



ISSN 2564-7377 (Online)



GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Giresun University Institute of Natural Sciences

The Black Sea Journal of Sciences

KARADENİZ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ
KARADENİZ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Cilt 14 Sayı 3

2024

Volume 14 Issue 3



K F B D

<http://www.dergipark.org.tr/kfbd>

**Giresun Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Giresun University
Institute of Natural Sciences**

**Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi
The Black Sea Journal of Sciences**

Cilt 14, Sayı 3, Eylül 2024
Volume 14, Issue 3, September 2024

ISSN: 2564-7377 (Online)

Dergi Hakkında

Giresun Üniversitesi tarafından yılda dört kez (15 Mart, 15 Haziran, 15 Eylül ve 15 Aralık) yayın yapan dergimiz 2020 yılından itibaren Tübitak - Ulakbim Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı (TR Dizin) Dergi Listesinde taranmaktadır. Yayın hayatına 2010 yılında başlamıştır. Fen, Mühendislik, ve Teknoloji alanlarından gelen eserleri kabul etmektedir. Dergimizde yayınlanmak üzere gönderilen makaleler editör, yayın kurulu ve hakemler (Hakemlerin isimleri yazarlara bildirilmez) tarafından değerlendirilir. Dergimiz, Türkçe veya İngilizce dilinde yazılmış orjinal araştırma makalesi kabul etmektedir. Dergimize gönderilen çalışmaların benzerlik oranı %25'i geçmemelidir. Dergimize gönderilen makaleler için değerlendirme ücreti ve başvuru ücreti alınmamaktadır. Dergimiz, 2017 yılından itibaren sadece elektronik olarak yayın hayatına devam etmektedir

About The Journal

The Black Sea Journal of Sciences is an international peer reviewed journal published four times a year and indexed by national and international databases. The Black Sea Journal of Sciences started its publication life in 2010. Our journal accepts works from science, engineering and technology. Articles submitted for publications in our journal are evaluated by the editor, editorial board and referees (Blind peer review). Our journal accepts original research articles written in Turkish or English. The similarity rate of the studies submitted to our journal should not exceed 25%. There are no evaluation fees or application fees for articles sent to our journal. Starting in 2017, The Black Sea Journal of Sciences will be published electronically only.

Sahibi / Owner

Prof. Dr. Yılmaz CAN

Giresun Üniversitesi Adına (Rektör)

Baş Editör / Editor in Chief

Prof. Dr. Bahadır KOZ
Giresun Üniversitesi (Enstitü Müdürü)

İstatistik Editörleri / Statistical Editors

Prof. Dr. Erol EĞRİOĞLU
Prof. Dr. Eren BAŞ

Editörler / Editors

Doç. Dr. Selin KALKAN
Giresun Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Zeliha KAYA
Giresun Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Kenan YANMAZ
Giresun Üniversitesi

Danışma Kurulu / Advisory Board

Prof. Dr. Alp Yalçın TEPE (Giresun Üniversitesi)
Prof. Dr. Birol ERTUĞRAL (Giresun Üniversitesi)
Prof. Dr. Birsen Şengül OKSAL (Giresun Üniversitesi)
Prof. Dr. Temel ÖZTÜRK (Giresun Üniversitesi)
Prof. Dr. Elif Neyran SOYLU (Giresun Üniversitesi)
Prof. Dr. Cengiz MUTLU (Giresun Üniversitesi)
Prof. Dr. Hakan BEKTAŞ (Giresun Üniversitesi)
Prof. Dr. Saim TOPÇU (Giresun Üniversitesi)
Prof. Dr. Hasan Hüseyin AKSU (Giresun Üniversitesi)
Prof. Dr. Hakan ADATEPE (Giresun Üniversitesi)
Prof. Dr. İmdat İŞCAN (Giresun Üniversitesi)
Prof. Dr. Mustafa Recep KAÇAL (Giresun Üniversitesi)
Doç. Dr. Murat YOLCU (Giresun Üniversitesi)
Doç. Dr. Şerif Ali DEĞİRMENÇAY (Giresun Üniversitesi)
Dr. Öğr. Üyesi Zuhul YOLCU (Giresun Üniversitesi)
Prof. Dr. Mustafa TÜRKMEN (Giresun Üniversitesi)
Prof. Dr. Baki HAZER (Bülent Ecevit Üniversitesi)
Prof. Dr. Telhat ÖZDOĞAN (Amasya Üniversitesi)
Prof. Dr. Hümeysra BATI (Ondokuzmayıs Üniversitesi)
Prof. Dr. Metin H. ACAR (İstanbul Teknik Üniversitesi)
Prof. Dr. Zeki AYTAÇ (Gazi Üniversitesi)
Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ (Karadeniz Teknik Üniversitesi)
Prof. Dr. Yusuf AYVAZ (Yıldız Teknik Üniversitesi)
Prof. Dr. Dursun SARAYDIN (Cumhuriyet Üniversitesi)
Prof. Dr. Emin KASAP (Ondokuz Mayıs Üniversitesi)
Prof. Dr. Okan Zafer YEŞİLEL (Eskişehir Osmangazi Üniversitesi)
Prof. Dr. Mithat KAYA (Marmara Üniversitesi)
Prof. Dr. Mustafa KURT (Ahi Evran Üniversitesi)
Prof. Dr. Nazmi POLAT (Ondokuz Mayıs Üniversitesi)
Prof. Dr. Nezihe ÇALIŞKAN (Gazi Üniversitesi)
Prof. Dr. Veysel Turan YILMAZ (Uludağ Üniversitesi)
Prof. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ (Karadeniz Teknik Üniversitesi)

Editör Kurulu / Editorial Board

Prof. Dr. Bahadır KOZ (Giresun Üniversitesi)
Prof. Dr. Temel ÖZTÜRK (Giresun Üniversitesi)
Prof. Dr. Seydahmet ÇAY (Giresun Üniversitesi)
Prof. Dr. Ersin TEMEL (Giresun Üniversitesi)
Prof. Dr. Mehmet Soner ENGİN (Giresun Üniversitesi)
Prof. Dr. Onur Özdal MENGE (Giresun Üniversitesi)
Doç. Dr. Fulya AYDIN TEMEL (Giresun Üniversitesi)
Doç. Dr. Selin KALKAN (Giresun Üniversitesi)
Doç. Dr. Volkan BAŞER (Giresun Üniversitesi)
Doç. Dr. Murat GÜL (Giresun Üniversitesi)
Doç. Dr. Erdiç ŞAHİN (Giresun Üniversitesi)
Doç. Dr. Tayfun ARSLAN (Giresun Üniversitesi)
Doç. Dr. Eren KÖMÜRLÜ (Giresun Üniversitesi)
Doç. Dr. Serdal KAYA (Necmettin Erbakan Üniversitesi)
Doç. Dr. Selen AYAS (Karadeniz Teknik Üniversitesi)
Dr. Öğr. Üyesi Kenan YANMAZ (Giresun Üniversitesi)
Dr. Öğr. Üyesi Serdar SOYLU (Giresun Üniversitesi)
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇELİK (Giresun Üniversitesi)
Dr. Öğr. Üyesi Selçuk ATASOY (Giresun Üniversitesi)
Dr. Öğr. Üyesi Zeliha ÇOLAK TOKA (Giresun Üniversitesi)
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KILINÇ (Giresun Üniversitesi)
Dr. Öğr. Üyesi Süleyman KÖSE (Karadeniz Teknik Üniversitesi)

Mizanpaj Editörleri / Manuscript Editors

Doç. Dr. Arzu AYDIN UNCUMUSAOĞLU
Dr. Öğr. Üyesi Kenan YANMAZ

Yazı İşleri Müdürü / Editorial Manager

Dr. Öğr. Üyesi Kenan YANMAZ

Yazışma Adresi / Correspondence Address

Giresun Üniversitesi Fen Bilimlerle Enstitüsü
Güre Yerleşkesi 28200 / Giresun
Tel: 0 (454) 310 10 87
E-mail: kfbd@giresun.edu.tr
Web: <https://dergipark.org.tr/pub/kfbd>

Grafik-Tasarım / Graphic-Design

Dr. Öğr. Üyesi Erkan GÜLER

Redaksiyon / Redaction

Dr. Öğr. Üyesi Fikret USLUCAN

Dil Editörleri / Language Editors

Öğr. Gör. Öznur GÜLER
Öğr. Gör. Yasin BİÇER

Bu dergi, aşağıda listelenen veri tabanları tarafından taranmaktadır / This journal is indexed by the following abstracting and indexing databases.

Tr Dizin, BASE, idealonline, Google Scholar, Index Copernicus, InfoBase Index, ResearchBib, SIS (Scientific Indexing Services), Akademik Dizin, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Directory of Open Access Journals (DOAJ) .

İçindekiler/Contents

<u>Araştırma Makaleleri / Research Articles</u>	<u>Sayfa/Page</u>
In silico Investigation of the Interactions of Thymol and Carvacrol on the Spike Protein of Omicron Variant and MPro Enzyme of Coronavirus Füreyra Elif ÖZTÜRKKAN Giray Buğra AKBABA Pınar AKSU KILIÇLE	997-1005
Sarıcakaya İlçesinin Güneş ve Biyogaz Enerji Potansiyelinin Hesaplanması Harun KAYNARCA Özlem ONAY	1006-1028
Arpada Tuz Stresinin Hafifletilmesinde Mikorizanın Etkisi Çiğdem KÜÇÜK Hala AKSOY	1029-1040
Modeling the Change in Amino Acid and Peptide Contents during the Aging of Bottled-Fermented Sparkling Wines by Image Processing Methods Adnan BOZDOĞAN Ahmet CANBAŞ Selahaddin Batuhan AKBEN	1041-1065
Türkiye'nin Karadeniz Kıyılarında Ekonomik Öneme Sahip Bazı Balık Türleri için Balık Ağırlığı ile Ağır Metal Konsantrasyonları Arasındaki Korelasyonların Belirlenmesi Evrin Sibel ÖNEL Mustafa TÜRKMEN Erkan KALIPCI	1066-1080
Ab-initio Study of Structural, Spectroscopic and Electronic Properties of High Energy Explosive Molecules: DFT/TD-DFT Calculations Yavuz EKİNCİOĞLU Abdullah KEPCEOĞLU	1081-1095
BiLSTM Derin Öğrenme Yöntemi ile Uzun Metinlerden Yeni Özet Metinlerin Türetilmesi Onur ŞAHİN Rıdvan YAYLA	1096-1119
q-Çatısı Kullanılarak Reel Kuarterniyonlar ile Oluşturulan Kanal ve Tüp Yüzeylerinin Karakterizasyonları Serkan ÇELİK Hatice KUŞAK SAMANCI Hacı Bayram KARADAĞ	1120-1140
Termal Olarak Aktive Edilmiş Karbonat İçerikli Kil Tipi Bor Üretim Atığından Su Liçiyile Lityum Kazanımı Merve ALADAĞ Mehmet ERDEM	1141-1158
Rulman Titreşim Verilerinden Derin Öğrenme Tabanlı Arıza Tespiti Engin OĞUZAY Murat BALTA	1159-1175
Armox 500T Zırh Çeliği İçeren Hibrit Zırh Plakalarının 7.62 mm Tam Metal Kaplama Mermi Karşısındaki Balistik Davranışının Deneysel ve Sayısal Olarak Araştırılması Mehmet ÖZER Kaan FERİKEL İbrahim Kutay YILMAZÇOBAN Tayfur Kerem DEMİRCİOĞLU Fatih BALIKOĞLU Can ÇİVİ	1176-1191

In Vitro Antiproliferative, Antibacterial, and Anti-Angiogenic Studies of Triethanolamine-Based Salts	1192-1203
Hüseyin AKBAŞ Seçil ERDEN TAYHAN Sema BİLGİN	
A Comparison of Alternative GIS Data Model Methods for Landslide Susceptibility Mapping with XGBoost and SHAP	1204-1224
Şevket BEDİROĞLU	
Bağımsız Bileşen Analizi ve Makine Öğrenmesi Kullanılarak Omurilik Yaralanması Olan Kişilerden Alınan EEG Sinyallerinden El Hareketlerinin Sınıflandırılması	1225-1244
Ebru SAYILGAN	
Taşınmaz Satışlarında Noterlerin Yetkilendirilmesinin Tapu Sistemi Olası Etkilerinin Kadastro 2014 Vizyonu ile Araştırılması	1245-1274
Yakup Emre ÇORUHLU Alkan ALEMDAR Mehmet Özgür ÇELİK	
Gözenekliliğin Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kirişlerin Serbest Titreşimleri Üzerinde Etkisi	1275-1289
Muhittin TURAN Mahmut İter HACIOĞLU Erkan BALCI	
Turuncu Havuç (Daucus Carota L.) Karotenoidleri ile Zenginleştirilmiş Kefir Üretimi	1290-1300
Hüseyin Can AYÇİÇEK Zeynep Naz ESEN Serap BERKTAŞ Mustafa ÇAM	
Radyal Baz Fonksiyonu (RBF) kullanan Ağsız (Meshless) Çözüm Yöntemlerinde Şekil Parametresi ve Merkez Nokta Sayısının Çözüme Etkisi	1301-1321
Hüseyin YILDIZ Hasan Ömür ÖZER Birkan DURAK Erol UZAL	
MRI Verilerinde Tümör Tespiti için Transfer Tabanlı Derin Öğrenme Algoritması Karşılaştırması	1322-1339
Cem DEMİREL Emel SOYLU	
Türkiye'de Cinsiyete göre Obezite Öncesi Yüzdeleri Dağılımının Yapay Sinir Ağı ve Zaman Serileri ile Tahmini	1340-1359
Halil ÇOLAK Emre ÇOLAK	
Some New Bis-(1,2,4-Triazole) Compounds: Synthesis, Characterization and Urease Enzyme Inhibition	1360-1370
Nesrin ÜNAL KARAALİ Havva Nur CİHANGİR	
Kireç ve Sodyum Aljinat Biyopolimeri ile İyileştirilen Yüksek Plastisiteli Kil Zeminin Donma-Çözülme Özelliklerinin Araştırılması	1371-1383
Dilber TEBER Harun AKOĞUZ	
Yeşil Meyveli Soğuk İçeceklerin Probiyotik Bakteriler ile Fermantasyonu: Biyoaktif, Mikrobiyolojik ve Fizikokimyasal Özellikleri	1384-1400
Selin KALKAN Emine KIRKOÇOĞLU Zeliha KAYA Mustafa Remzi OTAĞ	

A Mathematical Review Study on Dynamical Models of Symmetrical Three-Phase Induction Machine in Various Reference Frames	1401-1430
Mehmet Ali USTA	
Chemical Profile and Antioxidant Activity of Giresun Quality Hazelnut Skin	1431-1443
Sibel KACMAZ Evren ALTIOK	
Ek Parametre İçermeyen Dönüşüm Tekniklerinin Karşılaştırılması ve İki Veri Seti Üzerinde Modellenmesi	1444-1455
Hasan Hüseyin GÜL	
Meta-Sezgisel Yöntemlere Dayalı Kör Kaynak Sinyal Ayırma	1456-1470
Eyüp GEDİKLİ Emin TUĞCU	
Alifatik Ester-Eter Yapılı Yeni Makromonomerlerin Sentezi ve “Dolaylı Aşılama” Stratejisinde Kullanımı	1471-1485
Efkan ÇATIKER Temel ÖZTÜRK	
Türkiye’nin Güneş Enerjisi Potansiyelinin PVSyst ile Analizi	1486-1502
Ömür AKYAZI Şeymanur BAŞLIK Kanan KHIDIRZADE Bora ÇAVDAR	
Farklı Tiplerde Optik Fiber Kullanan DWDM-PON Sistem Mimarisi Üzerindeki Birleşik FWM ve SRS Etkisinin Karşılaştırmalı Analizi	1503-1523
Sait Eser KARLIK	
Bazı Ticari Şalgam Sularının Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi	1524-1541
Bilal AĞIRMAN	
Peyniraltı Suyunun Kompostlaştırmada Karbon/Azot Oranına Etkisinin İncelenmesi	1542-1551
Cem ŞAHİN Nurdan Gamze TURAN	
Sürdürülebilir Kalkınma için Mevcut Hidrolik Altyapılardan Enerji Geri Kazanımına Genel Bir Bakış	1552-1570
Ümmükülsüm ÖZEL AKDEMİR Andaç AKDEMİR	
Investigation of Building Automation Systems in Terms of Lighting Efficiency	1571-1585
Fikret KAYA Onur AKAR Nazmi EKREN	
Zorlanmış Hava Soğutma Esaslı Lityum Bazlı Silindirik bir Batarya Hücresinin Isı Dağılım Performansının Nümerik İncelenmesi	1586-1603
Seyda ÖZBEKTAŞ Bilal SUNGUR Alırıza KALELİ	
Arazi ve Arsa Düzenlemesi Uygulamalarında Bedele Dönüştürme Miktarının Tespiti	1604-1622
Bayram UZUN Volkan YILDIRIM Fatih TERZİ Bura Adem ATASOY Semih UZUN	

Sıçanlarda Deneysel Kafa Travması Sonrası Kan Şekeri Değişikliklerinin İstatistiksel Analizi Mehmet MERAL	1623-1629
Application of Chaotic Maps to Economic Load Dispatch Problem Mehmet Safa AYDIN Ertuğrul ÇAM	1630-1639
Ekokardiyografi Görüntülerinde Aort Kapak Kalsifikasyon Segmentasyonu için Veri Artırma Yöntemlerinin İrdelenmesi Elif BAYKAL KABLAN	1640-1653
Kahverengi Kokarca [Halyomorpha halys Stal (Hemiptera: Pentatomidae)] Zararının Fındığın Fiziksel Özellikleri Üzerine Etkisi Emre KAN Mehmet AKGÜN Ali TURAN	1654-1664

***In silico* Investigation of the Interactions of Thymol and Carvacrol on the Spike Protein of Omicron Variant and MPro Enzyme of Coronavirus**

Füreyâ Elif ÖZTÜRKKAN^{1*}, Giray Buğra AKBABA², Pınar AKSU KILIÇLE³

Abstract

Many drug studies have been conducted against the coronavirus disease, which has affected the whole world since December 2019, and some studies have been carried out on natural treatment methods. Many ideas for curing coronavirus disease of *T. vulgaris* known as thyme plant have been presented, although there are gaps in the literature on the subject. In this work, the anti-severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 potential of the major compounds of the *T. vulgaris* plant's essential oil was investigated *in silico*. The major components of the *T. vulgaris* plant's essential oil are thymol and carvacrol. Using molecular docking experiments, we evaluated the effects of thymol and carvacrol in thyme essential oil on Omicron variant spike protein and main protease enzyme (Mpro) of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2. We also used online databases to investigate the adsorption, distribution, metabolism, absorption, and toxic (ADMET) aspects of these two compounds. It was determined that thymol and carvacrol have strong binding affinity to the spike protein of the Omicron variant and the main protease enzyme. The compounds interact with target proteins through electrostatic, hydrogen bonds, and hydrophobic interactions. More promising findings are obtained when the contacts of carvacrol with target proteins are assessed in terms of the structure-activity relationship.

Keywords: *T. vulgaris*, Thymol, Carvacrol, Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2, Molecular Docking, ADMET

Timol ve Karvakrolün Koronavirüsün Ana Proteaz Enzimi ve Omicron Varyantının Spike Proteini ve Üzerindeki Etkileşimlerinin *In Silico* Araştırılması

Öz

Aralık 2019'dan beri dünyayı etkisi almış olan koronavirüs hastalığına karşı birçok ilaç çalışması yapılmış ve doğal tedavi yöntemleri üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır. Kekik olarak bilinen *T. vulgaris*'in koronavirüs hastalığı tedavisi ile ilgili birçok öneride bulunulmuş ancak bu konu ile ilgili literatürde boşluklar bulunmaktadır. Bu çalışmada, *T. vulgaris*'in ana bileşenlerinin anti-şiddetli akut solunum sendromu koronavirüs 2 potansiyeli *in silico* olarak araştırılmıştır. Timol ve karvakrol, *T. vulgaris* bitkisinin uçucu yağının ana bileşenleridir. Kekik esansiyel yağının ana bileşenlerinin SARS CoV-2 ana proteaz ve Omicron varyantı Spike proteini üzerindeki etkilerini moleküler yerleştirme çalışmaları kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca bu iki bileşiğin adsorpsiyon, dağılım, metabolizma, absorpsiyon ve toksik (ADMET) özelliklerini çevrimiçi veritabanlarının yardımıyla incelenmiştir. Timol ve karvakrol, şiddetli akut solunum sendromu koronavirüs 2'nin Omicron varyantının spike proteinine, ana proteaz enzimine kıyasla güçlü bir bağlanma afinitesine sahiptir. Bileşikler, hedef proteinler ile elektrostatik, hidrojen bağı ve hidrofobik etkileşimlerle bağlanmaktadır. Karvakrol bileşiğinin hedef proteinlerle olan etkileşimleri yapı-aktivite ilişkisi açısından değerlendirildiğinde daha umut verici bulgular göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *T. vulgaris*, Timol, Karvakrol, Şiddetli akut solunum sendromu koronavirüs 2, Moleküler Docking, ADMET

¹Kafkas University, Department of Chemical Engineering, Kars, Türkiye, fozturkkan36@gmail.com

²Kafkas University, Department of Bioengineering, Kars, Türkiye, gbugraakbaba@hotmail.com

³Kafkas University, Department of Biology, Kars, Türkiye, pinar-aksu@hotmail.com

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Introduction

The coronavirus disease has still caused many life-threatening pandemics worldwide. Numerous research have found that coronavirus variations are to blame for the disease's increasing infectiousness, effectiveness, and severity. Several investigations have found that changes in severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 variants improve the potential of the Spike Receptor Binding Domain to bind to the angiotensin-converting enzyme 2 receptor. The need for treatment of this illness is obvious given its impact on mankind. The main protease enzyme (Mpro) is required for viral translation, transcription, and replication activities. Drug therapy, which is a typical issue with many viral infections, is nevertheless appropriate for this illness. As a result, in coronavirus research, it is critical to understand the interactions of therapeutic candidate compounds with the severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 MPro enzyme and spike protein (Cheke 2020; Singh and Florez 2020; Daoud et al. 2021; Jain et al. 2021; Parmar et al. 2022).

For the treatment of numerous disorders, using plant essential oils and medication containing natural herbs are both effective alternatives (Alp, M and Alp, A.S 2019). Many aromatic plant species in the Lamiaceae family are used by people for this purpose and are known as thyme. However, species that have components similar to thymol and carvacrol in their essential oils are regarded as thyme. This plant is used to treat asthma, as well as other inflammatory and infectious diseases. Thyme essential oil is known to have antibacterial, antifungal, antiviral, and antioxidant properties (Ipek et al. 2005; Amirghofran et al. 2012; Hadidi). The anti-severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 abilities of some components of this biologically active plant have been investigated *in silico* with some studies and many promising results have been obtained (Sampangi-Ramaiah et al. 2020; Hadidi). It has previously been demonstrated that *Thymus vulgaris* EO (TEO) is effective against a variety of RNA viruses, including CoVs (Catella et al. 2021). Thyme has been shown by Sardari and his associates to have a beneficial impact on the recovery process from corona illness (Sardari et al. 2021). In this study, we examined the interactions of thymol and carvacrol, the major components of *T. vulgaris*, with the SARS-CoV-2 MPro enzyme and the spike protein of its final variant, Omicron, to contribute to the drug studies of coronavirus disease. Using internet databases, we looked into their toxicological and pharmacokinetic characteristics.

2. Materials and Methods

The structures of thymol and carvacrol are given in Figure 1.

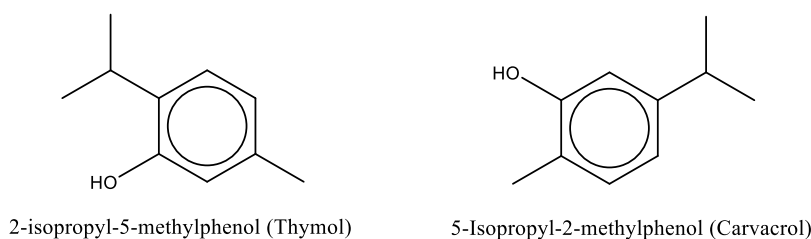


Figure 1. Structures of thymol and carvacrol.

2.1. Molecular Docking

The binding scores between the compounds and the MPro enzyme (PDB Code: 7BV2) (Fakhar et al. 2021) and the spike protein of the severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (PDB Code: 7T9J) (Bank) were calculated using the Autodock Vina (Trott and Olson 2009, p. vina) program. PDB extension files of the proteins were downloaded from the RCSB Protein Data Bank. (<https://www.rcsb.org>). The structures of thymol and carvacrol were given in Figure 1. The proteins, which will be modelled, were first optimized with the help of BIOVA Discovery Studio Visualizer 2021 (BIOVA Software) software. With the AutoDockTools 1.5.7 software (Trott and Olson 2009), the active regions of proteins have interacted with thymol and carvacrol, and ligand-protein interactions were visualized.

2.2. Drug Likeness and Toxicity Studies

Early identification of the pharmacokinetic and toxicokinetic characteristics of drug candidate compounds reduces the need for additional testing, improves success rates, and saves time and money. The absorption, distribution, metabolism, excretion, and toxicity (ADMET) features describe a drug's properties. ADMET properties of carvacrol and thymol were computed by SwissADME (Daina et al. 2017) and ProTox-II (Banerjee et al. 2018).

3. Findings and Discussion

3.1. Molecular Docking

The binding energy value between thymol and carvacrol and the MPro enzyme was determined as -4.9 kcal/mol. Thymol interacts with MPro enzyme via π -alkyl interactions with methionine165 (Figure 2). Carvacrol binds the active region of the MPro enzyme via the carbon-hydrogen bond with glutamine189, alkyl interactions with methionine165, and π -alkyl interactions with methionine165

and histidine41 (Figure 3). Although the binding energy is the same, considering the interaction types, it is thought that carvacrol interacts more strongly with the active region of the MPro enzyme.

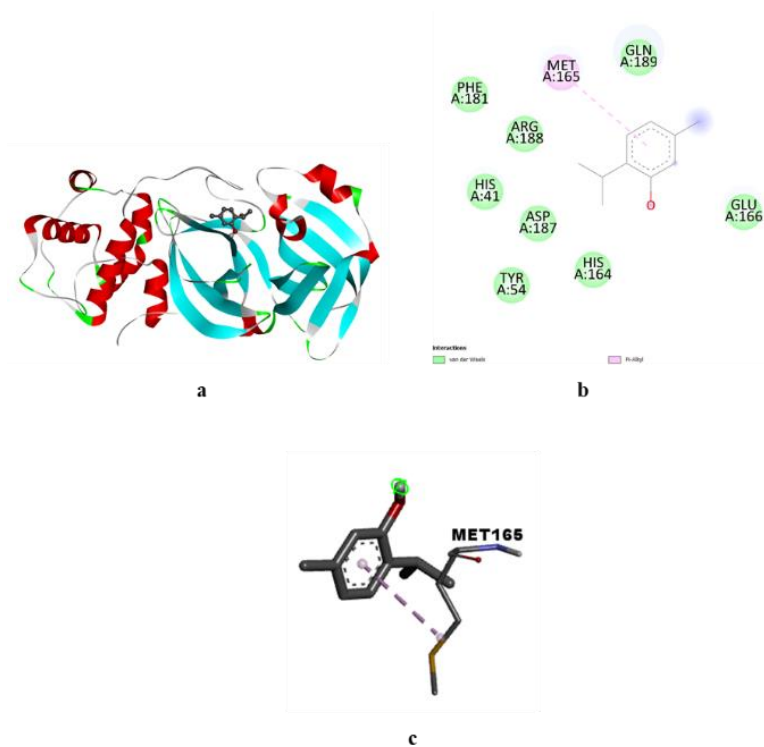


Figure 2. The Molecular docking results of thymol on the MPro enzyme (a), 2D interactions of thymol with the active region of the MPro enzyme (b), and ligand interactions between thymol and the active region of the MPro enzyme (c).

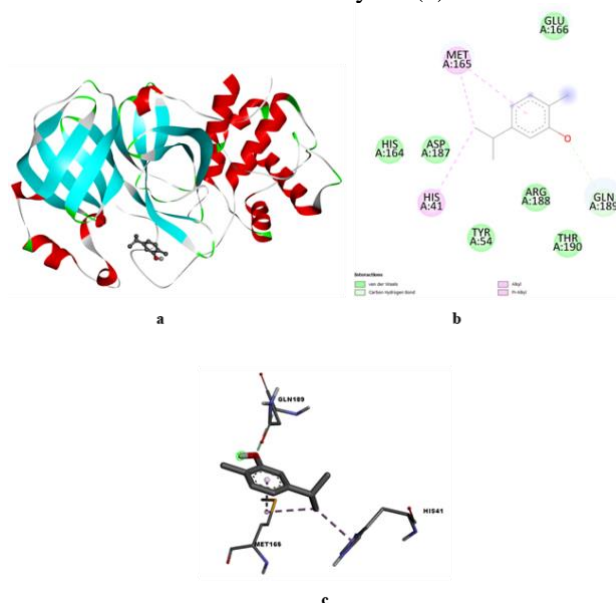


Figure 3. The Molecular docking results of carvacrol on the MPro enzyme (a), 2D interactions of carvacrol with the active region of the MPro enzyme (b), and ligand interactions between carvacrol and the active region of the MPro enzyme (c).

The binding energy values between thymol and carvacrol and the spike protein Omicron variant were found as -4.4 kcal/mol and -4.9 kcal/mol, respectively. Thymol interacts active region of the spike protein of Omicron variant by the conventional hydrogen bond with serine730, and

histidine1058, π -donor hydrogen bond with histidine1058, π -sigma interactions with histidine1058, π -alkyl interactions with phenylalanine872, isoleucine870 and alkyl interactions with isoleucine870 (Figure 4). The hydrogen bond distances of thymol and serine730 and histidine1058 amino acid residues were determined as 2.47 Å, and 2.44 Å, respectively. Carvacrol binds the active region of the spike protein of Omicron variant of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 by the conventional hydrogen bond with histidine1058 (2.76), alkyl interactions with proline863, π -alkyl interactions with histidine1058, isoleucine870 (Figure 5). The hydrogen bond distance of carvacrol and histidine1058 amino acid residue was found 2.76 Å. When the binding energy and interaction types were evaluated, it was determined that carvacrol interacted more strongly with spike protein. This indicates that the anti-severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 potential of carvacrol is stronger when compared to the data obtained for thymol.

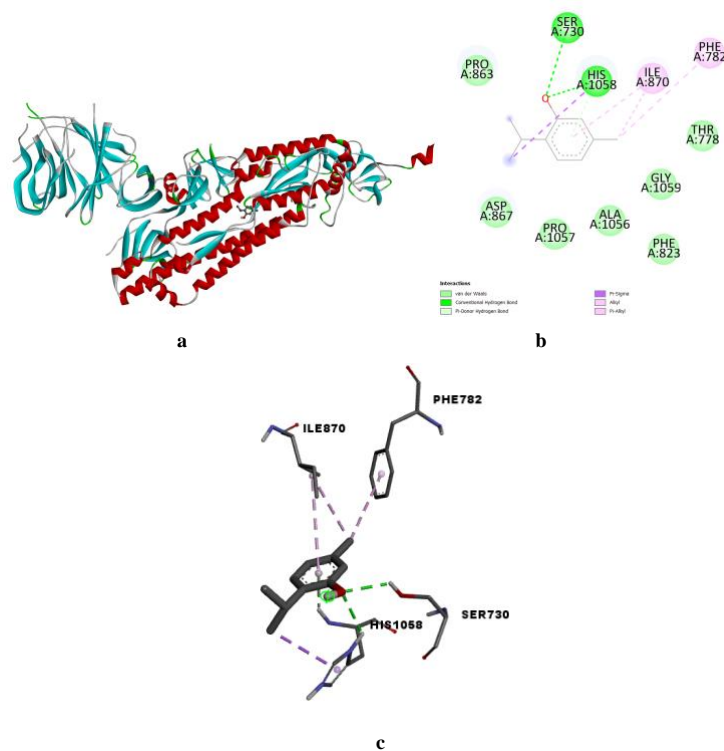


Figure 4. The Molecular docking results of thymol on the active region of the Omicron spike protein (a), 2D interactions of thymol with the active region of Omicron variant spike protein (b), and ligand interactions between thymol and the active region of active region of the Omicron spike protein (c).

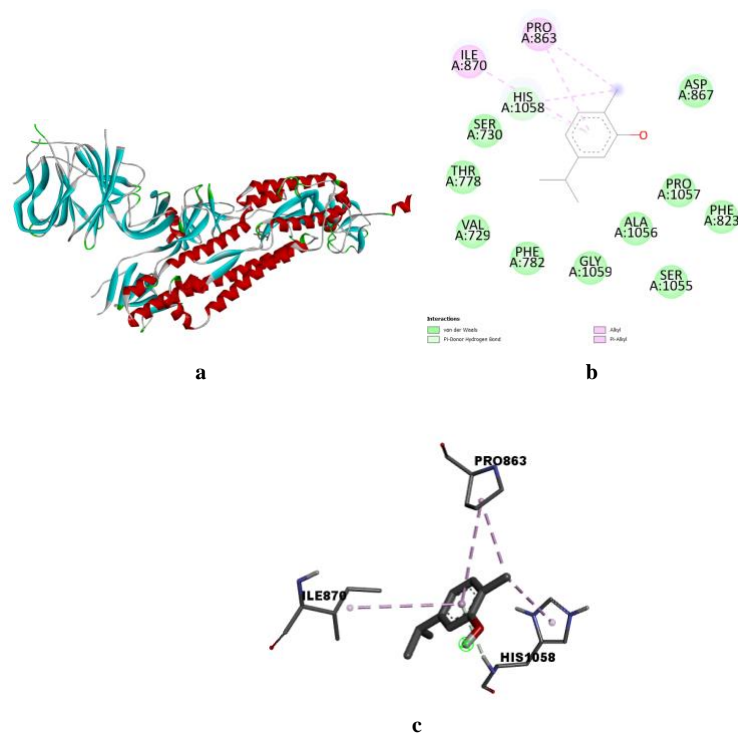


Figure 5. The Molecular docking results of carvacrol on the active region of the Omicron spike protein (a), 2D interactions of carvacrol with the active region of the Omicron variant spike protein (b), and ligand interactions between carvacrol and the active region of active region of the Omicron spike protein (c).

3.2. Prediction of Drug Likeness and Toxicity

Drug development is more likely to be effective if the pharmaco- and toxicokinetic characteristics of therapeutic candidate compounds can be predicted. Five rules of Lipinski were published by Lipinski and colleagues to determine if a chemical is an ideal pharmaceutical candidate (Lipinski et al. 1997). When the data were evaluated, thymol and carvacrol were determined to conform with Lipinski's five rules (Table 1). BOILED-Egg Models of thymol and carvacrol indicated their high gastrointestinal absorption, ability to cross the blood-brain barrier (BBB), and inability to function as P-glycoprotein substrates (Figure 6). The compounds were predicted to act as inhibitors of Cytochrome P450 enzyme 1A2, while not acting as inhibitors for Cytochrome P450 enzyme 2C19, Cytochrome P450 enzyme 2C9, Cytochrome P450 enzyme 2D6, Cytochrome P450 enzyme 3A4 with cytochrome P450 enzymes (CYPs). The compounds' hepatotoxicity, carcinogenicity, immunotoxicity, mutagenicity, and cytotoxicity are all inactive, yet they have an active mitochondrial membrane potential. When all of these data are considered, thymol and carvacrol are believed to be candidate pharmaceuticals and compounds that can be employed in drug formulation research.

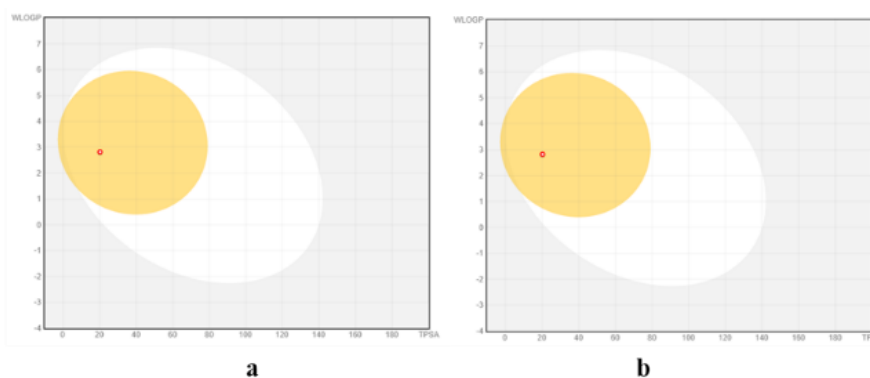


Figure 6. Boiled-Egg models of the thymol (a) and carvacrol (b).

Table 1. The pharmacokinetic properties of the thymol and carvacrol.

Properties	Predicted Result	
	Thymol	Carvacrol
Molecular weight	150.22 g/mol	150.22 g/mol
Heavy atoms' number	11	11
Aromatic heavy atoms' number	6	6
Rotatable bonds' number	1	1
Hydrogen bond acceptors' number	1	1
Hydrogen bond donors' number	1	1
Molar Refractivity	48.01	48.01
TPSA (\AA^2)	20.23	20.23
Log $P_{o/w}$	2.80	2.82
Gastrointestinal absorption	High	High
The blood-brain barrier (BBB)	Yes	Yes
<i>P</i> -glycoprotein substrate	No	No
Cytochrome P450 enzyme 1A2 inhibitor	Yes	Yes
Cytochrome P450 enzyme 2C19 inhibitor	No	No
Cytochrome P450 enzyme 2C9 inhibitor	No	No
Cytochrome P450 enzyme 2D6 inhibitor	No	No
Cytochrome P450 enzyme 3A4 inhibitor	No	No
Log K_p (skin permeation)	-4.87 cm/s	-4.74 cm/s
Lipinski	Yes; 0 violation	Yes; 0 violation
Toxicity Class*	4	4
Predicted LD ₅₀	640 mg/kg	810 mg/kg
Hepatotoxic	No	No
Carcinogenic	No	No
Immunotoxic	No	No
Mutagenic	No	No
Cytotoxic	No	No
Mitochondrial membrane potential	Yes	Yes

*Toxicity Class: 1-toxic; 6-non-toxic

4. Conclusions and Recommendations

The studies show that thymol and carvacrol have a strong affinity for the spike protein of Omicron variant of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 as well as the MPro enzyme of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2. The MPro enzyme of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 and the spike protein of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 Omicron variant have the best binding energy values for carvacrol. Carvacrol shows more promising findings when the interactions of the thymol and carvacrol with the proteins are assessed in terms of the structure-activity relationship. The thymol and carvacrol interact in electrostatic, hydrogen bonding, and hydrophobic interactions with the spike protein of the Omicron variant of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2. Because it can exert an antagonistic impact by interacting with the amino acid residues in the active site of the spike protein of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2. More research is needed to establish the effectiveness of thymol, carvacrol, and even *T. vulgaris* itself against severe acute respiratory syndrome coronavirus 2.

Authors' Contributions

The study's authors all contributed equally.

Statement of Conflicts of Interest

The authors do not have any conflicts of interest.

Statement of Research and Publication Ethics

The author declares that this study complies with Research and Publication Ethics.

References

- Alp, M & Alp, A.S. (2019). *Medisinal Kimyaya Kısa Bir Giriş* (1st ed.). Akademisyen Kitabevi.
- Amirghofran, Z., Ahmadi, H., Karimi, M. H. (2012). Immunomodulatory Activity of the Water Extract of *Thymus vulgaris*, *Thymus daenensis*, and *Zataria multiflora* on Dendritic Cells and T Cells Responses. *Journal of Immunoassay and Immunochemistry*, 33(4), 388–402. <https://doi.org/10.1080/15321819.2012.655822>.
- Banerjee, P., Eckert, A. O., Schrey, A. K., Preissner, R. (2018). ProTox-II: A webserver for the prediction of toxicity of chemicals. *Nucleic Acids Research*, 46, W257–W263. <https://doi.org/10.1093/nar/gky318>.
- Bank, R. P. D. RCSB PDB - 7T9J: Cryo-EM structure of the SARS-CoV-2 Omicron spike protein. Retrieved July 25, 2022, from <https://www.rcsb.org/structure/7T9J>.

- BIOVIA, Dassault Systèmes, (2021). BIOVA Discovery Studio Visualizer 2021, v21.1.0.20298, San Diego: Dassault Systèmes,
- Catella, C., Camero, M., Lucente, M.S., Fracchiolla, G., Sblano, S., Tempesta, M., Martella, V., Buonavoglia, C., Lanave, G. (2021). Virucidal and antiviral effects of *Thymus vulgaris* essential oil on feline coronavirus, *Research in Veterinary Science*, 137, 44-47. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2021.04.024>.
- Narkhede R. R., Cheke R. S., Ambhore J. P., Shinde S. D., (2020). The Molecular Docking Study of Potential Drug Candidates Showing Anti-COVID-19 Activity by Exploring of Therapeutic Targets of SARS-CoV-2. *Eurasian Journal of Medicine and Oncology*. 4(3), 185-195. | DOI: 10.14744/ejmo.2020.31503.
- Daina, A., Michielin, O., Zoete, V. (2017). SwissADME: A free web tool to evaluate pharmacokinetics, drug-likeness and medicinal chemistry friendliness of small molecules. *Scientific Reports*, 7(1), 42717. <https://doi.org/10.1038/srep42717>.
- Daoud, S., Alabed, S. J., Dahabiyeh, L. A. (2021). Identification of potential COVID-19 main protease inhibitors using structure-based pharmacophore approach, molecular docking and repurposing studies. *Acta Pharmaceutica*, 71(2), 163–174. <https://doi.org/10.2478/acph-2021-0016>.
- Fakhar, Z., Khan, S., AlOmar, S. Y., Alkhuriji, A., Ahmad, A. (2021). ABBV-744 as a potential inhibitor of SARS-CoV-2 main protease enzyme against COVID-19. *Scientific Reports*, 11(1), 234. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79918-3>.
- Hadidi, S. (n.d.). Evaluation of the inhibitory activities of thyme compounds against corona- virus disease-19 (COVID-19) by molecular docking and molecular dynamic simulation. *Trends in Pharmaceutical Sciences*, 8(2), 95-106.
- Ipek, E., Zeytinoglu, H., Okay, S., Tuylu, B. A., Kurkcuoglu, M., Baser, K. H. C. (2005). Genotoxicity and antigenotoxicity of *Origanum* oil and carvacrol evaluated by Ames Salmonella/microsomal test. *Food Chemistry*, 93(3), 551–556. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.12.034>
- Jain, S., Potschka, H., Chandra, P. P., Tripathi, M., Vohora, D. (2021). Management of COVID-19 in patients with seizures: Mechanisms of action of potential COVID-19 drug treatments and consideration for potential drug-drug interactions with anti-seizure medications. *Epilepsy Research*, 174, 106675. <https://doi.org/10.1016/j.eplepsyres.2021.106675>.
- Lipinski, C. A., Lombardo, F., Dominy, B. W., Feeney, P. J. (1997). Experimental and computational approaches to estimate solubility and permeability in drug discovery and development settings. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 23(1), 3–25. [https://doi.org/10.1016/S0169-409X\(96\)00423-1](https://doi.org/10.1016/S0169-409X(96)00423-1)
- Parmar, G., Shah, A., Shah, S., Seth, A. K. (2022). Identification of bioactive phytoconstituents from the plant *euphorbia hirta* as potential inhibitor of sars-cov-2: An in-silico approach. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 12(2), 1385–1396.
- Sampangi-Ramaiah, M. H., Vishwakarma, R., Shaanker, R. U. (2020). Molecular docking analysis of selected natural products from plants for inhibition of SARS-CoV-2 main protease. *Current Science*, 118(7), 1087-1092.
- Sardari, S., Mobaiend, A., Ghassemifard, L., Kamali, K., Khavasi, N. (2021). Therapeutic Effect of Thyme (*Thymus Vulgaris*) Essential Oil on Patients with COVID19: A Randomized Clinical Trial. *Journal of Advances in Medical and Biomedical Research*, 29(133), 83-91.
- Singh, S., Florez, H. (2020). Coronavirus disease 2019 drug discovery through molecular docking. *F1000Research*, 9, 502. <https://doi.org/10.12688/f1000research.24218.1>
- Trott, O., Olson, A. J. (2010). AutoDock Vina: Improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization, and multithreading. *Journal of Computational Chemistry*, 31(2), 455–461. <https://doi.org/10.1002/jcc.21334>

Sarıcakaya İlçesinin Güneş ve Biyogaz Enerji Potansiyelinin Hesaplanması

Harun KAYNARCA¹, Özlem ONAY^{2*}

Öz

Güneş enerjisi ve biyogaz enerjisinin kullanılması çevre sorunlarını azaltmak, enerji ekonomisine, enerji arz güvenliğine katkı sağlaması ve istihdamın artmasına olanak sağlaması bakımından oldukça önemli kaynaklardır. Eskişehir'in Sarıcakaya ilçesinin güneş enerjisi ve biyogaz enerji potansiyeli incelenmiştir. Sarıcakaya'nın en az güneşlenme süresinde günlük enerji ihtiyacını 28.200 adet 385 Wp gücündeki paneller ile karşılayabileceği ve yıllık ortalama güneşlenme saati ile yıllık enerji ihtiyacının 2 katından fazlasını karşılayabileceği hesaplanmıştır. 2021 yılı hayvan varlığı referans alındığında, elde edilebilecek toplanabilir faydalı gübre miktarı 34.711 ton/yıl'dır. Elde edilen gübre ile üretilen metan (CH₄) cinsinden biyogaz miktarı 1.109.951 m³ CH₄/yıl olarak hesaplanmıştır. Biyogazın elektrik enerjisine çevrilmesiyle ilçenin yıllık elektrik ihtiyacının %45'inden fazlası karşılanabilecektir. Güneş enerjisi ve biyogaz ile üretilen elektrik enerjisinin toplam karbondioksit (CO₂) salınımının 530 ton-CO₂/GWh olacağı ve diğer enerji kaynaklarına göre 326 ton-CO₂/GWh ile 23.222 ton-CO₂/GWh salınımını önenebileceği hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonuçları, Sarıcakaya ilçesinin güneş enerjisi ve biyogaz enerjisinin değerlendirilmesi enerji ekonomisine ve CO₂ salınımının önlenmesine ciddi katkı sağlayacağını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Sarıcakaya, Güneş enerjisi, Biyogaz, CO₂ salınımı.

Calculation of Solar and Biogas Energy Potential of Sarıcakaya

Abstract

The use of solar energy and biogas energy are very important resources in terms of reducing environmental problems, contributing to the energy economy, energy supply security and increasing employment. The solar energy and biogas energy potential of Sarıcakaya district of Eskişehir was examined. It has been calculated that Sarıcakaya can meet its daily energy needs with 28,200 panels of 385 Wp power during minimum sunshine hours, and can meet more than 2 fold its annual energy needs with its annual average sunshine hours. Taking the animal existence of 2021 as a reference, the amount of collectible useful fertilizer that can be obtained was 34,711 tons/year. The amount of biogas in terms of methane (CH₄) to be produced with the resulting fertilizer was calculated as 1,109,951 m³ CH₄/year. By converting biogas into electrical energy, more than 45% of the district's annual electricity needs can be met. It was calculated that the total CO₂ emission of the electrical energy to be produced with solar energy and biogas will be 530 tons-CO₂/GWh and that 326 tons-CO₂/GWh and 23,222 tons-CO₂/GWh emissions can be prevented compared to other energy sources. These calculation results show that the utilization of solar energy and biogas energy of Sarıcakaya district will make a serious contribution to the energy economy and the prevention of carbon dioxide emissions.

Keywords: Sarıcakaya, Solar energy, Biogas, CO₂ emission.

¹Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye, harunkaynarca@yahoo.com

²Anadolu Üniversitesi, Porsuk Meslek Yüksekokulu, Eskişehir, Türkiye, oonay@eskisehir.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 10.08.2023

Kabul/Accepted: 30.06.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Giriş

Günümüzde teknolojik gelişim, insanlığın yaşam konforunu ileri seviyelere getirmiş ve bundan dolayı da yaşamın her alanında enerji ihtiyacı zorunlu hale gelmiştir. İhtiyaç duyulan enerjinin karşılanması için en iyi yöntemlerin kullanılması ülke yönetimlerinin öncelikli ödevleri arasında yer almaktadır (Yılmaz, 2012).

Dünyada ihtiyaç duyulan enerji çeşitli kaynak ve teknolojiler kullanılarak üretilmektedir. Günümüzde en çok yararlanılan enerji kaynağı olan fosil yakıtlardır. Ancak fosil yakıtların önemli dezavantajları vardır. Bunların en önemlisi, fosil yakıtların oluşumu milyonlarca yıl sürdüğü için yenilenemeyen ve araştırma kaynaklarına göre 150 yıl içerisinde tükenecek olmalarıdır (Yılmaz ve ark., 2018). Fosil yakıtlar dünyanın her bölgesinde bulunamadığı için tüm ülkelerin kolaylıkla elde edebileceği bir enerji kaynağı değildir. Özellikle petrolün belli başlı ülkelerden temin edilmesi stratejik olarak diğer ülkeleri zor duruma düşürmektedir. Bu durum 1973 yılındaki petrol krizinde enerjide dışa bağımlı ülkeler tarafından yaşanarak tecrübe edilmiş ve enerjide dışa bağımlılığı azaltacak alternatif enerji kaynaklarını geliştirme çalışmalarına başlamışlardır (Karagöl, 2017). Günümüzde Rusya ve Ukrayna savaşı nedeniyle özellikle Avrupa ülkelerinde daha çok yaşanan enerji krizi, enerji tedarikinde milliliğin ve çeşitliliğin ne kadar önemli olduğunu bir kez daha ortaya koymuştur. Fosil yakıtların bir diğer önemli dezavantajı da hava ve çevre kirliliğinin ana nedenlerinden biri olmasıdır. Fosil yakıt kullanımı atmosfer sera gazı dengesini bozmasıyla iklim değişikliğine ve zararlı gaz, partikül salınımı ile de başta insan sağlığı olmak üzere tüm canlılara zarar vermektedir.

Ülkeler, enerji arz güvenliklerini sağlamak ve çevre kirliliğini azami ölçüde azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanma imkanlarını geliştirmeye başlamışlardır. Özellikle fosil kaynak rezervleri bulunmayan gelişmiş ülkeler, yenilenebilir enerji teknolojilerini geliştirmede dünyaya liderlik ve rehberlik etmektedirler.

Yenilenebilir enerji kaynakları başlıca güneş, rüzgâr, su, biokütle, hidrojen ve jeotermal enerjiden oluşan ve kendi kendilerini yenileyebildikleri için sürekli ve tekrar tekrar kullanılabilen tükenmeyen enerji kaynaklarıdır. Her ülkenin kendi jeolojik ve coğrafi yapısına bağlı olarak yenilenebilir enerji potansiyeli mevcuttur. Yenilenebilir enerji, ülkelerin enerji arzına olan faydasının yanında çevre kirliliğinin azaltılmasında da büyük katkı sağlayan etkidir.

Dünyada en yaygın kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisi, hidrojenin füzyon yoluyla helyuma dönüşmesidir. Bu dönüşümden oluşan ışımlar dünyaya ulaşarak insanlığın kullanımı için muazzam bir enerji kaynağı sağlamaktadır. Güneş tükenmeyen bir enerji kaynağıdır. Güneş enerjisi temiz, ucuz, bozulmayan ve taşıma zahmeti olmayan yerli bir enerji kaynağıdır (Yılmaz,2012).

Güneş enerjisinden elektrik üretmek için fotovoltaik sistemler daha çok uygun arazilere, çatılara, bina cephelerine, örtülü tarım alanlarına, agrivoltaik olarak adlandırılan sistem ile tarım alanlarına, su kanallarının üzerine, açık denizlere ve su kaynaklarının üzerine yüzer şekilde kurularak enerji üretimini sağlamaktadır.

Tarım üretimini engellemek için tarım alanlarına kurulmayan güneş panelleri günümüzde tarım üretimi ile birlikte enerjinin de üretilebileceği uygulamalar geliştirilmiştir. Seralar genellikle açık alanlara kurulduğu için sera çatıları her zaman yeterli güneş ışınlarına maruz kalırlar. Bundan dolayı elektrik üretimi için uygun alanlardır. Dayanıklı malzemeden imal edilmiş sera yapılarının güçlü çatılarına fotovoltaik paneller kurulduğu gibi daha basit imal edilen plastik örtülü seralarda güneş ışınlarının düştüğü tarafa direkler üzerine kurulan fotovoltaik panel uygulamaları da yapılabilmektedir.

Agrioltaik olarak adlandırılan uygulamada birkaç metre yükseklikteki platformların üzerine kurulan güneş panellerinin altında tarım ürünleri yetiştirilmekte, hayvancılık yapılabilmekte ve hatta yağmur sularının toplanması bile sağlanmaktadır. Agrioltaik uygulamalarının, enerji üretiminin yanında tarım ve hayvancılığa oldukça faydası olduğu bilinmektedir. Panellerin gölgeleme sağlaması, topraktan daha az suyun buharlaşarak toprağın nemli kalmasına katkı sağladığı gibi çiftçilerin, hayvanların ve tarım ürünlerinin ihtiyaç duyduğu mikro klima etkisini sağlamaktadır (Rosch, 2023).

Bir diğer önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biride biokütle enerjisidir. Biokütle kaynaklarının yakılarak enerji elde edilmesi, eskiden beri uygulanan klasik bir yöntemdir. Günümüzde teknoloji ve teknik imkanları kullanarak, biyokütle kaynaklarını havasız çürütme, hidroliz, esterleşme reaksiyonu ve mayalanma gibi reaksiyonlara uğratarak yüksek kaliteli biyoyakıtlar elde edilebilmektedir (Torunoğlu Gedik, 2015). Önemli bir biyoyakıt olan biyogaz, hayvansal, bitkisel, organik içerikli şehir ve endüstriyel atıkların havasız bir ortamda çeşitli bakteri grupları tarafından parçalanarak ortaya çıkartılan havadan hafif, renksiz, kokusuz büyük miktarda metan (CH₄) ve karbondioksit (CO₂) ihtiva eden yanıcı bir gazdır (Gülşen ve ark., 2019; Yenilmez, 2015; Çanka Kılıç, 2011).

Bu çalışmada; Eskişehir iline bağlı Sarıcakaya ilçesinin güneş ve biyogaz enerji potansiyeli hesaplanmıştır. Bu yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilecek elektrik enerjisinin ilçe elektrik tüketimine olan katkısı ve bu katkı ile birlikte diğer enerji kaynaklarına göre CO₂ salınım miktarı incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Güneş Enerjisi Potansiyelinin Hesaplanması

Birçok elektrikli cihazın kullanıldığı tesis, konut ve yaşam alanı gibi yapıların elektrik kullanım miktarları farklıdır. Bu nedenle elektrik ihtiyacının güneş enerjisi ile karşılanması için aylık ya da haftalık enerji kullanımları belirlenerek ortalama günlük elektrik ihtiyaçları hesaplanır. Günlük ortalama elektrik enerjisi ihtiyacına göre de güneş enerji sistem kapasitesi belirlenir (Alkan ve ark., 2014).

Güneş enerji sistemlerinde üretilen enerjinin tamamı maalesef sistemde kullanılamaz. Bunun sebebi ise güneş enerji sistemlerindeki fotovoltaik panellerin toz, gölge, kar gibi etkenlere maruz kalması, invertör, akü gibi cihazların çalışma verimleri bağlı olarak enerji kayıplarına uğramasıdır. İhtiyaç duyulan elektrik enerjisinin üretilmesi için bu kayıplar dikkate alınmalıdır. Her cihazın kendine öz verimliliği olmakla birlikte Fotovoltaik pillerin verimliliği (η_{pv}) %80, akü verimliliği ($\eta_{akü}$) %80 ve invertör verimliliği (η_{inv}) %90 civarındadır. Bu oranlar dikkate alınarak sistem verimliliği (η_{sis}) denklem (1) ile hesaplanır (Alkan ve ark., 2014).

$$\eta_{sis} = \eta_{pv} * \eta_{akü} * \eta_{inv} = 0,80 * 0,80 * 0,90 = 0,58 \quad (1)$$

Sistem verimliliği dikkate alınarak üretilmesi gereken elektrik enerjisi denklem (2) ile hesaplanır. Denklemde ÜGE üretilmesi gereken enerji, YE yükün enerjisini ifade etmektedir.

$$\dot{U}_{GE} = YE / \eta_{sis} \quad (2)$$

Panel sayısı, üretilmesi gereken enerji miktarı ve güneşlenme süresine göre denklem (3) ile hesaplanır. Denklemde PS panel sayını ifade etmektedir.

$$PS = \frac{\dot{U}_{GE}}{\text{Bir Güneş Panelinin Gücü} * \text{Güneşlenme Süresi}} \quad (3)$$

Elektrik enerjisinin üretilmediği kapalı günlerde ise enerji ihtiyacı aküler ile karşılanabilir. Akü kapasitesini belirlemek için kapalı geçen gün sayısı ve bu günlerde ihtiyaç duyulacak enerji miktarı bilinmelidir. Bununla birlikte kullanılacak akülerin deşarj faktörü de bilinmelidir. Akü kapasitesi hesabı denklem (4) ile hesaplanır. Denklemde KGGS kapalı gün sayısını ifade etmektedir (Alkan ve ark., 2014).

$$Akü Kapasitesi = \frac{\text{ÜGE}}{\text{Deşarj Olma aktörü}} \times KGGS \quad (4)$$

Kurulacak panellerin ihtiyaç duyduğu alanı hesaplamak için denklem (5)'ten faydalanılır. Denklemden A ihtiyaç duyulan alanı, P_{en} panelin enini, P_{boy} ise panelin boyunu ifade etmektedir (Gürgen, 2016).

$$A = PS * P_{en} * P_{boy} \quad (5)$$

Güneş enerji sistemi için ihtiyaç duyulan arazi miktarını hesaplarken hesaplanan panel alan hesabına istinaden sistemin konum, eğim, gölgelenme alanı, kablolama, diğer sistem elemanları ve çalışma alanlarını da hesaplamak gerekir.

Günümüzde gelişen fotovoltaik piller 675 Wp değerine kadar ulaşmış olup ortalama yüzey alanları 2,1 m²'dir. Kullanılan fotovoltaik teknolojilerine ve kurulum şekillerine bağlı olarak 1 MWe elektrik enerjisi üretebilmek için 13 – 25 dönüm araziye ihtiyaç duyulmaktadır (ETKB, 2022).

2.2. Biyogaz Potansiyelinin Hesaplanması

Hayvansal atıklardan elde edilebilecek biyogaz miktarı hesaplanırken hayvansal atık türlerinin yanında toplanabilirlik oranları da dikkate alınmalıdır. Her tür ve cins hayvanın günlük gübre miktarı farklı olmakla birlikte gübre toplanabilme imkanları farklıdır. Büyük çiftliklerde hayvanlar besihanelerden çıkarılmadan yetiştirilmektedir. Bundan dolayı gübrelerin tümü elde edilebilir. Daha çok kırsal kesimlerde az sayıdaki büyük baş hayvana sahip ve küçük baş yetiştiricileri yılın uygun mevsimlerinde hayvanlarını meralarda otlatırlar. Merada otlatılan hayvanların gübreleri meralarda kalır. Dolayısıyla gübreler kapalı alanlarda toplanabildiği için yetiştirilen hayvanların kapalı alanlarda ne kadar süre ile beslendikleri önemli bir faktördür. Bundan dolayı hayvansal atıktan elde edilecek biyogaz hesabında gübrelerin sadece toplanabilme oranı dikkate alınır (Kaynarca ve ark., 2021).

Biyogaz miktarı; yaş gübre üretim miktarı, toplanabilir gübre oranı, gübredeki katı madde oranı, katı madde miktarı içerisindeki uçucu katı madde oranı ve uçucu katı madde içerisindeki gaz üretim miktarı verileri kullanılarak hesaplanır.

Tablo 1'de hayvan türlerine göre elde edilebilecek gübre atıklarından, potansiyel biyogaz miktarının hesaplanmasında kabul edilen değerler gösterilmektedir.

Tablo 1. Biyogaz Miktarının Hesaplanabilmesinde Kabul Edilen Değerler (Kaynarca ve ark., 2021 doi:10.26650/jgeog2021-881905).

Hayvan Türü	Hayvan Başına Ortalama Günlük Gübre Üretimi (MYG)	Toplanabilir Faydalı Gübre Oranı (T)	Yaş Gübredeki Katı Madde Oranı (KM)	Katı Maddede İçerisindeki Uçucu Katı Madde Oranı (UKM)	Metan Üretimi (MO)
	kg/gün-hayvan	%	%	%	m ³ CH ₄ /kg-UKM
Kültür ve Melez Süt Sığırtı (Yetişkin)	43,00	100	17,27	83,36	0,18
Kültür ve Melez Et Sığırtı (Yetişkin)	29,00	100	12,41	84,65	0,33
Yerli Sığırtı	29,00	50	17,27	83,36	0,33
Buzağı (Genç yavru)	2,48	100	3,71	44,23	0,33
Koyun	2,40	13	23,00	83,63	0,30
Keçi	2,05	13	23,17	73,06	0,30
At, Katır, Eşek	20,40	29	19,61	66,67	0,30
Et Tavuğu	0,19	66	20,00	77,278	0,35
Yumurta Tavuğu	0,13	99	18,75	75,00	0,35
Hindi	0,38	68	19,36	75,83	0,35
Ördek ve Kaz	0,33	68	17,27	61,28	0,35

Potansiyel yaş gübre toplamını denklem (6) ile hesaplanır.

$$M_{YYM} = M_{YG} * S * 365 \quad (6)$$

Denklemdede; M_{YYM} hayvanların yılda üretebileceği gübre miktarının toplamını (kg/yıl), M_{YG} bir hayvanın günde üretebileceği gübre miktarı (kg/gün) ve S hayvan sayısını ifade etmektedir (Kaynarca ve ark., 2021).

Yılda toplanabilir faydalı yaş gübre toplamını denklem (7) ile hesaplanır.

$$M_{YFYG} = M_{YYM} * T \quad (7)$$

M_{YFYG} yıllık toplanabilir faydalı yaş gübre toplam miktarını (kg/yıl), T ise toplanabilir faydalı gübre miktar oranını (%) ifade etmektedir ve tablo 1'den ilgili türe karşılık gelen değerdir (Kaynarca ve ark., 2021 doi:10.26650/jgeog2021-881905).

Toplanabilir faydalı yaş gübre miktarındaki katı madde miktarını denklem (8) ile hesaplanır.

$$M_{KM} = M_{YFYG} * KM \quad (8)$$

M_{KM} hayvanlardan elde edilen toplam faydalı yaş gübre miktarı içerisindeki katı madde miktar toplamını (kg/yıl), KM ise yaş gübre içerisindeki katı madde miktar oranını (%) ifade eder (Kaynarca ve ark., 2021).

Katı madde miktarındaki uçucu katı madde miktarı denklem (9) ile hesaplanır.

$$M_{UKM} = M_{KM} * UKM \quad (9)$$

M_{UKM} hayvanlardan elde edilen faydalı gübre miktarı içerisindeki toplam uçucu katı madde miktarını (kg/yıl), UKM ise gübredeki katı madde içerisindeki uçucu katı madde miktar oranını (%) ifade etmektedir (Kaynarca ve ark., 2021).

Toplanabilir faydalı gübreden elde edilebilecek yıllık CH_4 miktarı denklem (10) ile hesaplanır.

$$M_{METAN} = M_{UKM} * MO \quad (10)$$

M_{METAN} toplanabilir faydalı gübreden elde edilebilecek yıllık toplam CH_4 miktarını ($m^3 CH_4/yıl$), MO ise 1 kg uçucu katı maddeden elde edilebilecek CH_4 miktarını ifade etmektedir. Burada uçucu katı madde miktarının tamamının CH_4 gazına dönüştüğü varsayılmıştır (Kaynarca ve ark., 2021).

Üretilen biyogaz miktarının %60 içeriği CH_4 olması durumunda enerji değeri $22,7 M/Nm^3$ 'tür. Saf CH_4 gazının enerji değeri ise $36 M/Nm^3$ 'tür. Bu değerler ile birlikte elde edilen biyogaz miktarının enerji miktar karşılığı hesaplanabilir (Kaynarca ve ark., 2021).

Üretilen CH_4 gazının enerji miktarı denklem (11) ile hesaplanır.

$$Q = M_{METAN} * H_{METAN} \quad (11)$$

Q yılda eldede edilebilecek CH_4 gazının enerji karşılığını ($MJ/yıl$), H_{METAN} ise CH_4 ısıl değeridir ve $36 MJ/m^3$ olarak alınmıştır (Kaynarca ve ark., 2021).

Üretilen CH_4 gazının kojenerasyon sistemlerinde kullanılarak üretilen elektrik miktarı denklem (12) ile hesaplanır (Kaynarca ve ark., 2021).

$$E = M_{METAN} * \eta_e * W \quad (12)$$

Denklemdede; E kojenerasyon sisteminin ürettiği yıllık elektrik miktarını ($MWh_e/yıl$), η_e kojenerasyon sisteminin elektriksel verimini (%35 alınmıştır) göstermektedir. W ise CH_4 gazının kWh cinsinde enerji karşılığı olup $10 \text{ kWh}/m^3$ olarak alınmıştır (Kaynarca ve ark., 2021).

3. Bulgular ve Tartışma

Eskişehir ilinin kuzeyinde Sündiken Dağları ile Bolu Dağları arasında yer alan Sarıcakaya ilçesi yaklaşık 375 km^2 alanı ile Eskişehir'in 8. Büyük ilçesidir. Rakımı yer yer 50 metreye kadar düşen ilçede, Akdeniz ve Marmara iklim özelliklerinin karışımı görüldüğünden mikro klima iklim özelliğine sahiptir. Akdeniz kadar olmasa da yazları sıcak ve kurak diğer mevsimler ise ılık ve yağışlı hava görülmektedir. Kendine has bu iklim özelliği bitki örtüsü ve ürün çeşitliliğine de yansımıştır. Kar ve don olaylarının çok nadir yaşanmasından dolayı sebze ve meyve üretimi yaygın ve çeşitlidir. Seracılığın çok yaygın olmasıyla da sebze ve meyve üretimi İstanbul ve Ankara illerinin ihtiyacını büyük ölçüde karşılamaktadır (BEBKA, 2012). Şekil 1'de Sarıcakaya ilçesinde gösterildiği bir Eskişehir il haritası gösterilmiştir.



Şekil 1. Sarıcakaya İlçesinin Haritası

İlçenin hayvancılığı maalesef tarım kadar gelişmemiştir. Bunun sebebi ise mera ve çayırların azalması, yemlik bitkiler için toprak ayrılmamasıdır (BEBKA, 2012). Türkiye İstatistik Kurumunun 2021 yılı verilerine göre ilçe hayvan varlığı, büyük baş (buzağı dahil) 2.555, küçük baş 11.182 ve kanatlı hayvan sayısı 79.049'dur.

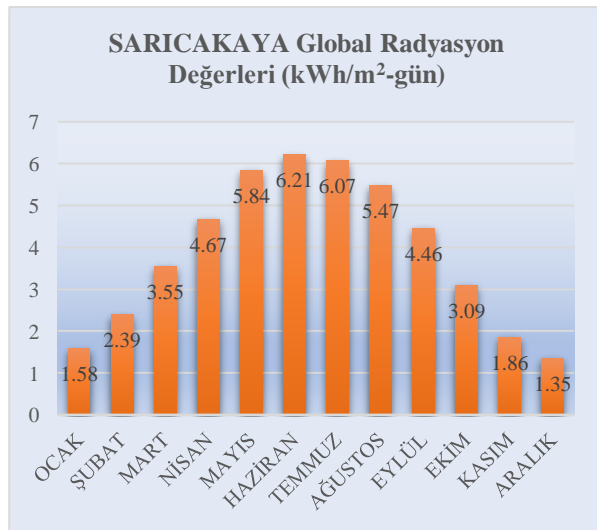
3.1. Sarıcakaya İlçesinin Güneş Enerji Potansiyeli

Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) verilerine göre Sarıcakaya'nın güneş radyasyon değeri yıllık yaklaşık 1420 kWh/m^2 'dir. Şekil 2'de Sarıcakaya'nın güneş enerjisi potansiyel haritası gösterilmektedir.



Şekil 2. Sarıcakaya Güneş Enerjisi Potansiyeli Haritası (GEPA, 2022)

Sarıcakaya'nın güneş radyasyon değerlerinin en yüksek olduğu aylar, Haziran ve Temmuz en düşük olduğu aylar ise Kasım, Aralık ve Ocak aylarıdır. Bununla birlikte en uzun güneşlenme süresi Temmuz ayında 10,5 saat iken en kısa güneşlenme süresi Ocak ayında yaklaşık 3 saattir. Yılda ortalama günlük güneşlenme süresi ise yaklaşık 6,5 saattir. Şekil 3 ve şekil 4'da Sarıcakaya'nın aylık radyasyon ve güneşlenme süreleri gösterilmiştir.



Şekil 3. Sarıcakaya Aylık Radyasyon Değerleri (GEPA, 2022)



Şekil 4. Sarıcakaya Aylık Güneşlenme Süreleri (GEPA, 2022)

Sarıcakaya'nın 2021 yılı elektrik tüketimi Osmangazi Elektrik Dağıtım A.Ş. verilerine göre yaklaşık 8.500.000 kWh/yıl'dır. Buna göre günlük elektrik ortalama tüketimi 23.288 kWh/gün olarak hesaplanır. Bu tüketim ihtiyacını karşılamak için fotovoltaik pil ve güneş enerjisi sistem hesabı bu değer referans alınarak yapılmıştır.

Güneş enerji sisteminde, fotovoltaik panel açısı, tozlanma, gölgelenme, sıcaklık gibi faktörlerden dolayı oluşan verim kaybı nedeniyle enerji üretim miktarında da kayıplar oluşmaktadır (Doğan, 2019).

Hesaplamalarda fotovoltaik pillerin, toz, gölgelenme ve sıcaklık gibi faktörlerden dolayı çalışma verimi %80, invertör cihazının çalışma verimi ise %90 olarak alınmıştır.

$$\eta_{\text{sis}} = \eta_{\text{pv}} * \eta_{\text{inv}} = 0,80 * 0,90 = 0,72 \text{ yani sistem verimini \%72 olarak buluruz.}$$

Güneş enerji sisteminin çalışma verimi %72 alındığında sistem kayıpları ve ihtiyaç duyulan günlük elektrik enerjisi ihtiyacını ki buna üretilmesi gereken enerji denilmekte;

$$\dot{U}_{GE} = YE / \eta_{\text{sis}} = 23.288 / 0,72 = 32.345 \text{ kWh olarak bulunur.}$$

Sistem kayıpları dikkate alındığında Sarıcakaya'nın günlük enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için günlük üretilmesi gereken elektrik enerji miktarı 32.345 kWh/gün kapasitede olmalıdır. Yılın en az güneşlenme süresinde üretilmesi gereken enerjiyi elde edecek fotovoltaik panel sayısının belirlenmesi için 385 Wp gücünde piyasada üretilen fotovoltaik panelini referans olarak alırsak denklem (3) ile;

$$PS = \frac{32.345 \text{ kWh/gün}}{385 \text{ Wp} * 2,98 \text{ saat}} = 28.199,65$$

Yılın en az güneşlenme süresinde 32.345 kWh/gün enerjiyi 385 Wp gücündeki fotovoltaik pil ile üretebilmek için 28.200 adet güneş paneline ihtiyaç vardır.

Piyasada imal edilen 385 Wp gücündeki fotovoltaik paneller ortalama 1000 mm * 2000 mm ölçülerinde üretilirler. İhtiyaç duyulan arazi hesabında ölçüler metre cinsinden alınır. Panel kurulumu için ihtiyaç duyulan arazi miktarı;

$$A = PS * P_{\text{en}} * P_{\text{boy}} = 28.200 * 1 * 2 = 56.400 \text{ m}^2$$

Yaklaşık olarak 57.000 m² veya 57 dönüm olarak hesaplanır.

Güneş enerjisi kurulacak arazide güneş panellerinin kaplayacağı alan ile birlikte arazinin konumu, eğimi, gölgeleme mesafesi, diğer ekipmanlar ve çalışma alanı içinde arazi ihtiyacı vardır. Panel teknolojisi ve kurulum tasarımına göre 1 MW enerji üretimi için 13 ile 25 dönüm araziye ihtiyaç duyulur. Sarıcakaya ilçesinin yılın en az güneşlenme süresinde günlük enerji ihtiyacını 24 MW olarak kabaca bir hesaplama en az 312 dönüm en fazla 600 dönüm ve ortalama olarak 456 dönüm araziye ihtiyaç duyduğunu hesaplarız.

Orta Sakarya vadisinde yer alan Sarıcakaya ilçesi mikro klima iklim özelliğinden dolayı örtü altı tarım olarak da adlandırılan seracılık yaygınlaşmış ve her geçen günde gelişmektedir. Seralar direk güneş ışınlarını alması ve gölgelenmenin az olması nedeniyle güneş enerji sistemleri için oldukça uygun alanlardır. TÜİK 2021 yılı verilerine göre örtülü tarım alanı 1912 da (dönüm)'dür. İlçenin sahip olduğu sera alanları ihtiyaç duyulan güneş enerji sistemi alanının en az 3 katına sahiptir. Eskişehir Tarım ve Orman Müdürlüğü 2021 yılı Faaliyet Raporunda toplam tarım alanının 39.480 da olduğu bildirilmektedir (TOB, 2021). Agrivoltaik (Tarım-Güneş Enerjisi) sistemlerinin uygulanabilirliği düşünüldüğünde ilçenin ihtiyaç duyduğu güneş enerjisi alanının en az 1.600 kattan fazla olduğu görülmektedir.

İlçede yılın en az güneşlenme süresine göre kurulacak güneş enerji sistemi güneşlenme süresi uzadıkça enerji üretme miktarı da artacaktır. Tablo 2'de en az güneşlenme süresi, en fazla güneşlenme süresi ve yıllık ortalama güneşlenme süresinde üretilebilecek enerji miktarı hesaplanarak gösterilmiştir.

Tablo 2. Kurulan fotovoltaik panel sisteminin yıllık en az, ortalama ve en fazla günlük enerji üretim değerleri

385 Wp gücünde 28.200 adet güneş paneli	Yılın en az güneşlenme süresi (2,98 saat)	Yıllık ortalama güneşlenme süresi (6,5 saat)	Yılın en fazla güneşlenme süresi (10,50 saat)
	MW/gün	MW/gün	MW/gün
Üretilen enerji	32,3	70,5	114
Kullanılabilir enerji (%72 verim ile)	23,3	50,1	82

Yılın en az güneşlenme süresine göre kurulan güneş enerji sistemi yılın güneşlenme süresinin uzamasıyla ihtiyaçtan fazla enerji üretecektir. Sarıcakaya'nın yıllık ortalama güneşlenme süresi 2.386 saattir. 28.200 adet 385 Wp gücündeki panellerin yıllık güneşlenme süresinde üretebileceği potansiyel elektrik enerjisi yaklaşık 25.905 MW/yıl olarak hesaplanır. Kurulan güneş enerjisi sisteminin çalışma verimliliği %72 olursa kullanılacak yıllık elektrik enerjisi üretimi 18.650 MW/yıl olarak hesaplanır. Sarıcakaya'nın 2021 yılındaki yaklaşık 8.500 MW/yıl elektrik tüketimi dikkate

alındığında kurulacak olan güneş enerjisi sistemi ile ihtiyacı olan enerjinin 2 katından fazlasını üretmiş olacaktır.

3.2. Sarıcakaya İlçesinin Biyogaz Potansiyeli

Sarıcakaya ilçesinin TÜİK verilerine göre 2021 yılı hayvan varlığı; saf kültür, kültür melezi süt sığır sayıları 1.444 baş, kültür melezi et sığır 625 baş, yerli sığır 19 baş, buzağı 467 baş, koyun 7.334 baş, keçi 3.848 baş, eşek 20 baş, et tavuğu 76.500 adet, yumurta tavuğu 1.743 adet, hindi 480 adet, ördek ve Beç tavuğu 145 adet ve kaz 181 adettir. Tablo 3'te hayvanlardan elde edilen toplanabilir faydalı gübre, gübre içerisindeki katı madde miktarı, hayvan türüne bağlı gübrenin katı madde oranı, katı madde içerisindeki uçucu katı madde miktarı ve hayvan türüne bağlı gübrenin uçucu katı madde oranı Tablo 1'deki değerler referans alınarak hesaplanmıştır.

Tablo 3. Sarıcakaya ilçesi 2021 yılı hayvan türüne göre toplanabilir gübre, KM miktarı ve UKM miktarı

Hayvan Türü	2021 Yılı Hayvan Sayısı	Toplanabilir Faydalı Gübre Miktarı	Katı Madde Miktarı (KM)	Gübre İçerisindeki KM Oranı	Uçucu Katı Madde Miktarı (UKM)	"Gübre İçerisindeki UKM Oranı"
	adet	ton/yıl	ton/yıl	%	ton/yıl	%
Kültür ve Melez Süt Sığır (Yetişkin)	1.444	22.664	3.914	66,1	3.263	67,5
Kültür ve Melez Et Sığır (Yetişkin)	625	6.616	821	13,9	695	14,4
Yerli Sığır	19	101	17	0,3	14	0,3
Buzağı (Genç yavru)	467	423	157	2,6	69	1,4
Koyun	7.334	835	192	3,2	161	3,3
Keçi	3.848	374	87	1,5	63	1,3
At, Katır, Eşek	20	43	8	0,1	6	0,1
Et Tavuğu	76.500	3.501	700	11,8	541	11,2
Yumurta Tavuğu	1.743	82	15	0,3	12	0,2
Hindi	480	45	9	0,1	7	0,1
Ördek ve Kaz	326	27	5	0,1	3	0,1
TOPLAM	92.806	34.711	5.926	100,0	4.833	100,0

Tablo 3'te, Sarıcakaya ilçesinin yıllık hayvanlardan elde edebileceği toplanabilir faydalı gübre miktarı 34.711 ton/yıl'dır. Kültür ve melez ırkı sığırların günlük ürettikleri ve toplanabilir gübre miktarları fazla olduğu için toplam gübre içerisindeki KM miktarına %80 ve UKM miktarına %81,9 katkı sağlamaktadırlar. Koyun ve keçi gübrelerinin ise fayda oranları %4,7 ile %4,6'dır ve toplamda

kanatlı hayvanların katkısı ise yaklaşık %12 oranındadır. Biyogaz üretiminde potansiyel fayda en çok sırası ile kanatlı, küçük baş ve büyük baş hayvan gübrelerinin olmasına rağmen tablo 3'te de görüldüğü gibi miktar olarak elde edilen büyük baş hayvan gübresi biyogaz üretiminin %80'inden fazlasını karşılamaktadır.

Tablo 4'te hayvansal atıklardan elde edilen CH₄ gazı miktarı Tablo 3'teki MO değeri referans alınarak hesaplanmış ve elde edilen CH₄'ün diğer enerji türlerine dönüşüm miktarları hesaplanmıştır.

Tablo 4. Sarıcakaya 2021 yılı hayvansal atık varlığı ile üretilebileceği metan miktarı ve diğer enerji türlerine dönüşüm miktarları

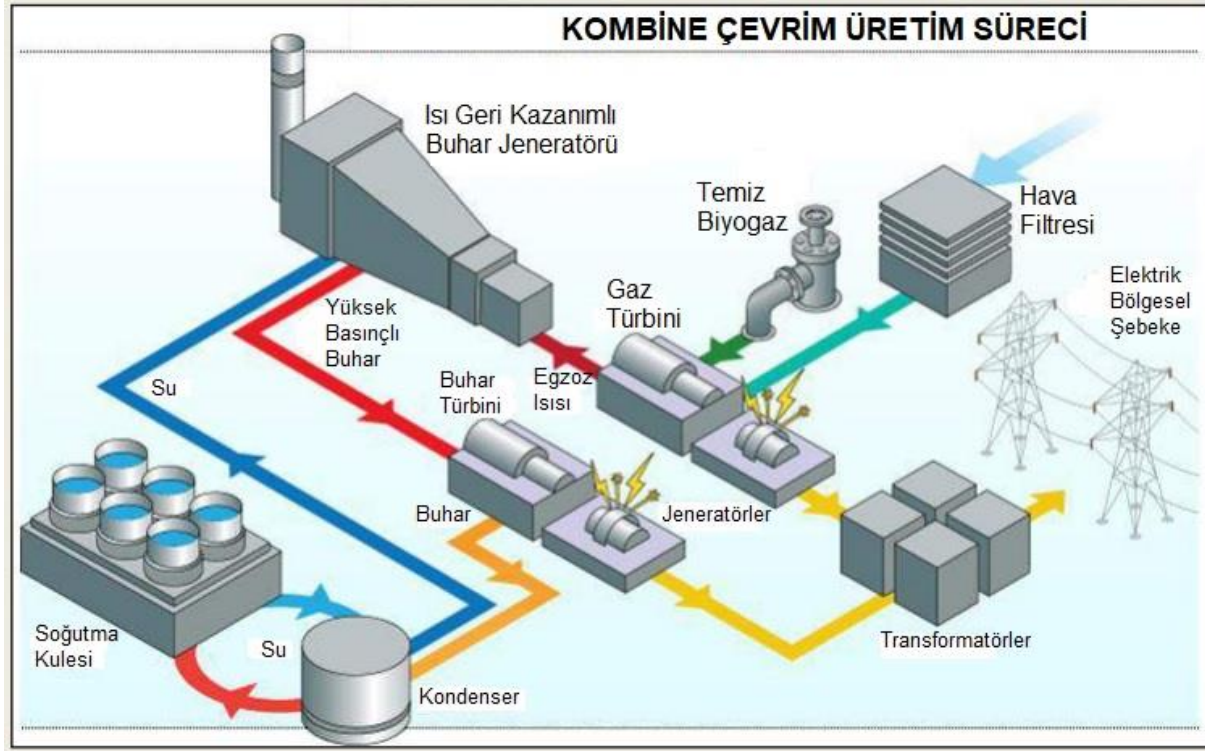
Hayvan Türü	2021 Yılı Hayvan Sayısı	Metan Üretimi	Enerji Değeri	TEP Enerji Karşılığı	Elektrik Enerjisi Karşılığı
	baş	M ³ -CH ₄ /yıl	GJ/yıl	TEP/yıl	MWhe/yıl
Kültür ve Melez Süt Sığırtı (Yetişkin)	1.444	587.287,91	21.142,36	504,98	2.055,51
Kültür ve Melez Et Sığırtı (Yetişkin)	625	229.341,98	8.256,31	197,20	802,70
Yerli Sığırtı	19	4.777,26	171,98	4,11	16,72
Buzağı (Genç yavru)	467	22.891,08	824,08	19,68	80,12
Koyun	7.334	48.194,73	1.735,01	41,44	168,68
Keçi	3.848	19.008,69	684,31	16,34	66,53
At, Kattır, Eşek	20	1.693,87	60,98	1,46	5,93
Et Tavuğu	76.500	189.411,24	6.818,80	162,86	662,94
Yumurta Tavuğu	1.743	4.029,95	145,08	3,47	14,10
Hindi	480	2.326,17	83,74	2,00	8,14
Ördek ve Kaz	326	989,04	35,61	0,85	3,46
Toplam	92.806	1.109.951,91	39.958,27	954,39	3.884,83

Tablo 4'te, üretilen biyogaz miktarı metot kısmındaki denklemler ile CH₄ cinsinden hesaplanmış ve hesaplanan CH₄ cinsinden biyogaz miktarı yine metot kısmındaki değerler referans alınarak diğer enerji türlerine dönüştürülmüştür.

Sarıcakaya ilçesinin 2021 yılı hayvansal atık varlığından elde edebileceği CH₄ cinsinden potansiyel biyogaz miktarı 1.109.951 m³ CH₄-yıl olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan CH₄ gazı, 39.958 GJ/yıl joule cinsinden enerjiye, 957 TEP/yıl eş değer petrole ve 3.884 MWhe/yıl elektrik enerjisine dönüştürülmüştür.

Biyogazdan geleneksel yöntemle veya kombine çevrim santralleri ile elektrik enerjisi üretilmektedir. Geleneksel yöntemle %35-40 verimle çalışan gaz türbinli jeneratör ile elektrik üretirken kojenerasyon ve trijenerasyon gibi kombine çevrim santrallerinde elektrik enerji ile birlikte buhar, sıcak su ve soğuk su elde edilebilmektedir. Böylelikle kullanılan biyogazın kullanım verimi %90'a kadar çıkabilmektedir. Geleneksel yöntem ve %35 verim ile üretilen 3.884 MWhe/yıl elektrik enerjisi Sarıcakaya ilçesinin 2021 yılındaki elektrik ihtiyacının %45,7'sini karşılayabilmektedir.

Anacak elde edilen biyogaz, kojenerasyon veya trijenerasyon gibi kombine çevrim santrallerinde gaz türbinli ve buhar türbinli jeneratörler birlikte kullanılarak daha fazla elektrik enerjisi üretilir. Böylelikle ilçe elektrik ihtiyacının %45,7'sinden daha fazlasını karşılanmış olur. Aynı zamanda CO₂ salınım miktarına daha fazla katkı sağlamış olur. Şekil 5'te tipik bir kombine çevrim santralının şekli gösterilmektedir.



Şekil 5. Kombine çevrim santralının tipik yerleşim şeması (TÜRKOTED, 2015)

Tüm bitkiler ve tarımsal atıklar biyogaz üretiminde yeteri kadar verimli değildir. Bu yüzden biyogaz tesisleri buğday, arpa, çavdar, yulaf, şeker pancarı, silaj mısırı gibi biyogaz üretiminde yüksek verim sağlayan bitkileri kullanmaktadır (STB, 2020). Örtü altı tarımın daha çok yapıldığı Sarıcakaya'da biyogaz üretimi için verimli olan bitkiler çok az yetiştirilmektedir. Yetiştirilen bu bitkilerin de biyogaz üretim miktarına katkısının çok az olacağından hesaplanmaya dahil edilmemiştir.

3.3. Sarıcakaya İlçesinde Üretilen Hibrit Enerjinin Elektrik Tüketimine Oranı

Sarıcakaya ilçesinin 2021 yılına ait elektrik tüketimi Zorlu Enerji Osmangazi Elektrik Dağıtım AŞ'den alınan bilgilere göre toplamda yaklaşık 8.500 MWh/yıl'dır. Tablo 5'te Sarıcakaya ilçesinin 2021 yılı abone gruplarına göre tüketim değerleri gösterilmiştir.

Tablo 5. Sarıcakaya 2021 yılı abone bazında elektrik tüketim miktarları

Abone Grupları	Sanayi	Ticarethane	Mesken	Tarımsal Sulama	Aydınlatma	Genel Toplam
Tüketim Miktarı (kWh/yıl)	595.545	2.173.469	3.040.933	1.961.015	728.711	8.499.672

Güneş enerji sistemi ile üretilebilecek elektrik enerjisinin ilçenin yıllık elektrik tüketimine oranı Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Güneş enerjisi ile üretilen elektrik enerjisinin tüketime katkısı

Abone Grupları	OEDAŞ Tüketim MWh/yıl	Güneş Paneli ile Üretilen MWh/yıl	Oran %
Sanayi	595,5		3131,8
Ticarethane	2.173,4		858,1
Mesken	3.041	18.650	613,2
Tarımsal Sulama	1.961		951
Aydınlatma	728,7		2559,3
TOPLAM	8.500	18.650	219,4

Tablo 6'daki değerler incelendiğinde güneş panelleri ile üretilebilecek elektrik enerjisi, ilçenin sanayi tüketiminin 31 katından fazlasını, ticarethane tüketiminin 8 katından fazlasını, mesken tüketiminin 6 katından fazlasını, tarımsal sulama tüketiminin 9 katından fazlasını ve aydınlatma tüketiminin 25 katından fazlasını karşılamaktadır. İlçenin toplam yıllık elektrik tüketiminin ise 2 katından fazlasını karşılamaktadır.

Biyogaz ile üretilebilecek elektrik enerjisinin ilçenin yıllık elektrik tüketimine oranı Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7. Biyogaz enerjisi ile üretilen elektrik enerjisinin tüketime katkısı

Abone Grupları	OEDAŞ Tüketim MWh/yıl	Biyogaz ile Üretilen MWh/yıl	Oran %
Sanayi	595,5		652,3
Ticarethane	2.173,4		178,7
Mesken	3.041	3.885	127,7
Tarımsal Sulama	1.961		198,1
Aydınlatma	728,7		533,1
TOPLAM	8.500	3.885	45,7

Tablo 7’deki değerler incelendiğinde biyogaz ile üretililecek elektrik enerjisi, ilçenin sanayi tüketiminin 6 katından fazlasını, ticarethane tüketiminin %178’ini, mesken tüketiminin %127’sini, tarımsal sulama tüketiminin yaklaşık 2 katını ve aydınlatma tüketiminin 5 katından fazlasını karşılamaktadır. İlçenin toplam yıllık elektrik tüketiminin ise yaklaşık %45’ini karşılamaktadır.

Biyogaz ve güneş paneli ile üretililecek elektrik enerjisinin ilçenin yıllık elektrik tüketimine oranı Tablo 8’de gösterilmiştir.

Tablo 8. Hibrit enerji ile üretililecek elektrik enerjisinin tüketime katkısı

Abone Grupları	OEDAŞ Tüketim MWh/yıl	Hibrit Enerji ile Üretilen MWh/yıl	Oran %
Sanayi	595,5		3784,2
Ticarethane	2.173,4		1036,8
Mesken	3.041	22.535	741
Tarımsal Sulama	1.961		1149,1
Aydınlatma	728,7		3092,4
TOPLAM	8.500	22.535	265,1

Tablo 8’deki değerler incelendiğinde hibrit enerji ile üretililecek elektrik enerjisi, ilçenin sanayi tüketiminin 37 katından fazlasını, ticarethane tüketiminin 10 katından fazlasını, mesken tüketiminin 7 katından fazlasını, tarımsal sulama tüketiminin 11 katından fazlasını ve aydınlatma tüketiminin 30 katından fazlasını karşılamaktadır. İlçenin toplam yıllık elektrik tüketiminin ise 2,5 katından fazlasını karşılamaktadır.

3.4. Sarıcakaya İlçesinde Üretilebilecek Hibrit Enerjinin Sera Gazı Salınımına Etkisi

Dünyada ihtiyaç duyulan elektrik enerji birçok kaynak kullanılarak üretilmektedir. Üretilen elektrik hangi kaynakla üretilirse üretilsin az ya da çok atmosferi kirletecek, sera gazı dengesini bozacak zararlı gazlar ve partiküller salınımına neden olmaktadır. Tablo 9’da elektrik üretimindeki kaynakların sera gazı salınım miktarları gösterilmiştir.

Tablo 9. Elektrik üretimin kaynaklarına göre sera gazı emisyon miktarları (Enerji Atlası, 2021)

Kaynak Türü	Min.-Max. Sera Gazı Emisyonu (ton-CO ₂ /GWh)	Ortalama Sera Gazı Emisyonu (ton-CO ₂ /GWh)
Linyit	790-1.372	1.054
İthal Kömür	756-1.310	888
Taş Kömür	756-1.310	888
Fuel-oil	547-935	733
Doğalgaz	362-981	499
Nükleer	2-130	66
Jeotermal	-	38
Biokütle	10-101	26
Hidroelektrik	2-237	26
Güneş	13-731	23
Rüzgâr	6-124	10

Tablo 9’deki değerlere göre elektrik enerjisi üretiminde sera gazı salınımının en az olduğu ikinci enerji kaynağı güneş enerjisi, üçüncü en az salım kaynağı ise hidroelektrik ve biyokütle enerji kaynaklarıdır.

Tablo 10. Üretilebilecek elektrik miktarının kaynaklara göre sera gazı emisyon miktarı

Kaynak Türü	Ortalama Sera Gazı Emisyonu (ton-CO ₂ /GWh)	Güneş Enerjisi ile Üretilen 18.650 MWh/yıl (ton-CO ₂ /GWh)	Biyogaz Enerjisi ile Üretilen 3.885 MWhe/yıl (ton-CO ₂ /GWh)	Hibrit Enerji ile Üretilen 22.535 MWh/yıl (ton-CO ₂ /GWh)
Linyit	1.054	19.657	4.095	23.752
İthal Kömür	888	16.561	3.450	20.011
Taş Kömür	888	16.561	3.450	20.011
Fuel-oil	733	13.670	2.848	16.518
Doğalgaz	499	9.306	1.939	11.245
Nükleer	66	1.231	256	1.487
Jeotermal	38	709	148	856
Biokütle	26	485	101	530
Hidroelektrik	26	485	101	586
Güneş	23	429	89	530
Rüzgâr	10	187	39	225

Tablo 10’da Sarıcakaya ilçesinde hibrit enerji ile üretilebilecek elektrik enerjisinin diğer kaynaklar ile üretilmesiyle oluşacak sera gazı salınımının ortalama değerleri hesaplanmıştır. Güneş panelleri ile üretilebilecek 18.650 MWh/yıl elektrik enerjisinin yıllık CO₂ salınımı 429 ton-

CO₂/GWh, biyogaz ile üretilebilecek 3.885 MWhe/yıl elektrik enerjisinin yıllık CO₂ salınımı 101 ton-CO₂/GWh ve her iki enerji kaynağı ile üretilebilecek toplam 22.535 MWh/yıl elektrik enerjisinin toplam ortalama CO₂ salınımı 530 ton-CO₂/GWh olacaktır. Buna göre linyit kaynağına göre 23.222 ton-CO₂/GWh, ithal ve taş kömürü kaynağına göre 19.481 ton-CO₂/GWh, fuel-oil kaynağına göre 15.988 ton-CO₂/GWh, doğalgaz kaynağına göre 10.715 ton-CO₂/GWh, nükleer kaynağına göre 957 ton-CO₂/GWh ve jeotermal kaynağına göre 326 ton-CO₂/GWh salınımı önlenmiş olacaktır.

4. Sonuç ve Öneriler

Ülkelerin enerji ihtiyacı gelişen teknoloji ve nüfustan dolayı her geçen gün daha da artmaktadır. Dünyada kullanılan enerjinin çok büyük bir kısmı fosil kaynaklı yakıtlardan karşılanmaktadır. Ancak fosil kaynaklı yakıtlar her bölge ve ülkede bulunan enerji kaynağı türü değildir. Bu durum da fosil kaynak rezervlerine sahip olan ülkelere avantaj sağlarken sahip olmayan ülkelere dezavantaj sağlamaktadır. Bunun yanında avantaj veya dezavantaj sağlasın esas problem yakın zamanda fosil yakıtların tükenmesi ve tükenirken de dünya atmosferine büyük zarar vermesidir. Ülkeler enerji tedariklerini çeşitlendirmek, enerji arz güvenliklerini güçlendirmek, milli ekonomilerine katkı sağlamak ve çevre kirliliğini önlemek için yenilenebilir enerji üretim imkanlarını arttırmaya çalışmaktadırlar.

Ülkemizin de jeopolitik yapısı kapsamında yenilenebilir enerji kaynağı potansiyeli mevcut olup her geçen gün bölgesel bazda enerji potansiyelleri hesaplanıp, projeler başlatılmakta ve uygulamalar devreye alınmaktadır.

Bir çalışmada Kahramanmaraş ilinin hayvansal atıklarından elde edilecek potansiyel biyogaz miktarı beş farklı model ile hesaplanmıştır. Elde edilebilecek biyogaz ile üretilecek elektrik enerjisinin Kahramanmaraş ilinin elektrik ihtiyacının karşılama oranları modellere göre %3,8 ile %10,6 arasında olduğu belirtilmiştir. Ayrıca dört kişilik aile dikkate alınarak 34.286 ile 95.769 adet konutun yıllık enerji ihtiyacının karşılanabileceği belirtilmiştir (Ay ve Kaya, 2020).

Başka bir çalışmada ise Ereğli ilçesinin hayvansal atık, bitkisel atık ve gıda atıklarından elde edilebilecek biyogaz potansiyeli hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamada Ereğli ilçesinin biyogaz potansiyelinin 177.921.276 m³ olduğu ve 4.270.110 GJ enerji elde edebileceği belirtilmiştir. Yapılan bu çalışmada biyogaz miktarı ve Giga Joule cinsinden ısı enerjisi karşılığı hesaplanmıştır. Elektrik enerjisi ile ilgili herhangi bir hesaplama ve karşılaştırma yapılmamıştır (Tunçez, 2018).

Bahse konu olan iki çalışmada da hayvansal atıklar Büyük baş, küçük baş ve kanatlı hayvanlar olarak genel anlamda sınıflandırılarak hesaplamalar yapılmıştır.

Bizim çalışmamızda, hayvansal atıklar her hayvan türüne göre ayrı ayrı hesaplanmıştır. İlçenin biyogaz üretiminde bitkisel atıklar hesap edilmemiştir. Yapılan hesaplamalarda elde edilebilecek

biyogaz miktarı CH_4 cinsinden hesaplanmıştır. Üretilebilecek biyogazın, joule, TEP ve elektrik enerjisi dönüşümleri hesaplanmıştır. Üretilebilecek elektrik enerjisinin ise ilçenin sanayi, ticarethane, mesken, tarımsal sulama ve aydınlatma tüketimlerini karşılama oranları hesaplanmıştır.

Eskişehir iline bağlı Sarıcakaya ilçesinin güneş enerjisi ve biyogaz enerji potansiyeli incelenmiş ve elde edilebilecek enerji miktarları ile CO_2 salınım miktarları hesaplanmıştır. Ancak yapılan hesaplamalar sadece teorik olarak potansiyel belirlemek için ve yapılabilecek teknik projelere tahmini olarak fikir sunmak için yapılmıştır.

Sarıcakaya ilçesi coğrafi konum olarak orta Sakarya vadisinde yer almaktadır. Mikroklima iklim özelliğinden dolayı örtü altı tarım yaygınlaşmıştır. 2021 yılında örtülü tarım alan miktarı 1912 dekadır. Gölgeleme oranları çok az, güneş ışınlarını yüksek oranda alan sera yapıları güneş enerjisi alanı olarak da değerlendirilebileceği gibi Agrivoltaik sistemler ile açık tarım arazileri de değerlendirilebilir.

Sarıcakaya'nın yıllık güneşlenme radyasyon değeri yaklaşık 1420 kWh/m^2 , en yüksek güneş radyasyon değerleri haziran, temmuz aylarında en az ise kasım, aralık ve ocak aylarında gerçekleşmektedir. En az güneşlenme süresi ocak ayında günlük ortalama yaklaşık 3 saattir. En fazla güneşlenme süresi ise temmuz ayında günlük ortalama 10,5 saattir. Yıllık ortalama güneşlenme süresi de günlük yaklaşık 6,5 saattir.

İlçenin 2021 yılı toplam elektrik tüketimi 8.500 MWh/yıl 'dır. Günlük ortalama tüketimi ise 23.288 kWh/gün 'dür.

Güneş enerjisi sistemi, Sarıcakaya ilçesinin yılın en az güneşlenme süresinde günlük enerji ihtiyacını karşılayabilecek şekilde hesaplanmıştır. Yılın en az güneşlenme süresine göre hesaplanan enerji sistemi mevsim değişimlerinde güneşlenme süreleri uzadıkça günlük ihtiyaçtan daha fazla enerji üretecektir. Yapılan hesaplamada 385 Wp gücünde monokristal bir fotovoltaik panel seçilmiş ve panel sayısı 28.200 adet olarak hesaplanmıştır. Bu panellerin kurulması için de ortalama 456 dönüm araziye ihtiyaç olduğu öngörülmüştür. Diğer ekipmanlar ile kurulacak güneş panelleri yıllık ortalama güneşlenme süresinde 25.905 MWh/yıl elektrik üreteceği ancak tüm sistemin %72 verimle üretim yapmasıyla şebekeye 18.650 MWh/yıl elektrik enerjisi verebileceği hesaplanmıştır. Şebekeye verilebilecek elektrik enerjisi ise ilçenin yıllık elektrik ihtiyacının iki katından fazlasını karşılayabilecektir.

Sarıcakaya ilçesinin 2021 yılında toplam 2.555 büyük baş hayvan, toplam 11.182 küçük baş hayvan toplam 79.049 adet kanatlı hayvan varlığına sahip olmuştur. Tüm hayvan varlığından elde ettiği toplanabilir faydalı gübre miktarı 34.711 ton/yıl olarak hesaplanmış ve elde edilen gübreden ise $1.109.952 \text{ m}^3\text{-CH}_4\text{/yıl}$ üretilbileceği hesaplanmıştır. Üretilebilecek CH_4 gazının joule cinsinden enerji karşılığı 39.958 GJ/yıl , eşdeğer petrol cinsinden ise 954 TEP olarak çevrilmiştir. Üretilebilecek CH_4 gazı %35 verimle çalışan jeneratörle yaklaşık 3.885 MWh/yıl elektrik enerjisi üretilbileceği

hesaplanmıştır. Üretilebilecek elektrik enerjisi ilçenin 2021 yılı elektrik tüketiminin %45,7'sini karşılayabilmektedir. Ancak üretilen biyogaz kombine çevrim santrallerinde kullanılmasıyla daha fazla enerji üretilbileceği öngörülmektedir.

Güneş enerji sistemi ve biyogaz ile üretilebilecek toplam 22.535 MWhe/yıl elektrik enerjisinin CO₂ salınımı toplamda 530 ton-CO₂/GWh olarak hesaplanmıştır. Aynı miktardaki elektrik enerjisinin diğer enerji kaynakları ile üretilmesi göre 326 ton-CO₂/GWh ile 23.222 ton-CO₂/GWh CO₂ salınımının önlenebileceği hesaplanmıştır.

Sarıcakaya ilçesinin güneş enerji potansiyeli ve hayvansal atıktan elde edilebilecek biyogaz enerji potansiyelini değerlendirdiğimizde ilçemizin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisinin 2,5 katından fazlasını karşılayacak potansiyelde olduğu görülmüştür. Üretilen enerjinin ilçe ekonomisi başta olmak üzere ülke enerji ekonomisine ciddi katkı sağlayacağı görülmüştür.

İlçe, güneş enerji santrali için ihtiyaç duyulan arazi miktarından çok daha fazlasına sahiptir. Sadece örtü altı tarım alanı ihtiyaç duyulanan arazinin 4 katından fazlasıdır. Bununla birlikte agrivoltaik sistem ile açık tarım arazilerinin kullanılmasıyla güneş enerji santrali için büyük bir arazi kullanım potansiyeline sahip olduğu dolayısıyla bu bölgede güneş enerjisinin sürdürülebilir olduğu görülmektedir.

İlçede hayvancılık çok gelişmemesine rağmen sahip olduğu hayvan varlığında elde edilecek atıklardan ilk etapta ilçe ihtiyacının neredeyse yarısı karşılanabilmektedir. Üretilen biyogazın kombine çevrim santrallerinde kullanılmasıyla çok daha fazlası karşılanabilecektir. Ayrıca geriye dönük TÜİK verileri incelendiğinde genel olarak hayvan sayıları her geçen yıl artış göstermektedir. Bu durumda hayvansal atık ile biyogaz üretiminin sürdürülebilir olduğunu göstermektedir.

Sarıcakaya'nın, güneş enerjisi potansiyeli ile ihtiyaç duyacağı elektrik enerjisinin ne kadarını karşılayabileceği öğrenilmek istenmiştir. Bunun için yılın en az güneşlenme zamanı referans alınmıştır. En az güneşlenme zamanı 3 saattir. Bu 3 saatte ihtiyaç duyulan enerji üretilerek şehir şebekesine verilecektir. İlçe ise ihtiyaç duyduğu enerjiyi 24 saat şebekeden çekecektir. Şehir şebekesine bağlı sistem olmasından dolayı herhangi bir depolama sistemine ihtiyaç duymayacaktır.

Üretilen biyogazın kombine çevrim santrallerinde değerlendirilmesiyle hesaplanan enerji miktarından çok daha fazlasını üretecektir. Kojenerasyon sisteminde elektrik ve ısı enerjisi sağlanırken trijenerasyon sisteminde ek olarak soğutma enerjisi de sağlayacaktır. Kullanım amacına göre özel olarak da kurulan kombine çevrim santralleri tesislerin ve işletmeler ihtiyaç duydukları enerjileri yerinde sağlayabilmektedir. Sarıcakaya'da daha çok seraların iklimlendirilmesi, üretilen sebze meyvelerin birkaç gün daha saklanabilmesi için soğuk hava depolarında ve tarım ürünleri işletme tesislerinde kullanılabilir.

Biyogaz tesislerinin tarım için bir diğer önemi ise üretim sonrası tesislerden kötü kokusu arınmış, yüksek kaliteli organik gübre olarak çıkmasıdır. Biyogaz tesislerinden çıkan yüksek kaliteli

gübrenin tarımsal üretimde kullanılması daha sağlıklı ve verimli ürün elde edilmesini sağlar. Ayrıca kimyasal gübre kullanımının azaltılmasını sağlayarak ekonomik giderlerin düşmesini de sağlar.

İlçede kurulmuş bir biyogaz tesisin diğer bir faydası çevre temizliğine ve sağlığına katkısının olmasıdır. İlçe genelinde işletmeler, tesisler ve yaşam merkezlerinde oluşabilecek özellikle hayvansal atıkların bertaraf edilebilmesine katkı sağlayacaktır. Bu atıkların miktar olarak biyogaz üretimi için değeri olmasa da çevre sağlığı ve kirliliğinin önlenmesindeki rolü ile sosyal sorumluluk yerine getirilmiş olur.

Güneş enerjisi ve biyogaz enerjisi ile üretilebilecek enerjinin diğer enerji kaynaklarına kıyasla daha düşük CO₂ salınımı olduğu hesaplanmıştır. Küresel ısınma ve iklim değişikliği ile ilgili mücadeleye büyük fayda sağlayacaktır.

Sarıcakaya ilçesinde sera yapılarına güneş panellerinin kurulması ilçe ve ülke elektrik ihtiyacının karşılanması yanında örtülü tarım alanlarının aynı zamanda enerji üretim alanları olarak kullanılmasına örnek olacaktır. İlçede tarım istihdamının yanında güneş enerjisi sektöründe de istihdamın oluşmasını, seralarda uygulanan güneş enerji panel teknolojisinin gelişmesini ve tecrübenin artmasını sağlayacaktır.

Örtü altı tarımı çiftçileri, tarım gelirinin yanında enerji geliri de elde edeceklerdir. Bununla birlikte iklimlendirmenin önemli olduğu seracılık sektöründe enerjiye ulaşma imkânı kolaylaştırarak seracılığın ihtiyaç duyacağı ısıtma ve soğutma enerjisini yerinde sağlanacaktır. Seracılıkta otomasyon sistemlerinin kurulmasına ve gelişmesine imkân sağlayacaktır. Çiftçinin çalışma ve ürün yetiştirme konforunu yükselterek ürün veriminin artmasına katkı sağlayacaktır.

Sarıcakaya'nın güneş enerji potansiyeli ve biyogaz enerji potansiyeli oldukça yüksektir. Ancak hesaplanan değerler sadece potansiyel belirlenmesi için yapılmıştır. Teknik araştırmanın veya fizibilite çalışmalarının yapılması için aşağı yukarı bir fikir verilmesi için yapılan çalışmadır. Bundan dolayı iyi bir teknik fizibilite çalışması yapılmalıdır. Güneş paneli uygulama modelleri sera yapılarına uygun olmalıdır. Birkaç dönüm sera alanlarına farklı modeller uygulanarak fayda maliyet ve uygulanabilirlik tecrübe edilmelidir. En verimli ve ekonomik olan modeller yaygınlaştırılmalıdır.

Sarıcakaya ilçesinde kurulacak biyogaz tesisinin kurulacağı bölge iyi araştırılmalı ve en iyi faydalanılacak bölge seçilmelidir. Biyogaz tesisinden sadece elektrik enerjisi değil aynı zamanda ısıtma ve soğutma enerjisi elde edilecektir. Bütün bu enerjilerin kullanılacağı bölge çok iyi seçilmelidir ki enerji iletimindeki kayıplar en az seviyede olmalıdır. En önemlisi biyogaz tesisinin girdisi olan hayvansal atıklarının gerçekte ne kadarının tesise getirilebileceği tesis kurulmadan araştırılmalıdır.

Söz konusu enerji yatırımlarının yapılması için devlet, ilgili tüm kurumları ile destek, teşvik ve danışmalık hizmeti vermelidir. Söz konusu enerji yatırımlarının getirisi çiftçilere en açık şekilde anlatılmalı ve yatırımlara iştirak ettirilmeleri sağlanmalıdır.

Yazarların Katısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Alkan, S., Öztürk, A., Zavrak, S., Tosun, S. ve Avcı, E. (2014). Bir Evin Elektrik Enerjisi İhtiyacını Karşılacak Fotovoltaik Sistemin Kurulumu. *Eleco 2014 Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa: Düzce Üniversitesi.
- Ay, Ö. F. ve Kaya, A. (2020). Kahramanmaraş İlinin Biyogaz Potansiyelinin Farklı Modeller Kullanılarak Belirlenmesi. *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 34(2), s. 351-36.
- BEBKA, (2012). Bebka.org.tr Sarıcakaya. https://www.bebka.org.tr/admin/datas/sayfas/198/saricakaya-ilce-raporu_1568787830.pdf (Erişim: 27.05.2022)
- Çanka Kılıç, F. (2011). Biyogaz, Önemi, Genel Durumu ve Türkiye’deki Yeri. *Mühendis ve Makina*, 52 (617), 94-106.
- Doğan, M. (2019). *Güneş Enerji Santrallerinin İncelenmesi ve Verimlilik Analizi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Sakarya: Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Enerji Atlası (2021). *Elektrik Üretiminde Karbon Salınımı*. <https://www.enerjiatlası.com/haber/elektrik-uretiminde-karbon-salinimi> (Erişim: 08.01.2021)
- GEPA (2022). <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/pages/26.aspx> (Erişim: 27.11.2022)
- Gülşen, H.E., Türkay, G. K., Akarsu, C., Kumbur, H., Dizge, N. (2019). Çeşitli Atıklardan Biyogaz Üretiminin Sürdürülebilir Çevre Yönetimine Etkisi. *Tmmob Çevre Mühendisleri Odası, Teknik Dergi*, ISSN: 1302-5627,3(2), 1-15.
- Gürgen, K. Ç. (2016). *Aydın’daki Bir Yapının Elektrik Enerjisi Gereksiniminin Fotovoltaik Sistemler ile Karşılama Olanakları*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Aydın: Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makinaları Anabilim Dalı.
- Karagöl, E., T. (2017). Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji. *SETA-Siyaset, Ekonomi ve Toplum Araştırmaları Vakfı, Analiz*, Nisan 2017, Sayı:197. <https://setav.org/assets/uploads/2017/04/YenilenebilirEnerji.pdf> (Erişim: 11.09.2022)
- Kaynarca, H., Kılıç, T., Açıklalp, E., Yerel Kandemir, S. (2021). Eskişehir’in Biyogaz Potansiyelinin Değerlendirilmesi. *Coğrafya Dergisi*, Sayı:42, 271-282.
- Rosch, C., (2023). Agrivoltaik tarım nedir, çiftçilerin iklim değişikliğiyle başa çıkmasını kolaylaştırabilir mi? BBC Dünya Servisi. <https://www.bbc.com/turkce/articles/cp9dm720en9o> (Erişim: 17.07.2023)
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2022). Yenilenebilir Enerji, Güneş. Enerji.gov.tr <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes> (Erişim: 9.12.2022)
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (2020). Eskişehir İli Tarım ve Hayvancılık Faaliyetlerinden Kaynaklanan Atıklardan Enerji Üretimi. <https://www.investineskisehir.gov.tr/wp-content/uploads/2021/04/eskisehir-ili-tarim-ve-hayvancilik-faaliyetlerinden-kaynaklanan-atiklardan-enerji-uretimi-projesi-on-fizibilite-raporu2020.pdf> (Erişim: 11.05.2023)

- T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, (2021). Eskişehir Tarım ve Orman Müdürlüğü, 2021 Çalışma Raporu. https://eskisehir.tarimorman.gov.tr/Belgeler/2021_Faaliyet_Raporu/2021_Faaliyet_Raporu.pdf (Erişim: 17.07.2023)
- Torunoğlu Gedik, Ö., (2015). *Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları ve Çevresel Etkileri*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Bilimler ve Mühendisliği Programı.
- Tunçez, D. F. (2008). Ereğli İlçesinin Biyogaz Potansiyelinin Belirlenmesi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, Sayı 1 (1):1-7.
- Türkiye Kojenerasyon ve Temiz Enerji Teknolojileri Derneği (2015). Türkiye’de Üretim Sistemleri, Kojenerasyon, Trijenerasyon ve Teknolojiler. <http://kosano.org.tr/wp-content/uploads/2015/03/sunu1.pdf> (Erişim: 17.07.2023)
- Yenilmez, F. (2015). Tavukçuluk Atıklarından Biyogaz Üretimi. *Fırat Üniv.Sağ.Bil.Vet.Derg*,29(3), 205-212.
- Yılmaz, A. (2012). *Türkiye’de Sektörel Enerji Tüketimini Etkileyen Faktörler ve Alternatif Enerji Politikaları*. Yayınlanmamış Doktora Tezi. Aydın: Adnan Menderes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İktisat Anabilim Dalı.
- Yılmaz, A., Ünvar, S., Koca, T., Koçer, A. (2018). Türkiye’de Biyogaz Üretimi ve Biyogaz Üretimi İstatistik Bilgileri. *Enerji ve Çevre Dünyası Dergisi*, (143), ISSN 1305-2047, 26-32.

Arpada Tuz Stresinin Hafifletilmesinde Mikorizanın Etkisi

Çiğdem KÜÇÜK^{1*}, Hala AKSOY²

Öz

Bu çalışma, arpa tuz stresini iyileştirmede mikorizanın rolünü belirlemek amacıyla serada yürütülmüştür. Denemede ticari olarak satılan mikoriza kullanılmıştır. Bitkilere üç tuz düzeyi (0, 100 ve 200 mM NaCl) sulama suyu ile uygulanmış ve ekimden 8 hafta sonra bitkiler hasat edilmiştir. Farklı tuz düzeyleri ile sulanan mikoriza ile aşıllı arpa bitki boyu, yeşil aksam ve kök kuru ağırlıkları, kök uzunluğu, yaprakların klorofil ve prolin içerikleri, kök bölgesi enzimlerinden dehidrogenaz ve alkalın fosfataz enzim aktiviteleri incelenmiştir. Tuz dozlarının arpa gelişimi üzerine olumsuz etkileri belirlenmiştir. Mikoriza aşılmasının tuzun neden olduğu olumsuz etkiyi azalttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikoriza, arpa (*Hordeum vulgare* L.), Tuzluluk.

The Effect of Mycorrhiza in Alleviating Salt Stress in Barley

Abstract

In this study was conducted in greenhouse to determine the role of mycorrhiza in improving salt stress in barley. Commercially available mycorrhiza was used in the experiment. Three salt levels (0, 100 and 200 mM NaCl) were applied to the plants with irrigation water and the plants were harvested 8 weeks after planting. Plant height, plant and root dry weights, root length, chlorophyll and proline contents of leaves, dehydrogenase and alkaline phosphatase enzyme activities from root zone enzymes were investigated. The negative effects of salt doses on barley growth were determined. It has been determined that mycorrhiza inoculation reduces the negative effect caused by salt.

Keywords: Mycorrhiza, Barley (*Hordeum vulgare* L.), Salinity.

¹ Harran Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji, Şanlıurfa, Türkiye, ckucuk@harran.edu.tr

² Harran Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji, Şanlıurfa, Türkiye, halaaljumaa93@gmail.com

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 07.11.2023

Kabul/Accepted: 07.09.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Giriş

Son yıllarda yoğun olarak hissedilen iklim değişikliği; sıcaklık artışı, yağış oranının düşük olması, artan tuzlanma ve toprak erozyonu, dünya çapında tarım ve gıda güvenliği üzerinde baskı oluşturmaktadır (Ait-El-Mokhtar ve ark., 2020). İklim değişikliği bitkisel üretimi olumsuz etkilemektedir (Hasanuzzaman ve ark., 2020). 2050 yılında dünya nüfusunun 9 milyarı aşacağı tahmin edildiğinden, gıda talebinde iki katı artması beklenmektedir (Lynch ve ark., 2021). Tarımın bu talebi karşılaması ve iklim tehlikeleriyle baş etmesi gerekmektedir (Lynch ve ark., 2021). Toprak tuzluluğu, arazi verimliliğini tehdit eden küresel bir sorundur, 2050 yılına kadar tüm ekilebilir alanların yaklaşık % 50'sinin tuzluluktan etkileneceği tahmin edilmektedir (Butcher ve ark., 2016). Tarım alanlarında bilinçsiz sulama ve tuzlu su kullanımı, özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde toprağın tuzlanmasına yol açan faktörler arasında yer almaktadır (Malhi ve ark., 2021). Toprağın tuzlanması bitki büyümesini ve verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Tuzluluk bitkilerde; yaprak su potansiyelinin azalmasına, iyonik dengesizliğe ve hücre hasarlarına neden olabildiği gibi, reaktif oksijen türlerinin (ROS) daha fazla birikmesine neden olmakta, protein sentezini, enzimatik aktiviteleri ve fotosentezi olumsuz etkilemektedir (Ait-El-Mokhtar ve ark., 2019). Tuzlu toprakların verimsizliği; tuzluluğun toksisitesine, organik madde ve N, P, K başta olmak üzere minerallerin düşük bulunabilirliğine bağlanabilir (Ben-Laouane ve ark., 2021). Bu nedenle, ekonomik kayıpların üstesinden gelmek, gıda güvenliğini artırmak ve tarımın sürdürülebilirliğini sağlamak için özellikle de tahılların tuzluluğa verdiği tepkileri anlamak önemlidir (Mukhopadhyay ve ark., 2021).

Ülkemizde ekiliş alanı ve üretim miktarı bakımından 2.sırada olan arpa hemen hemen her yerde yetiştirilmekte olup; İç Anadolu ile Güneydoğu Anadolu Bölgesi özellikle; Şanlıurfa, Diyarbakır ve Mardin'de arpa tarımı Türkiye'nin toplam arpa tarımı yapılan alanların yaklaşık % 60'nı oluşturmaktadır (TUİK, 2020). Arpa, tahıllar arasında tuza karşı yüksek seviyede toleranslıdır. Bitkilerin çoğu gelişme dönemlerinde tuza karşı farklı toleranslılık göstermekte olup, arpanın çimlenme ve fide oluşum dönemlerinde hassas olduğu açıklanmıştır (Benlioğlu ve Özkan, 2015). Tuza dayanıklı yeni çeşitlerin piyasaya sürülmesi ve tuzluluğun bitki sağlığı üzerindeki toksik etkilerini azaltmak için geleneksel yetiştirme, bitki genetik mühendisliği kullanılarak çeşitli stratejiler geliştirilmiştir (Wani ve ark., 2020). Ancak bu tekniklerin ilerlemesi yavaş olmuştur ve stres toleransının genetik belirleyicilerinin tanımlanması ise oldukça zordur. Ayrıca bu uygulamalar çiftçiler için her zaman mali açıdan uygun olmamaktadır (Hasanuzzaman ve ark., 2020). Bunun için arbüsküler mikorizal mantarlar gibi biyostimülantların/biyogübrelerin kullanımı, bitkileri çevresel streslere karşı desteklemek için umut verici biyolojik stratejiler haline gelmiştir (Anlı ve ark., 2020; Boutasknit ve ark., 2021).

Büyüme ile ilgili işlevlerin örneğin stomatal iletkenlik, yaprak su potansiyeli, bağıl su içeriği ve CO₂ asimilasyonunun mikoriza aşılmasından etkilendiği açıklanmıştır (He ve ark., 2017). Mikoriza aşılması bitkinin kuru madde birikimini iyileştirmiş, su alımını artırmış, kuraklık ve tuzluluk gibi streslere karşı bitki tolerans kazandırmıştır. Mikorizanın çeşitli biyolojik ekosistemlerde bitki büyümesi için kullanılması, büyümenin teşvik edilmesi ve verimin arttırılmasına büyük ölçüde katkıda bulunduğu açıklanmıştır (He ve ark., 2017). Toprak tuzluluğunun, küresel gıda güvenliği için ciddi bir tehdit oluşturan ve gittikçe artan bir çevresel sorun olduğu yaygın olarak bilinmektedir. Tuzluluk stresinin, bitki gelişimi ve asimilasyon oranını etkileyerek bitkilerin büyümesini baskıladığı ve bunun sonucunda ürün veriminin azaldığı bilinmektedir (Raza ve ark., 2022). Tarımı yapılan bitkilerin birçoğunun kurak koşullarda iyi bir performans gösterememesi nedeniyle, stres koşullarında üretimi yapılan bitkilerde gelişme ve verim performanslarının artırılması önemli bir çalışma alanını oluşturmaktadır. Ülkemiz tarımında önemli yere sahip olan arpanın, yetişme ortamında bulunan tuz konsantrasyonları ile mikorizanın, bitki gelişimi ve rizosferdeki bazı enzim aktiviteleri üzerindeki etkileri sera koşullarında incelenmiştir.

2. Materyal ve Metod

2.1. Materyal

Çalışmada bitki materyali olarak; Şanlıurfa'da tarımı yaygın olarak yapılan arpa (*Hordeum vulgare* L.) Akhisar-98 çeşidi kullanılmıştır. Mikorizal fungus ise ticari gübre olarak satılan bayiden temin edilmiştir.

2.2. Metod

Arpa tohumları %10 sodyum hipokloritte 5 dakika yüzey sterilizasyonundan sonra distile su ile 5 kez yıkanmış, filtre kağıtları üzerinde tohumların fazla suları alınmıştır. 121 °C'de 1 atm basınçta 15 dakika otoklavda 3 gün arka arkaya steril edilen toprak, 2 kg'lık saksılara doldurulmuştur. Mikoriza ile aşılammış (kontrol) ve mikoriza uygulaması ile bunların NaCl kombinasyonları (0,100, 200 mM NaCl) uygulanmıştır. Tesadüf parselleri deneme desenine göre 3 tekerrürlü olarak serada kurulan denemede kullanılan toprak; killi bünyeye sahip olup; 7.71 pH, %0.07 N, %1.62 organik madde içeriğine sahip olup kireç % 22.08 ve EC 0.86 ds/m'dir. Mikorizal fungus ekim öncesi tohum yatağının altına gelecek şekilde saksılara verilmiş (5g/kg), yüzey sterilizasyonu yapılan tohumlar ekilmiştir. Osmotik şoktan kaçınmak için, tuzun farklı dozları çimlenme sonrası sulama suyu ile verilmiştir. Çimleninceye kadar çeşme suyu ile, çimlendikten sonra gelişme süresince

bitkiler, farklı konsantrasyonlarda tuz içeren çeşme suyu ile sulanmıştır. Çimlendikten 8 hafta sonunda hasat edilmiştir.

2.2.1. Araştırmada incelenen özellikler

Bitki boyu: Kök boğazından bitkinin en uç noktası arasındaki mesafe ölçülmüş, cm olarak kaydedilmiştir.

Kök uzunluğu: Hasat sonunda kökler topraktan arındırılmak için önce çeşme suyu ile daha sonra distile su ile yıkanmış, uzunlukları cetvelle ölçülmüştür.

Yeşil aksam ve kök kuru ağırlıkları: Hasat sonrasında yeşil aksam ve kökler kesilerek hassas terazide tartılmış, yeşil aksam ve kök yaş ağırlıkları belirlenmiştir. Tartılan örnekler kese kağıtları içerisinde sabit ağırlığa gelinceye kadar 70 °C’de kurutulmuş, tartılarak kuru ağırlıkları belirlenmiştir.

Klorofil tayini: Hasat sırasında 2 g taze yaprak örneği 5 ml aseton:su (%80 v/v) karışımında homojenize edilerek, filtreden geçirilmiştir. Filtrat, 663 nm ve 645 nm’de spektrofotometrede okunmuştur. Toplam klorofil mg/l olarak hesaplanmıştır (Arnon 1949).

Yaprakta Prolin İçeriği (mg prolin/g yaprak):Yaprak örnekleri (0.5 g) üzerine % 3’lük sülfosalisilik asit ilave edilip ezilmiştir. Filtre kağıdından süzülen içeriğe; asit ninhidrin ve asetik asit eklenmiştir. İçerik 1 saat 80°C’de su banyosunda tutulduktan sonra tüpler buz banyosunda bekletilmiştir. İçeriğe toluen eklenip vortekste karıştırılmıştır. Süpernatantların, 520 nm’de okunmuştur (Bates ve ark., 1973).

Kök bölgesi Dehidrogenaz aktivite: Hasat sırasında kök bölgesinden alınan toprak örnekleri üzerine glikoz ve 2,3,5-trifeniltetrazolium klorid eklenmiş, 1 gün boyunca 25 °C’de inkübe edilmiştir (Pepper 1995). İçerik santrifüjlendikten sonra elde edilen süpernatant standart trifenil formazan serisine karşılık 485 nm’de spektrofotometrede okunmuştur (Pepper, 1995).

Alkalin fosfataz aktivite: Hasat sırasında ayrı ayrı her bir uygulamanın kök bölgesinden alınan toprak örneğine (1g) üzerine tolüen, fosfat tamponu (pH 8), p-nitrofenilfosfat eklenmiş, 1 saat 37°C de inkübe edilmiştir. Süre sonunda açığa p-nitrofenol, standart (PNPP’den hazırlanan) kullanılarak, 410 nm’de spektrofotometre kullanılarak belirlenmiştir (Tabatabai ve Bremner, 1969).

İstatistik analiz: Elde edilen sonuçlar JMP istatistik programında analiz edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Tuz stresi koşullarında, mikorizal fungi stresin temel biyoyileştiricisi olarak işlev görmüş, bitkileri stresin olası zararlarına karşı koruduğu belirtilmiştir (Zong ve ark., 2023). Mikorizal aşılamanın tuz stresine karşı bitkilerin dirençliliğini arttırdığı yapılan çalışmada da rapor edilmiştir

(Zong ve ark., 2023). Mikorizal mantarların, konakçı bitkilerin stresli koşullar altında gelişmesini kolaylaştırarak fotosentez oranının artmasına yardımcı oldukları açıklanmıştır (Birhane ve ark., 2012). Bitki türlerinin yaklaşık % 90'ı arbusküler mikoriza ile ortaklık kurabilmektedir (Zong ve ark., 2023). Mikoriza tarafından bitki kökleri ile hif ağının oluşturulması, köklerin geniş bir toprak yüzey alanına erişimini önemli ölçüde artırarak bitki büyümesinde iyileşmeye neden olduğu belirlenmiştir (Bowles ve ark., 2016). Tuz stresinin uygulanması arpanın büyüme parametrelerini önemli ölçüde azaltmıştır. Şekil 1'de gösterildiği gibi, mikoriza aşılammış bitkilerde tuz stresine maruz kalma, mikoriza uygulanmış bitkilerle karşılaştırıldığında arpanın kuru ağırlığını azaltmıştır. Mikoriza uygulaması, yeşil aksam kuru ağırlığını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Maksimum iyileşme, orta (100 mM) ve yüksek tuzlulukta (200 mM) bitkilerle karşılaştırıldığında yeşil aksam kuru ağırlığını sırasıyla %52.5 ve %19.2 oranında arttırmıştır. Benzer şekilde mikoriza uygulamaları tuz stresini hafifletmiş kök ağırlığını kontrole göre arttırmıştır (Şekil 1). Arpa kök kuru ağırlığı en yüksek mikoriza ve 100 mM NaCl'nin birlikte uygulanması ile alınırken, en düşük kök kuru ağırlığı ise mikoriza uygulanmayan 200 mM NaCl uygulamasında belirlenmiştir (Tablo 1). Mikoriza uygulamaları ve farklı NaCl dozlarının arpa kök ağırlıkları üzerine etkileri farklılık göstermiştir.

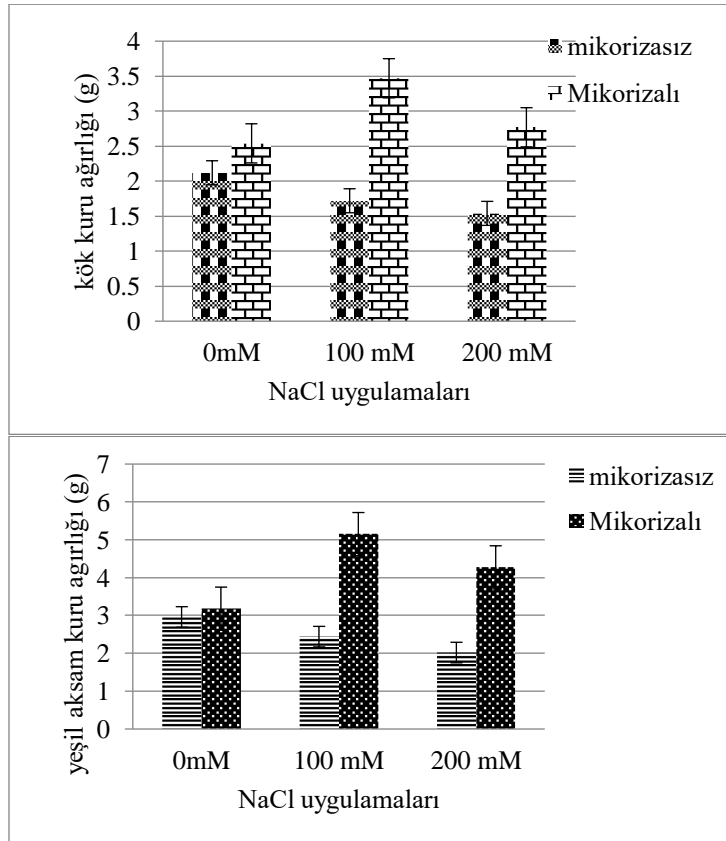
Tablo 1. Mikoriza ve farklı NaCl dozlarının arpanın bazı özelliklerine etkileri.

NaCl (mM)	*Mikoriza uygulaması	Yeşil aksam kuru ağırlığı (g/bitki)	Kök kuru ağırlığı (g/bitki)	Bitki boyu (cm)	Kök uzunluğu (cm)	Toplam klorofil (mg/g taze ağı.)	Prolin (mg/g taze ağı.)
0	-M	2.96c [#]	2.12c	25.3b	8.7e	5.09c	0.98e
	+M	2.93c	2.64b	31a	20.7a	5.89a	1.52d
100	-M	2.78c	1.89d	32.3a	13.3d	2.79e	2.29c
	+M	6.18a	3.47a	31.7a	17.7bc	5.70b	3.78a
200	-M	2.76c	1.80d	10.3c	16c	2.51f	3.19b
	+M	3.63b	2.77b	26b	8.6e	4.42d	3.79a
LSD(<0.001)		0.246	0.148	4.612	2.258	0.105	0.102

*-M: mikoriza uygulanmamış, +M: mikoriza uygulanmış; [#]Farklı harf ile gösterilen ortalamalar arasındaki fark önemlidir (p≤0.05)

Yapılan bir çalışmada; tuzlu koşullar altında; mikoriza ile aşılammış *Allium sativum* (soğan) bitkilerinin yaprak alanı indeksi, yeşil ve kuru aksam ağırlıklarında artış belirlenmiştir (Borde ve ark., 2010). Mikorizanın bitkiler üzerindeki olumlu etkisinin tuzluluk stresine bağlı olmadığını, faydalı etkilerinin tuz stresinin varlığına bakılmaksızın ortaya çıktığı yapılan bir çalışmada belirtilmiştir (Wang ve ark., 2018). Tuz stresine maruz kalan bitkilerde; sodyum, klorür gibi spesifik iyonların toksik etkileri fotosentez, solunum, protein sentezi gibi normal fizyolojik süreçleri bozmakta, bitkilerde Na⁺ ve Cl⁻'nin yüksek alımı ile besin dengesizliği meydana geldiğinden mikorizal aşılama tuzun olumsuz etkisini azaltmaktadır (Wang ve ark., 2018). Buna karşın özellikle stres koşullarında mikorizanın, köklere göre daha iyi topraktan yararlanılabilecek P alımını artırdığını ve böylece bitki

gelişimine katkı sağladığı açıklanmıştır (Chandrasekaran, 2022). Bu çalışmada da; 100 mM NaCl ve mikorizanın birlikte uygulanması; tuz stresi uygulanmamış mikoriza aşılmalı bitkilerle karşılaştırıldığında yeşil aksam ve kök kuru ağırlığını artırmıştır. Çalışmamızda, tuz stresine maruz kalan arpanın bitki boyu mikoriza aşılması ile yüksek tuz düzeyinde artmıştır (Tablo 1). Tuz stresine maruz kalan bitkilerle karşılaştırıldığında mikoriza uygulamasının bitki boyunda artış olduğu belirlenmiştir. Araştırmacılar, mikoriza ile aşılınmış narenciye ağaçlarında yaprak alanının arttığını açıklamışlardır (Alqarawi ve ark., 2014). Kumar ve ark. (2022) ise mikoriza aşılmasının baklanın tuz stresine karşı toleransını arttırdığını, bitki kuru aksam ağırlığını ve bitki boyunun mikoriza ile aşılı olanlarda daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Araştırmacıların bulguları bizim sonuçlarımızı desteklemektedir. Sonuçlarımız, arpada mikoriza uygulamasının tuz stresini bitki büyümesi üzerinde olumlu ve önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Tuzluluk stresinin fotoassimilasyonu azaltarak, fotosentetik pigmentlerin azalmasına, dolayısıyla bitki gelişiminin azalmasına neden olduğu bildirilmiştir (Abeer ve ark., 2016). Tuzluluk bitkisel üretimi, verimi azaltmaktadır. Mikorizal simbiyoz, farklı çevresel koşullara sahip çevrelerde bitkilere yardımcı olmaktadır (Beltrano ve ark., 2013). Mikorizal kolonizasyonun bitki gelişimini artırdığı rapor edilmiştir (Beltrano ve ark., 2013).



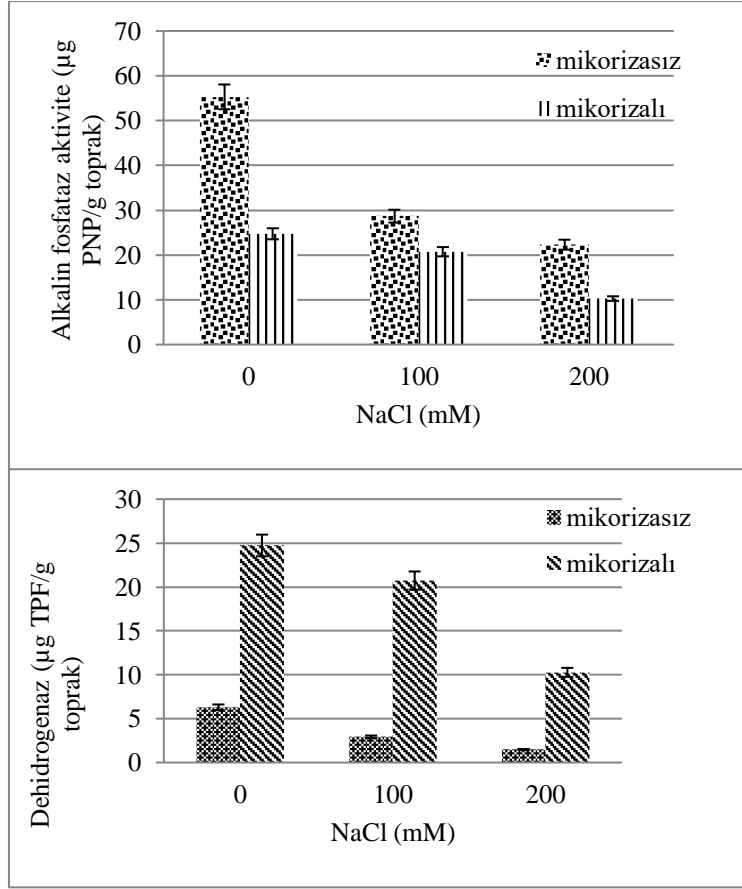
Şekil 1. Uygulamaların yeşil aksam ve kök kuru ağırlıkları üzerine etkileri

G.intraradices'in biber köklerinde kolonize olarak artan tuz düzeyine karşı biberin tuza toleranslılığını arttırdığı açıklanmıştır (Beltrano ve ark., 2013). Çeşitli araştırmacılar tarafından da

desteklendiği gibi (Ait-El-Mokhtar ve ark., 2019; Beltrano ve ark., 2013; Hashem ve ark., 2018), çalışmamızda mikoriza inokulasyonu ile klorofil içeriğinin arttığı belirlenmiştir (Tablo 1). Fakat araştırmacılar, farklı tuz düzeylerinde klorofil içeriklerinde farklı sonuçlar almışlar; farklılığın bitki türüne, tuzun uygulama dozuna göre değiştiğini açıklamışlardır. Mikorizal inokulasyonunun bakla (*Vicia faba* L.) (Hashem ve ark., 2014) ve *Sesbania sesban*'da (Abd-Allah ve ark., 2015) klorofil içeriklerini arttırdığı rapor edilmiştir. Mikorizanın klorofil içeriğini arttırması, mikorizal inokulasyon yapılan bitkilerdeki klorofil sentezinde magnezyum içeriğinin yüksek olmasına bağlanmıştır (Hashem ve ark., 2018). Mikorizal simbiyoz, antosiyaninlerin, klorofillerin, karotenoidlerin, toplam çözünür fenoliklerin, tokoferollerin ve çeşitli mineral besin maddelerinin birikmesine neden olmuştur (Baslam ve ark., 2011). Mikoriza uygulamaları ve tuz dozlarının arpa klorofil içeriğine etkileri Tablo 1'de verilmiştir. Mikoriza uygulaması, mikorizasız uygulamalara göre bitkide klorofil içeriğini arttırmıştır. Tuz dozunun artması ile klorofil içeriği azalmıştır. Savunma stratejisi olarak bazı bitkiler, hücrelerin osmatik potansiyelinin düzenlenmesiyle tuzluluğa direnç gösterirler. Bu bitkiler, yüksek tuz düzeylerinde prolin, betain, çözülebilir şeker veya aminoasit gibi düşük molekül ağırlıklı bileşikler depolarlar, stressiz koşullarda bu düşük molekül ağırlıklı bileşikler genellikle düşük konsantrasyonlarda bulunurlar (Beltrano ve ark., 2013). Sonuçlarımızdan da görüldüğü gibi, tuz stresine maruz kalan arpada prolin depolanmasının artması, Benhassaini ve ark. (2012) tarafından *Pictacia atlantica*'da, Ünal ve ark. (2014) tarafından arpada ve Abd-Allah ve ark. (2015) tarafından *Sesbania sesban*'da elde edilen sonuçlar ile benzerlik göstermektedir. Tablo 1'de görüldüğü gibi; prolin içeriği uygulanan tuzun artan dozu ile artış göstermiştir. Stresli koşullarda, prolin depolanmasının aminoasit degradasyonu ve gen ekspresyonu kadar prolin metabolizmasının da etkilenmesinin sonucudur. Bitkiler stresli koşullara maruz kaldıklarında, prolin sentezleyen enzimlerin aktiviteleri düşmektedir (Abeer ve ark., 2016; Khan ve ark., 2015). Çalışmamızda, prolin içeriği mikorizalı ve mikorizasız bitkilerde tuz stresi ortamında artmıştır. Prolinin artması tuz stresi ile ilişkilidir. Tuz stresinde prolin birikmesi, dış çevre ile stoslün osmatik basıncını dengeler, hücreyi korur. Prolin depolanması ve tuz toleransı arasında pozitif korelasyon Sousa ve ark. (2022) tarafından da desteklenmiştir. Prolin koruyucu enzim aktivitesi olarak düşünülebilir. Ozmolitin depolanmasının membran yapısını koruduğu ve ROS'un neden olacağı zararı azalttığı da bildirilmiştir (Ahanger ve ark., 2015; Alqarawi ve ark., 2014).

Toprak enzimleri toprak mikroorganizmaları tarafından salgılanır (Black 1982). Toprak biyokimyasal reaksiyonlarında katalizör görevi görürler ve topraktaki birçok önemli biyokimyasal süreçte yer alırlar (Ai ve ark., 2015). Başka bir deyişle, toprak enzimleri toprağın gelişimi ve değişiminde rol oynar ve toprak aktivitesinin önemli göstergeleridir (Du ve ark., 2018). Çalışmamızda; mikoriza ve farklı NaCl dozlarının rizosfer bölgesinde alkalın fosfataz aktiviteleri incelenmiştir. NaCl'nin artan dozları mikoriza ve mikorizasız uygulamalarda arpa rizosferinin alkalın

fosfataz enzim aktivitesini azaltmıştır (Şekil 2). En yüksek alkalin fosfataz enzim aktivitesi sadece mikorizalı uygulamadan alınmıştır. Farklı NaCl dozları ile birlikte mikoriza uygulamalarının arpa rizosfer bölgelerindeki dehidrogenaz enzim aktivitesindeki değişimler Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Uygulamaların arpa rizosferindeki alkalin fosfataz aktivite ve dehidrogenaz aktiviteye etkileri.

Uygulanan NaCl dozlarının artışı ile rizosferdeki dehidrogenaz enzim aktivitesi azalmıştır. Mikoriza uygulaması, mikorizasız uygulamalar ile karşılaştırıldığında rizosferdeki dehidrogenaz aktiviteyi artırmıştır. Çalışmada, farklı dozlardaki tuz içeriği dehidrogenaz ve alkalin fosfataz enzim aktivitelerini önemli ölçüde etkilemiştir. Bunun nedeni tuzun toprak mikrobiyal popülasyonunu olumsuz etkilemesinden kaynaklanabilir, çünkü tuzluluk mikroorganizmalar için elverişsiz bir ortama neden olabilir. Singh ve ark. (2018) toprak tuzluluğunun, belirli iyonlardan (Na^+ ve Cl^-) kaynaklanan toksisiteler veya topraktaki aşırı tuzların ozmotik etkileri nedeniyle mikrobiyal popülasyonun azalmasına neden olduğu, bunun da mikrobiyal hücrelerde beslenme dengesizliklerine yol açabileceği ve sonuçta dehidrogenaz enzim üretimini azaltabileceği sonucuna varmıştır. Tuzluluğun neden olduğu su eksikliği, olağan hücresel faaliyetlerde dengesizliklere yol açmakta ve mikrobiyal hücreleri parçalamakta, topraklardaki enzim aktivitelerini düşürmektedir (Yan ve ark., 2015). Yapılan bir çalışmada; *Azotobacter* ve mikoriza uygulanmış toprakların dehidrogenaz, alkalin fosfataz, nitrojenaz ve fluorescein diasetat hidrolizinin yüksek olmasının yüksek mikrobiyal popülasyondan

kaynaklanabileceği açıklanmıştır (Aseri ve ark., 2008). Fosfataz aktivitenin yüksek olması, biyomas üretimindeki artış ve mobilize fosforun bitkiler tarafından alınmasına yardımcı olabileceği yapılan bir araştırmada açıklanmıştır (Tarafdar ve Gharu, 2006). Bu enzim aktiviteleri, toprak verimliliğinin bir ölçütü olarak değerlendirilebilir. Çünkü enzimler; karbon, azot ve fosfor gibi önemli besin elementlerinin mineralizasyonu ile ilişkilidir (Aseri ve ark., 2008).

4. Sonuç ve Öneriler

Farklı tuz dozlarının uygulandığı arpada iki mikoriza (mikorizalı ve mikorizasız) uygulamasının etkileri araştırılmıştır. Serada yürütülen denemede, tuz uygulamalarının bitki gelişimini olumsuz etkilediği belirlenmiştir. Mikoriza ile aşılama tuzun olumsuz etkisini azaltmıştır. Tuzun artan dozunun bitki gelişimini azalttığı, buna karşın mikoriza uygulaması ile arpa tuz stresini iyileştirdiği belirlenmiştir. Tuz stresi arpa klorofil sentezini azaltmıştır. Bununla birlikte, mikoriza inokulasyonunun tuz stresinin etkisini azalttığı görülmüştür. Uygulamaların rizosfer enzim aktivitelerinden olan alkalın fosfataz enzim aktivitesi ve dehidrogenaz enzim aktivitesi üzerine etkileri araştırılmıştır. Tuzun artan dozlarının rizosfer mikroorganizmaları ile de ilişkili olan enzimlerin aktivitelerini kontrole göre azalttığı tespit edilmiştir. Mikoriza uygulaması, mikorizasız uygulamalarla karşılaştırıldığında arpa rizosferinde dehidrogenaz aktivitenin arttığı saptanmıştır. Mikorizanın tuz stres koşullarında arpa üzerindeki etkisi farklılık göstermekle birlikte; 100 mM NaCl ve mikorizanın birlikte uygulanması, 200 mM NaCl ve mikoriza aşılmasına göre tuzun olumsuz etkisini azaltmada daha etkili olmuştur. Bu sonuçlar, tuz stresi altında arpa bitkisinin gelişimini artırmak için mikorizanın potansiyel kullanımını kanıtlamakta ve biyoteknolojik uygulamada bu simbiyotik birlikteliğin avantajından yararlanmanın yolunu açabilir.

Yazarların katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Abd-Allah, E.F., Abeer-Hashem, A.A., Alqarawi, A.H., Bahkali, and Mona, S., (2015). Enhancing growth performance and systemic acquired resistance of medicinal plant *Sesbania sesban* (L.) Merr using arbuscular mycorrhizal fungi under salt stress. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22, 274-283.
- Abeer, H., Alterami, A.S., Alqarawi, V.E., Abd-Allah, A.A., and Egamberdieva, D., (2016). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance basil tolerance to salt stress through improved physiological and nutritional status. *Pakistan Journal of Botany*, 46, 37-45.
- Ahanger, M. A., Aharwal, R.M., Tomar, N.S., and Shrivastana, M., (2015). Potassium induces positive changes in nitrogen metabolism and antioxidant system of oat (*Avena sativa* L. cultivar Kent). *International Journal of Plant Sciences*, 10, 211-223.
- Ai, C., Liang, G., Sun, J., He, P., Tang, S., Yang, S., Zhou, W., and Wang, X., (2015). The alleviation of acid soil stress in rice by inorganic or organic ameliorants is associated with changes in soil enzyme activity and microbial community composition. *Biology and Fertility of Soils*, 51,465–477
- Ait-El-Mokhtar, M., Laouane, R. B., Anli, M., Boutasknit, A., Wahbi, S., and Meddich, A., (2019). Use of mycorrhizal fungi in improving tolerance of the date palm (*Phoenix dactylifera* L.) seedlings to salt stress. *Scientia Horticulturae*, 253, 429– 438.
- Ait-El-Mokhtar, M., Baslam, M., Ben Laouane, R., Anli, M., Boutasknit, A., Mitsui, T., Wahbi, S., and Meddich, A., (2020), Alleviation of detrimental effects of salt stress on date palm (*Phoenix dactylifera* L.) by the application of arbuscular mycorrhizal fungi and/or compost. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4,131.
- Alqarawi, A. A., Hashem, A., Abd_Allah, E. F., Alshahrani, T. S., and Huqail, A.A., (2014). Effect of salinity on moisture content, pigment system, and lipid composition in *Ephedra alata* Decne. *Acta Biologica Hungarica*, 65(1), 61–71
- Anli, M., Baslam, M., Tahiri, A., Raklami, A., Symanczik, S., Boutasknit, A., Ait-El-Mokhtar, M., Ben-Laouane, R., Toubali, S., Ait Rahou, Y., Ait Chitt, Y., Oufdou, K., Mitsui, T., Hafidi, M., and Meddich, A., (2020). Biofertilizers as strategies to improve photosynthetic apparatus, growth, and drought stress tolerance in the date palm. *Frontiers in Plant Science*, 11,1-21.
- Aseri, G. K., Jain, N., Panwar, J., Rao, A.V., and Meghwal, P.R., (2008). Biofertilizers improve plant growth, fruit yield, nutrition, metabolism and rhizosphere enzyme activities of Pomegrate (*Punica granatum* L.) in Indian Thar Desert. *Scientia Horticulturae*, 117, 130-135.
- Arnon, D.T., (1949). Copper enzymes in isolated chloroplast polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24, 1- 15.
- Bates, L. S., Waldern, R. P., and Teare, I. D., (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies, *Plant and Soil*, 39, 205-207.
- Baslam, M., Pascual, I., Sanchez-Diaz, M., Erro, J., Garcia-Mina, J.M., and Goicoechea, N., (2011). Improvement of nutritional quality of greenhouse-grown lettuce by arbuscular mycorrhizal fungi is conditioned by the source of phosphorus nutrition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59, 11129.
- Beltrano, J., Ruscitti, M., Arango, M.C., and Ronco, M., (2013). Effects of arbuscular mycorrhiza inoculation on plant growth, biological and physiological parameters and mineral nutrition in pepper grown under different salinity and p levels. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 13, 123-141.
- Benhassaini, H., Fetati, A., Kaddour Hocine, A., and Belkhodja, M., (2012). Effect of salt stress on growth and accumulation of proline and soluble sugars on plantlets of *Pistacia atlantica* Desf. subsp. *atlantica* used as rootstocks. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 16, 159-165.
- Ben-Laouane, R., Ait-El-Mokhtar, M., Anli, M., Boutasknit, A., Ait, Y., Rahou, A., Raklami, K., Oufdou, K., Wahbi, S., and Meddich, A., (2021). Green compost combined with mycorrhizae and rhizobia: a strategy for improving alfalfa growth and yield under field conditions. *Gesunde Pflanzen*. 73,193–207
- Benlioğlu, B., and Özkan, U., (2015). Bazı arpa çeşitlerinin (*Hordeum vulgare* L.) çimlenme dönemlerinde farklı dozlardaki tuz stresine tepkilerinin belirlenmesi. *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 24 (2), 109-114
- Birhane, E., Sterck, F., Fetene, M., Bongers, F., and Kuyper, T., (2012). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance photosynthesis, water use efficiency, and growth of frankincense seedlings under pulsed water availability conditions. *Oecologia*, 169, 895–904.

- Borde, M., Dudhane, M., and Jite, P. K., (2010). AM fungi influences the photosynthetic activity, growth and antioxidant enzymes in *Allium sativum* L. under salinity condition. *Notulae Scientia Biologicae*, 2, 64–71.
- Boutasknit, A., Baslam, M., Ait-El-Mokhtar, M., Anli, M., Ben-Laouane, R., Ait-Rahou, Y., Mitsui, T., Douira, A., El Modafar, C., Wahbi, S., and Meddich, A., (2021). Assemblage of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi and green waste compost enhance drought stress tolerance in carob (*Ceratonia siliqua* L.) trees. *Scientific Reports*, 11, 1-23.
- Bowles, T. M., Barrios-Masias, F. H., Carlisle, E. A., Cavagnaro, T. R., and Jackson, L. E., (2016). Effects of arbuscular mycorrhizae on tomato yield, nutrient uptake, water relations, and soil carbon dynamics under deficit irrigation in field conditions. *Science of the Total Environment*, 566, 1223–1234
- Butcher, K., Wick, A.F., Desutter, T., Chatterjee, A., and Harmon, J., (2016). Soil salinity: a threat to global food security. *Agronomy Journal*, 108, 2189-2200.
- Chandrasekaran, M. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi mediated enhanced biomass, root morphological traits and nutrient uptake under drought stress: A meta-analysis. *Journal of Fungi (Basel)*, 8, 660.
- Du, Z., Zhu, Y., Zhu, L., Zhang, J., Li, B., Wang, J., Wang, J., Zhang, C., and Cheng, C., (2018). Effects of the herbicide mesotrione on soil enzyme activity and microbial communities. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 164, 571–578.
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M.H.M.B., Parvin, Bhuiyan, K. T.F., Anee, T.I., Nahar, K., Hossen, M.S., Zulfiqar, F., Alam, M.M., and Fujita, M., (2020). Regulation of ROS metabolism in plants under environmental stress: a review of recent experimental evidence. *International Journal of Molecular Sciences*, 21, 1-44,
- Hashem, A., Abd-Allah, E.F., Alqarawi, G., Al-didamony, G., Al-Whibi, M., Egamberdieva, D., and Ahmad, P. (2014). Alleviation of adverse impact of salinity on faba bean (*Vicia faba* L.) by arbuscular mycorrhizal fungi. *Pakistan Journal of Botany*, 46(6), 2003-2013
- Hashem, A., Alqarawi, A. A., Radhakrishnan, R., Al-Arjani, A. F., Aldehaish, H. A., and Egamberdieva, D., (2018). Arbuscular mycorrhizal fungi regulate the oxidative system, hormones and ionic equilibrium to trigger salt stress tolerance in *Cucumis sativus* L. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25 (6), 1102–1114
- He, F., Sheng, M., and Tang, M., (2017). Effects of *Rhizophagus irregularis* on photosynthesis and antioxidative enzymatic system in *Robinia pseudoacacia* L. under drought Stress. *Frontiers in Plant Science*, 8, 183.
- Khan, M.I.R., Nazir, F., Asger, M., Per, T.S., and Khan, N.A., (2015). Selenium and sulfur influence ethylene formation and alleviate cadmium-induced oxidative stress by improving proline and glutathione production in wheat. *Journal of Plant Physiology*, 173, 9-18
- Kumar, A., Yadav, A., Dhanda, P., Delta, A.K., Sharma, M., and Kaushik, P., (2022). salinity stress and the influence of bioinoculants on the morphological and biochemical characteristics of faba bean (*Vicia faba* L.). *Sustainability*, 14, 1-15.
- Lynch, J., Cain, M., Frame, D., and Pierrehumbert, R., (2021). Agriculture's contribution to climate change and role in mitigation is distinct from predominantly fossil CO₂-emitting sectors. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 1-9.
- Malhi, G.S., Kaur, M., and Kaushik, P., (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: a review. *Sustainability*, 13, 1-21.
- Mukhopadhyay, R., Sarkar, B., Jat, H.S., Sharma, R.C., and Bolan, N.S., (2021). Challenges for sustainable agriculture and food security. *Journal of Environmental Management*.280, 1-15.
- Pepper, I.L., Gerba, C.P., and Brendecke, J.W., (1995). Brendecke: Environmental Microbiology, A Laboratory Manual. Academic Press, New York.
- Raza, A., Tabassum, J., Fakhar, A.Z., Sharif, R., Chen, H., Zhang, C., Ju, L., Fotopoulos, V., Siddique, K.H.M., Singh, R.K., Zhuang, W., and Varshney, R.K., (2022). Smart reprogramming of plants against salinity stress using modern biotechnological tools, *Critical Reviews in Biotechnology*, 1, 1-29.
- Singh, P., Chaudhary, O.P., and Mavi, M.S. (2018). Irrigation-induced salinization effects on soil chemical and biological properties under Cotton-Wheat rotation on loamy sand soil in Northwest India. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 66, 386–391.
- Sousa, B., Rodrigues, F., Soares, C., Martins, M., Azenha, M., Lino-Neto, T., Santos, C., Cunha, A., and Fidalgo, F. (2022). Impact of combined heat and salt stresses on tomato plants—insights into nutrient uptake and redox homeostasis. *Antioxidants*, 11, 478
- Tabatabai, M.A., and Bremner, J.M., (1969). Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biology and Biochemistry*. 1, 301–307.

- Tarafdar, J.C., and Gharu, A., (2006). Mobilization of organic and poorly soluble phosphates by *Chaetomium globosum*. *Applied Soil Ecology*, 32, 273-283.
- TUIK, (2020). Türkiye İstatistik Kurumu Erişim: http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1001 [Erişim tarihi 07.05.2020].
- Ünal, B.T., Aktaş, L.Y., and Güven, A., (2014). Effects of salinity on antioxidant enzymes and proline in leaves of barley seedlings in different growth stages. *Bulgarian Journal of Agricultural Sciences*. 20, 883-887.
- Wani, S.H., Kumar, V., Khare, T., Guddimalli, R., Parveda, M., Solymosi, K., Suprasanna, P., and Kishor, P.B.K., (2020). Engineering salinity tolerance in plants: progress and prospects. *Planta*, 251, 76.
- Wang, Y., Wang, M., Wu, A., and Huang, J. (2018). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and nitrogen uptake of *Chrysanthemum morifolium* under salt stress. *PlosOne*, 13, 1-14.
- Yan, N., Marshner, P., Cao, W., Zuo, C., and Qin, W. (2015). Influence of salinity and water content on soil microorganisms. *International Soil and Water Conservation Research*, 3, 316–323.
- Zong, J., Zhang, Z., Huang, P., and Yang, Y., (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi alleviates salt stress in *Xanthoceras sorbifolium* through improved osmotic tolerance, antioxidant activity, and photosynthesis. *Frontiers in Microbiology*, 3, 1-14.

Modeling the Change in Amino Acid and Peptide Contents during the Aging of Bottled-Fermented Sparkling Wines by Image Processing Methods

Adnan BOZDOĞAN^{1*}, Ahmet CANBAŞ², Selahaddin Batuhan AKBEN³

Abstract

In this study, natural sparkling wine was produced using a mixture (1:1) of Emir and Dimrit grapes harvested (Around the Urgup District of Turkey). The change of free amino acid and peptide contents in sparkling wine depending on the aging time and yeasts (free and immobilized forms of the *Saccharomyces bayanus* and *Saccharomyces oviformis*) used in the second fermentation stage were examined by image processing methods. The immobilized yeasts were determined as more than the free ones along the second fermentation. It was also determined that the yeast type does not have a significant effect on both the peptides and free amino acid contents of sparkling wines and these contents were divided into 3 classes from high to low by measuring separately along the aging time. The amino acid contents of sparkling wines reached the highest level between the 335th and 365th days of aging time and also exceeded the amino acid contents of base wine.

Keywords: Natural sparkling wine, Amino acid and Peptide, Immobilized yeast, Image processing.

Doğal Köpüren Şarapların Yıllandırılması Sırasında Amino Asit ve Peptid İçeriklerindeki Değişimin Görüntü İşleme Yöntemleriyle Modellenmesi

Öz

Bu çalışmada, Türkiye'nin Ürgüp İlçe'sinden toplanan Emir ve Dimrit üzümleri karışımından (1:1) doğal köpüren şarap üretilmiştir. İkinci fermantasyon aşamasında kullanılan mayalara (*Saccharomyces bayanus* ve *Saccharomyces oviformis*'in serbest ve immobilize formları) ve ikinci fermantasyon süresine bağlı olarak Köpüren şaraptaki serbest aminoasit ve peptid içeriklerindeki değişim görüntü işleme yöntemleriyle incelenmiştir. İkinci fermantasyonda immobilize mayaların serbest mayalara göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, maya tipinin köpüren şarapların hem peptidleri hem de serbest amino asit içerikleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı belirlenmiş ve bu içerikler yıllandırma süresi boyunca ayrı ayrı ölçülerek yüksekten düşüğe doğru 3 sınıfa ayrılmıştır. Köpüren şarapların aminoasit içerikleri yıllandırma süresinin 335. ile 365. günleri arasında en yüksek düzeye ulaşırken, temel şarabın aminoasit içeriğini de geçmiştir.

Anahtar Kelimeler: Doğal köpüren şarap, Amino asit ve Peptid, Tutuklanmış maya, Görüntü işleme.

¹Osmaniye Korkut Ata University, Department of Food Engineering, Osmaniye, Türkiye, bozdogan@osmaniye.edu.tr

²Çukurova University, Department of Food Engineering, Adana, Türkiye, acanbas@cu.edu.tr

³Osmaniye Korkut Ata University, Department of Electrical and Electronics, Osmaniye, Türkiye, batuhanakben@osmaniye.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Introduction

The wines containing high amount of CO₂ are called as sparkling wine. These wines are produced by performing two consecutive fermentation processes. The characteristic wine is obtained at the end of the first fermentation then CO₂ is created in this wine by applying second fermentation. Thus, the ability to foam is also gained to the characteristic wine at the end of the second fermentation (Ribereau-Gayon et al., 2000; Martinelli et al. 2003). The most specific and known among sparkling wines is Champagne. It is produced using the mixture of Pinot noir or Pinot meunier black grapes and Chardonnay white grape that are grown in the Champagne region of France. Outside the Champagne region of France and in other countries, wines produced by the same method are also called Champagne and these wines are classified as the natural sparkling wine (Ribereau-Gayon et al., 2000). The second fermentation stage of champagne production is carried out in a bottle by adding yeast and sugar to the wine. Therefore, the amount and properties of the yeast used in the second fermentation are very important because the yeast to be used in the second fermentation should be able to work at low temperature, high CO₂ pressure and in a medium containing more than 10% alcohol, while it should be separated from the liquid in a short time after fermentation (Martinez-Rodriguez et al., 2001). After the second fermentation the wine is aged on the yeast lees for at least 1 year and the yeasts autolyses during the aging process. Thus, compounds (amino acids, peptides, proteins and polysaccharides, nucleic acids, enzymes etc.) that contribute positively to sensory properties are also obtained during autolysis (Feulliat and Charpentier, 1982; Martinez-Rodriguez et al., 2002). Among these compounds, amino acids and peptides are the most striking ones because they pass into the wine and positively affect the quality of the foaming wine by creating a thinner and permanent foam (Marchall et al., 1999; Martinez-Rodriguez et al., 2003; Culbert et al., 2017). After the second fermentation and aging processes completed, the yeast lees are removed from the bottle and the bottles are placed to the wooden racks in an inclined position and turned. Thus, the yeast lees are collected on the cork cover and removed. Various alternative methods are used for yeast precipitation, such as chemical additives, cartridge insertion, the use of flocculent yeast, and the use of immobilized yeast. Therefore, yeast precipitation takes several weeks and requires considerable labour (Ciani and Ferraro, 1998; Benucci et al., 2019).

As described above, the production of Champagne is a very laborious and attention requiring process, so the economic value of Champagne is also high. For this reason, researchers are working to produce quality Champagne using the appropriate methods and grapes grown in geographical regions characteristically like the Champagne region of France. Cappadocia region (Around the Urgup District of Nevsehir Province) in Turkey is similar to France's Champagne region as the geological structure, having underground cellars and widespread cultivation of grape. Also, the grape

variety named Emir grown in this region is suitable for the production of good quality white wine. In addition, the black grape variety named as Dimrit is widely grown in this region. Similarity of the Cappadocia region in Turkey and Champagne region in France suggests the grape varieties named Emir and Dimrit can be used instead of grape varieties named white Chardonnay, black Pinot noir and Pinot meunier which are claimed to give fullness to the taste of champagne.

Many studies for the suitability to wine of grape varieties grown in the Cappadocia region of Turkey are available in the literature (Cabaroğlu et al., 1997; Canbaş et al., 2001). In addition, studies were carried out on the production of natural sparkling wine using the grape variety named Emir and it has been determined that high quality natural sparkling wine can be produced from this grape (Bozdogan and Canbaş, 2011). Similar studies were also carried out for the grape variety named Dimrit and it has been determined that this grape variety is suitable for the production of natural sparkling wine of acceptable quality (Bozdogan and Canbaş, 2012). However, there is no study in the literature regarding the production of natural sparkling wine using a mixture of grape varieties named Emir and Dimrit. So, the effects of these varieties on amino acid and peptide contents of wine have also not yet been determined. Whereas it may be possible to produce a quality sparkling wine using the mixture of these grape varieties. For this reason, natural sparkling wine to be produced by traditional method using the mixture of varieties named Emir and Dimrit was studied in this study. Thus, the effects of the yeast strain used in the second fermentation and the aging time on the free amino acid and peptide contents were analysed. As a result, how to produce better quality natural sparkling wine using the mixture of grape varieties named Emir and Dimrit has been suggested.

For the visual and better analysis, the data measured in the experiments were transformed into images and image processing algorithms were used. In this way, the day interval of aging time was suggested instead of precise day that significant change occurred in and more tolerant and more resistant results were produced for future studies.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

In the experiments, the varieties of white grape named Emir and black grape named Dimrit harvested in Cappadocia region (Around Urgup District of Nevsehir Province) of Turkey were used. The malt extract used to determine the total yeast number was obtained from Agar Merck (Germany). Alginic acid was obtained from Sigma (Germany). L-Aspartic acid, L-Glutamic acid, L-Asparagine, DL-Serine, L-Glutamine, L-Histidine, L-Threonine, L-Arginine, DL- Alanine, L-Tyrosine, γ - Amino butyric acid (GABA), Ethanolamine, L-Valine, DL-Methionine, DL-Tryptophan, L-Phenylalanine,

L-Isoleucine, L-Leucine and L-Lysine were obtained from Merck (USA). Methanol (HPLC grade) and Acetonitrile (HPLC grade) were purchased from Merck (Germany). All buffers and chemical solutions used in HPLC analysis were prepared with ultra-pure water (Obtained from Milli-Q Millipore device).

2.2. Arrangement of Trials

The trials were carried out in the Pilot Winery of the Çukurova University Food Engineering Department. In the production of naturally sparkling wines, the base wines obtained from a mixture of grape varieties named Emir and Dimrit in a ratio of 1: 1 were used. The fermentation in the bottle was carried out with free and immobilized yeasts. Measurement and application were carried out in three replications for each independent variable combination. Grapes were harvested after it was determined that they reached the appropriate maturity for sparkling wine production. The harvested grapes were transported to Pilot Winery in plastic cases. The grapes were squeezed in a horizontal press without being crushed then the obtained grape juice was grouped, and the juice group obtained with 50% yield as a result of the first squeezing was used for making quality champagne. The grape juice obtained was taken into the cellar at 15 °C after sulfurized at a rate of 30 mg/kg and kept in the cellar for 24 hours to remove precipitated particles. At the end of this period, the precipitate was separated, and grape juice was fermented in a 250 L stainless steel tank in the cellar at 18 °C to make its content alcoholic. Commercial *S. cerevisiae* yeast was added to the grape juice at the rate of 0.2 g/L before fermentation. The fermentation period was controlled by daily density and temperature measurements. After the fermentation was over, the wines were transferred to another fermentation tank and left for malolactic fermentation.

Malolactic fermentation was carried out with commercial lactic acid bacteria named as *Leuconostoc oenos*. Lactic acid bacteria were grown under sterile conditions and then added to wine at a rate of 1.8×10^6 cells/mL by counting in Thoma slide. Malolactic fermentation period was controlled by paper chromatography method. After these stages, the wines were transferred to another tank then 30 mg / L SO₂ was added to the wines and they left to rest in the cellar varying between 10-15 °C. The second transfer of the wines was made and an additional 30 mg/L SO₂ was added.

The wines were then transferred again and an additional 30 mg/L SO₂ was added. In order to clarify the wines, a preliminary trial of clarification has been carried out with different ratios of various clarification agents (Gelatin, Gelatin + Tannin, Bentonite, PVVP and Casein). The best result was 24 g/hL casein for Emir and 42 g/hL for Dimrit. The casein determined as a result of the preliminary trial was added to the wines and clarification was carried out. The wines were then transferred to another tank and clarified by filtration. Finally, the wines obtained from Emir and

Dimrit grapes were mixed in a ratio of 1: 1. Thus, wine was obtained with a composition (1:1) of Emir + Dimrit grapes to use it for the second fermentation.

2.3. Preparation of Inoculation Culture

The used *S. bayanus* and *S. oviformis* yeasts were grown in malt extract agar. Two colonies of the *S. bayanus* and *S. oviformis* yeasts grown in accordance with the literature were inoculated into sterile wine containing 11° alcohol and 60 g/L sugar in an Erlenmeyer flask and the wines inoculated were mixed in an orbital mixer for 72 hours at 23-25 °C and 160 rpm (Yokotsuko et al., 1997). Thereafter, the wines were centrifuged in sterile tubes at 4000 rpm for 10 minutes. As a result of this process, sterile pure water was added to the yeasts separated from the wine and again centrifuged (Eppendorf Centrifuge 5810, Germany) at 4000 rpm for 10 minutes. Finally, the yeasts were counted using thoma slide and microscope, and inoculation was carried out at 2×10^6 cells/mL per bottle.

2.4. Immobilization of Yeasts into Alginate Gel

Immobilization into alginate gel was done in accordance with the literature (Fumi et al., 1988; Ciani and Ferrera, 1998). Yeasts were immobilized in Na-alginate gel in immobilization trials. For this process, 2% Na-alginate and 0.5 M CaCl_2 solution to be used were sterilized first.

Yeasts used in immobilization were grown as described above and added to the Na-alginate solution under aseptic conditions. The prepared mixture was dropped into the sterile CaCl_2 solution at a flow rate of 2.5 mL/min from a height of 4-5 cm with the help of a peristaltic pump (Watson Marlov, England) so as to form beads with a diameter of approximately 2-3 mm or less. The beads were kept in the CaCl_2 solution for 2 hours to complete the gel formation. Then, the beads were separated from the CaCl_2 solution and washed with sterile distilled water, and 4.5 g of gel beads per 2×10^6 cells / mL were added to the wine for each bottle (Pisinelli et al., 1989).

2.5. Second Fermentation, Aging and Residue Removal

Base wines obtained from the mixture of Emir + Dimrit (1: 1) were placed in 750 ml champagne bottles then sugar and yeast were added in order to gain enough CO_2 to create 4-6 atmospheres pressure. 24 g/L sugar was added to the wine in order to create 6 atmospheres pressure in addition to *S. bayanus* and *S. oviformis* yeasts to perform fermentation since 4 g/L sugar addition creates 1 atmosphere pressure in wine. Later, the bottles were closed with a cork and left for the second fermentation at 18 °C.

During fermentation, the bottles were kept in a horizontal position. The sparkling wines were aged over the yeast following the second fermentation. After this process, the bottles were placed in special wooden racks after the yeast residue was dispersed in the wine by hand shaking. The bottles were initially placed in a horizontal position on the wooden racks the residue was then collected on the cork by moving bottles left and right every day and narrowing the angle between the wooden racks and the bottle.

In order to expel the residue from the bottle, the wire holding the cork of the bottle was removed, the cork was controlled with the index finger, the bottle was turned down first then turned up. Finally, the index finger was pulled while the bottle was at an angle of 45° with the vertical axis and the residue on the cork was discharged by the effect of pressure. The missing part was completed with its own wine. The sparkling wine was then corked and wired.

2.6. Determining the Number of Yeast

On the 1st, 20th, 40th, 90th and 180th days of aging on yeast, 50 ml samples of champagne were taken aseptically in sterile containers and 1 mL of these samples were diluted up to 10⁻⁶ in 0.25% of saline. Then, the prepared dilution was spread on the malt extract agar by spreading method. This process was carried out in two parallel. Petri dishes were incubated at 25 °C for 3-5 days. Colonies formed at the end of this period were determined (Campbell, 1988; Fleet, 1993).

Yeast count in alginate beads was made in accordance with the literature (Ciani and Ferraro, 1998). For this purpose, 2 beads were taken into test tubes and 1 mL of 2% EDTA and 1 ml of 3% NaCl solutions were added. The samples were mixed in a magnetic stirrer for 2 minutes. Then, 1mL was taken and diluted up to 10⁻⁶ in 0.25% salty water and planted on Malt Extract Agar. Petri boxes were left for 3-5 days of incubation at 25 °C and the total yeast number was determined by counting the growing colonies.

In addition, the count of the yeasts to be added to the fermentation medium was made in accordance with the literature using methylene blue under microscope (Euromex, Nederland) with the help of Thoma slide (Ciani and Ferrera, 1998).

2.7. Free Amino Acid Analysis

Free amino acids (Aspartic acid, Glutamic acid, Asparagine, Serine, Glutamine, Histidine, Threonine, Arginine, Alanine, Tyrosine, γ -amino butyric acid, Ethanolamine, Valine, Methionine, Tryptophan, Phenylalanine, Isoleucine, Leucine, Lysine) were determined in accordance with the literature (Hermosin et al., 2003; Gomez-Alonso et al., 2007).

Derivatization process was applied to the wine samples first. 30 μ L of diethyl ethoxy methylene malonate, 1.5 mL of methanol, 1 mL of wine sample, 3.5 mL of borate buffer (1M, pH 9) and 37.5 μ L of α -amino butyric acid (internal standard) are placed in a 10 mL tube and the mouth of the tube capped and left in an ultrasonic bath at room temperature for 30 minutes. After this process, the sample was filtered through a 0.45 μ m diameter filter and then injected into HPLC (Agilent 1100 model, USA) for analysis.

HPLC conditions: Operated at temperature 16 °C with 5 μ m particle size 250 mm length and 4.6 mm inner diameter ACE C18 column. Mobile phase was acetonitrile and acetate buffer (25 mM, pH = 5.8) while the flow rate was 0.9 mL / min and injected sample was amount of 50 μ L.

Gradient program

Time (Minutes)	0.0	13.0	13.5	17.0	20.0	32.0
%A	6.0	16.0	18.0	18.0	22.0	32.0
%B	94.0	84.0	82.0	82.0	78.0	68.0

Acetate buffer (pH: 5.8): To prevent microorganism growth, 2.052 g of Na-Acetate and 0.2 g of Sodium Azide were dissolved in ultrapure water and the volume was made up to 1 L with ultrapure water. Subsequently, its pH was adjusted to 5.8 with 1 N HCl.

2.8. Isolation of Peptide Fractions

Wine samples were centrifuged along 10 minutes at 7000xg and 4 °C. Then, 45 mL of wine sample was passed through Amicon brand ultrafiltration (Millipore, Bedford, USA) device to separate fractions with a molecular weight of 10000 Da and peptide fractions were isolated. Free amino acid and peptide analyses were performed on the filtrate obtained. The filtrate was kept at -20 °C until analysis.

2.9. Peptide Analysis

For peptide analysis, 1 mL was taken from the fractions below 10000 Da and taken part of fractions were subjected to acid hydrolysis with 25 μ L internal standard (1.015 g/L (0.1 M HCl) and 2 mL 6 M HCl along 24 hours (Acedo et al., 1994; Perrot et al., 2002). Then, free amino acid analysis was performed in HPLC according to the method described above for the samples subjected to acid hydrolysis. The difference of free amino acid contents before and after acid hydrolysis was calculated and the peptide amount was determined.

2.10. Analysis of Data by Transforming Them into Images

Transforming data into images is the process of normalizing all data to 0- $2^{\text{bit depth}}$ or 0-1 range, and it is a method that has recently been used in the field of food engineering. Because it provides the opportunity to determine the statistically different classes visually. In addition, it provides advantages such as offering optimal value range instead of optimal value in the data set if used with image processing algorithms. Furthermore, if modelling is difficult due to fluctuations in the data set, the image interpolation algorithm helps to better understand the experimental results (Akben, 2018; Kalkan et. al, 2019).

In this study, the transforming data into images method and histogram equalization algorithm was used together to analyse the effects of free and immobilized yeasts on the contents of amino acids and amino acids in peptides in natural sparkling wines along the aging of base wine on yeasts. Transforming the data into a grayscale image can be done as in Equation 1. In the Equation 1, D is the data set consisting of n pieces of data like as $D = \{d_1, d_2, \dots d_n\}$

$$I(m) = 2^{\text{bit depth}-1} \times \frac{D}{\max(D)} \quad (1)$$

The maximum number of $I(m)$ in the Equation-1 corresponds to the white colour and the number zero corresponds to the black colour, while the numbers in between minimum and maximum numbers of $I(m)$ correspond to the shades (tones) of gray. Also, gray tones can be matched to colours from dark red to navy blue if desired. The visually distinguishable 8 main colours (Navy Blue, Blue, Cyan, Green, Yellow, Orange, Red, Dark Red) that are formed in case the grayscale image is coloured represent each class in the data set. In this way, the values in the data set can be classified visually (Akben, 2018; Kalkan et al., 2019).

On the other hand, histogram equalization is an algorithm used to equalize the gray tones that can be considered statistically the same as the colour tone representing the maximum value of the data set to a single colour tone. Thus, it enables easier tracking of value changes caused by an independent variable in the data set (Akben, 2018). Histogram equalization was used in this study to determine the day after which the amino acid contents reached its maximum.

3. Findings and Discussion

3.1. Growth of yeasts during the second fermentation

The growth of free and immobilized yeasts during the second fermentation of the base wine prepared using mixture of Emir + Dimrit grapes is given in Figure 1. As seen in Figure 1, *S. bayanus* and *S. oviformis* yeasts in alginate beads in the immobilized yeast experiment were measured as 6.12 log cfu/ml on day 1. Then, 7.03 log cfu/ml was measured for *S. bayanus* on day 20 and 6.74 log cfu/ml was measured for *S. oviformis* on same day (20th day). For free yeast application, *S. bayanus* and *S. oviformis* yeasts were measured as 6.29 and 6.20 log cfu/ml on day 1, respectively. Free yeast growth determined in the second fermentation is similar with results in the literature (Martinez-Rodriguez et al., 2002).

In their second fermentation trial using yeasts *Saccharomyces cerevisiae* EC 1118, J, P29, IFI 473 and IFI 475, the researchers stated that the number of live yeast was initially 6 log cfu/ml in all wines, but more than this value at 20th days. Then, on the 40th day, they reported that EC 1118 yeast could not be detected in the medium, but other yeasts continued to decrease and could not be detected in the medium on the 90th day. The results of the wine trials using with Emir + Dimrit (1: 1) grapes are consistent with these results in the literature. Only free *S. oviformis* yeasts showed similar numbers of yeast from day 1 to day 20. These examples differ from the literature. On the other hand, the yeasts passing from alginate beads to fermentation medium during the second fermentation of wine made with Emir + Dimrit mixture is given in Figure 2.

As seen in Figure 2, the number of *S. bayanus* and *S. oviformis* yeasts leaking from alginate beads into the fermentation medium were 2.36 and 3.07 log cfu/ ml on day 1, then 5.51 and 5.65 log cfu/ml on day 20. Thereafter, the number of yeasts started to decrease. If a general evaluation is made, it was determined that the immobilized *S. bayanus* and *S. oviformis* yeasts were denser in the fermentation medium than the free ones. In addition, the yeast numbers of the samples started to decrease after the 20th day, decreased significantly on the 40th day and the yeasts could not be isolated from the environment on the 90th day. This situation is similar in the literature (Martinez-Rodriguez et al., 2002; Bozdogan and Canbaş, 2011).

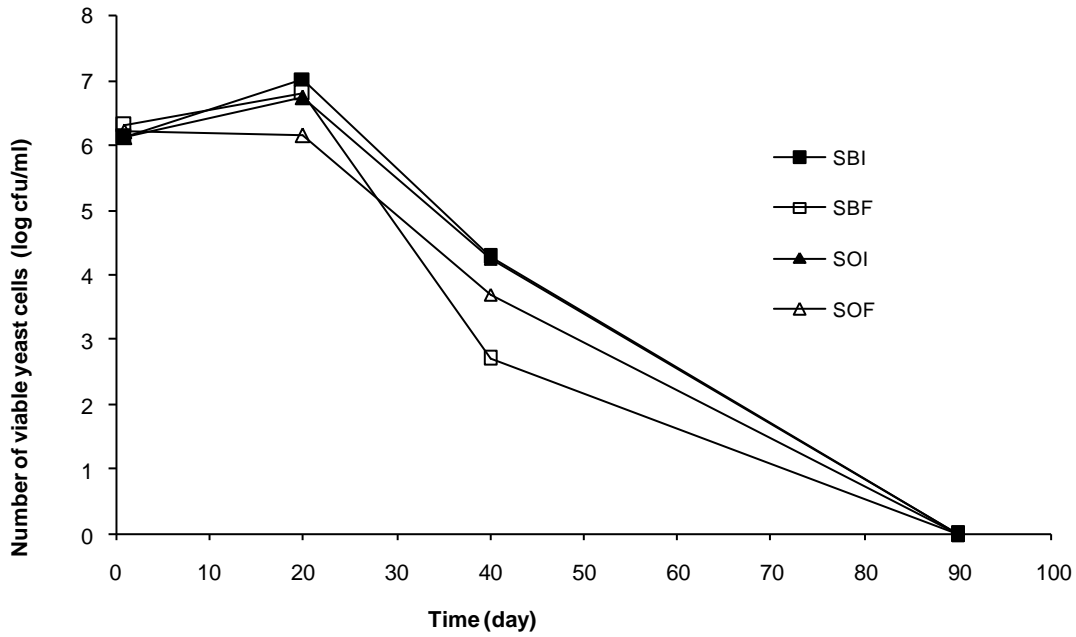


Figure 1. Growth of yeasts during second fermentation of base wine prepared using mixture of Emir + Dimrit grapes.

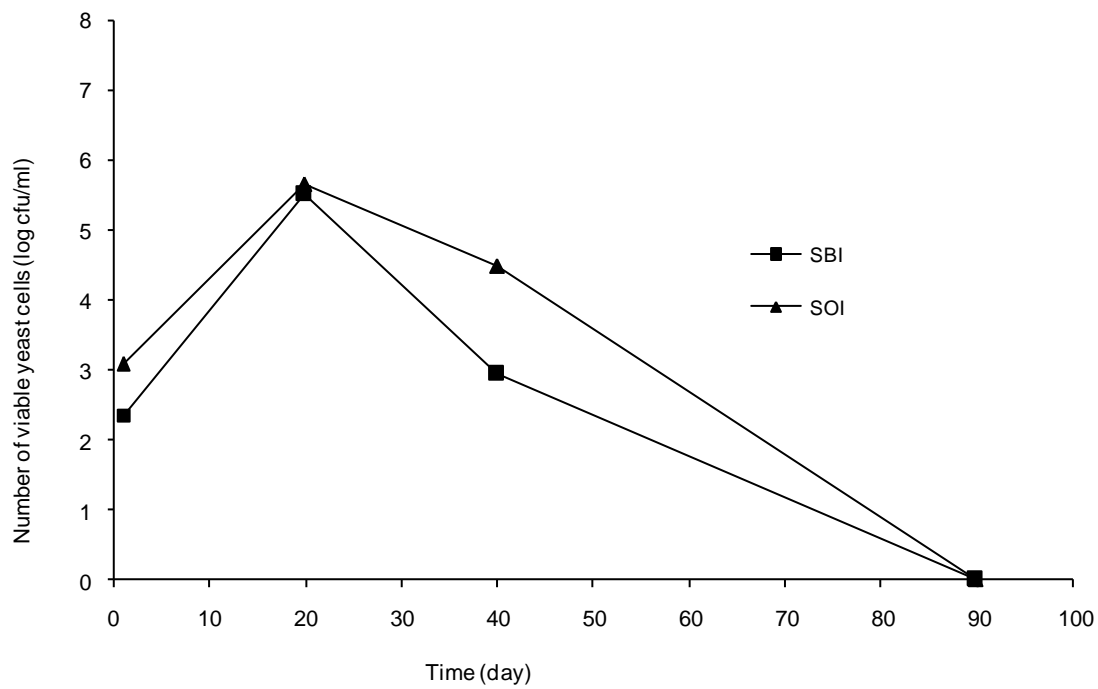


Figure 2. Yeasts passing from alginate beads to fermentation medium during the second fermentation of wine made with Emir + Dimrit mixture.

3.2. Changes in Amino Acid and Peptide Contents during the Second Fermentation

3.2.1. Analysis of Changes in Free Amino Acid Contents Depending on Yeast Type

First of all, the variation of each free amino acid depending on the yeast type and aging time was wanted to be analysed with polynomial surface models, but the determination coefficient (R^2 values) of the surface models were calculated between 0.089-0.84. Due to the insufficient determination coefficient, the measured amino acid values (raw data) were analysed by transforming them into images. Thus, the variation of each amino acid contents in wine depending on the yeast types and aging time was evaluated. Figure 3 and Figure 4 are for this purpose.

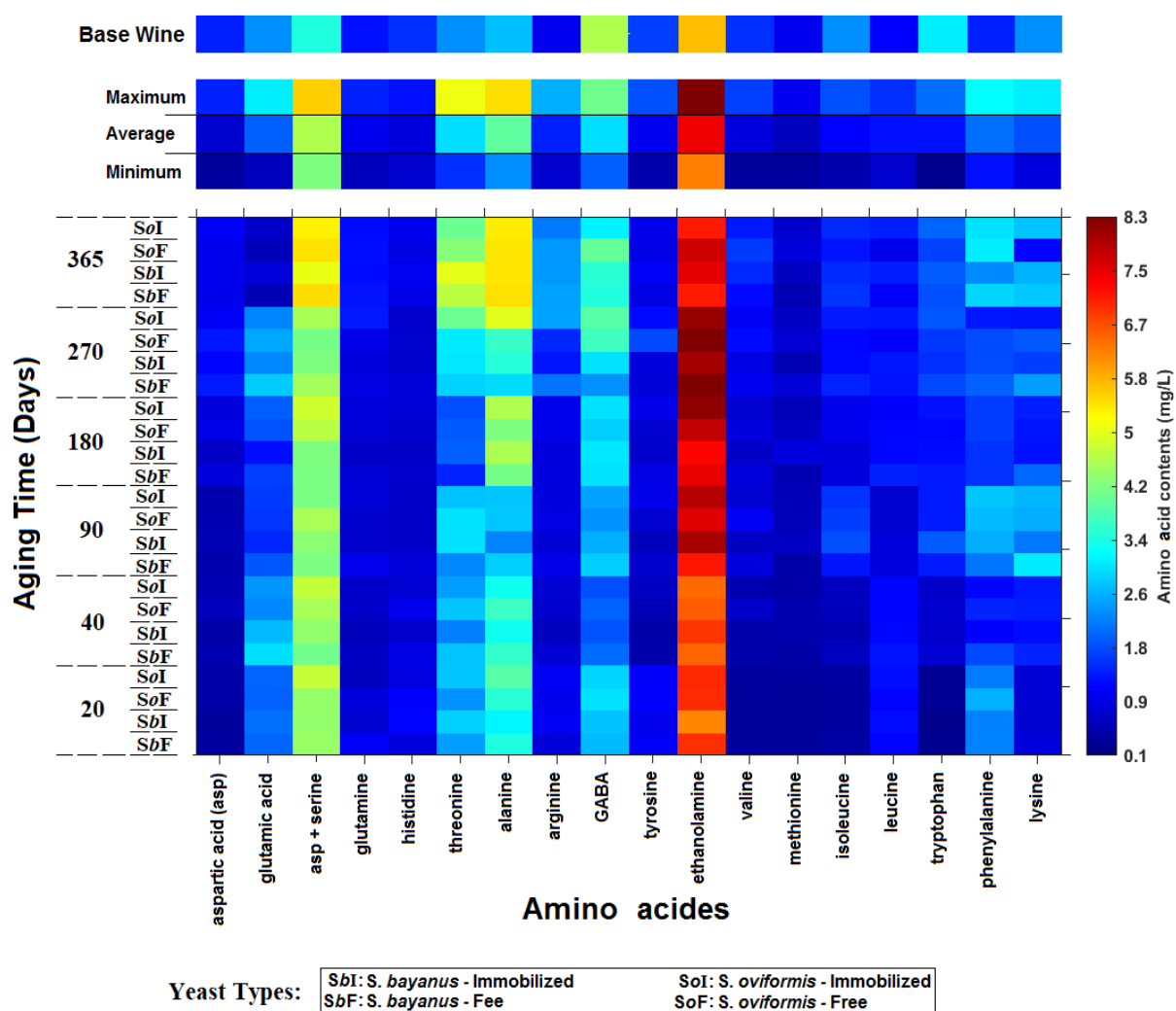


Figure 3. Image representation of the measured amino acid contents depending on aging time for all yeast types.

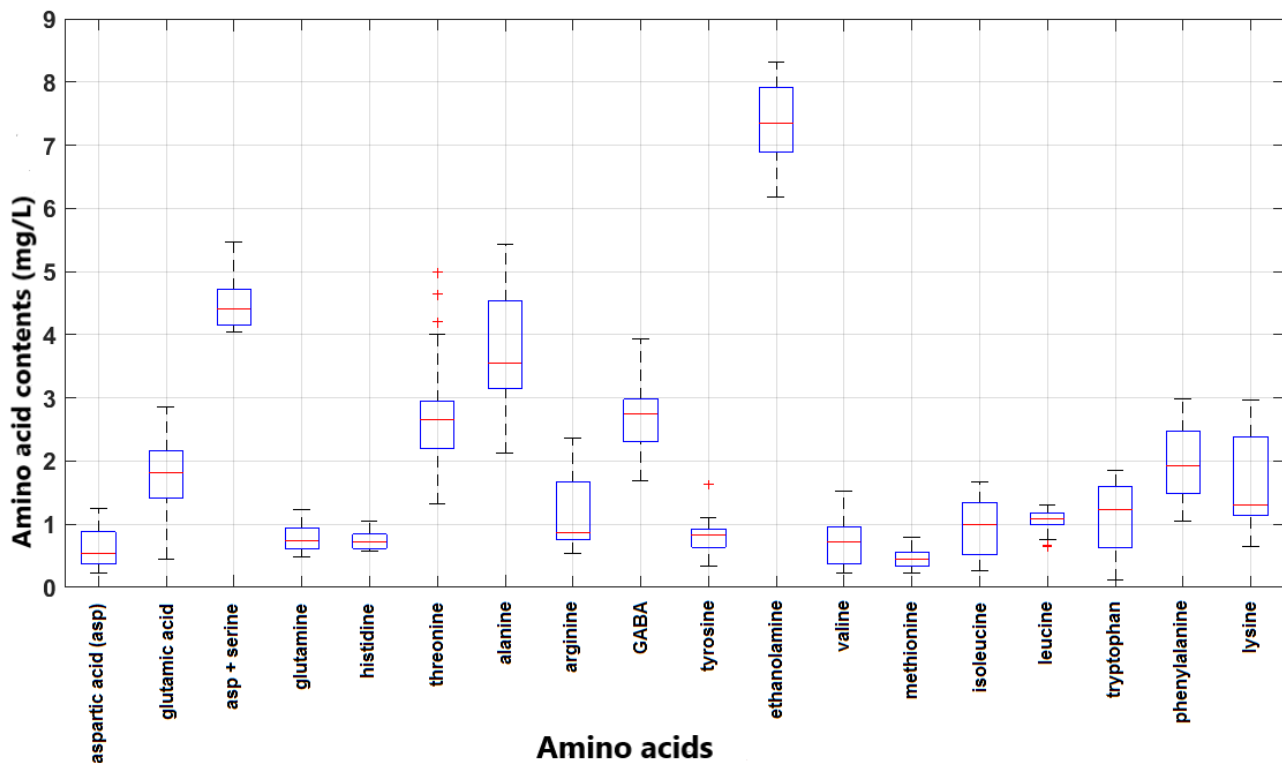


Figure 4. Box-plot graph showing the statistical coefficients of measured amino acid contents depending on day and for all yeast type

As can be seen in Figure 3, the amino acid with the highest content in wine is ethanolamine because ethanolamine values are represented in the image by the shade of orange-red colours corresponding to the change between 6.1-8.2 mg/L, and there are no other amino acids represented by these colours. In other words, ethanolamine content is the highest during the aging process for all yeast types, and this content is statistically different than other amino acid contents. Also, the contents of asp + serine, threonine, GABA and alanine wine are also statistically different from the other amino acids contents in wine as they are represented by the shade of green-yellow colours corresponding to the change between 1.2-5.5 mg/L. Therefore, they can be considered as a group with the second highest content in wine. Since the other amino acid contents are represented by blue and navy-blue shades corresponding to the change between 0.1-3 mg/L, it can be said that the contents of these amino acids in wine are in a single group consisting of two sub-groups that cannot be clearly separated from each other.

In summary, the contents of amino acids in wine during the aging time were classified into 3 main groups, which differ statistically significant from each other. In addition, if a group is formed for each color, it should be kept in mind that the contents of amino acids in wine can be divided into 8 groups that have a statistically significant difference from each other. However, distinguishing statistically these 8 groups from each other will be more difficult as compared to the 3 main groups that defined above. These analyses and related evaluations can also be seen from the statistical box-plots in Figure 4.

As shown in Figure 3, the colours representing the maximum content values obtained for asp, glutamine, histidine, GABA, tyrosine, valine, methionine, isolaine, laxine, triiopane are almost the same as those representing the amino acid contents of the base wine. This means that the content values measured at the end of the aging process for the specified amino acids are lower or not different than the content values of the amino acids in base wine. The colours representing the measured maximum content values for other amino acids are different from the representative colours for the base wine.

During the production of champagne, 4 yeast types (*S. bayanus*-Free, *S. bayanus*-Immobilized, *S. oviformis*-Free, *S. oviformis*-Immobilized) were tested. If so, the change in amino acid content for each of these 4 types can be modelled as a function of day then be analysed. Thus, a decision can be made about the changes in the number of amino acids caused by each yeast type, during the aging process. Therefore, the measured values of amino acids were averaged during the aging process and polynomial models were obtained for 4 yeast types. In Table 1 and Figure 5, polynomial models obtained for each yeast type and statistical coefficients of the models are shown.

Table 1. Aging Time dependent model equations of average amino acid contents for each yeast-cell combination

Yeast	Cells	Fit			
<i>S. bayanus</i>	Free	$4.18 \times 10^{-6} \times t^2 - 0.0005382 \times t + 1.674$			
		R²	Adj-R²	SSE	RMSE
		0.9612	0.9353	0.0172	0.0758
<i>S. bayanus</i>	Immobilized	$6.174 \times 10^{-6} \times t^2 - 0.0001097 \times t + 1.646$			
		R²	Adj-R²	SSE	RMSE
		0.9051	0.8419	0.0506	0.1299
<i>S. oviformus</i>	Free	$2.539 \times 10^{-6} \times t^2 - 0.001025 \times t + 1.687$			
		R²	Adj-R²	SSE	RMSE
		0.9416	0.9027	0.0229	0.0874
<i>S. oviformus</i>	Immobilized	$-6.467 \times 10^{-7} \times t^2 - 0.0002489 \times t + 1.608$			

R^2	Adj- R^2	SSE	RMSE
0.9154	0.8590	0.0436	0.1206

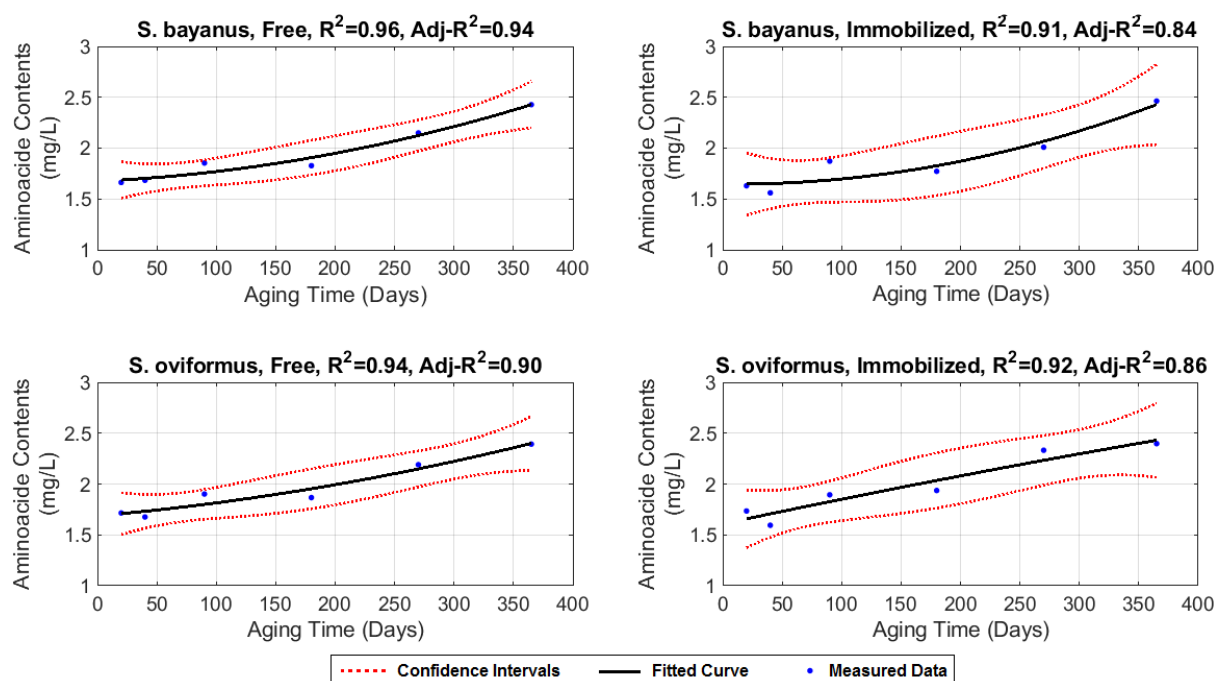


Figure 5. Polynomial models obtained for each yeast type

In all polynomial models in Figure 5, amino acid contents start from 1.65 and increase up to 2.43 mg / L at the end of the aging time. Since the average amino acid content in base wine is 2.115 mg / L, it is seen that more amino acids are obtained at the end of the aging time for all 4 yeast types compared to the base wine. In other words, the average amino acid content of the basic wine has increased at the end of the aging time for all 4 yeast types. According to the models, for the 4 yeast types, the aging days when the average amino acid content exceeds the amino acid content of the base wine are 269, 287, 258 and 218, respectively. However, Adj- R^2 values of the models in Figure 5 are between 0.84-0.94 and it cannot be said that the fit of the models is very good. Therefore, it would be more correct to make the analysis with image interpolation to make the determined values more accurate. Moreover, polynomial model equations present a single value for each critical aging day (It cannot collect the values that do not have statistically significant difference in a single group) and reduce the universality of the result. For these reasons, the measured values were first transformed into images in order to produce tolerant (universal) result, and these images were enlarged by bicubic interpolation. Thereafter, the days providing the highest amino acid content and the amount of amino acid content obtained in that days were determined by applying the histogram equalization algorithm to the images.

Figure 6 shows the representation of the average amino acid contents measured depending on the days for each yeast type with images enlarged by bicubic interpolation and the histogram equalization applied forms of these images. The enlarged image representations show the day-dependent change in amino acid content, and their histogram equalization applied forms determine the day intervals at which the maximum amino acid content is achieved.

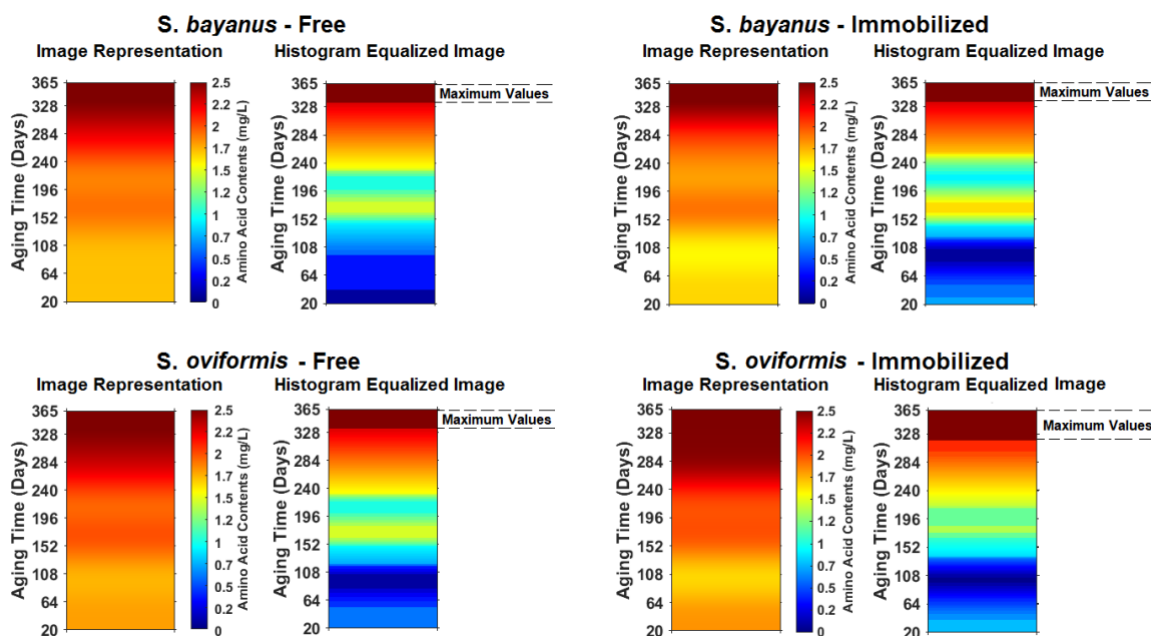


Figure 6. Representation of amino acid contents measured for each yeast type with magnified images and histogram equalization applied form of these images

As can be seen from Figure 6, while there are fluctuations (ups / downs) in amino acid content in the first 220 days of the aging period, only an increase is observed in other time intervals. The low coefficient of fit of the models in Figure 5 is also due to these fluctuations. Hence, the analysis with the image models in Figure 6 is more accurate.

The values represented in dark red in the histogram equalization applied images in Figure 6 are the highest values with no statistically significant difference between the amino acid contents. These values are in the range of 2.30-2.43 mg / L and were achieved for *S. bayanus*-Free, *S. bayanus*-Immobilized and *S. oviformis*-Free on days 335-365, while for *S. oviformis*-Immobilized on days 317-365. In other words, *S. oviformis*-Immobilized yeast provided the same amino acid content in a shorter time. However, on days that are indicated in dark red on the histogram equalized images and which statistically give almost the maximum number of amino acids, the amino acid contents obtained for all yeasts (2.30-2.43 mg/L) are higher than the amino acid content of the base wine (2.115 mg/L).

As a result, all the findings for amino acid content are given below for clarity.

- According to the analysis for each amino acid, the amino acid content was divided into 3 main groups in quantity. In these groups, ethanolamine with the highest amino acid content, the second highest asp + serine, alanine, teronine and GABA, and the third group are the others.
- The average amino acid content for all yeasts varied between 1.6-2.4 mg/L depending on the aging day.
- Although the average amino acid content varies according to the yeast type, amino acid contents exceeded the average amino acid content (2.115 mg/L) of the base wine on days 218-287 of aging time.
- The highest amino acid contents obtained using *S. bayanus*-Free, *S. bayanus*-Immobilized, *S. oviformis*-Free yeasts were achieved on days 335-365, while for *S. oviformis*-Immobilized yeast on day 317.

One of the striking findings is that the amino acid content fluctuates in the first 220 days of aging time. The reason for this is supported by studies in the literature. In these studies, the changes in nitrogenous compounds during aging the wines on yeast were examined and it was found that the amino acid contents decreased on the 20th day. It has been reported that this situation can be explained by the yeast's use of amino acids in some metabolic events (Martinez-Rodriquez et al., 2002). In another study about the occurrence of this fluctuation, it was emphasized that in the first 90 days of aging on yeast, the free amino acid contents decreased because yeasts use most amino acids for their reproduction (Martinez-Rodriquez and Polo, 2000; Feulliat and Charpentier, 1982; Leroy et al., 1990; Herraiz and Ough, 1993). In another study, it was reported that during the second fermentation of the naturally sparkling wine obtained using Emir grapes, most of the free amino acids decreased between the 20th and 40th days of fermentation (Bozdogan and Canbaş, 2011). In another study examining the effect of wine aging process on amino acid and peptide contents, it was reported that the amino acid contents decreased after the 9th month of the aging time (Moreno-Arribas et al., 1998; Martinez-Rodriquez et al., 2002). As can be seen, literature studies are consistent with the fluctuations of the amino acid content in the first 220 days determined in this study.

Another finding obtained in the study is that the measured amino acid contents between 218-287 days of the aging period began to be higher than the amino acid content of the base wine. This finding is supported by another study in the literature. In the relevant literature study, it was determined that free amino acids pass into the wine medium in the first 6th and 12th months in aging period that lasts for 4 years (Martinez-Rodriquez and Polo, 2000). The consistency the results of literature studies and current study, show that the results of current study are also correct.

3.2.2. Analysis of Changes in Amino Acid Contents in Peptides Depending on Yeast Type

The analysis performed in the first step for free amino acids was repeated for the amino acids in the peptides in the second step of the study. The image representation of the amino acid contents measured in the peptides can be seen in Figure 7.

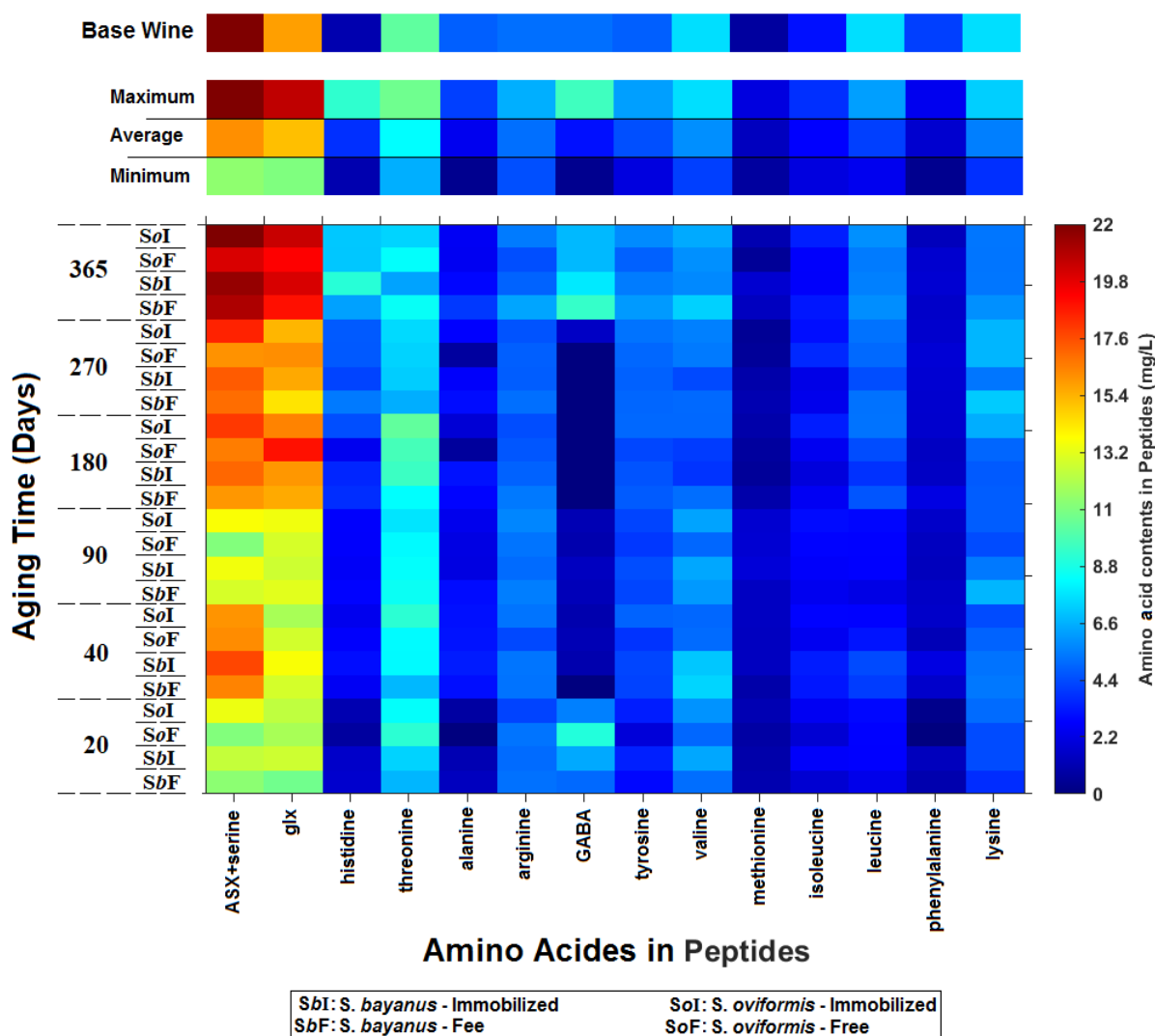


Figure 7. Image representation of the measured amino acid contents in peptides depending on aging time for all yeast types

As seen in Figure 7, the most abundant amino acids in terms of content are ASX + serine and glx, because the values of these amino acids are represented by the shadows of yellow-green-orange-red colours corresponding to the change between 1.5 and 22 mg/L and there are no other amino acids represented by these colours. In other words, the amino acids with the highest content in wine during the aging process are ASX + serine and glx and their content values are statistically significantly different from those of other amino acids. However, since the values of the threonine are represented by the shade of turquoise-green colours corresponding to the change between 6.3-10.4 mg/L, the

amount of content is statistically significantly higher than the remaining amino acids and can be considered as second group. Since the content amount of the remaining amino acids is represented by blue and dark blue tones corresponding to the change between 0-6.3 mg / L, the content amounts can be said to be in a single group.

In summary, the number of amino acids in the peptides were collected in 3 main groups with statistically significant differences from each other. These analyses can also be seen from the Box-plot chart in Figure 8.

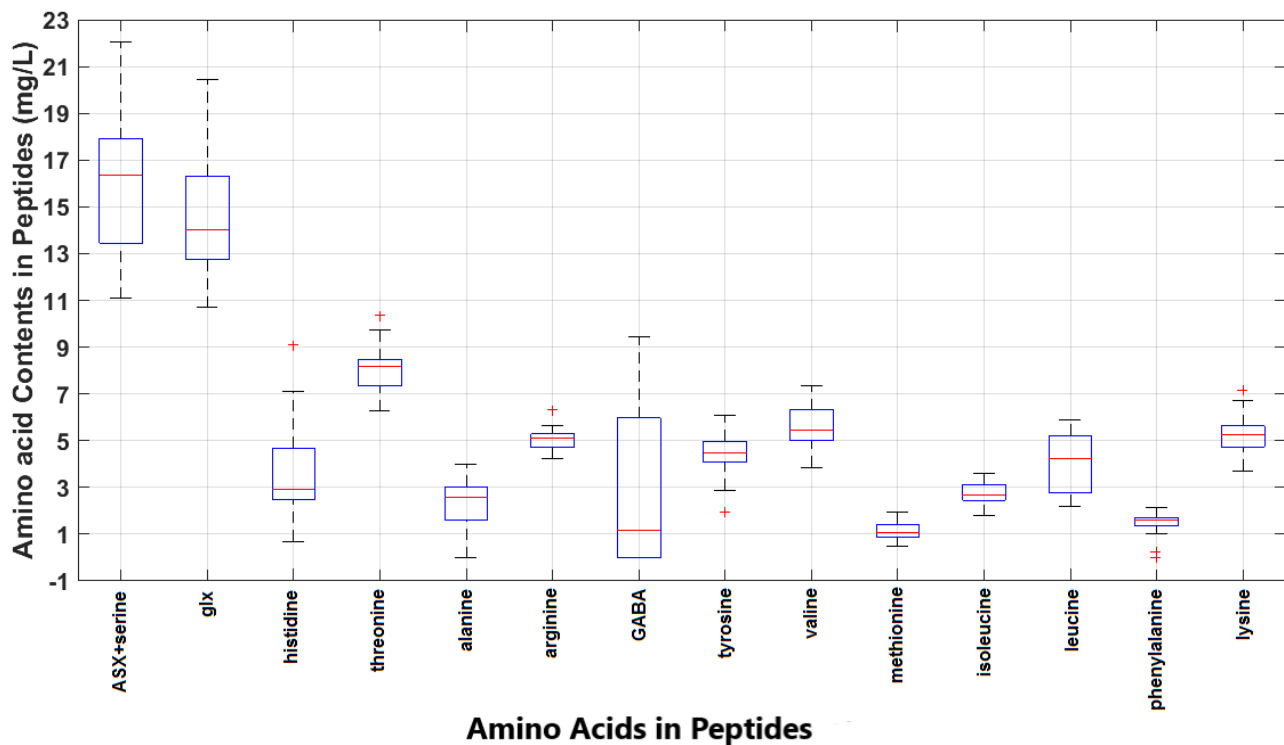


Figure 8. Box-plot graph showing the statistical coefficients of measured amino acid contents in peptides depending on day and yeast type

As shown in Figure 7, the colours representing the maximum content values obtained for asp, ASX + serine, teronine, alanine, valine, isoleucine, leucine, penylalanine and lysine are almost the same as those representing the amino acid contents of the base wine. The colours representing the maximum values measured for other amino acids are different from the colours representing the maximum values of amino acids in the base wine. In other words, while the aging process increased the number of amino acids glx, histidine, arginine, GABA, tyrosine and methylonine, it decreased or did not change the number of other amino acids.

In the study, it was tried to obtain polynomial models for each yeast type for analysis by using polynomial models as in Table 1 and Figure 5. The obtained polynomial models and the statistical coefficients of these models are shown in Table 2 and Figure 9.

Table 2. Aging Time dependent model equations of amino acid contents in peptides for each yeast-cell combination

Yeast	Cells	Fit			
<i>S. bayanus</i>	Free	$2.214 \times 10^{-5} \times t^2 - 0.001204 \times t + 4.83$			
		R²	Adj-R²	SSE	RMSE
		0.8599	0.7665	0.8263	0.5248
<i>S. bayanus</i>	Immobilized	$3.332 \times 10^{-5} \times t^2 - 0.00709 \times t + 5.502$			
		R²	Adj-R²	SSE	RMSE
		0.8094	0.6823	0.6658	0.4711
<i>S. oviformis</i>	Free	$1.663 \times 10^{-5} \times t^2 - 0.0007618 \times t + 4.768$			
		R²	Adj-R²	SSE	RMSE
		0.9277	0.8795	0.2344	0.2795
<i>S. oviformis</i>	Immobilized	$9.272 \times 10^{-6} \times t^2 + 0.002713 \times t + 4.86$			
		R²	Adj-R²	SSE	RMSE
		0.9280	0.8800	0.2822	0.3067

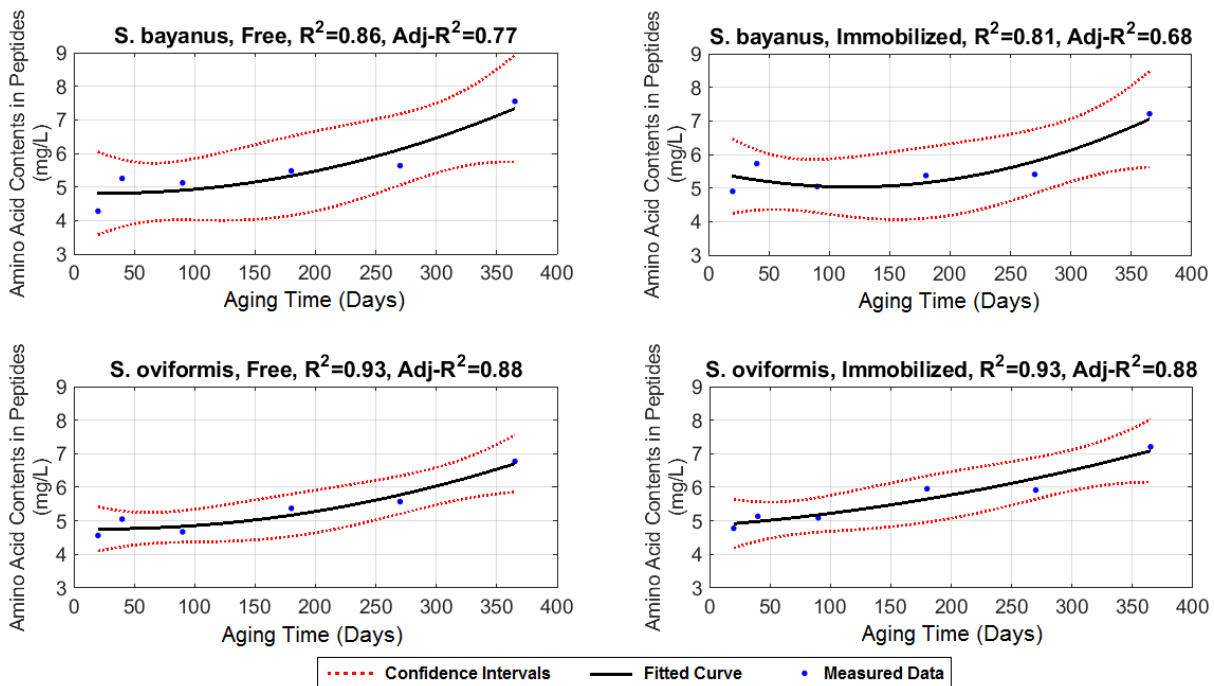


Figure 9. Polynomial models obtained for each yeast

In the polynomial models in Figure 9, the average amino acid contents in peptides changed between 4.28-7.55, 4.90-7.21, 4.56-6.77 and 4.77-7.20 mg / L for all yeasts, respectively but this is different from the Figure 3 because the change interval for each yeast is not the same. As compared to the average amino acid content (6.945 mg/L) in the base wine, it appears that slightly more amino

acids were obtained at the end of aging time for yeasts, except for *S. oviformis*-Free. According to the models, the days when the average amino acid contents exceed the average amino acid content in the base wine for *S. bayanus*-Free, *S. bayanus*-Immobilized, *S. oviformis*-Immobilized are 338, 359 and 351 days, respectively. However, Adj-R² values of the models in Figure 9 are between 0.68-0.88 and it cannot be said that the fit of the models is very good. Therefore, the measured values were first transformed into images and these images were enlarged by bicubic interpolation.

Then, histogram equalization was applied to the acquired images. Figure 10 shows the representation of the amino acid content measured for each yeast type with images enlarged by bicubic interpolation and the histogram equalization applied forms of these images.

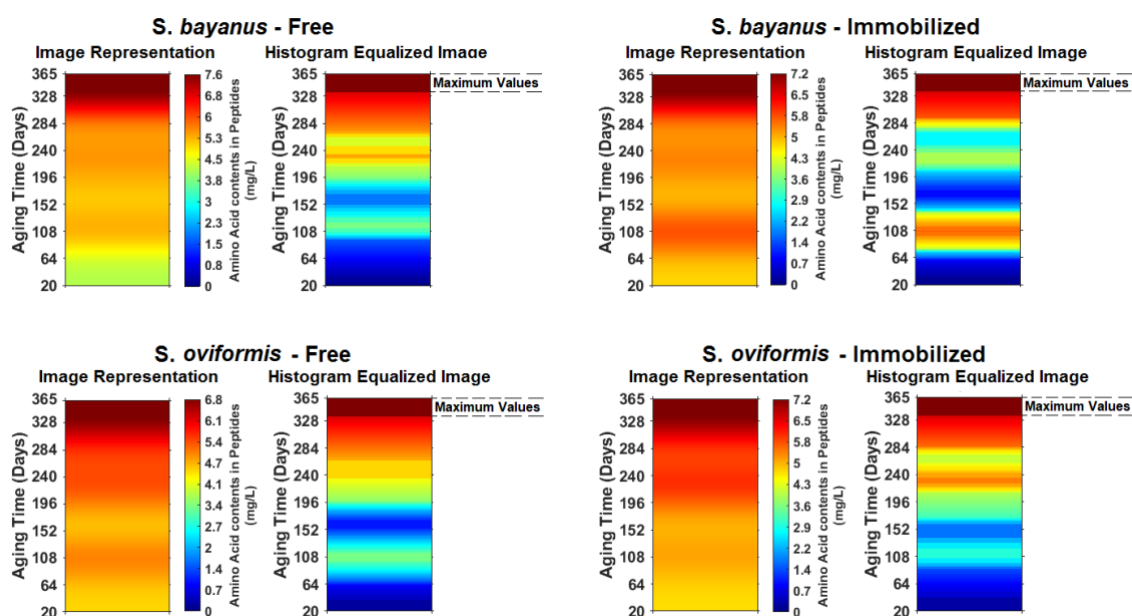


Figure 10. Representation of amino acid contents measured for each yeast with magnified images and histogram equalization applied form of these images

As can be seen from Figure 10, while there are fluctuations in the amino acid contents of peptides in the first 280 days of the maturation period, an increase is observed in other time intervals. This situation is similar to the change in Figure 6. The values represented with dark red in the histogram equalization applied images in Figure 10 are represent the values that do not have a statistically significant difference between the amino acid contents. These values occurred on days between 338 and 365 when the highest amino acid contents were achieved on average. In other words, the maximum amino acid contents were obtained from the 338th day for all yeasts. The highest amino acid contents determined in the specified day intervals are 6.95-7.55, 6.95-7.21, 6.3-6.77, 6.95-7.20 for *S. bayanus*-Free, *S. bayanus*-Immobilized, *S. oviformis*-Free, *S. oviformis*-Immobilized yeasts, respectively. Accordingly, the highest amino acid content was provided by *S. bayanus*-Free yeast,

and other yeasts, except for *S. oviformis*-Free yeast has provided more amino acid contents than the amino acid content (6.95 mg/L) of the base wine. As a result, all the findings for the amino acid contents in peptides are given below for clarity.

- As a result of the analysis for each amino acid, the content values were divided into 3 main groups. Among these groups, the highest amino acid content obtained is asx + serine and glx, the second is threonine and the third group is the others.

- Average amino acid contents obtained for the *S. bayanus*-Free, *S. bayanus*-Immobilized, *S. oviformis*-Free, *S. oviformis*-Immobilized yeasts were 7.55, 7.21, 6.77 and 7.20 mg/L, respectively, at the end of aging time.

- For *S. bayanus*-Free, *S. bayanus*-Immobilized, *S. oviformis*-Immobilized, the days when the average of amino acid contents exceed the average of amino acid contents of the base wine are days 338, 359 and 351, respectively. On the other hand, *S. oviformis*-Free caused to occur lower amino acid content than the average amino acid content (6.95 mg/L) of the basic wine at the end of the aging process.

- The highest average amino acid contents for all yeasts were achieved between days 338-365.

- Yeasts used more amino acids in peptides.

These findings about amino acids in peptides are also consistent with the findings in the literature. For example, in the literature, researchers have reported that there are fluctuations in number of peptides during the aging period, and this is due to the prolonged autolysis. In another study, it was determined that during the aging process of natural sparkling wine production made with Dimrit grape, amino acids in peptides decreased on the 20th day and then fluctuated until the 365th day (Bozdogan and Canbaş, 2012). Likewise, in another study, it was stated that the amino acid content in peptides fluctuated in the first 280 days. The finding obtained in the current study that yeasts benefit more from amino acids in peptides is also supported by studies in the literature. For example, in a study (Hidalgo et al., 2004) on the production of pink sparkling wine reported that yeasts used peptides more than amino acids during the second fermentation. The reason for this can be explained by a literature study that reports the breakdown and release of peptides in wines are due to the action of protease enzymes (Moreno-Arribas et al., 1996). Moreover, the release of peptides due to intracellular protease activity during fermentation also explains this situation (Alexandre et al., 2001).

In this study, it was determined that the contents of amino acids in the peptides reached the maximum between the 338-365 days. In a study in the literature, the change in the contents of peptides during the aging process of wines was examined and it was determined that the contents of peptides

reached the highest level in the 12th and 15th months of aging time (Bartolome et al., 1997). This result in the literature is similar to the result of the current study.

However, the finding of current study related to the effect of yeast strain and aging time on peptide content is striking. Similarly, in a study in the literature, it was determined that the effect of yeast strain and aging time on peptide content in the second fermentation was significant ($p < 0.05$) (Martinez-Rodriquez et al., 2002).

3.3. Foam sensory characteristics

The wine is considered to be of good quality if there is a lot of foam in the sparkling wine and it covers the entire surface of the wine. On the surface of this kind of bubbling wine, foam forms ring-shaped structure, gas bubbles are small, and foaming is fast (Gallart et al., 2004). Sensory evaluation results of sparkling wines are given in Table 3. The wines received acceptable sensory scores. In particular, sparkling wines produced with immobilized yeast appear to score higher. Hidalgo et al (2004) investigated the effects of different yeasts used in the second fermentation stage of sparkling wine production on the sensory properties of wines. The researchers stated that the sparkling wines obtained received acceptable scores in terms of sensory properties.

Table 3. Foam sensory characteristics of the sparkling wines at 12 months of aging time with yeast

Visual attributes	SBF	SBI	SOF	SOI
Initial Foam (1:Poor, 2:Normal, 3:Abundant)	2.2 ^c ±0.3	2.6 ^b ±0.2	2.2 ^c ±0.3	3.0 ^a ±0.0
Foam area (1:None,2:Partial,3:Total)	2.0 ^b ±0.0	2.6 ^a ±0.2	2.2 ^b ±0.3	2.7 ^a ±0.3
Foam collar(1:None,2:Partial,3:Total)	1.9 ^b ±0.5	2.5 ^a ±0.4	1.9 ^b ±0.5	3.0 ^a ±0.0
Bubble size(1:Large,2:medium,3:Small)	2.2 ^b ±0.4	2.7 ^a ±0.4	2.0 ^b ±0.0	2.7 ^a ±0.4
Effervescence speed(1:Slow,2:Medium,3:Slow)	1.7 ^b ±0.4	2.5 ^a ±0.6	1.9 ^b ±0.4	2.8 ^a ±0.3
Origin of bubbles(1:Glass wall,2:Glass wall and wine)	1.3 ^c ±0.3	1.9 ^{ab} ±0.2	1.5 ^{bc} ±0.5	2.0 ^a ±0.0
Number of bubble chains (1:Lower than five, 2: Higher than five)	1.2 ^b ±0.2	1.4 ^{ab} ±0.2	1.2 ^b ±0.3	1.7 ^a ±0.4
Global Impression(1:Bad,2:Acceptable,3:Good,4: Very good)	2.5 ^c ±0.2	3.1 ^b ±0.3	2.9 ^{bc} ±0.5	3.7 ^a ±0.3

In the same row, the difference between the values indicated by different letters is statistically significant. ($p < 0.05$).

4. Conclusions and Recommendations

In the study, natural sparkling wine was produced using a mixture (1:1) of Emir and Dimrit grapes, and the effects of free and immobilized yeast strains (*S. bayanus* and *S. oviformis*) that used in the second fermentation stage on free amino acid and peptide contents during the aging period were analysed. There is no significant difference between natural sparkling wines obtained using free and immobilized yeasts in terms of amino acids and amino acids in peptides. However, it should be noted that the process of removing yeast residue onto the cork that requires more labor is easier if immobilized yeast is used. On days between 335 and 365 of the aging period on yeast, the free amino acid content in natural sparkling wines was higher than that of the basic wine and reached its highest level. This result confirms how important the 1-year (365 days) aging period is mandatory for the production in the Champagne region. In addition, the results obtained also show that high quality natural sparkling wine can be produced using the mixture of Emir + Dimrit grapes. Sparkling wines with Emir+Dimrit blend (1:1) received acceptable sensory scores. It can be said that the foam quality of the immobilized yeasts used in the second fermentation stage is better than the free ones and that the Emir+Dimirt blend (1:1) suitable for the production of natural sparkling wine.

Acknowledgments

Researchers would like to thank The Scientific and Technical Research Council of Turkey for their financial support (Project No: TUBITAK - TOVAG 3391).

Authors' Contributions

The contribution of the authors to the article should be indicated. (For example: All authors contributed equally to the study.)

Statement of Conflicts of Interest

No potential conflict of interest was reported by the authors.

Statement of Research and Publication Ethics

The author declares that this study complies with Research and Publication Ethics.

References

- Acedo, M.I., Pueyo, E., and Polo, M.C. (1994). Preliminary Studies on Peptides in Wine by HPLC. *American Journal of Enology and Viticulture*, 45: 167-172.
- Akben, S.B. (2018). A new approach to reduce the effects of omitted minor variables on food engineering experiments: Transforming the variable-result interaction into image. *Measurement*, doi: 10.1016/j.measurement.2017.09.035.
- Alexandra, H., Heintz, D., Chassagne, D., Guilloux-Benatier, M., Charpentier, and Feulliat, M. (2001). Protease A activity and nitrogen fractions released during alcoholic fermentation and autolysis in enological conditions. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, doi: 10.1038/sj.jim.7000119.
- Bartolome, B., Moreno-Arribas, V., Pueyo, E., and Polo, M.C. (1997). On-Line HPLC Photodiode Array Detection and OPA Derivatization for Partial Identification of Small Peptides from White Wine. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, doi: 10.1021/jf9700844.
- Benucci, I., Cerreti, M., Maresca, D., Mauriello, G., and Esti, M. (2019). Yeast cells in double layer calcium alginate-chitosan microcapsules for sparkling wine production. *Food Chemistry*, doi: 10.1016/j.foodchem.2019.125174.
- Bozdogan, A., and Canbas, A. (2011). Influence of yeast strain, immobilisation and ageing time on the changes of free amino acids and amino acids in peptides in bottle-fermented sparkling wines obtained from *Vitis vinifera* cv. Emir. *International Journal of Food Science and Technology*, doi:10.1111/j.1365-2621.2011.02550.x.
- Bozdoğan, A., and Canbaş, A. (2012). The effect of yeast strain, immobilisation, and ageing time on the amount of free amino acids and amino acids in peptides of sparkling wines obtained from cv. Dimrit grapes. *South African Journal of Enology and Viticulture*, doi:10.21548/33-2-1124.
- Cabaroğlu, T., Canbaş, A., Baumes, R., Bayonove, C., Lepoutre, J. P., and Günata, Z. (1997). Aroma composition of a white wine of *Vitis vinifera* L. cv. Emir as affected by skin contact. *Journal of Food Science*, doi: 10.1111/j.1365-2621.1997.tb15434.x
- Campbell, I. (1988). Culture, storage, isolation and identification of yeasts. In *Yeast-A Practical Approach*, eds. I., Campbell, F.G. Priest Champman and Hall, London, 111p.
- Canbaş, A., Cabaroğlu, T., Erten, H., Nurgel, C., and Selli, S. (2001). Önemli Bazı Üzüm Çeşitlerinin Şaraplık Değerlerinin Belirlenmesi ve Elde Edilen Şarapların Kalitesinin Geliştirilmesi Üzerine Araştırmalar. TÜBİTAK-TOGTAK/TARP-1858.
- Ciani, M., and Ferrera, L. (1998). Combined use of Immobilized *Candida stellata* cells and *Saccharomyces cerevisiae* to Improve the Quality of Wines. *Journal of Applied Microbiology*, doi:10.1046/j.1365-2672.1998.00485.x.
- Culbert, J. A., McRae, J. M., Condé, B. C., Schmidtke, L. M., Nicholson, E. L., Smith, P. A., and Wilkinson, K.L. (2017). Influence of production method on the chemical composition, foaming properties, and quality of Australian carbonated and sparkling white wines. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, doi:10.1021/acs.jafc.6b05678.
- Feulliat, M., and Charpentier, C. (1982). Autolysis of Yeasts in Champagne. *American Journal of Enology and Viticulture*, 33: 6-13.
- Fidan, I., and Anlı, E. (2000). Özel Şaraplar. Kavaklıdere eğitim Yayınları, Ankara, 206p.
- Fleet, G.H., and Heard, G.M. (1993). Yeasts Growth During Fermentation. In *Wine Microbiology and Biotechnology*, ed: Fleet, G.M., Harwood Academic Press. Chur, Switzerland, pp:27-54.
- Fumi, D.M., Trioli, G., Colombi, M.G., and Colagrande, O. (1988). Immobilization of *S. cerevisiae* in Calcium Alginate and Its Application to Bottle-Fermented Sparkling Wine Production. *American Journal of Enology and Viticulture*, 39: 267-272.
- Gomez-Alonso, S., Hermosin-Gutierrez, I., and Garcia-Romero, E. (2007). Simultaneous HPLC Analysis of Biogenic Amines, Amino Acids, and Ammonium Ion as Aminoenone Derivatives in Wine and Beer Samples. *Journal of Science Food and Agriculture*, doi:10.1021/jf062820m.
- Hermosin, I., Rosa, M.C., and Dolores Cabezudo, M. (2003). Free Amino Acid Composition and Botanical Origin of Honey. *Food Chemistry*, doi: 10.1016/S0308-8146(03)00089-X.
- Herraiz, T., and Ough, C.S. (1993). Formation of Ethyl Esters of Amino acids by Yeasts During the Alcoholic Fermentation of Grape Juice. *American Journal of Enology and Viticulture*, 44: 41-48.

- Hidalgo, P., Pueyo, E., Pozo-Bayon, M.A., Martinez-Rodriguez, A.J., Martin-Alvarez, P., and Polo, M.C. (2004). Sensory and Analytical Study of Rose Sparkling Wines Manufactured by Second Fermentation in the Bottle. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, doi:10.1021/jf040151b.
- Kalkan, S., Akben, S. B., and Çanga, D. (2019). Modeling the microbiological effect of essential peppermint oil-supplemented chitosan film on Bonito fish (*Sarda sarda*) fillets and analysis via image processing methods. *Journal of Food Process Engineering*, doi:10.1111/jfpe.13232.
- Leroy, M.J., Charpentier, Duteurtre, B., Feulliat, and M., Charpentier, C. (1990). Yeast Autolysis During Champagne Aging. *American Journal of Enology and Viticulture*, 41: 21-28.
- Marchall, R., Liger-Belair, B. G., Berthier, L., Brissonet, F., Jeander, P., Maujean, A., Robillard, B., Morard, C., Viaux, L., and Duteurtre, B. (1999). Recent Progress in the Understanding of Champagne Wine Foaming Properties, ed: Campbell, G.M. Webb, C. Pandiella, S.S. Irenjan, K.N., Bubbles In Food. Eagen Pres, St. Paul, Minnesota, USA, 305-313.
- Martinez-Rodriguez, A., and Polo, M.C. (2000). Enological aspects of yeast autolysis, Book Chapter, *Recent Research Development Microbiology*, 4: 285-301.
- Martinez-Rodriguez, A., Carrascosa, A, V., Martin-Alvarez, P.J., Moreno-Arribas, V., and Polo, M.C. (2002). Influence Of The Yeast Strain On The Changes Of The Amino Acids, Peptides And Proteins During Sparkling Wine Production By The Traditional Method. *Journal of Industry Microbiology and Biotechnology*, doi:10.1038/sj.jim.7000323.
- Martinez-Rodriguez, A.J., and Polo, M.C. (2003). Effect Of The Additon Of The Tirage Solution On The Nitrogen Composition And Sensory Quality of Sparkling Wines. *Food Chemistry*, doi:10.1016/S0308-8146(02)00455-7.
- Moreno-Arribas, V., Pueyo, E., Polo, M.C., and Martin-Alvarez, P.J. (1998). Changes in the Amino Acid Composition of the Different Nitrogenous Fractions during the Aging of Wine with Yeasts. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, doi: 10.1021/jf9803381.
- Moreno-Arribas, V., Pueyo, E., and Polo, M.C. (1996). Peptides in Musts and Wines. Changes during the Manufacture of Cavas (Sparkling Wines). *Journal of Agricultural Food Chemistry*, doi:10.1021/jf960307a.
- Perrot, L., Charpentier, M., Charpentier, C., Feulliat, M., and Chassagne, D. (2002). Yeast adapted to Wine : Nitrogen compounds released during induced autolysis in a model wine. *Journal of Industry Microbiology and Biotechnology*, doi:10.1038/sj.jim.7000291.
- Pisinelli, A. M., Favati, F., Crapisi, A., Borin, G., and Spettolli, P. (1989). The Free Amino Acid Content of Bottle-Fermented Moscato Bianco Sparkling Wine by Immobilized Yeasts. *Yeast*, 5: 113-116.
- Ribereau-Gayon, P., Dubourdieau, D., Doneche, B., and Lonvaud, A. (2000). The Microbiology of Wine and Vinification, Handbook of Enology, Volume 1, John Wiley and Sons Ltd., 454p.
- Yokotsuko, K., Yajima, M., and Matsudo, T. (1997). Production of Bottle- Fermented Sparkling Wine Using Yeast Immobilized in Double-Layer Gel Beads or Strands. *American Journal of Enology and Viticulture*, 48: 471-481.

Türkiye'nin Karadeniz Kıyılarında Ekonomik Öneme Sahip Bazı Balık Türleri için Balık Ağırlığı ile Ağır Metal Konsantrasyonları Arasındaki Korelasyonların Belirlenmesi

Evrım Sibel ÖNEL^{1*}, Mustafa TÜRKMEN², Erkan KALIPCI³

Öz

Türkiye'nin Karadeniz Bölgesi'nde 8 İl'de yürütülen bu çalışmada, ekonomik önemi olan 7 tür balığın kas dokularında tespit edilen mineral madde ve ağır metal derişimleri indüktif eşleşmiş plazma kütle spektrometresi (ICP-MS) ile ölçülmüştür. Balık ağırlığı ile konsantrasyonlar arasındaki korelasyonlar Pearson Korelasyon Analizi ile $p<0.05$ ve $p<0.01$ düzeylerinde, istatistiki olarak anlamlı ilişkiler belirlenerek, daha önce yapılan çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Genel olarak tür ve istasyonlar dikkate alınmadan yapılan korelasyon analizlerinde balığın ağır metal yükü, absorpsiyon verileri ile balığın biyolojik ağırlığı arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Balık ağırlığı ile K, Mg, P, Cu, Se pozitif yönlü ve anlamlı ($p<0.01$); Ca, Na, Al, B, Cd, Co, Cr, Mn, Ni, Pb, Si, Zn negatif yönlü ve anlamlı ($p<0.01$); ve balık ağırlığı-As arasında ise negatif yönlü ve anlamlı ($p<0.05$) korelasyonlar bulunmuştur. Ağırlık ile Hg arasında pozitif; Fe arasında ise negatif yönlü olan korelasyonun önemsiz olduğu tespit edilmiştir ($p>0.05$).

Anahtar Kelimeler: Ağır metaller, Balık ağırlığı, Korelasyon, Karadeniz.

Determination of Correlations Between Fish Weight and Heavy Metal Concentrations for Some Fish Species of Economic Importance in the Black Sea Coast of Türkiye

Abstract

In this study conducted in 8 cities in the Black Sea Region of Turkey, mineral substance and heavy metal concentrations detected in the muscle tissues of 7 species of economically important fish were measured by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Correlations between fish weight and concentrations were determined by Pearson Correlation Analysis at $p<0.05$ and $p<0.01$ levels, and statistically significant relationships were determined and compared with the results of previous studies. In general, in the correlation analyses carried out without considering the species and stations, the heavy metal load of the fish was evaluated in terms of the relationship between the absorption data and the biological weight of the fish. The heavy metal concentrations showed a positive and significant correlation between fish weight and K, Mg, P, Cu, Se ($p<0.01$); a negative and significant correlation between fish weight and Ca, Na, Al, B, Cd, Co, Cr, Mn, Ni, Pb, Si, Zn ($p<0.01$); a negative and significant correlation between fish weight and As. It was determined that both the positive correlation between weight and Hg and the negative correlation between weight and Fe were insignificant ($p>0.05$).

Keywords: Heavy metals, Fish weight, Correlation, Black Sea.

¹Giresun Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Giresun, Türkiye, sibel.onel@giresun.edu.tr

²Giresun Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Giresun, Türkiye, mustafa.turkmen@giresun.edu.tr

³Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Giresun, Türkiye, erkankalipci@gmail.com

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 26.12.2023

Kabul/Accepted: 29.04.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Giriş

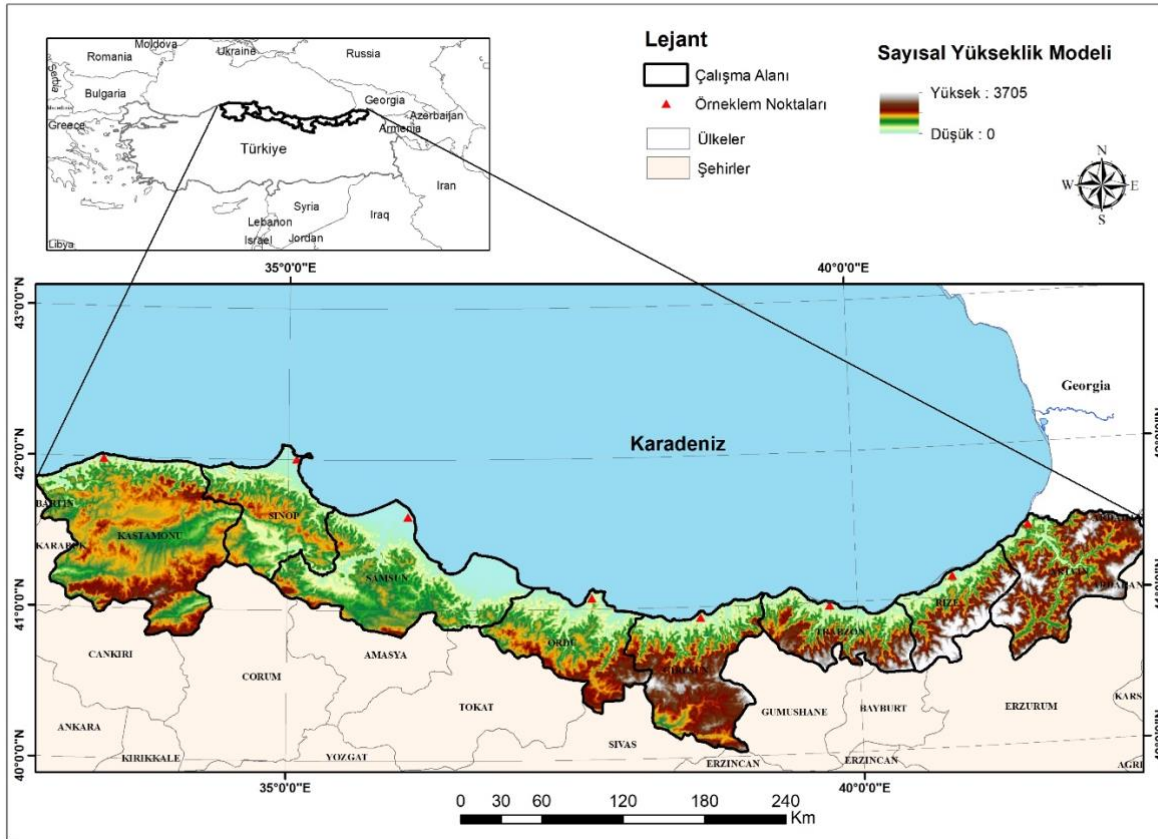
Endüstriyel gelişme ile birlikte metal kullanımındaki artış, ağır metal kirliliğini önemli bir çevre sorunu olarak ortaya koymaktadır. Günümüzde ağır metaller, çevrenin başlıca kirleticileridir ve endüstrinin yoğun olduğu bölgelerde okyanuslar, göller ve nehirler gibi su sistemleri için hızla büyüyen bir sorun haline gelmiştir. (Aras ve ark., 2017; Kalıpcı ve Namal, 2018). Ağır metaller uzun süre bozulmadıkları için suda, sedimentte ve sucul organizmaların bünyesinde depolanırlar. Vücuttaki birikim ve besin zincirine katılım sonucu uzun süre aktif kalır ve tolerasyon sınırını geçtiğinde ise toksik etki yaparlar (Kahvecioğlu ve ark., 2003; Özbolat ve Tuli, 2016). Çevresel kalıcılığı olan ağır metaller biyolojik olarak sucul biyota ve besin zincirinde solunum, adsorpsiyon ve yutma yoluyla birikebilmektedir. Bu nedenle ağır metaller, tüm canlı organizmalar için yüksek toksisiteye sahiptir ve biyolojik olarak parçalanamadıkları için de önemli sağlık sorunlarına neden olmaktadır (Türkmen ve Öğütçü, 2020; Ustaoglu ve Islam, 2020; Cüce ve ark., 2022a; Cüce ve ark., 2022b).

Balıklar, yüksek protein ve doymamış omega yağ asitleri içermesi nedeniyle yaygın olarak tüketilen deniz ürünlerinden biri haline gelmiştir (Töre ve ark., 2021; Burger ve Gochfeld, 2005; Türkmen ve ark., 2009). Protein kaynağı olarak bol miktarda deniz ürünlerinin tüketimi, özellikle kıyı sakinleri için potansiyel sağlık risklerine yol açabilmektedir (Guérin ve ark., 2011; Raknuzzaman ve ark., 2016; Türkmen ve ark., 2018; Liu ve ark., 2018; Liu ve ark., 2019; Kalıpcı ve ark., 2023). Balıkların eser metallere uzun süre maruz kalması balıkta toksik etkiye ve bu balıkların insanlar tarafından tüketilmesi üreme ve hematolojik etkilere, kardiyovasküler hastalıklara, sinir sistemi bozukluklarına, gelişimsel anomalilere, karaciğer ve böbrek hasarına ve kansere neden olabilmektedir (Singh ve Kumar, 2017; Türkmen ve Öğütçü, 2020; Qu ve ark., 2018). TEPGE'nin 2022 Su Ürünleri Ürün Raporu'na göre; 2019 yılında hayvansal protein ihtiyacının %17'sinin balıktan karşılandığı tespit edilmiştir (Çöteli, 2022). Türkiye balık üretiminin %76'sı ise bu çalışmada araştırma alanı olarak seçilen Karadeniz'den karşılanmaktadır (Sirkecioğlu, 2002). Protein kaynağı olan balıkların insanlar tarafından gıda olarak tüketilmesi ve tüketiminin sağlık açısından risk oluşturması nedeniyle kas dokusunun analizi oldukça önemlidir. Ağır metallerin sucul organizmalardaki biyolojik birikimi bu metallerin mevcut ekosistemdeki konsantrasyonuna, maruz kalma sürelerine, metal çeşidine, organizmanın büyüklüğüne, yaşına, beslenme alışkanlıklarına, metalleri sindirme yeteneklerine bağlıdır (Tokatlı ve ark., 2016; Bat ve ark., 2017). Balıkların yaşı ile paralel artış gösteren ağırlıkları, dokulardaki toksik element biyoakümüülasyonlarında önemli bir faktördür. Balıklar; metalin çeşidine göre ağır metalleri farklı dokularda farklı miktarlarda biriktirdiğinden balık ağırlığı ve absorpsiyon arasındaki korelasyon ilişkisi büyük önem arz etmektedir (Tokatlı ve ark., 2016; Düşükcan ve ark., 2017). Bu nedenle yapılan bu çalışmada; Türkiye'de balıkçılık sektörünün en önemli kaynağı olan

Karadeniz'de yaygın olarak tüketilen balık türlerinin ağırlığı ile mineral madde ve ağır metallerin kas dokudaki birikimi arasındaki korelasyon ilişkisi belirlenerek, risk seviyeleri değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Çalışma alanı olarak seçilen Karadeniz Bölgesi'nde; Artvin, Rize, Trabzon, Giresun, Ordu, Samsun, Sinop ve Kastamonu olmak üzere toplamda 8 il'de örnekleme çalışmaları yapılmıştır (Şekil 1). Türkiye genelinde yoğun olarak tüketilen ve ekonomik değere sahip olan; barbun (*Mullus barbatus*), çinekop (*Pomatomus saltatrix*), hamsi (*Engraulis encrasicolus*), istavrit (*Trachurus trachurus*), kefal (*Mugil cephalus*), mezigit (*Merlangius merlangus*) ve palamut (*Sarda sarda*) balık örneklemeleri 2021 yılı Eylül ve Ekim ayları içerisinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın objektif veriler ortaya koyabilmesi ve güvenilirliği için tüm istasyonlarda, kefal ve palamut için 5'er adet, diğer balık türlerinden ise 10'ar adet örnekleme yapılmış olup 7 tür ve 8 il için toplamda 480 adet balık ile çalışmalar yürütülmüştür.



Şekil 1. Çalışma alanı ve örnekleme istasyonları haritası.

Çalışmada kullanılan balık türlerinin ortalama boy ve ağırlıkları Tablo 1'de gösterilmiştir. Örneklerin soğuk zincir ile laboratuvara getirilmesinin ardından total boy ve ağırlık ölçümleri yapılarak kaydedilmiştir. Laboratuvara getirilen balık türlerinden 5 gr kas örneği alınarak distile su ile yıkanmış ve etiketli numune torbalarına yerleştirilmiştir. Kimyasal analizleri yapılmaya kadar -20°C'de polietilen kaplarda saklanılmıştır. Örneklerden hazırlanan kompozit numunelerin ekstraksiyon ve analiz işlemleri ICP-MS (Agilent 7700x) cihazı ile yapılmıştır. Analiz sonucu boron, kalsiyum, potasyum, sodyum, fosfor, magnezyum, alüminyum, arsenik, kadmiyum, kobalt, krom, bakır, demir, cıva, mangan, nikel, kurşun, selenyum, silisyum, çinko birikim seviyeleri tespit edilmiştir.

Balık doku örneklerinde mineral madde ve ağır metal içeriklerinin minimum ve maksimum değerleri arasında istatistiksel bir fark olup olmadığı ve standart sapmalar tek yönlü varyans analizi (ANOVA) kullanılarak hesaplanmıştır ($p < 0.05$). Balıklardaki konsantrasyonların kendi aralarındaki ilişkileri belirlemek için Pearson korelasyon katsayıları (PCC) kullanılmıştır. Ayrıca, balıkların ortalama ağırlıkları ile tespit edilen konsantrasyon verileri arasındaki ilişkinin istatistiki olarak anlamlı olup olmadığını tespit etmek için SPSS 24 istatistik programı ile Pearson Korelasyon Analizi uygulanmıştır ($r < 0.05$ ve $r < 0.01$). Analizlerde kullanılan verilerin güvenilirliğini arttırmak amacıyla balık örneklerinin tamamının ağırlık ortalamaları ve metal konsantrasyonları ele alınmıştır (Tablo 2).

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışma kapsamında 8'ilde örneklenen 7 balık türüne ait ortalama boy ve ağırlık verileri Tablo 1'de verilmiştir. Barbun (*M. barbatus*) ve çinekop (*P. Saltatrix*) hariç tüm türlerde boy ve ağırlık ortalamalarının maksimum değerleri Sinop ilinde örneklenen balıklarda tespit edilmiştir. Bu değerler hamsi (*E. encrasicolus*) için 12.3 cm, 9.42 g, istavrit (*T. trachurus*) için 13 cm, 25.51 g, kefal (*M. cephalus*) için 34 cm, 340.11 g, mezgit (*M. merlangus*) için 18.3 cm, 34.03 g, palamut (*S. sarda*) için 38 cm, 710 g olarak tespit edilmiştir. Barbun (*M. barbatus*) 13.3 cm boy ortalamasının maksimum değeri Ordu'da, 24.56 g ağırlık ortalamasının maksimum değeri Kastamonu'da, çinekop (*P. saltatrix*) için 19 cm ortalama boy ve 79.58 g ortalama ağırlığın maksimum değeri ise Kastamonu'daki örneklerde tespit edilmiştir (Tablo 1). Çalışmanın güvenilirliği için, balık türlerinde belirlenen ağırlık değerleri ve kompozit numunelerden yapılan her 3 okuma için alınan mineral madde ve ağır metal değerlerinin tümü analizlerde kullanılmıştır (N=168 → 7 tür, 8 il, 3 okuma).

Tablo 1. Örneklenen balıkların istasyonlara bağlı olarak; ortalama uzunluk (OU) (cm) ve ortalama ağırlıkları (OA) (gr) (Ortalama \pm SE).

		ART	RZE	TRB	GRS	ORD	SMS	SNP	KST
1. Barbun <i>M. barbatus</i>	OU (cm)	13.2 ± 1.3	12.5 ± 0.5	<u>10.8</u> ± 0.7	13 ± 1	13.3 ± 1.2	12 ± 1	13 ± 0.5	13 ± 0.3
	OA (g)	19.5 ± 0.51	17.23 ± 0.54	<u>14.40</u> ± 0.92	17.67 ± 1.21	22.28 ± 1.55	17.86 ± 1.13	22.52 ± 2.01	24.56 ± 2.24
2. Çinekop <i>P.saltatrix</i>	OU (cm)	15.8 ± 1.8	<u>14.5</u> ± 0.5	17 ± 2	15 ± 1	15.5 ± 1.5	16.5 ± 1.5	17.5 ± 2.5	19 ± 2
	OA (g)	40.38 ± 1.43	<u>33.68</u> ± 1.16	48.70 ± 1.51	36.60 ± 3.96	48.74 ± 1.2	50.10 ± 2.08	62.40 ± 3.9	79.58 ± 4.59
3. Hamsi <i>E. encrasicolus</i>	OU (cm)	11 ± 0.5	10.5 ± 0.5	11 ± 1	<u>10.3</u> ± 0.7	10.8 ± 0.3	11.8 ± 0.7	12.3 ± 0.2	11.3 ± 0.4
	OA (g)	8.28 ± 0.9	7.85 ± 0.9	8.27 ± 0.5	<u>6.84</u> ± 0.45	7.31 ± 0.4	8.87 ± 1	9.42 ± 1.2	8.47 ± 1
4. İstavrit <i>T. trachurus</i>	OU (cm)	<u>11</u> ± 0.7	<u>11</u> ± 0.9	12 ± 0.9	<u>11</u> ± 1	12 ± 0.8	<u>11</u> ± 0.7	13 ± 0.6	<u>11</u> ± 0.9
	OA (g)	13.37 ± 1.7	13.62 ± 0.7	15.54 ± 2	12.86 ± 0.6	14.21 ± 0.5	<u>10.99</u> ± 1.3	25.51 ± 0.4	13.65 ± 0.8
5. Kefal <i>M. cephalus</i>	OU (cm)	<u>22</u> ± 2	24 ± 1	28.5 ± 5	23 ± 1	32 ± 6	24 ± 3	34 ± 5	24 ± 2
	OA (g)	<u>89.92</u> ± 8.3	128.21 ± 10.1	263.67 ± 10.4	125.68 ± 4	298.74 ± 14.9	106.08 ± 6.7	340.11 ± 22.9	137.04 ± 7.4
6. Mezgit <i>M. merlangus</i>	OU (cm)	15.5 ± 0.5	16.3 ± 0.8	16 ± 1	<u>13.3</u> ± 0.8	16.5 ± 0.5	16.5 ± 0.9	18.3 ± 0.3	16 ± 0.5
	OA (g)	30.28 ± 1.1	27.66 ± 2.5	31.00 ± 0.9	<u>18.87</u> ± 2.6	30.13 ± 3.6	28.54 ± 2.9	34.03 ± 3.6	30.36 ± 1.7
7. Palamut <i>S. sarda</i>	OU (cm)	35 ± 2.9	35.5 ± 2.7	33 ± 1.9	36 ± 3.2	<u>30</u> ± 2.9	36 ± 3.9	38 ± 4.2	35 ± 2.1
	OA (g)	653.9 ± 58	505.8 ± 33	416.1 ± 31	559.9 ± 21	<u>285.5</u> ± 32	605.4 ± 67	710.0 ± 86	573.4 ± 35

*Kalın yazılı değerler maksimum veriyi, altı çizili olan değerler ise minimum veriyi göstermektedir.

Korelasyon; iki ya da daha çok değişken arasında ilişki olup olmadığını, varsa bu ilişkinin yönünü ve gücünü inceleyen istatistiksel bir yöntemdir. İki değişken %100 oranında ilişkili ise korelasyon maksimum (1) değeri ile mükemmel ilişkiyi yansıtır. +1 veya -1'e yakın değerler ise güçlü bir ilişkiyi işaret ederken, hiç ilişki yoksa korelasyon katsayısı sıfır ya da sıfıra yakın bulunur. Pozitif doğrusal ilişkide bir değişkenin değeri diğeri ile birlikte artış gösterir; oysaki negatif doğrusal ilişkide ise ters orantı söz konusudur ve bir değişkenin miktarındaki artışın diğeri değişkenin değerinde azalmaya yol açtığı anlamına gelir (URL -1; 2). Buna göre; balık dokularında tespit edilen mineral madde ve ağır metal konsantrasyonları ile balıkların ortalama ağırlıkları arasındaki korelasyon ilişkileri Tablo 2 ve Şekil 2'de, tespit edilen anlamlı korelasyon verileri ise Tablo 3'te verilmiştir. Korelasyon analizi sonuçlarına göre; balık ağırlığı ile kas dokuda tespit edilen potasyum, magnezyum, fosfor, bakır, selenyum arasındaki ilişkilerin pozitif yönde; kalsiyum, sodyum, alüminyum, bor, kadmiyum, kobalt, krom, mangan, nikel, kurşun, silisyum, çinko arasındaki ilişkilerin ise negatif yönde ve 0.01 düzeyinde önemli olduğu tespit edilmiştir. Ağırlık ile As arasında ise negatif yönlü ve önemli olduğu belirlenmiştir ($p < 0.05$). Ağırlık ile Hg arasında pozitif; Fe arasında ise negatif yönlü olan korelasyonun önemsiz olduğu tespit edilmiştir ($p > 0.05$) (Tablo 2, Tablo 3 ve Şekil 2).

Tablo 2. Balık ağırlığı ile kas dokudaki element birikimi arasındaki ilişkinin korelasyonu.

	W	Ca	K	Mg	Na	P	Al	As	B	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Se	Si	Zn		
W	r	1	-.397**	.369**	.471**	-.374**	.416**	-.229**	-.170*	-.296**	-.381**	-.233**	.356**	-0.098	0.026	-.376**	-.456**	-.363**	.277**	-.247**	-.266**		
	p		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,028	0,000	0,000	0,002	0,000	0,205	0,741	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000		
Ca	r		1	-.646**	-.260**	0,073	0,093	.366**	.596**	.288**	.676**	.699**	.197*	0,022	.432**	.368**	.793**	.722**	.370**	-0,010	.324**	.551**	
	p			0,000	0,001	0,346	0,233	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,776	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,894	0,000	0,000		
K	r			1	.629**	-0,102	.524**	-.737**	-.619**	-.273**	-.373**	-.696**	-.547**	0,121	-.696**	-.443**	-.590**	-.626**	-.596**	0,127	-.437**	-.192*	
	p				0,000	0,221	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,147	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,129	0,000	0,021		
Mg	r				1	0,136	.709**	-.688**	-.380**	0,136	-0,015	-.484**	-.324**	.317**	-.583**	-.217**	-.306**	-.369**	-.536**	.424**	-.362**	0,151	
	p					0,079	0,000	0,000	0,000	0,080	0,843	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,051		
Na	r					1	-.289**	-0,080	-0,021	.785**	0,114	-0,015	0,016	-0,140	-.243**	0,029	-0,042	-0,050	-.025	.228**	.153*	0,075	
	p						0,000	0,305	0,786	0,000	0,141	0,849	0,836	0,070	0,001	0,710	0,585	0,521	0,750	0,003	0,047	0,334	
P	r						1	-.620**	-.262**	-.205**	.206**	-.261**	-.398**	.471**	-.397**	-.244**	0,085	-0,084	-.391**	0,081	-.419**	.368**	
	p							0,000	0,001	0,008	0,008	0,001	0,000	0,000	0,001	0,274	0,277	0,000	0,294	0,000	0,000		
Al	r							1	.582**	0,028	0,091	.677**	.482**	-.252**	.804**	.513**	.341**	.413**	.542**	-0,068	.654**	-0,098	
	p								0,000	0,717	0,240	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,381	0,000	0,000	0,207		
As	r								1	.173*	.253**	.736**	.271**	-0,078	.532**	.447**	.429**	.476**	.330**	.159*	.491**	0,126	
	p									0,025	0,001	0,000	0,000	0,312	0,000	0,000	0,000	0,000	0,039	0,000	0,105		
B	r									1	.251**	.215**	.239**	0,000	0,010	.163*	0,123	.226**	0,076	.180*	.198*	.218**	
	p										0,001	0,005	0,002	0,995	0,898	0,034	0,111	0,003	0,330	0,019	0,010	0,004	
Cd	r										1	.525**	.157*	.288**	.293**	0,140	.814**	.622**	.226**	0,105	0,063	.784**	
	p											0,000	0,042	0,000	0,000	0,070	0,000	0,000	0,003	0,175	0,414	0,000	
Co	r											1	.414**	0,029	.717**	.504**	.609**	.788**	.473**	0,007	.560**	.322**	
	p												0,000	0,708	0,000	0,000	0,000	0,000	0,925	0,000	0,000		
Cr	r												1	-0,116	.499**	.523**	0,118	.501**	.251**	.188**	.562**	-0,145	
	p													0,133	0,000	0,000	0,128	0,000	0,001	0,015	0,000	0,060	
Cu	r													1	0,112	-.154*	.193*	0,098	-.191*	0,011	-.230**	.414**	
	p														0,148	0,046	0,012	0,205	0,013	0,891	0,003	0,000	
Fe	r														1	.564**	.498**	.590**	.450**	-0,091	.501**	0,116	
	p															0,000	0,000	0,000	0,000	0,241	0,000	0,133	
Hg	r															1	0,139	.459**	.184*	.277**	.493**	-.193*	
	p																0,072	0,000	0,017	0,000	0,000	0,012	
Mn	r																1	.655**	.430**	-.183*	.168*	.695**	
	p																	0,000	0,000	0,017	0,030	0,000	
Ni	r																	1	.384**	-0,142	.438**	.445**	
	p																		0,000	0,066	0,000	0,000	
Pb	r																		1	-.199**	.303**	0,044	
	p																			0,010	0,000	0,567	
Se	r																			1	0,104	-0,076	
	p																				0,181	0,328	
Si	r																				1	-0,140	
	p																					0,070	
Zn	r																					1	
	p																						0,000

* . Korelasyon 0,05 düzeyinde anlamlıdır.

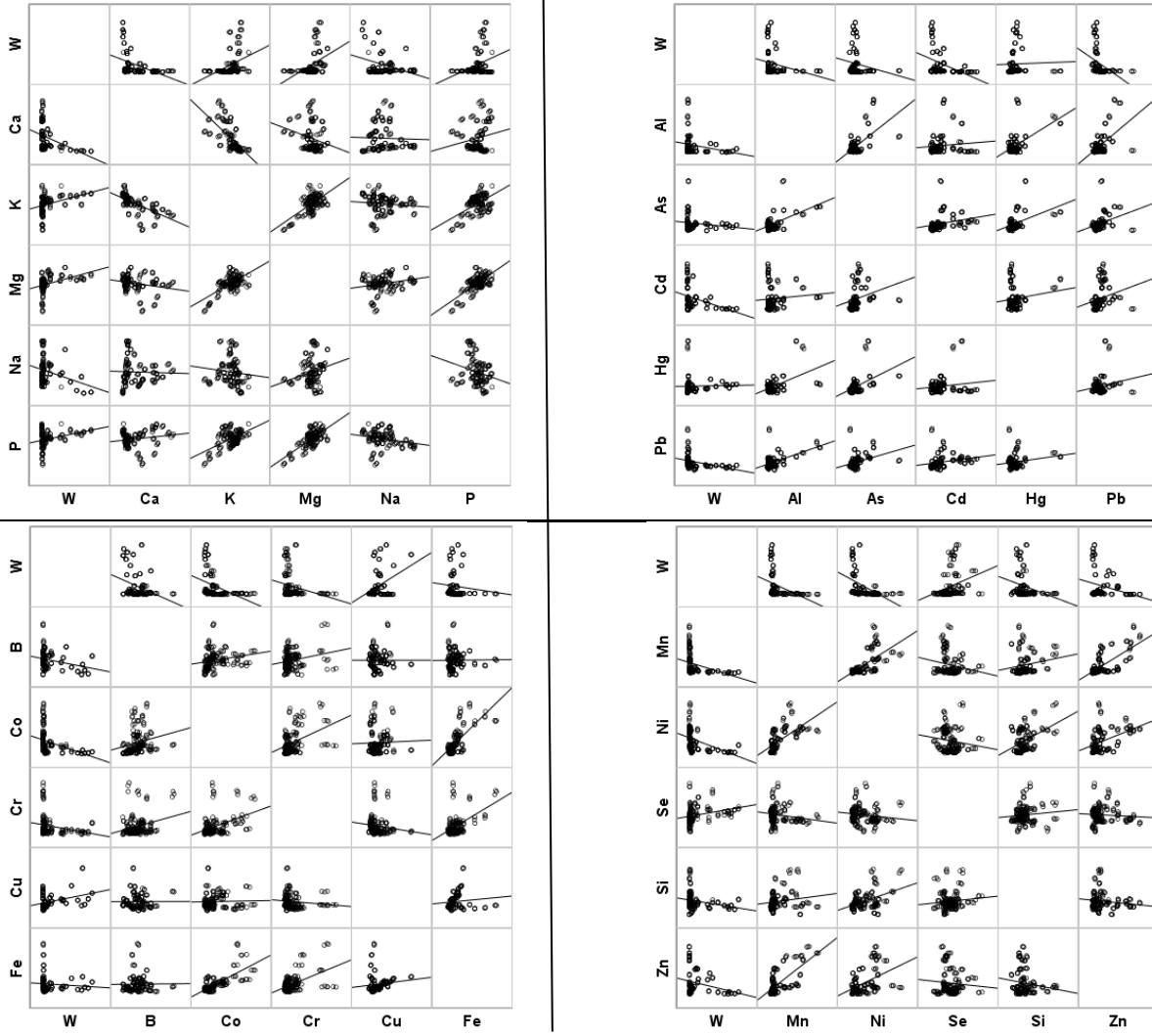
** . Korelasyon 0,01 seviyesinde anlamlıdır.

– (eksi) değerler negatif korelasyon ilişkisini ifade etmektedir.

N (eleman sayısı) 168'dir. (K için 145).

Tablo 3. Balık ağırlığı ile kas dokudaki element birikimi arasında tespit edilen anlamlı korelasyon verileri.

0,01	0,01	0,05	0,05
Pozitif	Negatif	Pozitif	Negatif
<u>Ağırlık ile K, Mg, P, Cu, Se</u> Ca <u>ile</u> Al, As, B, Cd, Co, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Si, Zn Al <u>ile</u> As, Co, Cr, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Si As <u>ile</u> Cd, Co, Cr, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Si Cd <u>ile</u> Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn Co <u>ile</u> Cr, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Si, Zn B <u>ile</u> Cd, Co, Cr, Ni, Zn Cr <u>ile</u> Fe, Hg, Ni, Pb, Si Fe <u>ile</u> Hg, Mn, Ni, Pb, Si Mg <u>ile</u> P, Cu, Se P <u>ile</u> Cd, Cu, Zn Hg <u>ile</u> Ni, Se, Si Mn <u>ile</u> Ni, Pb, Zn Ni <u>ile</u> Pb, Si, Zn K <u>ile</u> Mg, P Na <u>ile</u> B, Se Cu <u>ile</u> Zn Pb <u>ile</u> Si	<u>Ağırlık ile Ca, Na, Al, B, Cd, Co, Cr, Mn, Ni, Pb, Si, Zn</u> K <u>ile</u> Al, As, B, Cd, Co, Cr, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Si Mg <u>ile</u> Al, As, Co, Cr, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Si P <u>ile</u> Al, As, B, Co, Cr, Fe, Hg, Pb, Si Ca <u>ile</u> K, Mg Na <u>ile</u> P, Fe Al <u>ile</u> Cu Cu <u>ile</u> Si Pb <u>ile</u> Se	As <u>ile</u> B, Se B <u>ile</u> Hg, Se, Si Na <u>ile</u> Si Cd <u>ile</u> Cr Cr <u>ile</u> Se Cu <u>ile</u> Mn Hg <u>ile</u> Pb	<u>Ağırlık ile As</u> Cu <u>ile</u> Hg, Pb K <u>ile</u> Zn Hg <u>ile</u> Zn Mn <u>ile</u> Se



Şekil 2. Balık ağırlığı ile kas dokudaki element birikimi arasındaki ilişkinin korelasyonu.

Yapılan analizler sonucu mineral madde ve ağır metal konsantrasyonlarının çoğunlukla küçük balıklarda daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Yenilebilir kas dokudaki potasyum, magnezyum, fosfor, bakır, selenyum birikiminin ağırlıkça büyümeye bağlı olarak arttığı; kalsiyum, sodyum, alüminyum, bor, kadmiyum, kobalt, krom, mangan, nikel, kurşun, silisyum, çinko birikiminin ise ağırlıkça büyümeye bağlı olarak azaldığı belirlenmiştir. Nitekim Alkan ve ark.'da (2016) yapılan çalışmaya benzer şekilde literatürde balık dokularındaki metal konsantrasyonları ile balık boyutları arasında negatif korelasyon olduğunu bildirmiştir. Doğu Karadeniz'de ekonomik açıdan en önemli iki demersal balık türü olan barbun (*Mullus barbatus*) ve mezgit balıklarının (*Merlangius merlangus*) kas dokularındaki ağır metal birikim seviyeleri ve balık büyüklüğü gruplarının ağır metal birikim düzeyleri üzerindeki etkilerini değerlendirdiği çalışmalarında; Mezgit balığının boy grupları arasında; Mn, Co, Cu, Zn ve Cd birikim düzeyleri arasındaki; barbun balığı boy gruplarında ise Mn ve Cd birikimindeki farklılıklar istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ($p < 0.05$). Küçük boy mezgitlerin Cu ve Zn konsantrasyonları; küçük boy barbun grubunun ise Cd konsantrasyonları daha yüksek bulunmuş, küçük ve orta boy barbu'nun Mn konsantrasyonlarının büyük boy barbun balıklarına göre

anlamli derecede yuksek olduğu rapor edilmiştir. Yine bir başka çalışmada; İznik Gölü Havzası'ndaki 11 balık türü arasında benzer şekilde bazı ağır metallerin birikimi değerlendirilmiş olup *S. cii* ve *R. frisii* dokularındaki demir, çinko ve bakırın balık büyüklüğü ile arasında negatif korelasyon gösterdiği bildirilmiştir ($p<0.01$) (Köker, 2022). Varol ve ark. (2020) ise yapmış olduğu çalışmada; Dicle Nehri'nden toplanan *Capoeta umbla* ve *Luciobarbus mystaceus* balık örneklerinin uzunluk ve ağırlığı ile dokulardaki ağır metal konsantrasyonları arasında önemli negatif korelasyonlar kaydetmişlerdir. *C. umbla* için kastaki Cd uzunlukla; *L. mystaceus* için ise kastaki Cr dışındaki tüm metallerin ise ağırlıkla anlamli negatif korelasyon gösterdiğini belirtmişlerdir ($p<0.05$). Yine Varol ve Kaçar (2023), yapmış olduğu benzer bir çalışmada da balık büyüklüğü (uzunluk ve ağırlık) ile *Capoeta tinca* ve *Squalius pursakensis* dokularındaki 17 elementin biyolojik birikimi arasındaki ilişkiyi gözlemlenmişlerdir. *C. tinca* dikkate alındığında kastaki K ağırlıkla, mevcut çalışmada elde edilen sonuçları destekler şekilde pozitif ilişki göstermiştir ($p<0.05$). *S. pursakensis* dikkate alındığında ise kasta Mn ve Co balık büyüklüğü ile negatif ilişki göstermiştir ($p<0.05$). Canlı ve Atlı (2023) tarafından yapılan araştırmada; Kuzeydoğu Akdeniz'deki altı balık türünün dokularındaki ağır metal konsantrasyonları ölçülmüş ve birkaç durum dışında, metal konsantrasyonları ile balık büyüklüğü arasındaki anlamli ilişkilerin negatif olduğunu belirlemişlerdir. Başkaya ve ark.'nin (2023) yürüttüğü çalışmada ise Kozan Baraj Gölü'nde ağ kafeslerde yetiştirilen Gökkuşağı alabalığının (*Oncorhynchus*) mineral madde ve ağır metal içeriklerini araştırmış ve ağır metal içeriklerinin balığın büyüklüğüne göre değişiklik gösterdiğini tespit etmişlerdir ($p<0.05$). Balık boyu ve ağırlığının artışına paralel olarak Mg ve K değerlerinin arttığını, Na ve Ca değerlerinin ise azaldığını gözlemlenmişlerdir. Tespit edilen bu sonuçlar bizim çalışmamız ile paralellik göstermektedir. Baraj gölündeki büyük boy balıklarda Se konsantrasyonunun balığın boy ve ağırlık artışına paralel olarak arttığını rapor etmişlerdir (Başkaya ve ark., 2023). Dicle Nehri'nin Ilısu bölgesinden toplanan *Carassius gibelio*'nun kas dokularındaki bazı ağır metallere ile balığın boy ve ağırlığı arasındaki ilişkiler belirlenmiş, kas dokusundaki As miktarı ile ağırlık arasında anlamli bir ilişki bulunmamıştır ($p>0.05$). Ayrıca kastaki Ni miktarının hem uzunluk hem de ağırlık açısından anlamli negatif korelasyona sahip olduğu belirlenmiştir ($p<0.05$) (Kaçar, 2022). Tokatlıoğlu ve ark.'nın (2023), Kayseri bölgesindeki yenilebilir tatlı su balıklarının kaslarındaki ağır metal birikimlerini araştırdığı çalışmasında Hg içeriği ile balık boyutları (uzunluk ve ağırlık) arasında anlamli bir korelasyon bulunmamıştır ($p>0.05$). Tüm bu örnek çalışmalar mevcut çalışmanın bulgularını desteklemektedir.

Öte yandan; Ege Denizi, Çandarlı Körfezi'nde *Mullus barbatus*'un farklı organ dokularında ağır metal (Cu, Zn, Pb, Cr, Fe) birikimi ile bireysel ağırlıkları arasında anlamli bir ilişki bulunmadığı belirlenmiştir ($p>0.05$) (Taş ve ark., 2011). Dicle Nehri'nin Ilısu bölgesinden toplanan *Carassius gibelio*'nun kas dokularındaki bazı ağır metallere miktarları ile balığın boy ve ağırlığı arasındaki ilişkiler belirlenmiş, kas dokusundaki Cr, Mn, Co, Cu ve Cd konsantrasyonları ağırlık açısından

değerlendirildiğinde anlamlı bir korelasyon olmadığı tespit edilmiştir ($p>0.05$) (Kaçar, 2022). Damsa Baraj Gölü'nde *S. pursakensis* için kasta sadece Co ile uzunluk arasında pozitif bir korelasyon olduğu ($p<0.05$), *C. carpio*'da ise kastaki konsantrasyonu ile boy ve ağırlık arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık görülmediği belirlenmiştir ($p>0.05$) (Kaçar, 2024). Erzincan Karasu Nehri'nden toplanan dört balık türünün (*Acanthobrama marmid*, *Capoeta umbla*, *Capoeta trutta* ve *Chondrostoma regium*) dokularındaki ağır metal konsantrasyonları ile balık büyüklüğü (uzunluk ve ağırlık) arasındaki ilişkiler araştırılmış, 3 balık türü için de balık ağırlığı ile tüm ağır metaller arasında önemli pozitif korelasyonlar bulunmuştur ($p<0.01$, $p<0.05$). *C. trutta*'da benzer şekilde balık ağırlığı ile tüm ağır metaller ($p>0.05$ 'teki Cr ve Cu hariç) arasında anlamlı pozitif korelasyonlar bulunmuştur (Tanır, 2021). Türkiye'de sıklıkla tüketilen 10 farklı balık türünde 11 ağır metal düzeyi belirlenmiş, metal düzeyleri ile balık boy ve ağırlıkları arasındaki ilişkiler araştırılmış, metal konsantrasyonlarının genellikle balık boy veya ağırlığına bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir. Sazan balıklarında As, Cr ve Ni konsantrasyonlarında boy ile; barbun balıklarında As ve Ni konsantrasyonlarının hem boy hem de ağırlık ile pozitif korelasyon gösterdiği bildirilmiştir. Ancak Avrupa levreği, çipura ve Avrupa barakudasının uzunluk ve ağırlıkları arasında herhangi bir ilişki belirlenmemiştir. 11 metal arasında yalnızca Pb'nin balık türünün uzunluğu veya ağırlığı ile ilişki olmadığı belirtilmiştir (Varol ve ark., 2019). Emet Çayı ve Dursunbey Çayı üzerindeki istasyonlardan mevsimsel olarak, *Squalius cii*, *Capoeta tinca* ve *Barbus oligolepis* dokularında tespit edilen ağır metal seviyelerinin balık ağırlıkları ile korelasyon ilişkileri araştırılmış, balık kas dokularında tespit edilen Ni ile her 3 balığın total ağırlık verileri arasında; ayrıca *S. cii* türünün ağırlıkları ile kas dokularında tespit edilen As, Cd, Pb, Ag ve Cr arasında pozitif olmak üzere istatistiksel olarak anlamlı ilişkiler kaydedilmiştir ($p<0.01$) (Tokatlı ve ark., 2016). Sinop ilinde yakalanan *Sarda sarda* (Bloch, 1793) balıklarının yenilebilir dokularındaki metal birikiminin boyuta bağlı olduğu, tüm konsantrasyonların hem uzunluk hem de ağırlık açısından pozitif korelasyon gösterdiği rapor edilmiştir ($p<0.05$) (Bat ve ark., 2022). Keban Baraj Gölü, Örencik mevkiinden yakalanan *Capoeta trutta* örneklerinin kas dokusunda tespit edilen bazı ağır metallerin konsantrasyonları ile balığın bazı biyolojik özellikleri (ağırlık, uzunluk, cinsiyet) arasındaki ilişki belirlenmiş, ağır metal konsantrasyonlarının balığın ağırlığı ve uzunluğuna bağlı olarak artış gösterdiği; Cr, Cu, Zn için istatistiksel olarak önemsiz olduğu ($p>0.05$) fakat pozitif yönlü ilişkinin Fe ve Cd için önemli olduğu bildirilmiştir (Canpolat ve Çalta, 2021).

Yapılan çalışmaya göre balıkların kas dokusunda tespit edilen mineral madde ve ağır metal korelasyonları arasında belirgin bir fark olduğu tespit edilmiştir. Özellikle ağır metaller arasında gözlenen istatistiksel olarak önemli korelasyonlar kirliliği göstermektedir. Örneğin mevcut çalışmada; alüminyum ile arsenik, kadmiyum, cıva, kurşun arasında; arsenik ile kadmiyum, cıva, kurşun arasında; kadmiyum ile kurşun arasında pozitif yönde ve 0.01 düzeyinde önemli; cıva ile kurşun arasında pozitif yönde ve 0.05 düzeyinde önemli; kadmiyum ve cıva arasında pozitif yönde

fakat 0,05 düzeyinde önemsiz korelasyon ilişkileri bulunmuştur (Tablo 2, Tablo 3 ve Şekil 2). Benzer şekilde; Sinop kıyılarında yaşayan *Trachurus trachurus*, *Engraulis encrasicolus*, *Merlangius merlangius euxinus* ve *Mullus barbatus*'un kas dokusunda bulunan konsantrasyonlar arasındaki korelasyonun istatistiksel anlamı belirlenmiş ve yapmış olduğumuz çalışmaya benzer sonuçlar elde edilmiştir. Al ve Fe arasındaki korelasyon pozitif; Al ile Zn arasındaki ilişki negatif olarak tespit edilmiş ancak bu ilişkiler mevcut çalışmadan farklı olarak istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır ($p>0.05$). Cd'nin Pb ve Ni ile ilişkisi; Cu ile Zn arasındaki korelasyon pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı olarak bildirilmiştir ($p\leq 0.05$). Ayrıca; Fe, Ni ile güçlü ve pozitif bir ilişki içinde olduğu rapor edilmiştir ($p<0.01$) (Gündoğdu ve ark., 2020). Doğu Karadeniz'de yapılan çalışmada mezgitte Mn ile Co arasında; barbunda Cr ile Ni ve Cu ile Cd metalleri arasında pozitif ve önemli düzeyde korelasyon katsayıları elde edilmiştir ($p<0.01$) (Alkan, 2016). Tokatlıoğlu ve ark. (2023), Kayseri bölgesindeki yenilebilir tatlı su balıklarının kaslarındaki ağır metal birikimlerini araştırdığı çalışmada; metal çiftlerinin çoğunun birbirleriyle önemli ölçüde pozitif korelasyon gösterdiğini; Cr-As, Cr-Co, As-Se ve Al-Cr çiftlerinin dikkat çekici pozitif korelasyon sonuçları verdiğini bildirmişlerdir. Gökova Körfezi'nde yaşayan dört balık türünün (*Mugil cephalus*, *Sparus auratus*, *Pagellus erythrinus*, *Epinephelus costae*) dokularındaki metaller arasında güçlü pozitif korelasyon katsayıları belirlenmiş, en yüksek pozitif korelasyon katsayısı Cd ve Pb ile *P. erythrinus* ve *E. costae* arasında analiz edilmiştir (Genç, 2021).

4. Sonuç ve Öneriler

Su ekosistemlerinin ağır metallerle kirlenmesi dünya çapında ciddi şekilde artırmıştır. Ağır metal kirliliği hem sudaki organizmaları hem de besin zincirindeki birikim sebebi ile insan sağlığını etkilemektedir. Balıkların insani tüketim amacıyla kullanılan kısmı olan kas dokusunda biriken metaller insan sağlığı açısından önemlidir. Tüketimdeki tercih önceliği sebebiyle artan balık ağırlığı ve element absorpsiyonu arasındaki korelasyon ilişkisi büyük önem arz etmektedir. Karadeniz Bölgesi'nde 8 ilde ekonomik öneme sahip 7 balık türünde gerçekleştirilen bu çalışmada; balık ağırlığı ile kas dokuda tespit edilen mineraller, eser ve toksik elementlerin birikimleri arasındaki önemli korelasyonlar tespit edilmiştir. Balık ağırlığı potasyum, magnezyum, fosfor, bakır, selenyum arasındaki ilişkilerin pozitif yönde; kalsiyum, sodyum, alüminyum, bor, kadmiyum, kobalt, krom, mangan, nikel, kurşun, silisyum, çinko arasındaki ilişkilerin ise negatif yönde ve 0.01 düzeyinde; As ile arasındaki korelasyonun ise 0.05 düzeyinde önemli olduğu tespit edilmiştir. Ağırlık ve cıva arasında pozitif yönlü; demir arasında ise negatif yönlü olan korelasyonun ise 0.05 düzeyinde önemsiz olduğu belirlenmiştir (Tablo 2, 3 ve Şekil 1).

Yapılan analizler sonucu bazı elementlerin, balık büyüklüğü ile orantılı olarak arttığı, diğerlerinin ise küçük balıklarda daha yüksek konsantrasyonlarda olduğu gözlenmiştir. Yenilebilir kas dokudaki potasyum, magnezyum, fosfor, bakır, selenyum birikiminin ağırlıkça büyümeye bağlı olarak arttığı; kalsiyum, sodyum, alüminyum, bor, kadmiyum, kobalt, krom, mangan, nikel, kurşun, silisyum, çinko birikiminin ise ağırlıkça büyümeye bağlı olarak azaldığı belirlenmiştir. Metal konsantrasyonları ile balık büyüklüğü arasındaki negatif ilişkiyi küçük balıkların metabolizmalarının daha hızlı olması nedeniyle vücutlarında daha fazla metal biriktiği, bağışıklık sistemlerinin gelişmemiş olması ve beslenme konusunda daha aktif olmaları ile açıklanabilir. Genç balıklar daha aktif enerji sağladığı için daha yüksek düzeyde oksijene ihtiyaç duyarlar. Aynı zamanda büyük balıkların besin zincirinde daha fazla besine ve besin çeşidine ihtiyaç duymaları ve tüketmelerinden dolayı bazı metaller dokularda daha fazla akümüle olabilir. Ayrıca küçük balıkların solungaçlarındaki yüksek metal birikimi, küçük balıkların büyük balıklara göre daha fazla oksijene ihtiyaç duyması ve dolayısıyla solunum için solungaçlarından daha fazla su geçmesiyle açıklanabilir (Kaçar, 2022; Varol ve Kaçar, 2023; Köse ve Uysal, 2008; Canlı ve Atlı, 2003; Canpolat ve Çalta, 2003).

Yapılan bu çalışmanın sonucu; balıkların kas dokusundaki element konsantrasyonları arasında önemli korelasyonlar olduğunu göstermiştir. Özellikle ağır metaller arasında gözlenen istatistiksel olarak önemli korelasyonlar kirliliği göstermektedir. Alüminyum ile arsenik, kadmiyum, cıva, kurşun arasında; arsenik ile kadmiyum, cıva, kurşun arasında; kadmiyum ile kurşun arasında pozitif yönde ve 0.01 düzeyinde önemli; cıva ile kurşun arasında pozitif yönde ve 0.05 düzeyinde önemli; kadmiyum ve cıva arasında pozitif yönde fakat 0.05 düzeyinde önemsiz bir korelasyon ilişkisi bulunmuştur (Tablo 2, 3 ve Şekil 1).

Sonuç olarak, çalışmamızda tespit edilen anlamlı korelasyonlar, tüketimde önemli yere sahip olan balıkların insan sağlığı üzerindeki risklerini ortaya koymakla birlikte, Karadeniz'deki kirlilik kaynaklarının değerlendirilmesi, ağır metal konsantrasyonlarının sürekli izlenmesi ve gerekli önlemlerin alınmasının önemine dikkat çekmektedir. Ayrıca ileride yapılacak çalışmalar için de veri kaynağı oluşturması açısından önem arz etmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Giresun Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nde tamamlanan "Karadeniz Sahil Sularında Bazı Denizel Organizmalarda ve Sedimentte Ağır Metal Kirliliğinin Değerlendirilmesi" başlıklı Doktora Tezi esas alınarak hazırlanmıştır.

Yazarlar, bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde FEN-BAP-C-301221-09 proje numarası ile maddi destek sağlayan Giresun Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine (BAP) teşekkürlerini sunar.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Alkan, A., Alkan, N., Akbaş, U. (2016). The factors heavy metal levels in the muscle tissues of whiting (*Merlangius merlangus*) and red mullet (*Mullus barbatus*). *Journal of Agricultural Sciences*, 22(3), 349-359.
- Aras, S., Findik, O., Kalıpcı, E., & Sahinkaya, S. (2017). Assessment of concentration physicochemical parameters and heavy metals in Kızılırmak river, Turkey. *Desalination and Water Treatment*, 72, 328-334.
- Başkaya, B., Çelik, M., Kadak, A.E., Küçükgülmez, A. (2023). Comparison of nutritional composition, mineral and heavy metal content of rainbow trout from different aquaculture systems, *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 547-553.
- Bat, L., Arıcı, E., Ürkmez, D. (2017). Heavy metal levels in the Black Sea Sprat (*Sprattus sprattus*), *International Journal of Research in Agriculture and Forestry*, (4), 1-8.
- Bat, L., Öztekin, A., Arıcı, E., Şahin, F., Bhuyan, Md.S. (2022). Trace element risk assessment for the consumption of *Sarda sarda* (Bloch, 1973) from the mid-South Black Sea Coastline. *Water Air Soil Pollut*, 233:441.
- Burger, J., Gochfeld, M. (2005). Heavy metals in commercial fish in New Jersey. *Environmental Research*, 99(3), 403-412.
- Canlı, M., Atlı, G. (2003). The relationships between heavy metal (Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Zn) levels and the size of six Mediterranean fish species. *Environmental Pollution*, 121(1), 129-136.
- Canpolat, Ö., Çalta, M. (2003). Heavy metals in some tissues and organs of *Capoeta capoeta umbla* (Heckel, 1843) fish species in relation to body size, age, sex and seasons, *Fresenius Environmental Bulletin*, 12, 961-966.
- Canpolat, Ö., Çalta, M. (2021). Comparison of some heavy metal levels in the muscle tissue of *Capoeta trutta* captured from Örencik Region of Keban Dam Lake (Elazığ). *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 1250-1257.
- Cüce, H., Kalıpcı, E., Ustaoglu, F., Baser, V., & Türkmen, M. (2022a). Ecotoxicological health risk analysis of potential toxic elements accumulation in the sediments of Kızılırmak River, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-14.
- Cüce, H., Kalıpcı, E., Ustaoglu, F., Dereli, M.A., & Türkmen, M. (2022b). Multivariate statistical and spatial assessment of water quality from a dam threatened by drought at the mid-Anatolia, Cappadocia/ Turkey, *Arabian Journal of Geosciences* (2022) 15: 441.
- Çötel, F.T. (2022). Su Ürünleri Ürün Raporu. Tarımsal Ekonomi ve Politika Geliştirme Enstitüsü, TEPGE-355, 1-23.

- Düşükcan, M., Canpolat, Ö., Eroğlu, M. (2017). Some heavy metals in *Luciobarbus esocinus* for public consumption and consumer protection, *Cellular and Molecular Biology*, (63); 24-28.
- Genç, T.O. (2021). Analysis of metal concentration and health risk assessment for consumption of four economically important fish species from Gökova Bay (Turkey). *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, (16/2), 329-340.
- Gündoğdu, A., Çulha, S.T., Koçbaş, F. (2020). Trace elements concentrations and human health risk evaluation for four common fish species in Sinop Coasts (Black Sea). *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 1854-1862.
- Guérin, T., Chekri, R., Vastel, C., Sirot, V., Volatier, J.L., Leblanc, J.C., Noël, L. (2011). Determination of 20 trace elements in fish and other seafood from the French market. *Food Chem.*, 127, 934-942.
- Kaçar, E. (2022). Relationship of concentrations of some heavy metals with fish size in muscle tissue of *Carassius gibelio* (Bloch, 1782) from the Tigris River (Turkey). *Erzincan University Journal of Science Technology*, 475-484.
- Kaçar, E. (2024). Heavy metal concentrations in various tissues of two fish from Damsa Dam Lake (Turkey) and associated health risk assessment. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 1-8.
- Kalıpcı, E., Namal, O. O. (2018). Removal of Cr (VI) using a novel adsorbent modification. Ultrasonic method with apricot kernel shells. *Environment Protection Engineering*, 44(3), 79-93.
- Kalıpcı, E., Cüce, H., Ustaoglu, F., Dereli, M. A., & Türkmen, M. (2023). Toxicological health risk analysis of hazardous trace elements accumulation in the edible fish species of the Black Sea in Türkiye using multivariate statistical and spatial assessment. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 97, 104028.
- Kahvecioğlu, Ö., Kartal, G., Güven, A., Timur, S. (2003). Metallerin çevresel etkileri - I . İTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 1-12.
- Köker, L. (2022). Health risk assessment of heavy metal concentrations in selected fish species from İznik Lake Basin, Turkey. *Environ. Monit. Assess.*, 194:372, 1-11.
- Köse, E., Uysal, K. (2008). Cinsi olgunluğa erişmemiş pullu sazanların (*Cyprinus carpio* L., 1758) kas, deri ve solungaçlarındaki ağır metal akümülyasyon oranlarının karşılaştırılması, *Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17: 19-26.
- Liu, Q., Liao, Y., Shou, L. (2018). Concentration and potential health risk of heavy metals in seafoods collected from Sanmen Bay and its adjacent areas, China. *Mar. Pollut. Bull.*, 131, 356-364.
- Liu, Q., Xu, X., Zeng, J., Shi, X., Liao, Y., Du, P., ... & Shou, L. (2019). Heavy metal concentrations in commercial marine organisms from Xiangshan Bay, China, and the potential health risks. *Marine Pollution Bulletin*, 141, 215-226.
- Özbolat, G., Tuli, A. (2016). Ağır metal toksisitesinin insan sağlığına etkileri. *Arşiv Kaynak Tarama Dergisi*, 25(4), 502-521.
- Qu, L., Huang, H., Xia, F., Liu, Y., Dahlgren, R.A., Zhang, M. (2018). Risk analysis of heavy metal concentration in surface waters across the rural-urban interface of the Wen-Rui Tang River, China. *Environ. Pollut.*, 237, 639-649.
- Raknuzzaman, M., Ahmed, M.K., Islam, M.S., Habibullah-Al-Mamun, M., Tokumura, M., Sekine, M., Masunaga, S. (2016). Trace metal contamination in commercial fish and crustaceans collected from coastal area of Bangladesh and health risk assessment. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 23, 17298-17310.
- Singh, U.K., Kumar, B. (2017). Pathways of heavy metals contamination and associated human health risk in Ajay River basin, India. *Chemosphere*, 174, 183-199.
- Sirkecioğlu, A.N., Bayır, A., Aras, N.M., Haliloğlu, H.İ. (2002). Türkiye'deki doğal ve kültür balıkçılığının mevcut durumu (1990-2000), dünyadaki yeri, problemleri ve çözüm önerileri. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 33(3), 337-343.
- Tanır, Ö.Z. (2021). Determination of heavy metals in some tissues of four fish species from the Karasu River (Erzincan, Turkey) for public consumption. *International Journal of Oceanography and Hydrobiology*, 232-246.
- Taş, E.Ç., Filipoğlu, I., Türker, Ç.D., Beyaztaş, S., Sunlu, U., Toğulga, M., Özyayın, O., Arslan, O. (2011). Heavy metal concentrations in tissues of edible fish (*Mullus barbatus*, L., 1758) from the Çandarlı Bay (Turkey). *Fresenius Environmental Bulletin*, 2834-2839.
- Türkmen, M., Mutlu, E., Zebel, S., & Türkmen, A. (2018). Doğu Karadeniz sahili Batlama Deresi'nde dağılım gösteren bazı balık türlerinde ağır metal birikiminin değerlendirilmesi. *Türk Tarım-Gıda Bilim ve Teknoloji dergisi*, 6(7), 858-862.
- Türkmen, M., Ögütçü, B. (2020). Assessment of Heavy Metals in Selected Fish Species from Markets in the Black Sea Region of Turkey. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 5(4), 636-639.

- Türkmen, M., Türkmen, A., Tepe, Y., Töre, Y., & Ateş, A. (2009). Determination of metals in fish species from Aegean and Mediterranean seas. *Food chemistry*, 113(1), 233-237.
- Töre, Y., Ustaoglu, F., Tepe, Y., & Kalipci, E. (2021). Levels of toxic metals in edible fish species of the Tigris River (Turkey); threat to public health. *Ecological Indicators*, 123, 107361.
- Tokalioğlu, Ş., Gönülalan, Z., Şimşek, E., Onmaz, N.E., Yılmaz, E. (2023). Bioaccumulation of heavy metals in freshwater fish species reared in Kayseri Region: Potential public health hazard of toxic metals. *Bozok Veterinary Sciences*, 4(1): 27-36.
- Tokatlı, C., Emiroğlu, Ö., Arslan, N., Köse, E., Çiçek, A., Dayıoğlu, H., Başkurt, S. (2016). Relationship between body weight and heavy metal bioaccumulation in mining basin fishes: Emet Stream Basin. *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi C-Yaşam Bilimleri ve Biyoteknoloji*, 57-72.
- URL-1: <https://sedatsen.files.wordpress.com/2016/11/7-sunum.pdf>, (Erişim Tarihi: 01.12.2023).
- URL-2: https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/2154/mod_resource/content/2/konu8a.pdf, (Erişim tarihi: 01.12.2023).
- Ustaoglu F., Islam M.S. (2020). Potential toxic elements in sediment of some rivers at Giresun, Northeast Turkey: a preliminary assessment for ecotoxicological status and health risk. *Ecol Indic.*, 113:106237
- Varol, M., Kaya, G.K., Sünbül, M.R. (2019). Evaluation of health risks from exposure to arsenic and heavy metals through consumption of ten fish species. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-10.
- Varol, M., Kaçar, E., Akın, H.K. (2020). Accumulation of trace elements in muscle, gill and liver of fish (*Capoeta umbla* and *Licibarbus mystaceus*) in the Tigris River (Turkey), and health risk assessment. *Environmental Research*, (186) 109570.
- Varol, M., Kaçar, E. (2023). Bioaccumulation of metals in various tissues of fish species in relation to fish size and gender and health risk assessment. *Current Pollution Reports*, (9), 327-337.

Ab-initio Study of Structural, Spectroscopic and Electronic Properties of High Energy Explosive Molecules: DFT/TD-DFT Calculations

Yavuz EKİNCİOĞLU^{1*}, Abdullah KEPCEOĞLU²

Abstract

This research explores the ground state geometry and molecular properties of FOX-7 and nitroguanidine molecules, with a focus on their spectroscopic and electronic characteristics. Initially, the conformational space of each molecule was systematically scanned using molecular mechanic calculations and the most probable conformer structure was obtained for each molecule. Subsequently, geometry optimizations of molecules were conducted by using ab initio density functional theory (DFT) with Becke's three-parameter hybrid-exchange functional, which combines the Lee–Yang–Parr correlation functional (B3LYP) method, and the standard 6-311++G(d,p) basis set. The theoretically determined geometrical parameters from optimized structure and experimental values available in the literature were compared, providing validation for the structural properties of both molecules. Furthermore, the stability and reactivity properties of both molecules are estimated in terms of HOMO-LUMO energies. Overall, this study contributes to a comprehensive understanding of the ground state geometry, molecular structure, and spectroscopic behavior of FOX-7 and nitroguanidine, paving the way for potential applications in various fields of science and technology.

Keywords: DFT, Molecular Structures, HOMO, LUMO, Spectroscopic Properties, FOX-7, Nitroguanidine.

Yüksek Enerjili Patlayıcı Moleküllerin Yapısal, Spektroskopik ve Elektronik Özelliklerinin Ab-initio Çalışması: YFT/TD-YFT Hesaplamaları

Öz

Bu araştırma, FOX-7 ve nitroguanidin moleküllerinin temel durum geometrisini ve moleküler özelliklerini incelemekte olup özellikle spektroskopik ve elektronik karakteristiklerine odaklanmaktadır. İlk olarak, her molekülün konformasyonel uzayı moleküler mekanik hesaplamalar kullanılarak sistemli bir şekilde tarandı ve her molekül için en olası konformer yapı elde edildi. Daha sonra, moleküllerin geometri optimizasyonları, Becke'nin üç parametrelili hibrid-değişim fonksiyonu içeren ab initio yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) kullanılarak gerçekleştirildi. Bu, Lee–Yang–Parr korelasyon fonksiyoneli (B3LYP) içeren yöntem ve standart 6-311++G(d,p) baz setini içermektedir. Teorik olarak belirlenen geometrik parametreler, optimize edilmiş yapıdan elde edilen deneysel değerlerle karşılaştırılarak, her iki molekülün yapısal özelliklerinin doğrulanmasını sağlamıştır. Ayrıca, her iki molekülün kararlılık ve reaktivite özellikleri HOMO-LUMO enerjileri açısından tahmin edilmiştir. Genel olarak, bu çalışma, FOX-7 ve nitroguanidin'in temel durum geometrisi, moleküler yapısı ve spektroskopik davranışının kapsamlı bir anlayışına katkıda bulunmakta olup, bilim ve teknolojinin çeşitli alanlarında potansiyel uygulamalar için yol açmaktadır.

Anahtar Kelimeler: YFT, Moleküler Yapı, HOMO, LUMO, Spektroskopik Özellikler, FOX-7, Nitroguanidin.

¹Bayburt University, Department of Opticianry, Bayburt, Türkiye, yekincioglu@bayburt.edu.tr

²Koç University Surface Science and Technology Center (KUYTAM), İstanbul, Türkiye, abdullahkepceoğlu@gmail.com

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 09.01.2024

Kabul/Accepted: 18.07.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Introduction

High energy explosives have been the topic of theoretical and experimental research (Chavez, Hill, Hiskey, & Kinkead, 2000; Chu et al., 2023; Ghanta, 2016, 2023; He et al., 2015; Manna, Das, & Ghanta, 2021; Mondal et al., 2009; Östmark et al., 1998). Owing to their capacity to store substantial quantities of chemical energy, these explosive materials pose significant challenges in handling and storage due to their exceptionally high reactivity. Furthermore, these chemical compounds find applications in both military and civilian sectors, serving roles in explosives, pyrotechnics, and propellants (Agrawal, 2010). This chemical group can be particularly dangerous to study experimentally since it can release a lot of energy in reaction to certain events including heat, collision, and friction. In this instance, theoretical studies are an excellent choice in terms of danger, time, and cost.

Nitroguanidine and FOX-7 molecules are very high-energy explosives. Especially, nitroguanidine can lower propellant flash and flame temperatures without lowering chamber pressure (Klapötke, 2022). Due to their simple molecular structure, these compounds can be easily manufactured and potentially employed in terrorist acts. The literature has many theoretical and experimental investigations for both molecules. These investigations have been used a variety of method to examine the structural, electrical, spectroscopic, and thermodynamic properties of both molecules (Agrawal, 2010; Jeong, Jeon, & Kwon, 2017; Kuklja, Rashkeev, & Zerilli, 2004; Pravica et al., 2012; Prendergast, 2018; Sorescu, Boatz, & Thompson, 2001, 2003; Sun et al., 2015; Taylor, Rob, Rice, Podeszwa, & Szalewicz, 2011).

To the best of our knowledge, the vertical ionization energy (VE) and adiabatic ionization energy (AE), as well as the nonlinear optical (NLO) characteristics of both molecules, have not been explored theoretically or experimentally. This work includes a theoretical examination of the VE, AE, and NLO properties in addition to the calculation of the structural, electronic, and spectroscopic properties were also compared with the previously estimated by various methods in the literature. The objective of this study is to develop a theoretical model applicable for uncovering the fundamental behavior and characteristics of high-energy explosives.

2. Computational Methods

In this study, the conformational analysis of FOX-7 and Nitroguanidine molecules were performed using the Spartan08 program with Merck molecular force field (MMFF) in the molecular mechanic method (Shao et al., 2006). The quantum chemical calculations for both molecules were carried out using the GAUSSIAN 09 program with density functional theory using the Becke three-

parameter Lee–Yang–Parr exchange correlation functional (B3LYP) with the standard 6-311++G (d,p) basis set (Frisch et al., 2009). The UV–vis spectra for both molecules were calculated using time-dependent density functional theory (TD-DFT) (Improta & Barone, 2004). The computations utilized an identical basis set and exchange correlation functional.

3. Results and Discussion

3.1. Structural Geometry Analysis

In the structural geometry analysis, it is critical to discover all possible conformations of molecules. The conformational space of each molecule was systematically scanned using molecular mechanic calculations using the Spartan08 program (Shao et al., 2006) and the Merck molecular force field (MMFF) (Halgren, 1996) method. The most probable conformer structure was obtained for each molecule. As a result, just one conformer was obtained for both molecules. The findings of conformational analysis indicated that the FOX-7 and nitroguanidine molecules lack a conformational distribution. There is only one stable conformer with a DFT energy of -598.507687 Hartree for FOX-7 and -409.996269 Hartree for nitroguanidine according to molecular mechanic method calculations. These structures were optimized using the DFT//B3LYP/6-311++G(d,p) method. The optimized molecules structures and structural properties are shown in Figure 1. and Table 1., respectively.

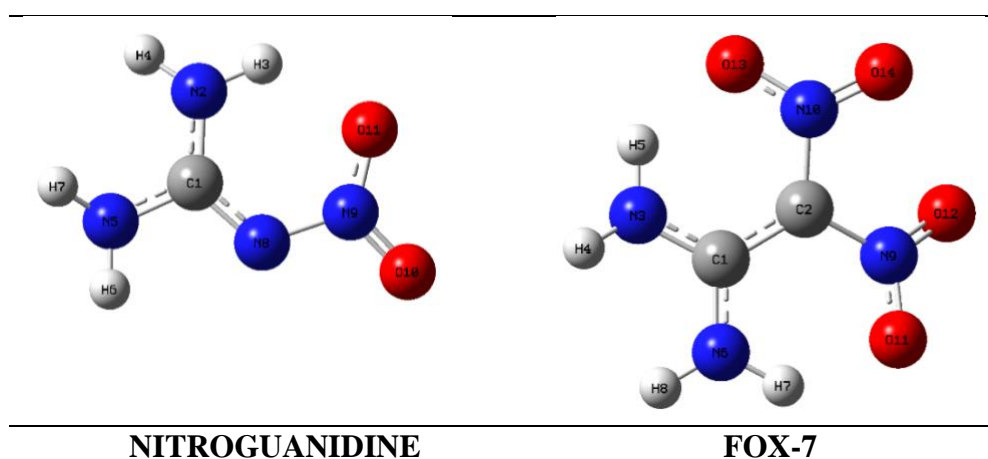


Figure 1. The optimized molecular structure obtained for **FOX-7** and **nitroguanidine** molecules.

Table 1. Comparative analysis of calculated bond lengths, bond angles and dihedral angles for FOX-7 and Nitroguanidine molecules.

Molecules					
NITROGUANIDINE			FOX-7		
Parameters			Parameters		
Bond Lengths (Å)	Calculated	Experimental (Koch, 2019)	Bond Lengths (Å)	Calculated	Experimental (Sorescu et al., 2001)
C1-N2	1.34	1.34	C1-C2	1.42	1.46
C1-N5	1.36	1.34	C2-N9	1.43	1.39
C1-N8	1.33	1.35	C2-N10	1.43	1.42
N8-N9	1.38	1.35	N9-O12	1.22	1.23
N9-O10	1.22	1.22	N10-O13	1.25	1.26
N9-O11	1.24	1.23	C1-N3	1.34	1.32
Bond angles (°)			Bond angles (°)		
N5-C1-N2	117.04	118	O12-N9-C2	119.36805	120
N5-C1-N8	113.96	112	O13-N10-C2	117.69497	118
N2-C1-N8	128.99	129	N9-C2-N10	116.44066	116
C1-N8-N9	119.35	118	N9-C2-C1	121.77967	123
N8-N9-O11	121.86	-	C2-C1-N6	121.48531	121
N8-N9-O10	115.09	124	N6-C1-N3	117.02937	118
O11-N9-O10	123.03	121	H5-N3-C1	117.29306	122
Dihedral angles (°)			Dihedral angles (°)		
H6-N5-C1-N2	-172.14206	-	O11-N9-C2-N10	156.13465	-148
N5-C1-N2-H3	-174.12730	-	O11-N9-C2-C1	-23.86535	6.34
H4-N2-C1-N8	164.04647	-	O12-N9-C2-C1	153.75423	-170
H6-N5-C1-N8	151.87073	-	O14-N10-C2-N9	-26.24577	33
N5-C1-N8-N9	173.42129	-	N10-C2-C1-N6	-166.15266	172
N2-C1-N8-N9	-6.36510	-	N9-C2-C1-N6	13.84734	-
C1-N8-N9-O11	6.23282	-	C2-C1-N3-H4	-162.89913	178
C1-N8-N9-O10	-174.68108	-			

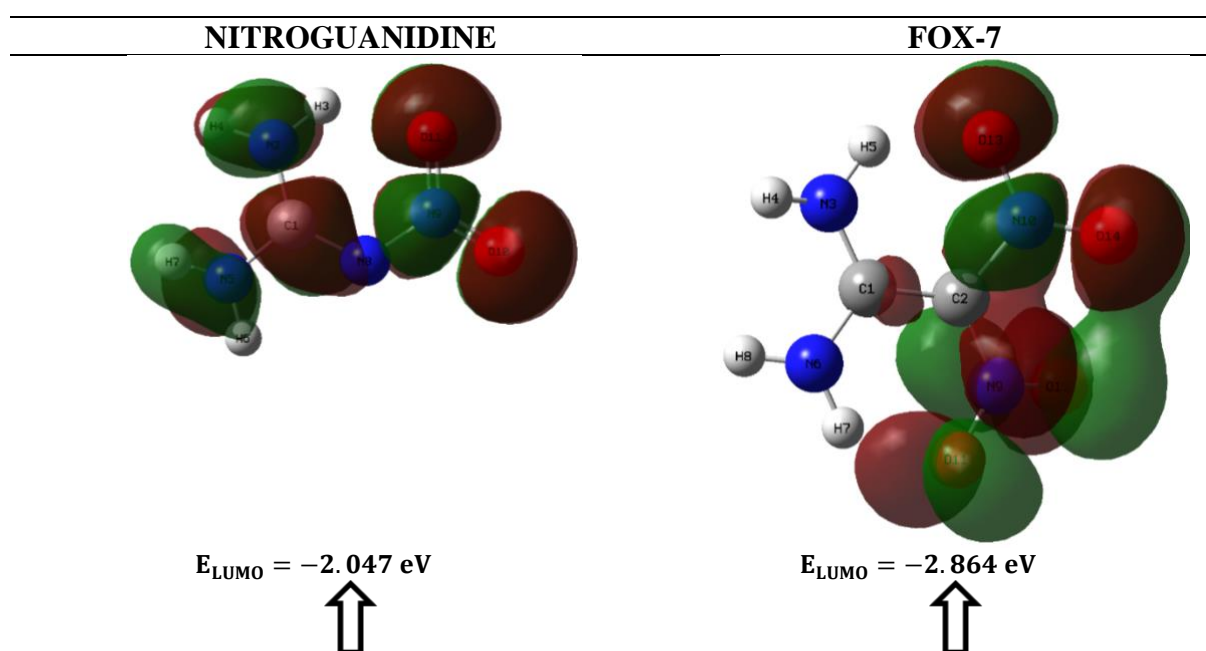
As a result, the computed molecular structure and properties align closely with the experimental data documented in the literature. The measured C1-N2, N9-O10, and N9-O11 bond lengths for the nitroguanidine molecule are 1.34 Å, 1.22 Å, and 1.23 Å, respectively. These values closely match the theoretical predictions of 1.34 Å, 1.22 Å, and 1.24 Å. Likewise, the experimental C2-N10, N10-O13, and C1-N3 bond lengths for the FOX-7 molecule are 1.43 Å, 1.25 Å, and 1.34 Å, demonstrating notable agreement with the corresponding theoretical data of 1.42 Å, 1.26 Å, and 1.32 Å.

For the hydrogen bond interaction of a molecule, it must be in the range of < 3.0 Å (Jeffrey & Jeffrey, 1997). In this study, the calculated bond length and bond angle of H3-O11 and N9-O11...H3 for Nitroguanidine are 1.85 Å and 108.17° respectively. The calculated bond lengths of H5-O13 and H7-O11 for FOX-7 are 1.82 and 1.81 Å respectively, and the calculated bond angles of N10-O13...H5 and N9-O11...H7 for FOX-7 are obtained as 108.24° and 108.24° respectively. According to our calculations, there is a possibility of an intramolecular N-H-O hydrogen bond between the -NO₂ and -NH₂ groups for the molecules studied.

The calculated bond angles for both molecules are in good agreement with the experimental values. However, it is noteworthy that the dihedral angles, particularly for the FOX-7 molecule, exhibit slight deviations from the experimental measurements.

3.2. Frontier Molecular orbitals and Chemical Reactivity Descriptors

The frontier molecular orbitals (FMOs), namely the highest occupied molecular orbital (HOMO) and the lowest unoccupied molecular orbital (LUMO), exert a significant influence on the electrical, electronic, and optical properties within the realm of physics (Fleming, 1976). The LUMO, or Lowest Unoccupied Molecular Orbital, represents the orbital with the minimal energy capable of accepting electrons. Consequently, it serves as an electron acceptor, delineating the molecule's susceptibility to nucleophilic attacks. Conversely, the HOMO, or Highest Occupied Molecular Orbital, designates the outermost orbital with higher energy containing electrons. Functioning as an electron donor, it defines the molecule's susceptibility to attacks by electrophiles (Karelson, Lobanov, & Katritzky, 1996). The energy gap, denoting the disparity between the energy levels of the LUMO and the HOMO, serves as a pivotal descriptor for elucidating the chemical reactivity and kinetic stability of the molecular system under consideration. In this context, the colors red and green symbolize the positive and negative phases, respectively. All compounds exhibit strong $\pi \rightarrow \pi^*$ and $\sigma \rightarrow \sigma^*$ transitions in the UV-vis range (Cotton, Wilkinson, Murillo, & Bochmann, 1999). The energies, oscillator strengths and major contributions of the transitions are given in Tables 4-5. The calculated absorption maxima values for FOX-7 and nitroguanidine molecules have been obtained as 341.874 nm and 318.438 nm, respectively. The maximum absorption at 341.874 nm and 318.438 nm corresponds to the transition from the HOMO to LUMO molecular orbitals (H \rightarrow L (61%) and H \rightarrow L (92%)). These transitions are predicted to be of $\pi \rightarrow \pi^*$ nature for FOX-7 and n $\rightarrow \pi^*$ nature for nitroguanidine molecules (see Figure.3).



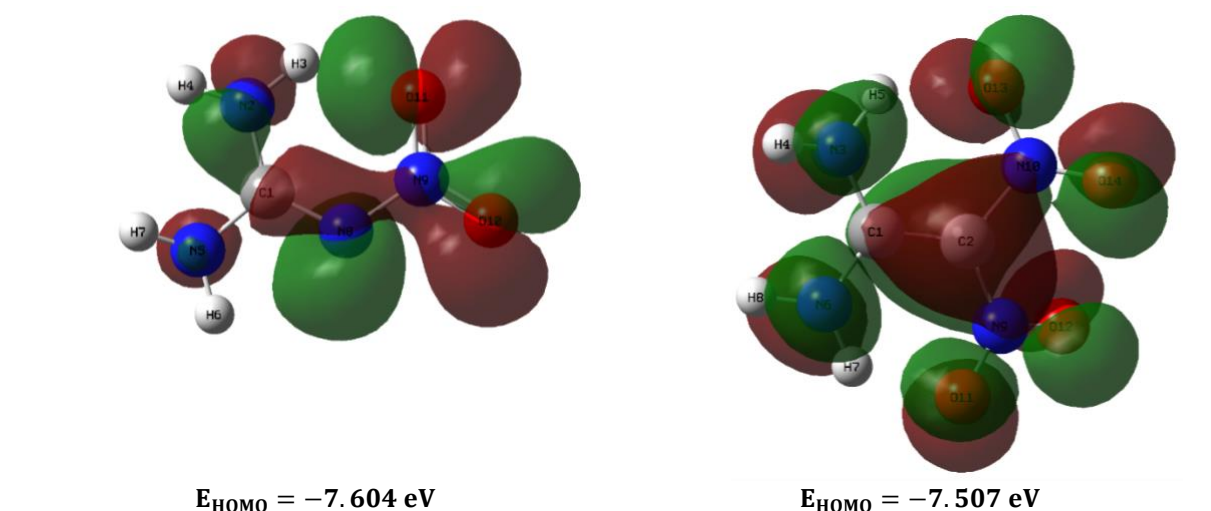


Figure 2. Localizations of the FMOs of **nitroguanidine** and **FOX-7** molecules.

The global chemical reactivity descriptors are defined utilizing Koopman's theorem (Koopmans, 1934). Ionization potential (I) and electron affinity (A) values are computed based on the energies of HOMO and LUMO through the equations $I = -E_{\text{HOMO}}$ and $A = -E_{\text{LUMO}}$. Additionally, expressions for chemical potential (μ), global hardness (η), global softness (S), electrophilicity index (ω) and the electronegativity (χ) are provided by the following equations. These quantum chemical parameters, described by equations 1-5 (Ekincioglu, Kılıç, & Dereli, 2021; Vijayaraj, Subramanian, & Chattaraj, 2009) were employed to calculate the global reactivity descriptors. The resulting values are presented in Table 2.

$$\mu = -\frac{(I+A)}{2} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{(I-A)}{2} \quad (2)$$

$$S = \frac{1}{\eta} \quad (3)$$

$$\omega = \frac{\mu^2}{2\eta} \quad (4)$$

$$\chi = \frac{(I+A)}{2} \quad (5)$$

Table 2. Chemical reactivity descriptors of **nitroguanidine** and **FOX-7** molecules.

Compounds	E_{gap} (eV)	I (eV)	A (eV)	μ (eV)	η (eV)	S (eV)	ω (eV)	χ (eV)
NITROGUANIDINE	5.557	7.604	2.047	-4.825	2.778	0.359	4.190	4.825
FOX-7	4.643	7.507	2.864	-5.185	2.321	0.430	5.791	5.185

Soft molecules have a smaller E_{gap} energy gap and are more reactive and less stable than hard molecules, which have a larger E_{gap} energy gap. According to the results, FOX-7 molecule is softer but less reactive and stable than nitroguanidine molecule. In the nitroguanidine molecule, the LUMO exhibits significant localization across the entire molecular moiety, while the region of the HOMO

extends approximately over the entire molecule, excluding hydrogen atoms bonded to N5-N3 atoms. For the FOX-7 molecule, the HOMO is prominently localized almost entirely across the molecular moiety, whereas the localization of the LUMO extends approximately over the entire molecule, with the exception of N5-N2 atoms and hydrogen atoms bonded to these atoms.

3.3. Nonlinear Optical Properties

The nonlinear optical parameters, namely dipole moment (D), polarizability (α) (measured in atomic units and electrostatic units), and first-order hyperpolarizability (β) (expressed in atomic units and electrostatic units), were determined through computational simulations employing the DFT/B3LYP/6-311++G(d,p) level of theory.

The dipole moment, polarizability, and first-order hyperpolarizability components of both molecules are expressed by the equations provided below and summarized in Table 3. The obtained values, given in atomic units (a.u.), were converted to statcoulomb (esu) units using the following conversion factors: for μ , 1 a.u. = 2.5412 Debye; for α , 1 a.u. = 0.1482×10^{-24} esu; and for β , 1 a.u. = 8.6393×10^{-33} esu (de Silva, de Silva, & De Silva, 2005; Ekincioglu et al., 2021; Prasad & Williams, 1991) he transformed data facilitates a consistent comparison and analysis within the context of electrodynamic properties.

Total dipole moment (μ_{tot}) for molecule is defined as in Equation 6

$$\mu_{tot} = (\mu_x + \mu_y + \mu_z)^{1/2} \quad (6)$$

Total polarizability (α_{tot}) for molecule can be evaluated by Equation 7

$$\alpha_{tot} = \frac{1}{3} (\alpha_{xx} + \alpha_{yy} + \alpha_{zz}) \quad (7)$$

The total first order hyper polarizability (β_{tot}) can be calculated by Equation 8

$$\beta_{tot} = (\beta_x^2 + \beta_y^2 + \beta_z^2)^{1/2} \quad (8)$$

where β_x , β_y and β_z are defined to be

$$\beta_x = (\beta_{xxx} + \beta_{xyy} + \beta_{xzz}) \quad (9)$$

$$\beta_y = (\beta_{yyy} + \beta_{yzz} + \beta_{yxx}) \quad (10)$$

$$\beta_z = (\beta_{zzz} + \beta_{zxx} + \beta_{zyy}) \quad (11)$$

Total first order hyper polarizability from Gaussian 09 output is given in Equation 12.

$$\beta_{tot} = \left[(\beta_{xxx} + \beta_{xyy} + \beta_{xzz})^2 + (\beta_{yyy} + \beta_{yzz} + \beta_{yxx})^2 + (\beta_{zzz} + \beta_{zxx} + \beta_{zyy})^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

Table 3. The values of calculated dipole moment (μ), polarizability (α), first order hyperpolarizability (β) components of **nitroguanidine** and **FOX-7** molecules

<i>Parameters</i>	NITROGUANIDINE	FOX-7
Dipole moment (Debye)		
μ_x	-7.3946	0.0000
μ_y	1.2972	0.0000
μ_z	0.2076	8.5441
μ_{tot}	7.5104	8.5441
Polarizability (a.u)		
α_{xx}	83.533	58.281
α_{yy}	60.241	81.534
α_{zz}	60.241	105.047
α_{tot} (a.u)	58.935	81.621
α_{tot} (esu)	8.734×10^{-24}	12.096×10^{-24}
Hyperpolarizability (a.u)		
β_{xxx}	67.429	7074.8×10^{-7}
β_{xxy}	184.791	-10.087×10^{-7}
β_{xyy}	8.884	16.616×10^{-7}
β_{yyy}	-71.960	237.00×10^{-7}
β_{xxz}	2.080	-20.694
β_{xyz}	6.712	156.912
β_{yyz}	2.465	-294.278
β_{xzz}	-56.985	34.978×10^{-7}
β_{yzz}	2.971	18.384×10^{-7}
β_{zzz}	1.965	344.995
β_{tot} (a.u)	117.585	29.022
β_{tot} (esu)	1015.85×10^{-33}	250.73×10^{-33}

The investigation revealed that a comparative analysis of the dipole moment and first-order hyperpolarizability values of the molecules under scrutiny with those of urea, serving as a reference molecule, proves instrumental in elucidating the behavior of nonlinear optical materials. The outcomes indicated that the overall dipole moments of nitroguanidine and FOX-7 molecules were 7.5104 and 8.5441 Debye, respectively. Notably, both molecules exhibited higher dipole moments compared to urea (1.3732 Debye) (Dixon & Matsuzawa, 1994). The dipole moment of urea was determined to be 5.47 times smaller than that of nitroguanidine and 6.22 times smaller than that of FOX-7.

The polarizability assessments indicate that the polarizability tensor along the x-axis exhibits greater dominance for the nitroguanidine molecule compared to its counterparts along the y and z directions. Conversely, the polarizability tensor along the z-axis displays heightened dominance for the FOX-7 molecule relative to the x and y directions. Consequently, it is evident that the contribution of the x-axis to the polarizability of the nitroguanidine molecule surpasses that of the other axes, while the z-axis holds greater influence on the polarizability of the FOX-7 molecule.

The first-order hyperpolarizability of urea, as documented in the literature, stands at 0.1947×10^{-30} esu (Dixon & Matsuzawa, 1994). Calculations reveal that the first-order hyperpolarizability

values for nitroguanidine and FOX-7 molecules are approximately 5.21 times and 1.28 times greater, respectively, than the magnitude reported for urea.

3.4. TD-DFT Results: UV-Vis Spectra and Ionization Energies

The ultraviolet-visible (UV-Vis) spectra of FOX-7 and nitroguanidine were investigated using the TD-DFT approach, employing the B3LYP/6-311++G(d,p) functional and basis set. Figure 3 illustrates the computed spectra, revealing prominent absorption bands at approximately 245 nm and 270 nm for nitroguanidine and FOX-7, respectively. Additionally, weaker absorption bands are observed around 200 nm for nitroguanidine and at 300 nm and 340 nm for FOX-7. The key features of the UV-Vis spectra, along with their associated transitions, are summarized in Tables 4 and 5. Furthermore, we explored the ionization of nitroguanidine and FOX-7 molecules by calculating adiabatic and vertical transitions, and the obtained results are presented in Table 6.

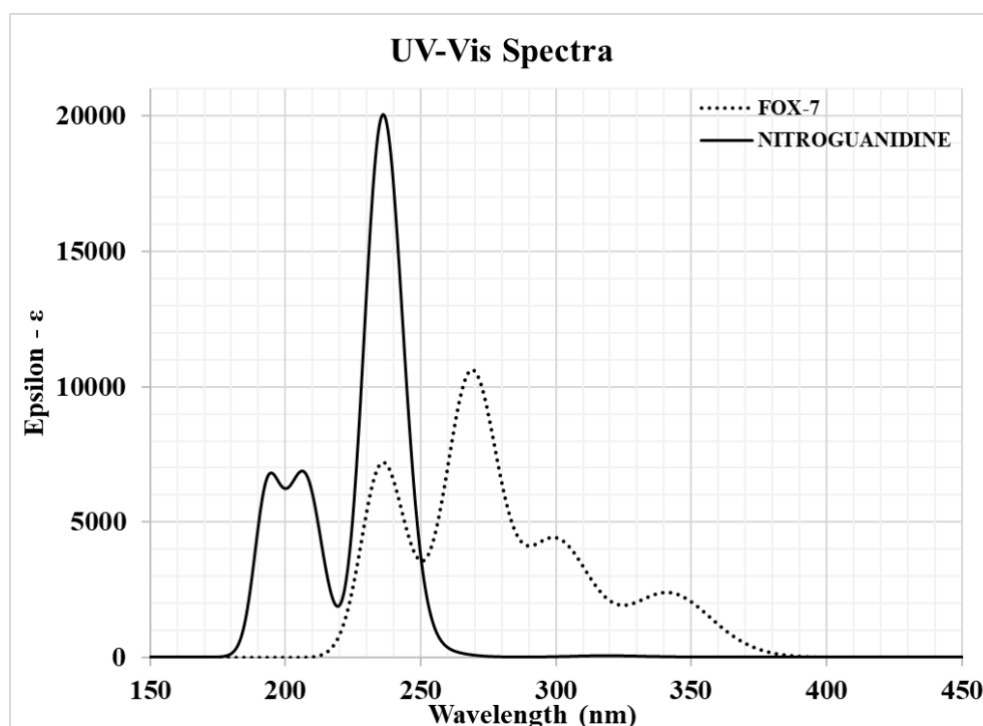


Figure 3. Calculated UV-Vis spectra of the FOX-7 and nitroguanidine molecules (GaussSum program (O'boyle, Tenderholt, & Langner, 2008) was used to plot spectra)

Table 4. TD-DFT results for the excited states of the neutral nitroguanidine (f is the oscillator strength)

Excited State	ΔE (nm)	f	Major Contributions to the Transitions (percentage)
1	318.438	0.0007	H->L (92%)
2	257.543	0.0024	H-3->L (81%)
3	235.872	0.2769	H-1->L (83%)
4	209.826	0.0224	H-4->L (15%), H-2->L (13%), H-1->L+1 (15%), H->L+1 (50%)
5	208.601	0.038	H-5->L (20%), H-4->L (30%), H-2->L (16%), H->L+1 (24%)
6	205.074	0.0196	H-1->L+1 (75%), H->L+1 (21%)
7	201.521	0.0299	H-5->L (70%), H-4->L (10%), H-2->L (15%)
8	193.106	0.0816	H-4->L (38%), H-2->L (39%)
9	189.827	0.0015	H-4->L+1 (28%), H-2->L+1 (63%)
10	185.299	0.0021	H->L+2 (68%), H->L+3 (11%), H->L+4 (10%)

The calculated absorption maximum value for the nitroguanidine molecule is 318.438 nm ($f = 0.0007$). This value is corresponding to the excited state $S_0 \rightarrow S_1$, which includes the transition from HOMO to LUMO ($n \rightarrow \pi^*$ in nature). The absorption value of the excited state $S_0 \rightarrow S_2$ is the transition HOMO-3 \rightarrow LUMO with the absorption value 257.543 nm ($f = 0.0024$), which is $n \rightarrow \pi^*$ in nature. The transition HOMO-1 \rightarrow LUMO has a wavelength of 235.872 nm. This transition corresponds to the excited state $S_0 \rightarrow S_3$ and is $\pi \rightarrow \pi^*$ in nature. Furthermore, the absorption of the excited state $S_0 \rightarrow S_4$ is 209.826 nm ($f = 0.0224$), corresponding to $n \rightarrow \pi^*$, and involving four configurations (HOMO-4 \rightarrow LUMO), HOMO-2 \rightarrow LUMO, HOMO-1 \rightarrow LUMO+1, and HOMO \rightarrow LUMO+1). The excited state $S_0 \rightarrow S_5$ has a wavelength of 208.601 nm ($f = 0.038$), corresponding to $\pi \rightarrow \pi^*$ transition, and involving four configurations (HOMO-5 \rightarrow LUMO, HOMO-4 \rightarrow LUMO, HOMO-2 \rightarrow LUMO, HOMO \rightarrow LUMO+1). The excited state $S_0 \rightarrow S_6$ has a wavelength of 205.074 nm ($f = 0.0196$). This transition corresponds to $n \rightarrow \pi^*$ and involving two configurations (HOMO-1 \rightarrow LUMO+1, HOMO \rightarrow LUMO+1). The excited state $S_0 \rightarrow S_7$ transition and involves three configurations (HOMO-5 \rightarrow LUMO, HOMO-4 \rightarrow LUMO, HOMO-2 \rightarrow LUMO) with an absorption value of 201.521 nm ($f = 0.0299$), corresponds to $\pi \rightarrow \pi^*$ transition in nature. The excited state $S_0 \rightarrow S_8$ with a wavelength of 193.106 nm ($f = 0.0816$) corresponds to $n \rightarrow \sigma^*$ transition and involves two configurations (HOMO-4 \rightarrow LUMO, HOMO-2 \rightarrow LUMO). The absorption of the excited state $S_0 \rightarrow S_9$ is 189.827 nm ($f = 0.0015$) and corresponding to $n \rightarrow \pi^*$ transition and involving three configurations (HOMO-4 \rightarrow LUMO+1, HOMO-2 \rightarrow LUMO+1, HOMO-1 \rightarrow LUMO+1). Finally, the excited state $S_0 \rightarrow S_{10}$, with a wavelength of 185.299 nm ($f = 0.0021$), corresponds to $n \rightarrow \pi^*$ transition and involves three configurations (HOMO \rightarrow LUMO+2, HOMO \rightarrow LUMO+3, HOMO \rightarrow LUMO+4).

Table 5. TD-DFT results for the excited states of the neutral FOX-7 (f is the oscillator strength)

Excited State	ΔE (nm)	f	Major Contributions to the Transitions (percentage)
1	341.874	0.0323	H-1->L (28%), H->L (61%)
2	307.104	0.0187	H-4->L (16%), H-2->L (30%), H-1->L+1 (20%), H->L+1 (28%)
3	297.688	0.0445	H-3->L (12%), H-1->L (51%), HOMO->L (25%)
4	269.361	0.0875	H-2->L (25%), H->L+1 (57%)
5	269.115	0.0523	H-3->L (69%), H->L (12%)
6	256.383	0.0161	H-7->L (24%), H-6->L (21%), H-3->L+1 (31%)
7	241.529	0.0331	H-4->L (39%), H-1->L+1 (51%)
8	234.286	0.0734	H-4->L (32%), H-2->L (27%), H-1->L+1 (15%)
9	233.242	0.001	H-4->L+1 (20%), H-2->L+1 (68%)
10	225.102	0.0068	H-5->L (50%), H-4->L+1 (27%)

The calculated absorption maximum value for the FOX-7 molecule is 341.874nm ($f = 0.0323$). This value is equal to the excited state $S_0 \rightarrow S_1$, including the transition from HOMO to LUMO and from HOMO-1 to LUMO corresponding to a $\pi \rightarrow \pi^*$ transition in nature. The absorption value of the excited state $S_0 \rightarrow S_2$ is 307.104 nm ($f = 0.0187$), and corresponds to $\pi \rightarrow \pi^*$ transition and involves four configurations (HOMO-4 \rightarrow LUMO), HOMO-2 \rightarrow LUMO, HOMO-1 \rightarrow LUMO+1, HOMO \rightarrow LUMO+1). The absorption value of the excited state $S_0 \rightarrow S_3$ is 297.688 nm ($f = 0.0445$), and this transition corresponds to $\pi \rightarrow \pi^*$, and involves three configurations (HOMO-3 \rightarrow LUMO), HOMO-1 \rightarrow LUMO, HOMO \rightarrow LUMO.) Furthermore, the absorption of the excited state $S_0 \rightarrow S_4$ is 269.361 nm ($f = 0.0875$), and this transition corresponds to $\pi \rightarrow \pi^*$ and involves two configurations (HOMO-2 \rightarrow LUMO), HOMO \rightarrow LUMO+1). The excited state $S_0 \rightarrow S_5$ is equal to 269.115 nm ($f = 0.0523$), and this transition corresponds to $\pi \rightarrow \pi^*$, and involves two configurations (HOMO-3 \rightarrow LUMO), HOMO \rightarrow LUMO). The excited state $S_0 \rightarrow S_6$ has a wavelength of 256.383 nm ($f = 0.0161$). This transition corresponds to $\pi \rightarrow \pi^*$ nature and involves three configurations (HOMO-7 \rightarrow LUMO, HOMO-6 \rightarrow LUMO, HOMO-3 \rightarrow LUMO+1). The excited state $S_0 \rightarrow S_7$ is the transition and involves two configurations (HOMO-4 \rightarrow LUMO, HOMO-1 \rightarrow LUMO+1) with the absorption wavelength of 241.529 nm ($f = 0.0331$), which is $\pi \rightarrow \pi^*$ in nature. The excited state $S_0 \rightarrow S_8$ is with a wavelength of 234.286nm ($f = 0.0734$) corresponding to $n \rightarrow \pi^*$ transition and involves three configurations (HOMO-4 \rightarrow LUMO, HOMO-2 \rightarrow LUMO, HOMO-1 \rightarrow LUMO+1). The absorption of the excited state $S_0 \rightarrow S_9$ is 189.827 nm ($f = 0.001$) and this transition is corresponded to $\pi \rightarrow \pi^*$ and involves two configurations (HOMO-4 \rightarrow LUMO+1), HOMO-2 \rightarrow LUMO+1). The excited state $S_0 \rightarrow S_{10}$ is 225.102 nm ($f = 0.0068$) and this transition is corresponded to $n \rightarrow \pi^*$ and involves two configurations (HOMO-5 \rightarrow LUMO+1), HOMO-4 \rightarrow LUMO+1).

Table 6. Molecular energies (relative to its neutrals) and dipole moments of the FOX-7 and nitroguanidine (AI: Adiabatic Ionization, VI: Vertical Ionization)

Isomers	Energy (Hartree)	Relative Energy (Hartree)	Relative Energy (kcal/mol)	Relative Energy (cm ⁻¹)	Relative Energy (eV)	Dipole Moment (D)
FOX-7	-598.374	0.000	0.000	0.000	0.000	8.544
FOX-7 (AI)	-598.172	0.203	532.018	127.155	5.514	9.775
FOX-7 (VI)	-598.157	0.217	570.219	136.286	5.910	8.975
NITROGUANIDINE	-409.853	0.000	0.000	0.000	0.000	7.510
NITROGUANIDINE (AI)	-409.656	0.197	518.400	123.901	5.373	8.016
NITROGUANIDINE (VI)	-409.631	0.222	583.646	139.495	6.049	7.190

The ionization of FOX-7 was studied through adiabatic and vertical ionization methods. The resulting minimum energies were found to be -598.174, and -598.157 Hartree for the adiabatic and vertical ionized states. These energies correspond to 0.203, and 0.217 Hartree relative to their respective neutrals. Adiabatic and vertical ionization energies were calculated as 5.514 eV and 5.910 eV.

Similarly, the ionization of nitroguanidine molecule was studied, and the resulting minimum energies were -409.656, and -409.631 Hartree, corresponding to 0.197, and 0.222 Hartree relative to their respective neutrals. Adiabatic and vertical ionization energies were calculated as 5.373 eV and 6.049 eV.

4. Conclusions and Recommendations

In this study, the structural, electronic, spectroscopic, adiabatic and vertical ionization energy values, and NLO properties of nitroguanidine and FOX-7 molecules, which are high energy explosives were studied using density functional theory. Every molecule underwent conformational analysis, these structures were optimized, and the results were consistent with previous research. The HOMO and LUMO energies of the titled molecules were then used to compute the ionization potential and electron affinity values. Furthermore, the chemical potential (μ), electronegativity (χ), global softness (S), global hardness (η), and electrophilicity index (ω) values were attained. The results showed that FOX-7 molecule is softer but less reactive and stable than nitroguanidine molecule. The dipole moment, polarizability, and first-order hyperpolarizability were used to examine the nonlinear optical properties of these compounds. According to the obtained results, the dipole moment of urea was found 5.47 times smaller than of nitroguanidine and 6.22 times smaller than of FOX-7. Furthermore, the calculated first-order hyper polarizability values for nitroguanidine and FOX-7 molecules were founded be approximately 5.21 times and 1.28 times greater than the magnitude of urea respectively. Additionally, the vertical ionization energy (VE) and adiabatic ionization energy (AE) parameters were calculated through the construction of the singly charged cation radicals. AE of the nitroguanidine calculated as 5.373 eV and 5.514 eV for the FOX-7

molecule. VE of the of the nitroguanidine calculated as 6.049 eV and 5.910 eV for the FOX-7 molecule.

Acknowledgments

The research described in this article was funded by Grants No. 118C476 and No. 122F301 from the Scientific and Technical Research Council of Turkey (TÜBİTAK). However, the authors bear full responsibility for the content of this publication. It is important to note that the financial support provided by TÜBİTAK does not imply scientific approval or endorsement of the publication's content by TÜBİTAK.

Authors' Contributions

YE: Conceptualization, Experimental Design, Manuscript Drafting, Manuscript Review, Formal Analysis, Data Visualization, Manuscript Editing

AK: Conceptualization, Experimental Design, Manuscript Drafting, Manuscript Review, Formal Analysis, Data Visualization, Manuscript Editing

Statement of Conflicts of Interest

The authors affirm that they do not possess any conflicting interests to disclose.

Data Availability Statement

This manuscript does not have associated data, or the data will not be deposited. The corresponding author is available to provide the data upon request to interested parties.

Statement of Research and Publication Ethics

The author declares that this study complies with Research and Publication Ethics.

References

- Agrawal, J. P., (2010). High energy materials: propellants, explosives and pyrotechnics: *John Wiley & Sons*.
- Chavez, D., Hill, L., Hiskey, M., and Kinkead, S., (2000). Preparation and explosive properties of azo-and azoxy-furazans. *Journal of Energetic Materials*, 18(2-3), 219-236.
- Chu, G.-b., Xi, T., Wang, S.-y., Shui, M., Yan, Y.-h., Lv, G.-q., and Tan, F., (2023). Recent progress in research on the dynamic process of high-energy explosives through pump-probe experiments at high-intensity laser facilities. *Energetic Materials Frontiers*.
- Cotton, F. A., Wilkinson, G., Murillo, C. A., and Bochmann, M. (1999). *Advanced inorganic chemistry: John Wiley & Sons*.
- De Silva, I. C., De Silva, R. M., and De Silva, K. N., (2005). Investigations of nonlinear optical (NLO) properties of Fe, Ru and Os organometallic complexes using high accuracy density functional theory (DFT) calculations. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, 728(1-3), 141-145.
- Dixon, D. A., and Matsuzawa, N., (1994). Density functional study of the structures and nonlinear optical properties of urea. *The Journal of Physical Chemistry*, 98(15), 3967-3977.
- Ekincioglu, Y., Kılıç, H. Ş., and Dereli, Ö., (2021). DFT Study of Conformational Analysis, Molecular Structure and Properties of para-, meta- and ortho 4-Methoxyphenyl Piperazine Isomers. *Brazilian Journal of Physics*, 51(4), 958-968.
- Fleming, I. (1976). Frontier orbitals and organic chemical reactions. (*No Title*).
- Frisch, M., Trucks, G., Schlegel, H., Scuseria, G., Robb, M., Cheeseman, J., and Petersson, G., (2009). 09, Revision D. 01, Gaussian. Inc., Wallingford, CT.
- Ghanta, S. (2016). Theoretically predicted Fox-7 based new high energy density molecules. *Journal of Molecular Structure*, 1118, 28-33.
- Ghanta, S., (2023). Design of derivatives of FOX-7-based new four-member heterocyclic insensitive high energy density molecules: a theoretical prospectives. *Journal of Molecular Modeling*, 29(1), 18.
- Halgren, T. A., (1996). Merck molecular force field. I. Basis, form, scope, parameterization, and performance of MMFF94. *Journal of computational chemistry*, 17(5-6), 490-519.
- He, P. Zhang, J.-G., Wang, K., Yin, X., Jin, X., and Zhang, T.-L., (2015). Extensive theoretical studies on two new members of the FOX-7 family: 5-(dinitromethylene)-1, 4-dinitramino-tetrazole and 1, 1'-dinitro-4, 4'-diamino-5, 5'-bitetrazole as energetic compounds. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17(8), 5840-5848.
- Improta, R., and Barone, V., (2004). Absorption and fluorescence spectra of uracil in the gas phase and in aqueous solution: A TD-DFT quantum mechanical study. *Journal of the American Chemical Society*, 126(44), 14320-14321.
- Jeffrey, G. A., and Jeffrey, G. A., (1997). *An introduction to hydrogen bonding: Oxford university press New York*. 12
- Jeong, K., Jeon, Y., and Kwon, S., (2017). Assessment of various DFT, DFT-D, and MP2 methods for studying FOX-7 detonation properties. *Journal of Molecular Modeling*, 23, 1-6.
- Karelson, M., Lobanov, V. S., and Katritzky, A. R., (1996). Quantum-chemical descriptors in QSAR/QSPR studies. *Chemical reviews*, 96(3), 1027-1044.
- Klapötke, T. M., (2022). *Chemistry of high-energy materials: Walter de Gruyter GmbH & Co KG*.
- Koch, E. C., (2019). Insensitive high explosives: III. Nitroguanidine–synthesis–structure–spectroscopy–sensitiveness. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 44(3), 267-292.
- Koopmans, T., (1934). About the assignment of wave functions and eigenvalues to the individual electrons of an atom. *Physica*, 1(1-6), 104-113.
- Kuklja, M., Rashkeev, S., and Zerilli, F., (2004). Ab initio Calculations of the Electronic Structure of 1, 1-Diamino-2, 2-Dinitroethylene. *Paper presented at the AIP Conference Proceedings*.
- Manna, M. S., Das, C. K., and Ghanta, S., (2021). Design of CHNO based new hetero-cyclic high energy density molecules: a theoretical survey. *Structural Chemistry*, 32, 1095-1104.

- Mondal, T., Saritha, B., Ghanta, S., Roy, T., Mahapatra, S., and Prasad, M. D., (2009). On some strategies to design new high energy density molecules. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, 897(1-3), 42-47.
- O'boyle, N. M., Tenderholt, A. L., and Langner, K. M., (2008). Cclib: a library for package-independent computational chemistry algorithms. *Journal of computational chemistry*, 29(5), 839-845.
- Östmark, H., Langlet, A., Bergman, H., Wingborg, N., Wellmar, U., and Bemm, U., (1998). *FOX-7—A new explosive with low sensitivity and high performance*. Paper presented at the The 11th International Detonation Symposium, Colorado, USA.
- Prasad, P. N. and Williams, D. J., (1991). Introduction to nonlinear optical effects in molecules and polymers: Wiley New York. 1.
- Pravica, M., Liu, Y., Robinson, J., Velisavljevic, N., Liu, Z., and Galley, M., (2012). A high-pressure far-and mid-infrared study of 1, 1-diamino-2, 2-dinitroethylene. *Journal of Applied Physics*, 111(10).
- Prendergast, R., (2018). A Solid-State Theoretical and Experimental Analysis of Nitroguanidine and Gunshot Residues. *Syracuse University*,
- Shao, Y., Molnar, L., Jung, Y., Kussmann, J., Ochsenfeld, C., Brown, S., and O'Neill, D., (2006). Spartan'08, Wavefunction, Inc. Irvine, CA. *Phys. Chem. Chem. Phys*, 8, 3172-3191.
- Sorescu, D. C., Boatz, J. A., and Thompson, D. L., (2001). Classical and quantum-mechanical studies of crystalline FOX-7 (1, 1-diamino-2, 2-dinitroethylene). *The Journal of Physical Chemistry A*, 105(20), 5010-5021.
- Sorescu, D. C., Boatz, J. A., and Thompson, D. L., (2003). First-principles calculations of the adsorption of nitromethane and 1, 1-diamino-2, 2-dinitroethylene (FOX-7) molecules on the Al (111) surface. *The Journal of Physical Chemistry B*, 107(34), 8953-8964.
- Sun, Q., Zhang, Y., Xu, K., Ren, Z., Song, J., and Zhao, F., (2015). Studies on thermodynamic properties of FOX-7 and its five closed-loop derivatives. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 60(7), 2057-2061.
- Taylor, D. E., Rob, F., Rice, B. M., Podeszwa, R., and Szalewicz, K., (2011). A molecular dynamics study of 1, 1-diamino-2, 2-dinitroethylene (FOX-7) crystal using a symmetry adapted perturbation theory-based intermolecular force field. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 13(37), 16629-16636.
- Vijayaraj, R., Subramanian, V., and Chattaraj, P. (2009). Comparison of global reactivity descriptors calculated using various density functionals: a QSAR perspective. *Journal of chemical theory and computation*, 5(10), 2744-2753.

BiLSTM Derin Öğrenme Yöntemi ile Uzun Metinlerden Yeni Özet Metinlerin Türetilmesi

Onur ŞAHİN^{1*}, Rıdvan YAYLA²

Öz

Günümüzde, derin öğrenme tekniklerinin yaratıcı metin oluşturma süreçlerine entegrasyonu, araştırmacılar ve yazılım geliştiriciler arasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Derin öğrenme, büyük veri setleri üzerinde karmaşık bilgileri öğrenme yeteneği ile bilinir ve bu özellik, dil anlama ve metin üretme konularında önemli avantajlar sunar. Çalışmanın amacı Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM) derin öğrenme mimarisi temelinde uzun bir metindeki ifadelerin eğitilerek yeni bir özet metnin türetilmesidir. Bu amaç doğrultusunda Türkçe dilinde yazılmış farklı uzunlukta ve türdeki (Roman, Kişisel Gelişim) iki doküman veriseti olarak kullanılmış, veri setindeki metinler veri temizleme, tokenizasyon ve vektörleştirme gibi bir dizi önışlemeden geçirilmiştir. Çalışma, BiLSTM'nin yanı sıra LSTM, GRU, BiGRU ve CNN gibi diğer derin öğrenme mimarilerini de değerlendirmiş ve BiLSTM modelinin iki farklı kitap türünde ve farklı kelime sayılarında (1.000, 2.000 ve 5.000 kelime) en yüksek METEOR, BLEU ve ROGUE skorlarına sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgular, BiLSTM'nin metin özetleme ve metin üretme için diğer modellere göre daha başarılı sonuçlar ürettiğini göstermektedir. BiLSTM kullanarak belli bir roman veya kişisel gelişim kitabından yaratıcı ve özgün metinler üretme yöntemi araştırmacılar ve yazılım geliştiriciler için ilham verici bir kaynak olup, önerilen yöntemin farklı metin türleri için de uygulanabileceği öngörülmektedir. Bu sayede, metin özetleme ve üretme süreçlerinde BiLSTM mimarisinin başarılı sonuçlar ürettiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: BiLSTM, Doğal dil işleme, Metin üretme, Derin öğrenme.

New Summary Text Generation from Long Texts With BiLSTM Deep Learning Method

Abstract

Nowadays, the integration of deep learning techniques into creative text generation processes is widely used among researchers and software developers. Deep learning is known for its ability to learn complex information over large data sets, and this feature offers significant advantages in language understanding and text generation. The aim of the study is to derive a new summary text by training the expressions in a long text on the basis of Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM) deep learning architecture. For this purpose, two documents of different lengths and types (Novel, Personal Development) written in Turkish were used as a dataset, and the texts in the dataset were subjected to a series of pre-processes such as data cleaning, tokenization and vectorization. The study evaluated other deep learning architectures such as LSTM, GRU, BiGRU and CNN, as well as BiLSTM, and found that the BiLSTM model had the highest METEOR, BLEU and ROGUE scores in two different book types and different word counts (1,000, 2,000 and 5,000 words). showed. These findings show that BiLSTM produces more successful results than other models for text summarization and text generation. The method of generating creative and original texts from a certain novel or personal development book using BiLSTM is an inspiring resource for researchers and software developers, and it is envisaged that the proposed method can be applied for different text types. In this way, it has been shown that the BiLSTM architecture produces successful results in text summarization and generation processes.

Keywords: BiLSTM, Natural language processing, Text generation, Deep learning.

¹Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği ABD. Bilgisayar Mühendisliği Yüksek Lisans Programı, Bilecik, Türkiye, onur2000sahin@outlook.com

²Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bilecik, Türkiye, ridvan.yayla@bilecik.edu.tr

¹<https://orcid.org/0009-0000-8955-658X> ²<https://orcid.org/0000-0002-1105-9169>

1. Giriş

Dil, insanların birbirleriyle iletişim kurmasını, fikirlerini ve duygularını ifade etmesini, bilgi paylaşmasını ve kültürlerini oluşturmasını sağlar. Ayrıca, şiir, müzik, edebiyat ve sanat gibi yaratıcı ifade biçimlerinin de temelini oluşturur. Bu temel oluşması, dilin zengin semantik yapılarının çeşitli biçimlerde kullanılması ile mümkün olmaktadır. İnsan dili, karmaşıklığı ve yaratıcı ifade gücü ile makine üstü bir iletişim aracıdır. Günümüzde sürekli olarak gelişen yapay zekâ teknikleri, dildeki semantik karmaşıklığın detaylı bir biçimde incelenmesine imkân sağlamaktadır.

Derin öğrenme, belli algoritmalarındaki karmaşık görevlerin öğrenilmesini sağlayan yapay sinir ağı temelli bir yapay zekâ alanıdır. Öğrenme modelleri, örüntü tanıma, doğal dil işleme ve makine çevirisi gibi geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Bu modeller, metin sınıflandırma, bilgi çıkarımı, duygu analizi ve özetleme gibi doğal dil işleme görevlerinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

Yapay zekâ temelinde oluşturulan modeller temelde yinelemeli sinir ağları (RNN) ile veya buna bağlı eğitilmiş modeller kullanılarak inşa edilir. RNN'ler, önceki girdileri hatırlama ve sonraki girdilerle ilişkilendirme yeteneğine sahiptir (Sherstinsky, 2020).

Bilginin öğrenme modellerinde geçici hafızada tutulması, dilin uzun vadeli bağımlılıklarını anlama açısından önemli bir kriterdir. LSTM, bu kriteri sağlamak için, unutma kapısı, girdi kapısı ve çıkış kapısı olarak üç ana özellikten oluşmaktadır. Bu özellikler, öğrenme modelinde dil karmaşıklığını anlama, yaratıcı ve yeni metinler üretme yeteneğini sağlar.

Gated Recurrent Unit (GRU), LSTM'nin bir türüdür ve RNN'lerdeki problemleri çözmek için tasarlanmıştır. GRU, daha basit bir yapıya sahip olup, özellikle hafıza sorunlarına çözüm sunarak dilin uzun vadeli bağımlılıklarını anlamada etkili olabilir. Bidirectional GRU (BiGRU) ve Bidirectional LSTM (BiLSTM) modelleri, metin içindeki bağlamsal ilişkileri anlamada daha gelişmiş bir yaklaşım sunar. Bu modeller, sadece önceki girdilere değil, aynı zamanda sonraki girdilere de odaklanarak bilginin daha kapsamlı bir şekilde öğrenilmesine olanak tanır. Convolutional Neural Network (CNN), özellikle görüntü işleme alanında popüler olan bir derin öğrenme mimarisidir. Metin işleme için uyarlanmış CNN modelleri, belirli metin özelliklerini vurgulayarak ve öğrenerek dilin yapılarını anlamada kullanılabilir.

Bu çalışmada Türkçe dilinde yazılmış bir roman ve yabancı bir dilde yazılmış ancak Türkçeye çevrilmiş bir kişisel gelişim kitabı olarak iki farklı metin türü ele alınmıştır. Bu, modelin farklı dilsel yapıları ve konuları anlama yeteneğini test etmek açısından önemlidir. Roman metni, karmaşık dil yapısı ve edebi anlatım tarzı ile karakterize edilirken, Kişisel gelişim türünde daha genel bir dil kullanılmaktadır. Ayrıca çalışmanın birinci yazarı tarafından yazılan Türkçe roman metni, önerilen yöntemin yeni fikirler ve yaratıcı metinler çıkarma potansiyeline işaret etmektedir. Bu kapsamda çalışma sadece metin özetleme değil, aynı zamanda yaratıcı ve özgün metinlerin türetilmesi amacını

da içermektedir. Geleneksel özetleme yöntemleri, metindeki önemli bilgileri özetlemek için kullanılan belirli cümleleri seçmeye odaklanırken, BiLSTM, bu çalışma kapsamında metnin dilbilgisi yapısı ve anlamsal içeriğini anlayarak yeni ve özgün cümleler üretmektedir. Bu özellik, edebi yaratıcılık, öyküleme ve otomatik metin üretimi alanlarında yeni olasılıklar sunmaktadır.

Bu çalışmada, BiLSTM mimarisinin yanı sıra LSTM, GRU, BiGRU ve CNN gibi farklı derin öğrenme mimarileri kullanılarak uzun metinlerden oluşan bir verisetinin eğitilmesiyle ayrı modeller oluşturulmuş ve bu modeller yeni üretilecek özet metinler için analiz edilmiştir. Bu analizlerin doğrulukları Meteor, Bleu, Rogue gibi metin üretimi ve özetlemede sıklıkla kullanılan metriklerle gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Günümüzde makine öğrenmesi ve doğal dil işleme temelinde oluşturulan Yapay zekâ uygulamaları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Derin öğrenme modellerinin çok katmanlı ve gelişmiş yapısı sayesinde geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerine göre daha başarılı sonuçlar üretilebilmektedir. Derin öğrenme mimarileri içerisinde özellikle BiLSTM (Bidirectional Long Short-Term Memory), metin işleme uygulamalarında kullanılan bir tür yinelemeli sinir ağıdır. Bu mimari, analiz edilen verinin etkili bir şekilde öğrenilebilmesini sağlar. BiLSTM, bilgiyi uzun süreli olarak saklayabilme özelliğine sahip olmasıyla ön plana çıkar. Ayrıca, gereksiz bilgileri unutma yeteneği sayesinde, işe yarar özelliklere odaklanır ve bu sayede veri içerisindeki önemsiz detayları filtreler. Ayrıca sadece önceki girdilere değil, aynı zamanda sonraki girdilere de dikkat ederek bilginin daha kapsamlı bir şekilde öğrenilmesine imkân tanır. Bu çalışmada, örnek bir roman ve kişisel gelişim kitabındaki tüm metinler veriseti olarak BiLSTM mimarisine giriş verisi olarak aktarılmış ve bu metinlerden örnek bir özet metin çıkış verisi türetilmiştir.

2.1. Literatür Taraması

Literatür çalışmalarında BiLSTM yöntemleri, metin sınıflandırma, duygu analizi ve görüş madenciliği gibi alanlarda daha çok kullanılmaktadır. Ancak metinler arasındaki semantik ilişkilerden yararlanarak özellik çıkarımı için yeni metinler oluşturmak, daha az rastlanan bir çalışma alanıdır. Son yıllarda, derin öğrenme modellerinin, özellikle BiLSTM ve gömme (embedding) katmanlarının dil anlama ve metin üretme yöntemlerinde daha başarılı olduğu gözlemlenmektedir.

Young ve ark. tarafından yapılan çalışmada, derin öğrenme mimarilerinin (LSTM, GRU, CNN) doğal dil işleme alanındaki gelişmeleri incelenerek, çeşitli doğal dil işleme görevlerinde kullanılan modellerin başarı oranları analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Ayrıca derin öğrenme modellerinin

doğal dil işleme alanındaki avantajlarına ve gelecekteki çalışmaların hangi alanlara döneceğine ilişkin bilgiler detaylandırılmıştır (Young ve ark, 2018). Sutskever ve ark. çalışmalarında, tekrarlayan sinir ağları (RNNs) üzerindeki zorlukların Free-Hessian optimizasyonu ile aşılabildiğini göstermiş, çalışmada karakter düzeyinde dil modelleme görevlerinde uygulanan yeni bir RNN çeşidi önerilmiştir (Sutskever ve ark., 2011). Çarpımsal bağlantılar içeren bu RNN türünde, standart mimarilere göre daha etkili sonuçlar elde edilebilmektedir. Ayrıca çalışmada, dilin karakter düzeyindeki modellemesinin zorluğuna rağmen, bu yöntemin güçlü bir öğrenme sistemi olduğu vurgulanmıştır. Bu öğrenme sisteminin, kelimeleri kolayca öğrendiği ve eğitim setinde görünmeyen uygun kelimelerin olasılığını hesaplayabildiği belirtilmektedir.

Yu ve ark. Doğal dil işlemenin temel konularından biri olan metinden yeni metin oluşturma için genel ve özel teknikleri açıklamıştır (Yu ve ark., 2022).

Zhao ve ark. çalışmasında, büyük dil modellerinin (LLM) metin oluşturma performanslarını incelemişlerdir. LLM'lerin yüksek kaliteli ve tutarlı metin üretme yeteneklerini değerlendirmişler ve bu modellerin gelecekteki sınırlamalarına ve güvenlik risklerine değinmişlerdir. Büyük dil modellerinin etkililiğini artırmak için daha fazla ince ayar, sağlam eğitim ve kontrollü üretim yöntemleri önerilmiştir (Zhao ve ark., 2023).

Vo ve ark. çalışmasında, meta-öğrenme ve BiLSTM kullanarak açıklanabilir bir özet çıkarma modelini ele almaktadır. Araştırma, sınırlı veri ile performansı artırmayı amaçlayan meta-öğrenme algoritması kullanarak derin öğrenme modelini eğitiyor ve modelin karar verme sürecine dair içgörü sağlamak için SHAP, doğrusal regresyon ve karar ağaçları gibi çeşitli açıklama tekniklerini uygulamıştır. Sonuçlar, modelin performansını değerlendirerek açıklanabilirlik ve etkinlik açısından önemli bulgular sunmaktadır (Vo ve ark., 2024).

Iqbal ve Qureshi tarafından gerçekleştirilen çalışma derin öğrenme alanındaki gelişmelerin özellikle Doğal Dil İşleme (NLP) bağlamında metin üretme modellerine etkisini ele almaktadır. 2015 yılından itibaren yayınlanan bir dizi çalışmayı inceleyerek derin öğrenme modellerinin geçmişi, bugünü ve geleceğini detaylı bir şekilde analiz etmeyi amaçlamaktadır. Çalışma, kelime yerleştirmeleri, RNN'ler, CNN'ler, VAE'ler ve GAN'lar gibi popüler derin öğrenme modellerini inceleyerek bu modellerin metin üretme sorunlarına nasıl yaklaştığını ele almaktadır (Iqbal ve Qureshi, 2020). Li ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışma, önceden eğitilmiş dil modellerin Pre-trained language models (PLM) kullanımına odaklanan bir anket niteliğindedir. Bu çalışma, derin öğrenme yöntemlerinin metin oluşturma alanındaki gelişmeleri ve özellikle PLM'lerin metin üretimine olan katkılarını incelemektedir. Ayrıca, PLM'leri metin oluştururken karşılaşılan temel zorlukları ve bu zorlukların çözüm önerilerini tartışmaktadır. Çalışma PLM'leri metin üretimine uygulamanın üç temel yönünü ele almaktadır. Bunlar, girdi temsili öğrenimi, etkili bir PLM modelinin tasarımı ve referans metni verilen PLM'lerin etkili bir şekilde optimize edilmesiyle ilgili

konuları içermektedir. Her bir yöntem, mevcut zorluklarla birlikte detaylı bir şekilde incelenmiştir (Li ve ark., 2022).

Otter ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışma, doğal dil işleme (NLP) alanındaki derin öğrenme modellerinin kullanımına odaklanarak, alandaki son gelişmeleri sistematik bir şekilde ele almaktadır. Çalışma, derin öğrenme mimarileri ve yöntemleri konusunda bir genel bakış sunarak, çok sayıda güncel araştırmayı incelemekte ve bu araştırmaların alanına katkılarını özetlemektedir. Araştırma, hesaplamalı dilbilim, temel dilsel işleme konuları ve çeşitli uygulama alanlarına odaklanarak geniş bir yelpazede yapılmıştır. Derin öğrenme modellerinin, özellikle transformatör birimleri yığınlarının, NLP görevlerinde üstün performans sergilediği vurgulanmıştır. Çalışma, ön eğitim ve transfer öğrenimi gibi tekniklerin önemine değinerek, derin öğrenme modellerinin mevcut durumunu tartışmaktadır (Otter ve ark. 2021). Babüroğlu ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışma, Türkçe için derin öğrenme tabanlı doğal dil işleme modeli geliştirmeyi amaçlamaktadır. çalışmada, doğal dilin önemi ve karmaşıklığı vurgulanarak, bilgisayar ortamında doğal dil işlemenin zorlukları ele alınmaktadır. Derin öğrenme yöntemlerinin, yapay zekâ teknolojilerinde dil bilimi alanında kullanımına vurgu yapılmış ve özyinelemeli sinir ağları (RNN) özellikle sıralı verilerin işlenmesinde kullanışlı bulunmuştur. Çalışmada önerilen model, iki yönlü uzun-kısa vadeli bellek (BiLSTM) kullanılarak Türkçe sözcük etiketleme amacıyla geliştirilmiştir. Bu model, doğal dil araştırmacılarına kendi analizlerini gerçekleştirme ve kullanabilme imkânı sunan bir platform olarak tasarlanmıştır. BLSTM kullanılarak geliştirilen platform, uzman görüşleri ve geri bildirimlerle sürekli olarak iyileştirilmiş ve sözcük etiketleyici hata oranı azaltılmıştır (Babüroğlu ve ark., 2019). Semeniuta ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışma metin üretimi için Değişken Otomatik Kodlayıcı (VAE) üzerindeki mimari seçimlerin etkisini araştırmaktadır. Geleneksel VAE modellerinden farklı olarak, önerilen hibrit mimari, tekrarlayan bir dil modeli ile tamamen ileri beslemeli evrişimli ve ters evrişimli bileşenleri birleştirmektedir. Bu yeni mimari, hızlı çalışma süresi, yakınsama yeteneği ve uzun dizileri daha etkili bir şekilde işleme özellikleriyle dikkat çekmektedir. Çalışma, öne sürülen mimarinin VAE modellerinin metinsel veriler üzerindeki eğitim zorluklarını aşmada etkili olduğunu göstermektedir. İleri beslemeli kısmın eğitimi, VAE'yi daha kolay hale getirirken, kod çözücünün standart dil modeline dönmesi, örnekleme engelleyen bir sorunu önlemektedir. Ayrıca, gizli vektöre güvenmeyi teşvik etmek için ek bir maliyet terimi önerilmiş ve VAE'nin uzun dizilerde iyi çalıştığı gözlemlenmiştir (Semeniuta ve ark., 2017).

Onan çalışmasında, dikkat mekanizması tabanlı derin öğrenme mimarilerini kullanarak Türkçe duygu analizi için karşılaştırılmalı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada küresel dikkat mekanizması tabanlı LSTM ve GRU, kendine dikkat mekanizması tabanlı LSTM ve GRU gibi farklı dikkat mekanizmalarını inceleyerek duygu analizi için daha doğru sınıflandırma oranları elde etmiştir (Onan, 2022). Onan diğer bir çalışmasında, Türkçe duygu analizi için farklı derin öğrenme

mimarilerini değerlendirmiştir. Yapılan deneylerde, çalışan bellek bağlantıları tabanlı uzun kısa süreli bellek (LSTM) mimarisinin diğer mimarilere göre daha yüksek doğruluk oranlarına ulaştığı gözlemlenmiş, GloVe kelime gömme yönteminin kullanımıyla diğer yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Onan, 2022).

Chakraborty ve ark. tarafından yapılan çalışmada, karakter tabanlı kelime üretme modelleri için Uzun Kısa Süreli Bellek hücreleri (LSTM'ler) ve sıralı veri işleme için tek boyutlu Evrişimli LSTM ağlarının performansı incelenmiştir. Çalışmada, LSTM hücre sayısının model başarısına etkisini değerlendirilmiş; artan hücre sayısının başlangıçta iyileşme sağladığı ancak belirli bir noktadan sonra aşırı uyum sorunlarına yol açtığını belirtilmiştir. Bu kapsamda LSTM hücre sayısı daha az olduğu takdirde daha başarılı sonuçlar elde edileceği ifade edilmiştir (Chakraborty ve ark., 2020). Welleck ve ark. metin oluşturma alanında sıralı olmayan düzenlerde çalışan yeni bir model geliştirmiştir. Geleneksel metin oluşturma yöntemlerinin aksine, önerilen yöntem rastgele bir konumda kelime üretmek ve ardından kelimenin soluna ve sağına kelimeler türeterek ikili ağaç oluşturma yöntemi ile yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar, bu yöntemin geleneksel soldan sağa metin oluşturma yöntemi ile rekabet edebilecek bir performans sergilemiştir. Ayrıca, modelin anlamı koruyacak şekilde çeviri yapmayı öğrendiği ve dil modelleme görevlerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir (Welleck ve ark., 2019). Zhu ve ark. çalışmasında farklı metin oluşturma platformlarını mukayese eden, metinlerin çeşitliliğini, kalitesini ve tutarlılığını değerlendiren Taxygen isimli bir metin oluşturma platformu tasarlamıştır (Zhu ve ark., 2018).

Bayer ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, sınıflandırıcıların eğitim verilerini yapay olarak artırmak için yeni bir metin üretme yöntemi sunulmuş ve önerilen yöntem hem uzun hem de kısa metin sınıflandırıcılarının performansını değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Veri artırma yöntemi, küçük veri analitiği bağlamında %15,53 ve %3,56'ya kadar ilave doğruluk kazançları elde edilmiştir. Bu yaklaşımın düşük veri görevlerinde önemli iyileştirmeler sağladığı da belirtilmiştir. Ayrıca, yöntemin her tür veri kümesine uygun olmadığı durumlar da gözlemlenerek, metin üretme yönteminin çeşitli dönüşümleri başarılı bir şekilde gerçekleştirebildiği belirtilmiştir (Bayer ve ark., 2022). Fang ve ark. kullanıcı gizliliği endişelerinden yola çıkarak, iki kullanıcının şifreli mesaj alışverişini, bir saldırganın bu alışverişini tespit etmeden gerçekleştirmesine olanak tanıyan steganografik bir mesajlaşma sistemi tasarlamıştır. Twitter ve Enron e-posta veri kümeleri üzerinden yapılan araştırmada, şifreleme kapasitesi (kelime başına şifrelenmiş bit sayısı) artırılırken, yüksek kalitede steganografik metin üretilebildiği gösterilmiştir (Fang ve ark., 2017). Fatima ve ark. metin üretme konusunda derin sinir ağı modellerini incelemiştir. Ayrıca çalışmada geçmişten günümüze çeşitli araştırmacıların bu alandaki önemli katkılarına ve metin üretme konusundaki literatür boşluklarına, gelecekte yapılabilecek muhtemel çalışmalara yer verilmiştir. Bulgular, metin üretimi alanındaki çeşitli yönlerdeki eğilimleri ve gelişmeleri ortaya koyarak araştırmacılara kılavuz

olabilecek zengin bir bilgi kaynağı sunmaktadır (Fatima ve ark., 2021). Guo ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, derin öğrenme gelişmeleriyle birlikte metin üretme teknolojisinin nasıl değiştiği ve koşullu metin üretimi üzerine odaklanan yeni araştırma eğilimleri incelenmektedir. Metin oluşturma teknolojisinin antropomorfik ve duygusal öğelerle zenginleştirilmesi, kişiselleştirilmiş metin üretimi gibi konulara odaklanılarak, bu alandaki değişen teknik yönler ele alınmıştır. Ayrıca, mevcut koşullu metin üretimi alanlarını ve genel öğrenme modellerini içeren çeşitli öneriler sunulmuştur. Çalışmada, koşullu metin üretimi alanında devam eden araştırma sorunlarına ve gelecekteki potansiyel araştırma yönlerine de vurgu yapılmaktadır (Guo ve ark., 2020). Li ve Zhang tarafından gerçekleştirilen çalışma, metin oluşturma alanında Long Short-Term Memory (LSTM) tabanlı bir araştırmaya odaklanmaktadır. Çalışmada LSTM ve geliştirilmiş varyantları olan Gated Recurrent Unit (GRU) ve görsel delik bağlantılı LSTM'nin performansı karşılaştırılmıştır. Çalışma LSTM'nin uzun vadeli bağımlılık özelliği ile uzun metinlerde daha iyi performans gösterdiğini belirtmektedir. Gelecekteki dil modellerinin, BERT puanı ve BLEURT gibi otomatik değerlendirme göstergeleri kullanarak daha geniş ölçekli değerlendirmelerle optimize edilebileceği ve iyileştirilebileceği vurgulanmaktadır (Li ve Zhang, 2021).

Pawade ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışma tekrarlayan sinir ağı (RNN) ve uzun kısa vadeli bellek (LSTM) kullanarak metin oluşturma sistemini ele almaktadır. Bu sistem, giriş olarak alınan bir dizi hikâyeden ilham alarak yeni hikayeler oluşturmayı amaçlamaktadır. Farklı konu ve karakterlere sahip hikayelerin yanı sıra aynı hikâyenin farklı ciltleriyle de çalışarak sistemin ürettiği sonuçları dilbilgisi doğruluğu, olayların bağlantısı, ilgi düzeyi ve benzersizlik gibi parametrelerle analiz etmiştir. Sonuç olarak, çalışmada sistem tarafından üretilen hikayelerin insanlar tarafından değerlendirilmesi sonucunda %63 oranında doğruluk elde edildiği belirtilmektedir. Ayrıca, sistemde kullanılan parametrelerin değiştirilerek doğruluğun daha da artırılabilirliği ve sistemin genişletilerek farklı uygulamalarda kullanılabilirliği öne sürülmektedir. Bu çalışma, metin oluşturma alanında yapay zekâ temelli yöntemlerin potansiyelini vurgulamaktadır (Pawade ve ark., 2018). Samant ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışma, doğal dil anlama (NLU) ve doğal dil işleme (NLP) alanındaki derin öğrenme tabanlı dil modellerini sistemli bir şekilde incelemektedir. Çalışma, çok görevli öğrenme (MTL) kullanan dil modellerinin performansını artırmayı hedefleyerek, NLU ve NLP görevlerinde kullanılan çeşitli dil modellerini sistematik bir literatür taraması ile değerlendirmektedir. Sonuçlar, denetimsiz öğrenme yöntemlerinin dil modellerinin performansını artırabileceğini göstermektedir. Ancak, çok görevli NLU için genel amaçlı bir çerçevenin tasarlanmasının zorluğu, dil modelleri için genel bir temsil oluşturma karmaşıklığına işaret etmektedir (Samant ve ark., 2022). Shi ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışma, metin oluşturma alanında çeşitliliği artırmak amacıyla ters takviyeli öğrenmeyi (IRL) kullanmaktadır. Maruz kalma yanlılığı, ödül kıtlığı ve modun çökmesi gibi sorunları çözmek için IRL çerçevesini benimseyen bu yöntem, daha yoğun ödül

sinyalleri üretme yeteneğine sahiptir. Yöntemin iki temel avantajı vurgulanmıştır: Birincisi, ödül fonksiyonu daha yoğun ödül sinyalleri üretebilir, ikincisi ise "entropi düzenlenmiş" politika eğimiyle eğitilen üretim politikasının daha çeşitli metinler üretmeyi teşvik etmesidir. Yapılan deney sonuçları, önerilen yöntemin önceki modellere göre daha kaliteli metinler üretebildiğini göstermektedir. Çalışma, önerilen yöntemin yanı sıra BLEU puanına dayalı üç yeni değerlendirme ölçüsü de sunarak, metinlerin daha iyi değerlendirilmesine katkıda bulunmaktadır (Shi ve ark., 2018).

Santhanam tarafından gerçekleştirilen çalışma, içerik tabanlı metin üretimi için Long Short-Term Memory (LSTM) ağlarını kullanarak dil modellerini incelemektedir. Bu çalışmada, LSTM birimlerinin doğal dil üretimi modellerindeki etkisi ele alınmakta ve dil modelinin bağlamı anlama yeteneğini artırmak amacıyla bağlam vektörleri kullanılmaktadır. Çalışmada önerilen model, metin oluştururken belirli bir bağlam etrafında çalışabilen dil modellerini eğitmek üzere tasarlanmıştır. Bağlam vektörleri, cümlenin anlamsal anlamını kavrayan bir yapıya sahiptir ve dil modelinin oluşturduğu metinlerde anlamsal tutarlılığı artırmaya yöneliktir. Çalışmada, bağlam vektörlerini çıkarmak için farklı yöntemlerin yanı sıra kelime kümeleme ve kelime önemi gibi faktörlerin etkisi üzerine çeşitli analizler sunulmuştur. Önerilen modelin, bağlam temelli metin üretiminde daha iyi performans gösterdiğini ve sağlanan bağlama anlamsal yakınlık sağladığını göstermektedir. Ayrıca, kelime kümeleme yönteminin bağlam vektörlerini daha etkili bir şekilde çıkardığı ve modelin eğitimini değerlendirmek için kullanılan yöntemin, aşırı öğrenme durumlarını belirlemede etkili olduğu belirtilmiştir (Santhanam, 2020).

Erhandi ve Çallı çalışmasında yapay zekâ ve derin öğrenme teknikleri metin özetleme için başarılı bir şekilde uygulanmamıştır. Yapay sinir ağları temel alınarak geliştirilen derin öğrenme modeli ile, Keras kütüphanesi kullanılarak Türkçe metinler üzerinde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Türkçe ve İngilizce veri setleri üzerinde yapılan gözlemler ve sonuçlar, derin öğrenme modelinin Türkçe için etkili bir şekilde çalıştığını göstermiştir (Erhandi ve Çallı, 2020). Mishra ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışma, biyomedikal alanda metin özetleme konusunda son yıllarda yapılan araştırmaları sistematik olarak incelemektedir. Çalışma, klinisyenler ve klinik araştırmacılar için giderek artan bilgi miktarıyla başa çıkma ihtiyacından yola çıkarak, metin özetleme tekniklerinin biyomedikal alanda nasıl geliştirildiğini ve değerlendirildiğini ele almaktadır. Çalışmanın bulgularına göre, doğal dil işleme ve istatistiksel yöntemlerin bir kombinasyonunu içeren hibrit tekniklerin metin özetleme alanında öne çıktığı belirtilmiştir. Ayrıca, bu alanda yapılan araştırmaların çoğunluğunun içsel değerlendirme gerçekleştirdiği ve gelecekteki araştırmalara yönelik önerilere de yer verildiği görülmektedir (Mishra ve ark., 2014). Ünlü ve Çetin tarafından gerçekleştirilen çalışma derin öğrenme yöntemlerinin anahtar kelime ve anahtar ifade çıkarımı üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, teknolojik gelişmelerin ardından ortaya çıkan yüksek miktardaki veri ve bu verilerin anlamlandırılma zorluğu ele alınmıştır. Geleneksel istatistiksel yöntemlerin yanı sıra,

derin öğrenme ve yapay sinir ağları gibi tekniklerin anahtar kelime ve anahtar ifade çıkarımı problemlerine uygulanmaya başlandığı belirtilmiştir. Derin öğrenme yöntemlerinin, geleneksel istatistiksel ve Doğal Dil İşleme (NLP) tekniklerine göre daha iyi sonuçlar verdiği vurgulanarak, makine çevirisi, anahtar kelime çıkarımı, özetleme gibi alanlarda derin öğrenme yöntemlerinin kullanımının arttığı ifade edilmiştir. Çalışmada, anahtar kelime ve anahtar ifade çıkarımında kullanılan derin öğrenme yöntemleri kategorik olarak sınıflandırılmış ve literatürdeki bu yöntemlere dair yapılmış çalışmalar incelenmiştir (Ünlü ve Çetin, 2019).

Metin özetleme veya yeni metin yaratımı süreçlerinde performans değerlendirme amacıyla sıkça kullanılan hata metrikleri arasında METEOR BLEU ve ROUGE, öne çıkmaktadır. Literatürde, bu metriklerin birlikte kullanıldığı birçok çalışma bulunmaktadır (Zhang ve ark., 2024; Mao ve ark., 2024; Zhou ve ark., 2023; Wu ve ark., 2023). ROUGE, BLEU ve METEOR metriklerinin aynı anda kullanıldığı projelerde, özetleme ve metin üretimi modellerinin doğruluğu ve etkinliği kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu metrikler, farklı açılardan performans analizi yaparak, modellerin referans metinlerle benzerliğini, n-gram düzeyinde doğruluğunu ve anlamsal uygunluğunu ölçmeyi sağlamaktadır. Bu sayede, metin oluşturma ve özetleme modellerinin performansını nesnel bir şekilde değerlendirmek mümkün olmaktadır.

Literatürde verilen örneklerde görüldüğü gibi, makine öğrenimi ve doğal dil işleme alanındaki derin öğrenme modellerinin metin oluşturma üzerindeki etkilerini ve uygulamalarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Çeşitli çalışmalar, özellikle uzun kısa vadeli bellek (LSTM) ve diğer derin öğrenme mimarilerinin dil anlama, duygu analizi, metin üretimi gibi görevlerde etkileyici başarılar elde ettiğini göstermektedir.

Literatürde incelenen çalışmalardan bazıları, Türkçe duygu analizi için derin öğrenme modellerinin etkinliğini değerlendirirken, diğerleri metin oluşturma, dil modellemesi ve çeşitli NLP görevlerinde derin öğrenme yöntemlerini ele almaktadır. Ayrıca, metin oluşturma alanında yeni modeller ve çerçeveler üzerine yapılan çalışmalardan da bahsedilmiştir.

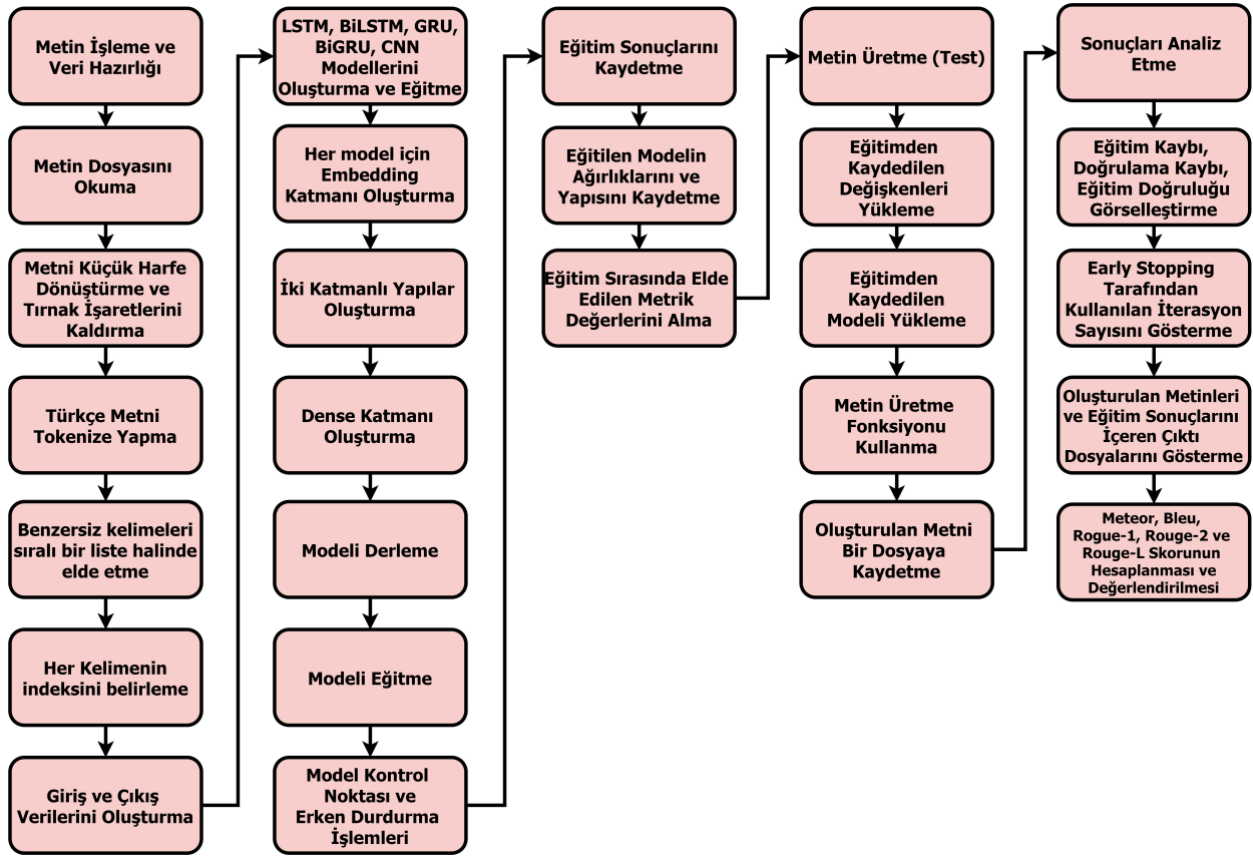
2.2. Sistem Tasarımı

Sistem tasarımı bölümü, metin işleme, veri hazırlama, derin öğrenme modellerini oluşturma ve eğitme aşamalarını içermektedir. Bu adımlar, dil modelinin karmaşık dil yapılarını anlamasını sağlamak için belirlenmiş adımlardan oluşmaktadır. Her bir adım, modelin dil öğrenme yeteneklerini artırmayı ve metinden anlamlı sonuçlar üretebilmesini hedeflemek amacıyla tasarlanmıştır.

Geleneksel dil modelleri, sınırlı bir dil yapısı ve metin analizi yöntemlerine sahip oldukları için özellikle uzun metinlerin semantik yapısını çözümü konusunda zayıf kalmaktadırlar. Bu durum, özellikle metinlerin daha geniş bir anlamsal yapı içinde sınıflandırılmasında birtakım zorluklara

neden olmaktadır. Bu zorluklar, yapay zekâ temelindeki dil modellerinin oluşturulmasına ve derin öğrenme mimarileri temelinde eğitilerek geliştirilmesini sağlamıştır.

Metin özetleme, doğal dil işleme alanında önemli bir konsept olup, çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilmektedir. Uzun metin içinden özetleme (Extractive Summarization) yönteminde belirli cümleler veya paragraflar, metindeki önem sırasına göre seçilir ve bu seçimler özet olarak kullanılır. Bu yaklaşım, TF-IDF veya benzeri ölçütlerle cümlelerin önemini değerlendirerek metni özetler. Diğer bir önemli yöntem ise metinden özet oluşturma (Abstractive Summarization) işlemidir. Bu yöntemde, metnin bağlamını anlayarak yeni cümleler üretilir ve bu cümleler, metnin özeti olarak kullanılır. Bu çalışmada, metinden özet oluşturma yöntemi benimsenmiştir. Bu sayede, metnin anlamını daha iyi kavramak ve daha özgün özetler oluşturmak hedeflenmiştir. Çalışmanın tüm adımlarını içeren diyagram Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Önerilen Yöntemin Çalışma Prensibi

Çalışma metin işleme ve veri hazırlığı ile başlayıp modellerin eğitimi ile devam eder. Kaydedilen eğitim verileri derlendikten sonra metin üretme aşamasına geçilir. Metin üretme aşamasında elde edilen metinler Meteor, Bleu ve Rouge metrikleri ile analiz edilmiş, sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2.2.1. Veriseti

Çalışmada iki farklı edebi türde kitaplar veriseti olarak kullanılmıştır. Kullanılan verisetinin ilk kitabı, 2020 yılında yayımlanan ve makalenin 1.yazarı tarafından kaleme alınan 250 sayfalık “Roman” türündeki bir kitabın metinlerinden oluşmaktadır. Kitap, 6910 cümle ve 65207 kelimedenden oluşmaktadır. Kullanılan verisetinin ikinci kitabı 2018 yılında yayımlanan 208 sayfalık “Kişisel Gelişim” türündeki bir kitabın metinlerinden oluşmaktadır. Kitap 3897 cümle ve 46077 kelimedenden oluşmaktadır. Metin özetleme, bu iki kitaba ait cümle ve kelimelerden oluşturulan çeşitli derin öğrenme mimarileriyle eğitilen modellerin sonuçlarından elde edilerek geliştirilmiştir.

2.2.2. Metin Önışleme

Metin işleme aşaması, dil modelinin derin öğrenme mekanizmalarıyla anlamlandırabileceği bir formata dönüştürme sürecini içermektedir. Bu aşamalardan ilki, metin içeriğindeki tüm karakterlerin küçük harfe dönüştürülmesini içermektedir. Bu adım, modelin büyük harf kullanımına bağlı olarak dil örüntülerini tespit etme konusunda problem yaşamamasını sağlamak amacıyla uygulanmıştır. Büyük ve küçük harflerin modele benzer şekillerde temsil edilmesi, dil öğrenme sürecindeki tutarlılığı arttırmaktadır.

İkinci adımda metin içeriğindeki tırnak işaretleri temizlenmiştir. Bu işlem, modelin tırnak işaretleri arasındaki özel karakterleri anlamdan bağımsız bir şekilde öğrenmesine yardımcı olmaktadır. Tırnak işaretlerinin kaldırılması, dil modelinin doğrudan kelime anlamını öğrenmesine ve dil yapısını daha iyi anlamasına katkı sağlar. Üçüncü olarak kitaplardan elde edilen kelimelerin sayısal veriye dönüştürülmesi (tokenization) işlemini kapsamaktadır. Bu adım, metni anlamlandırmak ve dil örüntülerini çıkarmak için gereklidir. Kelime tokenizasyonu, metni analiz etmek için kelimeleri ayırarak modelin daha iyi anlamasına ve dil yapılarını daha etkili bir şekilde öğrenmesine yardımcı olur. Bu aşamalar, dil modelinin girdi verilerini daha homojen ve anlamlı bir hale getirerek eğitim sürecinin başarılı olmasına katkıda bulunur.

2.2.3. Veri Hazırlama

Veri hazırlamanın ilk aşaması, modelin kelimeler arasındaki ilişkileri anlamlandırabilmesi için temel bir ön koşul olan kelime numaralandırma işlemidir. Her bir benzersiz kelimeye bir numara atanmıştır. Her kelimenin benzersiz bir sayısal temsilini kullanmak, modelin kelimeler arasındaki hiyerarşisini anlamasına ve bu kelimeleri sayısal olarak işleyebilmesine olanak tanır. Örneğin,

"merhaba" kelimesine atanan indeks, modelin bu kelimeyle ilişkilendirilmiş diğer kelimelerle olan sıklık ilişkisini ifade eder.

Öğrenme dizileri ve etiketlerin oluşturulması adımıyla ise belirlenen maksimum dizi uzunluğu ve adım aralığı kullanılarak, veriseti içerisinde dolaşarak öğrenme dizileri ve etiketler oluşturulmuştur. Bu adım, modelin dil örüntülerini çıkarmasına ve bir sonraki kelimenin tahminini gerçekleştirmesine olanak tanımaktadır. Her bir öğrenme dizisi, belirlenen maksimum dizi uzunluğunda bir dizi kelime içermektedir. Öğrenme dizilerinin yanı sıra, her bir öğrenme dizisine karşılık gelen etiketler de belirlenir. Bu etiketler, modelin bir sonraki kelimenin tahminini yapmasına yardımcı olur. Öğrenme dizileri ve etiketlerin doğru bir şekilde oluşturulması, modelin dil örüntülerini başarılı bir şekilde öğrenmesine olanak tanır ve dilin yapılarına duyarlılığını artırır.

Bu adımlar, dil modelinin eğitim verilerini etkili bir şekilde oluşturarak, dilin karmaşıklıklarını öğrenmesine ve yeni metinler üretebilmesine olanak sağlar.

2.2.4. Derin Öğrenme Modellerini Oluşturma

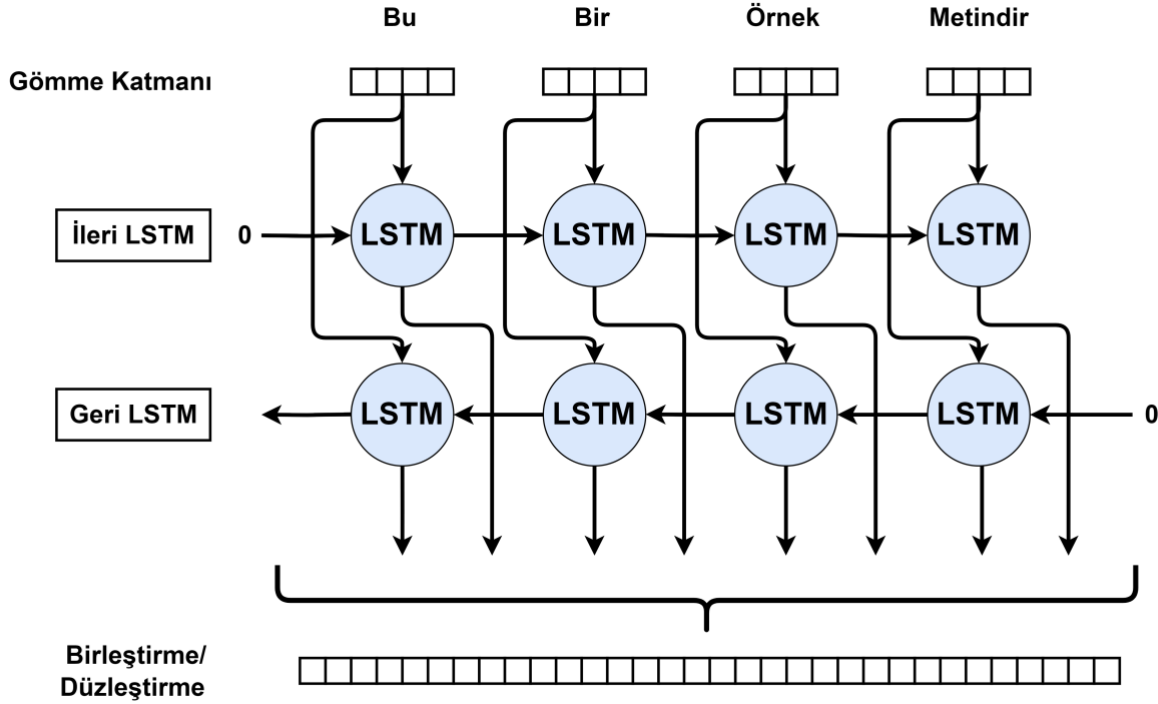
Bu bölümde, metin tabanlı derin öğrenme modelleri kullanılarak dil anlama ve metin üretimi üzerine karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır. Öncelikle, BiLSTM (Bidirectional Long Short-Term Memory) mimarisi temelinde oluşturulacak olan model hazırlanmıştır. Giriş verilerinin kelime gömme (embedding) işlemi için bir Embedding katmanı kullanılmıştır. Embedding katmanı, kelimeler arasındaki semantik ilişkileri ve benzerlikleri daha iyi anlamak adına kelime vektörlerini oluşturur. Bu sayede model, kelimelerin anlamsal bağlamını daha etkili bir şekilde kavrayabilir (Cui ve ark., 2018). Bu katman, benzer anlamlı kelimelerin benzer vektörlere sahip olmasını sağlayarak modelin dil örüntülerini daha etkili bir şekilde öğrenmesine imkân sağlar.

LSTM, (Long Short-Term Memory) derin öğrenme alanında kullanılan bir tür tekrarlayan sinir ağı (RNN) mimarisidir. Standart RNN'lerin aksine, LSTM'ler uzun vadeli bağlantıları daha etkili bir şekilde öğrenebilir ve bilgiyi daha uzun süre saklayabilir. LSTM, girdi, unutma ve çıkış kapıları olarak adlandırılan üç ana kapıdan oluşur. Girdi kapısı, yeni bilgileri kabul etme veya reddetme görevini üstlenir. Unutma kapısı, geçmiş bilgileri hatırlama veya unutma işlevini yerine getirir. Çıkış kapısı ise bilgiyi sonraki birimlere aktarmak için kullanılır. LSTM, bu kapıları kullanarak dilin dil bilgisi yapısını, anlamsal ilişkilerini ve hatta duygusal tonlarını öğrenebilir.

BiLSTM, LSTM'ye dayanan bir yapıdır, ancak bir adım daha ileri giderek metin içindeki bağlamı daha iyi anlamak için çift yönlü işleme olanak tanır. Bir BiLSTM, giriş verilerini hem ileri hem de geri yönde işleyen iki ayrı LSTM katmanını içerir.

İlk olarak, ileri yöndeki LSTM katmanı, metni baştan sona doğru okuyarak dil örüntülerini öğrenir. Bu, tüm zaman adımlarında çıktı üreterek uzun vadeli bağımlılıkları anlama kabiliyetini

sağlar. İkinci olarak, geri yöndeki LSTM katmanı, metni tersinden okuyarak benzer bir şekilde dil örüntülerini öğrenir. Bu iki yönlü işlem, metnin her iki yönünden gelen bağlamı birleştirerek daha kapsamlı bir dil anlama yeteneği sağlar. BiLSTM mimarisinin işleyiş yapısı Sekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. BiLSTM Mimarısının Çalışma Prensibi

BiLSTM'nin bu çift yönlü yaklaşımı, özellikle metin içindeki bağlamın hem önceki hem de sonraki kısımları içermesi durumunda avantajlıdır (Huang ve ark., 2015). Bu, BiLSTM'nin daha uzun vadeli bağımlılıkları ve metnin genel yapısını daha etkili bir şekilde öğrenmesine olanak tanır.

Oluşturulan modelde iki adet BiLSTM katmanı bulunmaktadır. İlk katman, tüm zaman adımlarından çıktıları döndürerek uzun vadeli bağımlılıkları anlama yeteneği ile dil örüntülerini geniş bir bağlamda öğrenmiştir. İkinci katman ise, yalnızca son zaman adımının çıktısını kullanarak daha etkili öğrenme sağlamıştır. Bu yapı, modelin metnin daha önceki kısımlarından aldığı bilgileri koruyarak daha etkili bir öğrenme sağlar.

Modelin çıkış katmanı Tam bağlantılı (Dense) katmandır. Bu katman tüm benzersiz kelimeleri içeren bir çıkış vektörü üretir (Javid ve ark., 2021). Aktivasyon fonksiyonu olarak softmax kullanılarak, olasılık dağılımı elde edilmektedir. Bu sayede, modelin bir sonraki kelimenin olasılığını tahmin etmesi sağlanır ve metin üretim sürecinde çeşitlilik elde edilir (Wang ve ark., 2018).

BiLSTM modeli ile karşılaştırma yapmak üzere, LSTM, GRU, BiGRU ve CNN modelleri de oluşturulmuştur. LSTM, uzun vadeli bağımlılıkları başarıyla ele alabilen bir yapay sinir ağı modelidir.

GRU (Gated Recurrent Unit) ise benzer bir yapıya sahip olmasına rağmen daha az parametre kullanarak hafıza hücrelerini daha etkili bir şekilde güncellemeyi hedefler (Dey ve Salem, 2017). Bu, daha hızlı eğitim süreleri ve daha düşük hesaplama maliyetleri sağlayabilir.

BiGRU modeli, her iki yönde çalışan GRU hücrelerini içerir. Bu, metnin hem ileri hem de geri yönden gelen bağlamını dikkate alarak daha kapsamlı bir anlam çıkarmaya olanak tanır (Li ve ark., 2022). Özellikle metin verilerinde, bu çift yönlü yaklaşım, dil örüntülerini daha etkili bir şekilde kavrama konusunda yardımcı olabilir. Bu model, metin içindeki bağlamsal ilişkileri daha iyi anlayarak performansı artırabilir.

CNN modeli ise metin verilerinde özellik çıkarmak için evrişim katmanları içeren bir yapıdır (Gu ve ark., 2018). Metin içindeki önemli özellikleri vurgular ve dil örüntülerini öğrenir. CNN, özellikle belirli uzunluktaki metinlerde lokal örüntüleri daha etkili bir şekilde tespit edebilir ve bu nedenle belirli metin tabanlı görevlerde başarılı olabilir.

Bu çeşitli modellerin kullanılması, BiLSTM modelinin performansını değerlendirmek ve metin verilerindeki örüntüleri daha iyi anlamak için farklı yaklaşımları keşfetmek açısından önemlidir. Her bir modelin avantajları ve dezavantajları, belirli görevlere uygunluğunu belirlemede yardımcı olabilir.

2.2.5. Model Eğitimi

Her bir derin öğrenme mimarisi için model eğitimi, Core Dou i5 işlemci, 32 GB RAM, 8 GB dahili ekran kartı, 1 TB SSD harddisk donanımı ile yaklaşık 16 ila 28 saatlik eğitim süreçlerinden geçirilerek ve farklı iterasyon sayıları (epoch) test edilerek oluşturulmuştur. Her bir epoch, modelin tüm eğitim verilerini bir kez gördüğü bir iterasyonu temsil eder. Batch (grup) büyüklüğü, her iterasyonda kullanılan örnek sayısını belirler (Kandel ve Castelli, 2020). Eğitim sırasında, model giriş verilerini kullanarak tahminlerde bulunur, ardından bu tahminlerle gerçek etiketler arasındaki kaybı hesaplar ve ağırlıkları günceller. Bu süreç, modelin eğitim verilerini öğrenmesini sağlar. Modelin performansını izlemek ve kontrol etmek için geri besleme kullanılır. Model kontrol noktaları, eğitim sırasında belirli bir metrik değerine ulaşıldığında modelin ağırlıklarını kaydeder. Bu yöntem, en iyi performansın elde edildiği durumu korumak için kullanılır. Eğitim belli bir iterasyondan sonra durdurulması, doğrulama kaybındaki belirgin bir iyileşme olmadığı takdirde eğitimi durdurarak aşırı öğrenmeyi önler. Eğitim sürecinin bu adımları, modelin doğru öğrenme, genelleme yeteneği ve istikrarlı performans elde etmesine katkı sağlar. Eğitim süreci, modelin öğrenme başarısını tespit etmek amacıyla 30, 50, 100 ve 200 iterasyon ile test edilmiştir ve model eğitimi 100 iterasyonda en fazla başarıya ulaştığı gözlemlenmiştir.

2.2.6. Metin Üretimi

Eğitilen model, belirli bir başlangıç kelime dizisi üzerinden yeni metinlerin üretilmesi için kullanılmıştır. Metin üretimi sürecinde, çeşitlilik ve özgünlük elde etmek amacıyla Top-K örnekleme teknikleri uygulanmıştır. Metin üretimi, belirlenen bir başlangıç kelime dizisiyle başlar. Bu dizideki kelimeler, modelin metin üretimini yönlendiren temel unsurları oluşturur. Kullanıcı, isteğe bağlı olarak farklı başlangıç dizileri seçerek modelin üretimini etkileyebilir.

Top-K örnekleme, modele en yüksek olasılığa sahip K kelime seçeneğini belirleme yöntemidir. Bu teknik, metin üretimini belirli bir çeşitlilik seviyesinde tutmak için kullanılır. Modelin en yüksek olasılığa sahip K kelime arasından rastgele bir seçim yapması sağlanır (Fagin ve ark., 2003).

Bu tekniklerin bir araya gelmesi, modelin belirli bir kelime dizisiyle çeşitli, özgün ve anlamlı metinler üretmesini sağlar. Metin üretim süreci, modelin öğrendiği dil yapılarını kullanarak başlangıç dizisi üzerinden tutarlı ve yaratıcı bir dil üretme yeteneğini yansıtır.

2.2.7. Model Doğruluğu

Günümüzde metin özetleme, altyazı oluşturma, konuşma tanıma, makine çevirisi vb. alanlarda önemli bir yer tutan METEOR skoru, metin oluşturma süreçlerinde üretilen metinlerin referans metinlerle olan benzerliğini değerlendirmek amacıyla kullanılan bir doğruluk metriğidir. Bu metrik, bir model veya sistem tarafından üretilen metinlerin, bir referans metinle karşılaştırılarak objektif bir benzerlik değerlendirmesi yapılmasına olanak tanır. METEOR skoru, metinler arasındaki kelime düzeni doğruluğunu dikkate alarak çalışmasıyla öne çıkar (Banerjee ve Lavie, 2005). Bu metrik, Precision (Doğruluk) ve Recall (Hatırlama) kavramlarını içeren bir formülle hesaplanır. Precision, sistem tarafından doğru bir şekilde üretilen kelimelerin oranını temsil ederken, Recall referans metinde doğru bulunan kelimelerin oranını ifade eder ve sırasıyla Denklem (1) ve Denklem (2)'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$Precision = \frac{m}{w_t} \quad (1)$$

$$Recall = \frac{m}{w_r} \quad (2)$$

Burada m sayısı referans metin ve özet metindeki ortak unigram sayısı olarak ifade edilir. w_t özet metindeki unigram sayısı, w_r ise referans metindeki unigram sayısını ifade eder. Meteor skorunu

hesaplamak için öncelikle ortalama F değerinin hesaplanması gerekir. *Fort* değerini bulmak için doğruluk ve hatırlama formülleri harmonik ortalama kullanılarak Denklem (3)'deki gibi hesaplanır.

$$Fort = \frac{10PR}{R+9P} \quad (3)$$

Doğruluk ve hatırlama metrikleri harmonik ortalama kullanılarak birleştirilir; Hatırlama metriği, doğruluk metriğinden 9 kat daha fazla olacak şekilde ağırlıklandırılır.

Meteor sonucu hesaplanırken bir diğer parametre parça cezası olarak adlandırılır. Bu metrik bir metin dizisinde özet ve referans kelimelerinin ardışık olarak eşleşmelerine dayanan bir değerlendirme kriteridir. Bu ceza, adaydaki kelimelerin hedef veya referanstaki kelimelerle ne kadar uyumlu olduğunu ölçer. İdeal durumda, tüm kelimelerin tam bir eşleşmesi durumunda sadece bir parça kalır. Ancak, genellikle bu ideal durum gerçekleşmez ve daha fazla parça ortaya çıkar. Sonuç olarak parça cezası, metinler arasındaki ardışık kelime eşleşmelerini değerlendirmek ve bu eşleşmelerin doğruluğunu ölçmek amacıyla kullanılan bir değerlendirme ölçüsüdür. Formülü Denklem (4)'teki gibi hesaplanır.

$$p = 0.5 \left(\frac{c}{u_m} \right)^3 \quad (4)$$

Burada p sayısı parça cezası, c sayısı ardışık olarak eşleşen parça sayısı, u_m ise maksimum parça sayısı (toplam unigram sayısı) olarak ifade edilir. Bu formül, ardışık olarak eşleşen parçaların sayısının maksimum eşleşen parça sayısına oranının küpünün yarısını kullanarak parça cezasını hesaplar. Bu durum, eşleşen parçaların sayısı arttıkça cezanın hızla artmasını ve metinler arasındaki uyumsuzluğun daha belirgin hale gelmesini sağlar. Nihai meteor puanı, Precision (Doğruluk) ve Recall (Hatırlama) verileriyle hesaplanan F puanını parça cezasıyla birleştirir ve 0 ile 1 arasında bir değer oluşturur. Sonuç 1 değerine ne kadar yakınsa o kadar başarılı sayılır. Meteor skoru Denklem (5)'teki formül ile hesaplanır.

$$M = Fort * (1 - p) \quad (5)$$

METEOR skoru, metin oluşturma modellerinin performansını objektif bir biçimde değerlendirmek, farklı modeller arasında karşılaştırma yapmak ve metin üretim kalitesini ölçmek için etkili bir araçtır.

ROUGE (Recall-Oriented Understudy for Gisting Evaluation), metin özetleme sistemlerinin performansını değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan başka bir ölçüm aracıdır. ROUGE, özet

metin ile referans metin arasındaki benzerlikleri analiz eder ve farklı türdeki eşleşmeleri ölçen çeşitli metrikler sunar (Lin C.Y., 2004; Grusky M., 2023). Bu metrikler, özetin ne kadar bilgilendirici ve doğru olduğunu belirlemede önemli rol oynar.

ROUGE-N metriği, özet ve referans metinlerde bulunan aynı N kelimelik dizilerin sayısını ölçer. Burada N, 1'den başlayarak herhangi bir pozitif tam sayı olabilir ve genellikle unigram (ROUGE-1), bigram (ROUGE-2) gibi ifadeler kullanılır. ROUGE-N hesaplaması, özet ve referans metinde ortak olan N-gramların sayısının, referans metindeki toplam N-gram sayısına oranlanması ile yapılır. ROUGE-N skoru Denklem (6)'daki formül ile hesaplanır.

$$ROUGE - N = \frac{(\sum_{i=1}^n Count(Unigram(S), Unigram(R)))}{n} \quad (6)$$

Burada: Count(Unigram(S), Unigram(R)): özetlenen metin (S) ve referans metin (R) içinde bulunan aynı N kelimelik dizilerin sayısı. n : referans metinde bulunan N kelimelik dizilerin sayısı.

ROUGE-L metriği ise, özetlenen metin ile referans metin arasındaki en uzun ortak dizinin (LCS - Longest Common Subsequence) uzunluğunu ölçer. LCS, özetin ve referansın içindeki kelimelerin sırasını göz önünde bulundurarak, iki metin arasındaki en uzun alt diziyi temsil eder. ROUGE-L, iki metin arasındaki benzerliği değerlendirirken sıralı bilgiyi dikkate alır ve Denklem (7)'deki formül ile hesaplanır.

$$ROUGE - L = \frac{2 * LCS(S,R)}{|S| + |R|} \quad (7)$$

Burada: LCS(S, R): Özetlenen metin (S) ve referans metin (R) arasındaki en uzun ortak dizinin uzunluğu. |S|: Özetlenen metindeki kelime sayısı. |R|: Referans metindeki kelime sayısı.

ROUGE metrikleri, genellikle F-Measure (F1 skoru) bazlı olarak hesaplanır. F1 skoru, hatırlama (Recall) ve doğruluk (Precision) arasında denge kurar. F1 skoru, özet metnin referans metinle ne kadar örtüştüğünü değerlendirmek için kullanılır. ROUGE skorları 0 ile 1 arasında değer alır; burada 1 tam uyumu, 0 ise hiç uyum olmadığını göstermektedir. Yüksek ROUGE skorları, özet metnin referans metinle daha fazla bilgi içerdiğini ve daha iyi bir performansa sahip olduğunu gösterir.

BLEU (Bilingual Evaluation Understudy): BLEU, özetlenen metinleri bir çeviri olarak değerlendirir. Metrik, referans metin ile özetlenen metin arasındaki kelime eşleşmelerini

değerlendirerek hesaplanır. BLEU, referans metinde bulunan kelimelerin özetlenen metinde kaç kez geçtiğini dikkate alır ve bu bilgiyi bir BLEU skoru oluşturmak için kullanır. BLEU skoru 0 ile 1 arasında değer alır ve yüksek skorlar, özetin referans metne daha yakın olduğunu gösterir (Papineni K. ve ark., 2002).

BLEU, öncelikle, özetlenen metindeki kelimelerin, referans metindeki hangi kelimelerle eşleştiği belirlenir. Daha sonra, bu eşleşmelere dayalı olarak bir kelime eşleşme oranı hesaplanır.

BLEU skoru, Denklem (8)'deki formül ile hesaplanır:

$$BLUE = e^{(\sum_{i=1}^n w_i * \log(pi))} \quad (8)$$

Burada: w_i : i-nci n-gram için bir ağırlık faktörü. p_i : i-nci n-gram için kelime eşleşme oranı. BLEU formülünde, farklı n-gramlar için farklı ağırlık faktörleri kullanılır. Örneğin, 1-gram (tekli kelimeler) için daha yüksek bir ağırlık faktörü kullanılırken, 4-gram (dört kelimelik diziler) için daha düşük bir ağırlık faktörü kullanılır.

Bu metriklerin kullanılması, özetlenen metinlerin kalitesini objektif bir şekilde değerlendirmek için önemlidir.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışma, dil modeli eğitimi ve metin üretimi süreçlerini inceleyen bir dizi derin öğrenme modelini içermektedir. Eğitim aşamasında kullanılan Derin öğrenme modelleri, TensorFlow kütüphanesi üzerinde kurulmuş ve Türkçe metin verisi üzerinde eğitilmiştir.

Farklı tür ve lehçelerde yazılan ilgisiz metinlerin bir arada kullanılarak anlamsız metinler üretmesinin önüne geçmek için eğitim verisi olarak "kitap.txt" ve "kitap2.txt" dosyalarındaki kitap metinleri birbirinden bağımsız olarak verisetine aktarılmıştır. Metinler, öncelikle küçük harfe dönüştürülmüş, ardından tırnak işaretleri temizlenmiş ve Türkçe dilinde kelime tokenize işlemine tabi tutulmuştur.

Tüm modeller, belirlenen maksimum kelime sayısı olan 50 kelime uzunluğunda örnek dizileri kullanılarak oluşturulmuştur. BiLSTM mimarisi, iki katmanlı bir BiLSTM yapısını içermekte ve her bir kelimenin gömme (embedding) vektörünü oluşturarak öğrenmeyi gerçekleştirmektedir. Benzer şekilde LSTM, GRU ve BiGRU mimarileri de kendi iki katmanlı yapılarını içermektedir. Bu dört modelde de Overfitting (Aşırı Öğrenme) ile karşılaşmamak için her katmanda %40'lık Dropout kullanılmıştır. CNN mimarisi 3'lük bir çekirdek boyutu ve 'same' dolgusu ile 64 filtre sayısı uygulanarak eğitilmiştir. Eğitim sırasında kullanılan aktivasyon fonksiyonu tüm mimariler için "softmax" olarak belirlenmiş ve optimizasyon için Adam optimizer kullanılmıştır.

Ayrıca, eğitim sürecinde en düşük kayba ve en yüksek doğrulama oranına sahip olan modelin ağırlıkları "model.h5" dosyasına kaydedilmiştir. Eğitim sırasında belirli bir süre boyunca doğrulama kaybında iyileşme olmazsa eğitimi durduran bir erken durdurma (Early Stopping) mekanizması uygulanmıştır. Metin üretimi sırasında Top-K örnekleme yöntemiyle bir sonraki kelime belirlenmektedir. Oluşturulan özet metnin referans metinle ne kadar uyumlu olduğu Meteor, Blue ve Rouge skorlarıyla hesaplanmıştır. Farklı kitap türüne, modellere ve kelime sayılarına göre oluşturulan metin özetlerinin aldıkları Meteor, Bleu, Rouge değerleri Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Kitap Türü, Model ve Kelime sayısına göre Meteor, Bleu, Rouge-1, Rouge-2 ve Rouge-L Metrik Sonuçları

Kitap Türü	Model	Kelime	Meteor	BLEU	ROGUE-1	ROUGE-2	ROUGE-L
ROMAN	CNN	1.000	0.5497	0.5231	0.6693	0.5402	0.5024
		2.000	0.6798	0.6623	0.7533	0.6632	0.5323
		5.000	0.7558	0.6812	0.8049	0.6823	0.5671
	LSTM	1.000	0.6313	0.5944	0.7123	0.6363	0.5242
		2.000	0.7054	0.6108	0.7843	0.6574	0.5467
		5.000	0.7565	0.6954	0.8299	0.7028	0.5664
	BiLSTM	1.000	0.6609	0.6299	0.7112	0.6424	0.5454
		2.000	0.7158	0.6533	0.7933	0.6509	0.5611
		5.000	0.7702	0.7133	0.8723	0.7201	0.5834
	GRU	1.000	0.6408	0.5902	0.6921	0.6244	0.5145
		2.000	0.7060	0.6290	0.7309	0.6723	0.5402
		5.000	0.7565	0.6892	0.8232	0.6823	0.5498
	BiGRU	1.000	0.6412	0.6030	0.7011	0.6396	0.5033
		2.000	0.7075	0.6186	0.7832	0.6535	0.5335
		5.000	0.7537	0.6877	0.8551	0.7045	0.5721
KİŞİSEL GELİŞİM	CNN	1.000	0.5361	0.5299	0.6923	0.5355	0.4834
		2.000	0.6312	0.6270	0.7751	0.6413	0.5291
		5.000	0.7206	0.6652	0.8140	0.6932	0.5528
	LSTM	1.000	0.6134	0.6043	0.7331	0.6216	0.5123
		2.000	0.6839	0.6333	0.8023	0.6732	0.5392
		5.000	0.7248	0.6824	0.8453	0.7035	0.5622
	BiLSTM	1.000	0.6520	0.6301	0.7412	0.6521	0.5406
		2.000	0.7143	0.6784	0.8237	0.6743	0.5633
		5.000	0.7666	0.7238	0.8619	0.7158	0.5891
	GRU	1.000	0.6403	0.5902	0.7124	0.6223	0.5014
		2.000	0.6823	0.6340	0.7823	0.6674	0.5349
		5.000	0.7320	0.6855	0.8320	0.6810	0.5512
	BiGRU	1.000	0.6397	0.6123	0.7349	0.6403	0.5232
		2.000	0.7082	0.6534	0.8017	0.6734	0.5453
		5.000	0.7469	0.7012	0.8523	0.6923	0.5671

Tablo 1, iki farklı kitap türü için farklı dil modeli türlerinin (CNN, LSTM, BiLSTM, GRU, BiGRU) farklı kelime sayılarında Meteor, Bleu ve Rouge skorlarını içermektedir. Tablo 1’e göre, BiLSTM mimarisi üretilen 1.000, 2.000 ve 5.000 kelime sayılarından oluşan metin özetleme için en yüksek Meteor, Bleu ve Rouge skorlarına sahiptir.

Test sonuçları incelendiğinde, kelime sayısının arttıkça tüm hata metrik skorlarının yükseldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, daha büyük veri setlerinin model eğitimini iyileştirebileceğini ve genel performansı artırabileceğini göstermektedir.

LSTM, BiLSTM, GRU ve BiGRU mimarileri genellikle CNN'e göre daha yüksek Meteor, Bleu ve Rogue skorlarına sahiptir. Bu, özellikle dil modelleri ve metin anlama görevleri için uzunluğu daha iyi ele alabilen yineleme (RNN) tabanlı modellerin daha etkili olduğunu göstermektedir. Optimal model seçimi, spesifik bir görev veya veri kümesine bağlı olabilir. Ancak, genel olarak, BiLSTM modeli çeşitli kelime sayıları için daha iyi bir performans göstermektedir.

Roman ve kişisel gelişim kitabı özetlemeleri için kullanılan BiLSTM modeli ile elde edilen 5.000 kelimelik özetlerden oluşan yaklaşık 30 kelimelik örnek metinler Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Özetlenen Metinden Örnek Metinler

Örneklem	Roman	Kişisel Gelişim
Örnek-1	hayat için çalışacaktı birkaç saatini not defterindeki düşünceleri okuyarak ve okuduklarını zihninde canlandırarak geçirdikten sonra denizle buluşmak için yurttan çıktı yapay zekâ ile o kadar çok büyülenmişti ki zeynep aklının ucundan geçmiyordu	başarıya ulaşmanın sırrı hedef belirlemekten ziyade sürdürülebilir ve etkili bir sistem kurmaktır hedefler bize yön gösterirken sistemler bizi o hedefe ulaştırır bu sistem küçük ve tekrarlanabilir adımlardan oluşmalı
Örnek-2	ancak gece geç saatlere doğru uyuşmuş parmaklarımla son cümleyi yazarken bir tuhaflık hissetti kendi dünyasının dışına çıkmış gibiydi onun hikayesini yazarken kendi hikayesini de yazıyordu sanki tıpkı tüm yazarlar gibi	her ne kadar iyi şeyler hayatımıza renk katsa da unutmamalı ki her iyi şeyin beraberinde getirdiği yüzlerce dezavantaj mevcut bu dezavantajları farkında olmak gerçekçi beklentiler oluşturmaya ve daha bilinçli seçimler yapmamıza yardımcı olur

Bu uygulama, dil modeli eğitimi ve metin üretmede farklı derin öğrenme mimarilerinin bir örneğini sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, dilin karmaşıklığını anlama ve yaratıcı bir şekilde metin üretme potansiyelini değerlendirmek için farklı derin öğrenme mimarilerinin metin özetleme konusundaki karşılaştırmalı bir yaklaşımını göstermektedir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma, dil modelinin eğitiminden metin üretimine uzanan süreci detaylı bir şekilde ele almış ve derin öğrenme tekniklerini kullanarak dilin karmaşıklıklarını anlama ve yaratıcı bir şekilde yeni metinler üretme potansiyelini incelemiştir. Çalışma, Bidirectional Long Short-Term Memory (BiLSTM) mimarisi dahil olmak üzere çeşitli derin öğrenme yöntemlerini değerlendirmiştir.

Araştırma, iki farklı kitap metnini farklı dil modeli mimarilerinin performansını ölçmek için 1000, 2000 ve 5000 kelime sayısı ve Meteor, Bleu, Rogue skorlarını kullanarak kapsamlı bir analiz sunmaktadır. sonuçlara göre, farklı model türleri ve üretilen farklı kelime sayıları arasında belirgin farklar bulunmaktadır.

Roman türü için, BiLSTM modelinin genel olarak daha yüksek bir performans sergilediği görülmüştür. 5.000 kelimelik metinler üzerinde BiLSTM, en yüksek METEOR skoru (0.7702), BLEU skoru (0.7133), ROUGE-1 (0.8723), ROUGE-2 (0.7201) ve ROUGE-L (0.5834) değerlerine ulaşmıştır. Bu değerlere göre BiLSTM modelinin uzun metin üretiminde daha tutarlı ve kaliteli içerik üretebildiğini göstermektedir. LSTM ve GRU modelleri de benzer şekilde yüksek performans sergilemiş, özellikle 5.000 kelimelik metinlerde belirgin iyileşme göstermişlerdir. CNN modeli ise diğer modellere kıyasla daha düşük performans sergilemiş, ancak kelime sayısı arttıkça performansında bir artış gözlenmiştir.

Kişisel gelişim kitapları türü için de benzer bir eğilim gözlenmiştir. BiLSTM modeli yine en yüksek performansı sergileyerek, 5.000 kelimelik metinlerde en yüksek METEOR skoru (0.7666), BLEU skoru (0.7238), ROUGE-1 (0.8619), ROUGE-2 (0.7158) ve ROUGE-L (0.5891) değerlerine ulaşmıştır. LSTM ve GRU modelleri, kişisel gelişim metinlerinde de yüksek performans sergileyerek, uzun metinlerde daha tutarlı ve anlamlı içerikler üretebilmişlerdir. CNN modeli bu türde de diğer modellere göre daha düşük performans sergilemiş, ancak yine de kelime sayısı arttıkça performansında iyileşme gözlenmiştir.

Genel olarak, sonuçlar BiLSTM modelinin hem roman hem de kişisel gelişim kitaplarında en yüksek performansı sergilediğini göstermektedir. Bu modelin üstün performansı, çift yönlü bilgi akışı sayesinde metinlerin bağlamını daha iyi anlamasından kaynaklanmaktadır. BiLSTM, cümle içerisindeki kelimelerin hem önceki hem de sonraki bağlamını dikkate alarak daha tutarlı ve anlamlı metinler üretebilmektedir.

Bu bulgular, metin üretiminde model seçiminin kritik olduğunu ve modelin metnin bağlamını ne kadar iyi yakalayabildiğinin, metin kalitesinde büyük bir rol oynadığını göstermektedir. Dil modeli eğitimi ve metin üretimi sürecinde farklı derin öğrenme tekniklerinin etkilerini anlamak isteyen araştırmacılar ve yazılım geliştiriciler için önemli bir kaynak sunmaktadır. BiLSTM'nin yanı sıra LSTM, GRU, BiGRU ve CNN gibi diğer model türlerinin de dikkate alınması, dilin karmaşıklığını anlama ve yaratıcı bir şekilde metin üretme yeteneklerini değerlendirmek için kapsamlı bir yaklaşım sunmaktadır.

Bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak, dil modeli eğitimi ve metin üretimi süreçlerinde daha geniş bir perspektif elde etmek için ilerleyen dönemlerde hibrit modeller ortaya koyulabilir. Örneğin, CNN ve BiLSTM'nin birleşimiyle oluşturulan bir model hem lokal hem de uzun vadeli bağımlılıkları ele alabilir. Gelecekteki çalışmalar için, farklı kitap türlerinde ve daha geniş veri setlerinde bu

modellerin performansının test edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, modellerin eğitimi sırasında kullanılan hiperparametrelerin optimizasyonu, metin kalitesini daha da artırabilir. Yeni model mimarilerin ve hibrit yaklaşımların, metin üretiminde daha yenilikçi ve etkili çözümleri sunabileceği öngörülmektedir.

Bu öneriler, dil modeli eğitimi ve metin üretimi konularında daha geniş bir araştırma yelpazesi sunarak, derin öğrenme modellerinin dilin zenginliğini anlama ve yaratıcı bir şekilde ifade etme yeteneklerini artırma potansiyelini daha da genişletebilir.

Yazarların Katkısı

Bu çalışmanın veriseti, araştırma, geliştirme ve uygulama süreçleri Yazar1 tarafından, araştırma ve düzenleme süreçleri Yazar2 tarafından yapılmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Babüroğlu, B., Tekerek, A., & Tekerek, M. (2019). Türkçe İçin Derin Öğrenme Tabanlı Doğal Dil İşleme Modeli Geliştirilmesi. *13th International Computer and Instructional Technology Symposium*
- Banerjee, S. and Lavie, A. (2005). METEOR: An Automatic Metric for MT Evaluation with Improved Correlation with Human Judgments. *In Proceedings of the ACL Workshop on Intrinsic and Extrinsic Evaluation Measures for Machine Translation and/or Summarization*, pages 65–72, Ann Arbor, Michigan. Association for Computational Linguistics.
- Bayer, M., Kaufhold, M.-A., Buchhold, B., Keller, M., Dallmeyer, J., Reuter, C. (2022). Data augmentation in natural language processing: a novel text generation approach for long and short text classifiers. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 14(3), 135-150. <https://doi.org/10.1007/s13042-022-01553-3>
- Chakraborty, S., Banik, J., Addhya, S., & Chatterjee, D. (2020). Study of Dependency on number of LSTM units for Character based Text Generation models. *2020 International Conference on Computer Science, Engineering and Applications (ICCSEA)*.
- Cui, P., Wang, X., Pei, J., & Zhu, W. (2018). A Survey on Network Embedding. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 31(5), 833-852. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2018.2849727>
- Dey, R., Salem F. M. (2017). Gate-variants of Gated Recurrent Unit (GRU) neural networks. *Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 1597-1600. <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2017.8053243>
- Erhandi, B., Çallı, F. (2020). Derin Özetleme ile Metin Özetleme. *3rd International Conference on Data Science and Applications (ICONDATA'20)*.

- Fagin, R., Kumar, R., Sivakumar, D. (2003). Comparing Top k Lists. *SIAM Journal on Discrete Mathematics* 17(1), 134-160. <https://doi.org/10.1137/S0895480102412856>
- Fang, T., Jaggi, M., & Argyraki, K. (2017). Generating Steganographic Text with LSTMs. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.10742>
- Fatima, N., Imran, A. S., Kastrati, Z., Daudpota, S. M., & Soomro, A. (2021). A Systematic Literature Review on Text Generation Using Deep Neural Network Models. *2021 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM)*.
- Grusky, M. (2023, July). Rogue scores. In Proceedings of the 61st Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers) (pp. 1914-1934).
- Gu, J., Wang, Z., Kuen, J., Ma, L., Shahroudy, A., Shuai, B., Liu, T., Wang, X., Wang, G., Cai, J., & Chen, T. (2018). Recent advances in convolutional neural networks. *Pattern Recognition*, 77, 354-377. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.10.013>
- Guo, B., Wang, H., Ding, Y., Wu, W., Hao, S., Sun, Y., & Yu, Z. (2020). Conditional Text Generation for Harmonious Human-Machine Interaction. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology* 14, 1-50. <https://doi.org/10.1145/3439816>
- Huang, Z., Xu, W., Yu, K. (2015). Bidirectional LSTM-CRF Models for Sequence Tagging. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1508.01991>
- Iqbal, T., Qureshi, S. (2020). The survey: Text generation models in deep learning. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences* 34/6, 2515-2528. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.04.001>
- Javid, A. M., Das, S., Skoglund, M., & Chatterjee, S. (2021). A ReLU Dense Layer to Improve the Performance of Neural Networks. *ICASSP 2021 - 2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. 2810-2814.
- Kandel, I., Castelli, M. (2020). The effect of batch size on the generalizability of the convolutional neural networks on a histopathology dataset. *ICT Express*, 6(4), 312-315. <https://doi.org/10.1016/J.ICTE.2020.04.010>
- Li, J., Zhao, W. X., Nie, J.-Y., Wen, J.-R., & Tang, T. (2022). Pre-trained Language Models for Text Generation: A Survey. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.05273>
- Li, L., Zhang, T. (2021). Research on Text Generation Based on LSTM. *International Core Journal of Engineering*, 7, 2021. [https://doi.org/10.6919/ICJE.202105_7\(5\).0067](https://doi.org/10.6919/ICJE.202105_7(5).0067)
- Li, X., Ma, X., Xiao, F., Xiao, C., Wang, F., & Zhang, S. (2022). Time-series production forecasting method based on the integration of Bidirectional Gated Recurrent Unit (Bi-GRU) network and Sparrow Search Algorithm (SSA). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109309. <https://doi.org/10.1016/J.PETROL.2021.109309>
- Lin, C. Y. (2004, July). Rouge: A package for automatic evaluation of summaries. In Text summarization branches out (pp. 74-81).
- Mao, Y., Li, X., Li, Z., & Li, W. (2024). Automated Smart Contract Summarization via LLMs. arXiv preprint arXiv:2402.04863.
- Mishra, R., Bian, J., Fiszman, M., Weir, C. R., Jonnalagadda, S., Mostafa, J., & Fiol, G. Del. (2014). Text summarization in the biomedical domain: A systematic review of recent research. *Journal of Biomedical Informatics*. 52, 457-467 <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2014.06.009>
- Onan, A. (2022). Türkçe Metin Madenciliği için Çalışan Bellek Bağlantıları Tabanlı Uzun Kısa Süreli Bellek Mimarisi. *European Journal of Science and Technology Special Issue*, 34, 239-246. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1080239>
- Onan, A. (2022). Türkçe Metin Madenciliği için Dikkat Mekanizması Tabanlı Derin Öğrenme Mimarilerinin Değerlendirilmesi. *European Journal of Science and Technology Special Issue*, 34, 403-407. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1082379>
- Otter, D. W., Medina, J. R., & Kalita, J. K. (2021). A Survey of the Usages of Deep Learning for Natural Language Processing. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. Issue, 2, 604-624.
- Papineni, K., Roukos, S., Ward, T., & Zhu, W. J. (2002, July). Bleu: a method for automatic evaluation of machine translation. In Proceedings of the 40th annual meeting of the Association for Computational Linguistics (pp. 311-318).
- Pawade, D., Sakhapara, A., Somaiya, K. J., Jain, M., Jain, N., & Gada, K. (2018). Story Scrambler - Automatic Text Generation Using Word Level RNN-LSTM. *Information Technology and Computer Science*, 6, 44-53. <https://doi.org/10.5815/ijitcs.2018.06.05>

- Samant, R. M., Bachute, M. R., Gite, S., & Kotecha, K. (2022). Framework for Deep Learning-Based Language Models Using Multi-Task Learning in Natural Language Understanding: A Systematic Literature Review and Future Directions.
- Santhanam, S. (2020). Context Based Text - Generation Using LSTM Networks. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.00048>
- Semeniuta, S., Severyn, A., & Barth, E. (2017). A Hybrid Convolutional Variational Autoencoder for Text Generation. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1702.02390>
- Sherstinsky, A. (2020). Fundamentals of Recurrent Neural Network (RNN) and Long Short-Term Memory (LSTM) network. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 404, 132306. <https://doi.org/10.1016/J.PHYSD.2019.132306>
- Shi, Z., Chen, X., Qiu, X., & Huang, X. (2018). Toward Diverse Text Generation with Inverse Reinforcement Learning. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.11258>
- Sutskever, I., Martens, J., & Hinton, G. (2011). Generating Text with Recurrent Neural Networks.
- Ünlü, Ö., Cetin, A. (2019). A Survey on Keyword and Key Phrase Extraction with Deep Learning. 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, ISMSIT 2019 - Proceedings.
- Vo, S. N., Vo, T. T., & Le, B. (2024). Interpretable extractive text summarization with meta-learning and BI-LSTM: A study of meta learning and explainability techniques. *Expert Systems with Applications*, 245, 123045.
- Wang, M., Lu, S., Zhu, D., Lin, J., & Wang, Z. (2018). A High-Speed and Low-Complexity Architecture for Softmax Function in Deep Learning. 2018 *IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, APCCAS 2018*, 223-226. <https://doi.org/10.1109/APCCAS.2018.8605654>
- Welleck, S., Brantley, K., Daumé, H., & Cho, K. (2019). Non-Monotonic Sequential Text Generation. *Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning, PMLR 97:6716-6726*.
- Wu, N., Gong, M., Shou, L., Liang, S., & Jiang, D. (2023, October). Large language models are diverse role-players for summarization evaluation. In *CCF International Conference on Natural Language Processing and Chinese Computing* (pp. 695-707). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Young, T., Hazarika, D., Poria, S., & Cambria, E. (2018). Recent Trends in Deep Learning Based Natural Language Processing [Review Article]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*. 13, 55-75.
- Yu, W., Zhu, C., Li, Z., Hu, Z., Wang, Q., Ji, H., & Jiang, M. (2022). A Survey of Knowledge-Enhanced Text *ACM Computing Surveys*. 227, 1-38. <https://doi.org/10.1145/3512467>
- Zhang, T., Meng, J., Yang, Y., & Yu, S. (2024). Contrastive learning penalized cross-entropy with diversity contrastive search decoding for diagnostic report generation of reduced token repetition. *Applied Sciences*, 14(7), 2817.
- Zhao, W. X., Zhou, K., Li, J., Tang, T., Wang, X., Hou, Y., ... & Wen, J. R. (2023). A survey of large language models. arXiv preprint arXiv:2303.18223.
- Zhou, W., Ye, Z., Yang, Y., Wang, S., Huang, H., Wang, R., & Yang, D. (2023). Transferring pre-trained large language-image model for medical image captioning. In *CLEF2023 Working Notes, CEUR Workshop Proceedings, CEUR-WS.org, Thessaloniki, Greece*.
- Zhu, Y., Lu, S., Zheng, L., Guo, J., Zhang, W., Wang, J., Yu, Y. (2018). Taxygen: A Benchmarking Platform for Text Generation Models. *SIGIR '18: The 41st International ACM SIGIR Conference on Research & Development in Information Retrieval* 1097–1100. <https://doi.org/10.1145/3209978.3210080>

q-Çatısı Kullanılarak Reel Kuaterniyonlar ile Oluşturulan Kanal ve Tüp Yüzeylerinin Karakterizasyonları

Serkan ÇELİK^{1*}, Hatice KUŞAK SAMANCI², Hacı Bayram KARADAĞ³

Öz

Bu çalışma, q-çatısına göre parametrize edilen kanal ve tüp yüzeylerinin birim kuaterniyon yardımı ile elde edilen yeni ifadeleri temel alınarak hazırlanmıştır. Elde edilen bu yeni ifadeler üzerinde Gauss ve ortalama eğrilikler hesaplanmış, verilen örnekler ile yapılan çalışma zenginleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kanal yüzey, Tüp yüzey, q-çatı, Kuaterniyonlar.

Characterizations of Canal and Tube Surfaces Formed by Real Quaternions Using q-Frame

Abstract

This study was prepared on the basis of the new expressions obtained with the help of a unit quaternion of canal and tube surfaces parametrized according to the q-frame. Gaussian and mean curvatures were calculated on these new expressions obtained, the study done with the examples given was enriched.

Keywords: Canal surface, Tube surface, q-frame, Quaternions.

¹İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, Türkiye, serkan_cauchy_27@hotmail.com

²Bitlis Eren Üniversitesi, Matematik Bölümü, Bitlis, Türkiye, hkusak@beu.edu.tr

³İnönü Üniversitesi, Matematik Bölümü, Malatya, Türkiye, bayram.karadag@inonu.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 22.01.2024

Kabul/Accepted: 04.07.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Giriş

Kanal yüzeyleri ilk olarak 1850 yılında Monge tarafından incelenmiştir. Bir kanal yüzeyi; merkezi spin eğrisinde bulunan değişken yarıçaplı hareketli bir kürenin zarfıdır. Hareketli kürenin merkezlerinin yörüngesi olan eğri, kanal yüzeyinin merkez (spin) eğrisi olarak adlandırılır. Kanal yüzeyleri boru, direk, halat gibi cisimlerin geometrik modellemesinde kullanılarak mühendislik ve tıp çalışmalarında yaygın olarak ele alınmaktadır. Yarıçap fonksiyonu sabit ise kanal yüzeyi tüp veya boru yüzeyi olarak adlandırılır (Do Carmo, 1976; Gray ve ark., 2017; Xu ve ark., 2006; Maekawa ve ark., 1998; Dogan ve ark., 2011; Dogan ve ark., 2012; Dogan, 2012). Kanal yüzeylerinin temel geometrik özellikleri (Xu ve ark., 2006) da incelenmiştir. Ayrıca, bu makalede yerel olarak kendisi ile kesişmeyen kanal yüzeyleri incelenerek bu yüzeylerin alanı ve Gauss eğriliği hesaplanmıştır. (Maekawa ve ark., 1998) da tüp yüzeyinin tekil olması için gerekli ve yeterli koşullar incelenmiş ve bu yüzeylerin rasyonel parametrizasyonu için algoritmik bir yöntem geliştirilmiştir. Son zamanlarda bazı yazarlar tarafından, 3-boyutlu Öklid uzayında farklı çatılar kullanılarak tüp yüzeyleri incelenmektedir. Örneğin Serret-Frenet, Bishop, Darboux ve q-çatısı yardımıyla tüp yüzeyleri incelenerek geometrik özellikleri verilmiştir (Dogan ve ark., 2011; Dogan ve ark., 2012; Dogan, 2012; Dede ve ark., 2015; Dede ve ark., 2015; Koyuncu, 2020). Eğriler ve yüzeyler teorisi diferansiyel geometrinin temelini oluşturur. Gelişen teknoloji ve artan çalışmalarla birlikte yüzey teorisi çok geniş bir çalışma alanı oluşturmaktadır. Bu alanda yapılan çalışmalardan bazıları (Kazan ve ark., 2019; Kazan ve ark., 2021; Celik ve ark., 2023) da verilmiştir. Yüzeyler teorisinin özellikle fizik, mühendislik, tasarım ve bilgisayar modellemesinde birçok uygulaması vardır. Böylece, Öklid uzayında özel yüzeylerin geometrik yapısı, geometriciler için önemli bir çalışma alanı haline gelmiştir (Hacısalıhoğlu, 1994; Sabuncuoğlu, 2010). Ayrıca, bir parametrelili düzlemsel homotetik hareketlerle elde edilen bir doğru parçası tarafından süpürülen bölgenin alanı ve uzaysal homotetik hareketler altında süpürülen bölgenin hacmi incelenmiştir (Duldul, 2020). Kuaterniyonlar ve kuaterniyonların bazı uygulamaları (Hacısalıhoğlu, 1983; Özdemir, 2020) de incelenmiştir. Ayrıca, üç boyutlu reel vektör uzayında reel kuaterniyonlar ve bu reel kuaterniyonları kullanarak kanal yüzeyinin geometrik modellemesi ve uygulamaları (Aslan ve ark., 2016; Aslan, 2017) de ele alınmıştır. (Gok, 2017) de kuaterniyon çarpımı ve matris temsili kullanarak $\{N, C, W\}$ alternatif çatı yardımıyla merkezleri, bir uzay eğrisinin küresel göstergeleri olan kanal yüzeyi elde edilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, Serret-Frenet çatısından daha avantajlı olan q-çatısını kullanarak, kuaterniyon yardımıyla kanal ve tüp yüzeyini yeni bir yaklaşım ile ele almaktır. Bu sayede gerek mühendislikte ve tıpta, gerekse matematik ve geometrik uygulamalarda yüzey modellemesiyle farklı şekiller elde edilebilmektedir.

2. Materyal ve Metot

Kanal yüzeyi, merkezlerinin yörüngesi $\Omega: (a, b) \rightarrow R^3$ spin eğrisi üzerinde bulunan ve yarıçapı $r(s)$ ile tanımlanan, değişen yarıçaplı hareketli bir kürenin zarfıdır. $\Omega(s)$, eğriliği sıfırdan farklı bir kanal yüzeyinin birim hızlı merkez eğrisi olsun. O halde kanal yüzeyi parametrik olarak

$$K(s, \theta) = \Omega(s) - r(s)r'(s)\mathbf{t}(s) \pm r(s)\sqrt{1-r'^2(s)}(\cos\theta\mathbf{n}(s) + \sin\theta\mathbf{b}(s)) \quad (1)$$

şeklinde tanımlanır. Yarıçap fonksiyonu $r(s) = r$ sabit olması durumunda, kanal yüzeyi bir tüp yüzeyi veya boru yüzeyi olarak adlandırılır ve parametrik olarak tüp yüzeyi

$$T(s, \theta) = \Omega(s) + r(\cos\theta\mathbf{n}(s) + \sin\theta\mathbf{b}(s)), \quad 0 \leq \theta < 2\pi \quad (2)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada $\mathbf{t}(s), \mathbf{n}(s), \mathbf{b}(s)$ sırasıyla, Ω merkez eğrisinin $\Omega(s)$ noktasındaki teğeti, asli normal ve binormaldir (Do Carmo, 1976; Gray ve ark., 2017; Xu ve ark., 2006; Maekawa ve ark., 1998; Dogan ve ark., 2011; Dogan ve ark., 2012; Dogan, 2012). Şimdi de Serret-Frenet çatısına alternatif olarak q-çatısını ifade edelim. q-çatısının Serret-Frenet çatısına göre iki önemli avantajı vardır. İlki, türevin mevcut olmadığı durumlarda Serret-Frenet çatısı tanımlanamazken, q-çatının tanımlanabilmesidir. İkincisi ise q-çatısının eğrinin teğet vektörü etrafında ortaya çıkan gereksiz bükülmeyi önlemesidir. $\mathbf{k}_z = (0, 0, 1)$ ve $A = (a, b, c)$ olsun. $A \wedge \mathbf{k}_z = (b, -a, 0)$ olduğundan A vektörü xy-düzlemine iz düşürülmüş olur. Burada \wedge sembolü vektörel çarpımı ifade eder. Buna göre \mathbf{k} iz düşüm vektörü eksenler doğrultusunda birim vektör olarak alınır. Bir eğrinin teğet vektörü ile \mathbf{k} iz düşüm vektörü paralel olursa $\mathbf{t} \wedge \mathbf{k} = 0$ olduğu dikkate alınmalıdır. q-çatısını üç tipte sınıflandırabiliriz. z-ekseni, y-ekseni ve x-ekseni yönündeki q-çatıları sırasıyla $\{\mathbf{t}, \mathbf{n}_q, \mathbf{b}_q, \mathbf{k}_z\}$, $\{\mathbf{t}, \mathbf{n}_q, \mathbf{b}_q, \mathbf{k}_y\}$, $\{\mathbf{t}, \mathbf{n}_q, \mathbf{b}_q, \mathbf{k}_x\}$ ile gösterilir. Burada iz düşüm vektörleri sırasıyla $\mathbf{k}_z = (0, 0, 1)$, $\mathbf{k}_y = (0, 1, 0)$, $\mathbf{k}_x = (1, 0, 0)$ olarak tanımlanmaktadır.

Bir $\Omega(s)$ uzay eğrisi boyunca q-çatısı

$$\mathbf{t}(s) = \frac{\Omega'(s)}{\|\Omega'(s)\|}, \quad \mathbf{n}_q(s) = \frac{\mathbf{t}(s) \wedge \mathbf{k}}{\|\mathbf{t}(s) \wedge \mathbf{k}\|}, \quad \mathbf{b}_q(s) = \mathbf{t}(s) \wedge \mathbf{n}_q(s) \quad (3)$$

eşitlikleri ile tanımlanır. Burada $\|\cdot\|$, ile Öklid normu ifade edilmektedir. \mathbf{k} , \mathbf{t} , \mathbf{n}_q , \mathbf{b}_q sırasıyla $\Omega(s)$ eğrisinin izdüşüm vektörü, teğeti, kuasi normal, kuasi binormalidir (Dede ve ark., 2015). Matris formundaki q-çatısının türev formülleri

$$\mathbf{t}' = k_1 \mathbf{n}_q + k_2 \mathbf{b}_q, \mathbf{n}'_q = -k_1 \mathbf{t} + k_3 \mathbf{b}_q, \mathbf{b}'_q = -k_2 \mathbf{t} - k_3 \mathbf{n}_q \quad (4)$$

denklemleri ile hesaplanır (Dede ve ark., 2015; Dede ve ark., 2015; Koyuncu, 2020).

Öklid 3-uzayında X yüzeyini $X(s, t) = (X_1(s, t), X_2(s, t), X_3(s, t))$ ile gösterelim ve \mathbf{n} , X yüzeyi üzerinde

$$\mathbf{n}(s, t) = \frac{X_s(s, t) \wedge X_t(s, t)}{\|X_s(s, t) \wedge X_t(s, t)\|} \quad (5)$$

ile tanımlanan standart birim normal vektör alanıdır. Burada $X_s(s, t) = \frac{\partial X(s, t)}{\partial s}$ dır. O halde X yüzeyinin I birinci temel formu ve II ikinci temel formu sırasıyla,

$$I = E ds^2 + 2F ds dt + G dt^2$$

$$II = eds^2 + 2f ds dt + g dt^2$$

dır. Burada

$$E = \langle X_s, X_s \rangle, F = \langle X_s, X_t \rangle, G = \langle X_t, X_t \rangle \quad (6)$$

$$e = \langle X_{ss}, N \rangle, f = \langle X_{st}, N \rangle, g = \langle X_{tt}, N \rangle$$

$$(7)$$

dir. Burada $\langle \cdot, \cdot \rangle$ Öklid iç çarpımı ifade eder. (6) ve (7) eşitlikleri kullanılarak yüzeyin K Gauss eğriliği, H ortalama eğriliği sırasıyla,

$$K = \frac{eg - f^2}{EG - F^2}, H = \frac{Eg - 2Ff + Ge}{2(EG - F^2)} \quad (8)$$

ile hesaplanır (Hacısalıhoğlu, 1994; Sabuncuoğlu, 2010). $\{\mathbf{t}(s), \mathbf{n}_q(s), \mathbf{b}_q(s) = \mathbf{t}(s) \wedge \mathbf{n}_q(s)\}$, $\Omega(s)$

birim hızlı merkez eğrisinin q-çatısı olsun. O halde kanal yüzeyi ve tüp yüzeyi sırasıyla,

$$\tilde{K}(s, \theta) = \Omega(s) - r(s)r'(s)t(s) \pm r(s)\sqrt{1-r'^2(s)}(\cos \theta \mathbf{n}_q(s) + \sin \theta \mathbf{b}_q(s)) \quad (9)$$

$$T(s, \theta) = \Omega(s) + r(\cos \theta \mathbf{n}_q(s) + \sin \theta \mathbf{b}_q(s)) \quad (10)$$

olarak ifade edilir (Dede ve ark., 2015; Dede ve ark., 2015; Koyuncu, 2020).

Şimdi de kuaterniyonlarla ilgili temel kavramları verelim. Kuaterniyonlar kompleks sayıların bir genelleştirilmesi olarak 1843 yılında İrlandalı matematikçi Sir William Roman Hamilton tarafından ifade edilmiştir.

$$IH = \{q_1 + q_2i + q_3j + q_4k : i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1, q_1, q_2, q_3, q_4 \in \mathbb{R}\}$$

dörtlü sayı kümesine kuaterniyonlar kümesi, bu kümenin elemanlarına da kuaterniyon denir. Matematiksel olarak, bir q reel kuaterniyon $q = q_1 + q_2i + q_3j + q_4k$ olarak tanımlanır. Burada q_1, q_2, q_3, q_4 reel sayı i, j, k ise

$$i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1 \quad (11)$$

$$ij = -ji = k, jk = -kj = i, ki = -ik = j \quad (12)$$

koşuluna sahip sanal sayıdır. q_1 skalar kısım ve $q_2i + q_3j + q_4k$ vektörel kısım olarak tanımlanır. Skaler ve vektörel kısımları sırasıyla, $S(q)$ ve $V(q)$ ile gösterilirse, q kuaterniyonu kısaca $q = S(q) + V(q)$ şeklinde yazılabilir. Eğer $S(q) = q_1 = 0$ ise q bir saf kuaterniyon olur. $q = q_1 + q_2i + q_3j + q_4k$ ve $p = p_1 + p_2i + p_3j + p_4k$ iki kuaterniyon olsun. Bir kuaterniyonun eşleniği, iki kuaterniyonun toplamı ve bir kuaterniyonun bir skaler ile çarpımı sırasıyla,

$$\bar{q} = S(q) - V(q) = q_1 - q_2i - q_3j - q_4k \quad (13)$$

$$q + p = (S(q) + S(p)) + (V(q) + V(p)) \quad (14)$$

$$\lambda q = \lambda S(q) + \lambda V(q) \quad (15)$$

dir (Hacısalıhoğlu, 1983; Özdemir, 2020). Ayrıca q ve p kuaterniyonlarının kuaterniyon çarpımı

$$q \times p = S(q)S(p) - \langle V(q), V(p) \rangle + S(q)V(p) + S(p)V(q) + V(q) \wedge V(p) \quad (16)$$

dir. q kuaterniyonunun normu

$$\|q\| = \sqrt{q \times \bar{q}} = \sqrt{\bar{q} \times q} = \sqrt{q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + q_4^2} \quad (17)$$

dir. Eğer $\|q\|=1$ ise, q kuaterniyonu birim kuaterniyon olarak adlandırılır. $q = q_1 + q_2i + q_3j + q_4k$ birim kuaterniyonunun kutupsal gösterimi $q = \cos(\theta) + m \cdot \sin(\theta)$ ile tanımlanır. Burada m birim vektörü dönme eksenini, θ dönme açısıdır. q kuaterniyonunun tersi

$$q^{-1} = \frac{\bar{q}}{\|q\|^2}, \quad q \neq 0 \quad (18)$$

olarak verilir. $\psi: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ bir lineer dönüşüm ve $\psi(v) = q \times v \times q^{-1}$ olsun. Burada q bir birim kuaterniyon ve v bir saf kuaterniyondur. Böylece her $q = q_1 + q_2i + q_3j + q_4k$ birim kuaterniyonu için $I\mathbb{H}$ kuaterniyon kümesinin saf kuaterniyonun baz elemanları kullanılarak ψ nin M matrisi temsili

$$M = \begin{bmatrix} q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 - q_4^2 & -2q_1q_4 + 2q_2q_3 & 2q_1q_3 + 2q_2q_4 \\ 2q_1q_4 + 2q_2q_3 & q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 - q_4^2 & 2q_3q_4 - 2q_1q_2 \\ 2q_2q_4 + 2q_1q_3 & 2q_1q_2 + 2q_3q_4 & q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_4^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

olarak ifade edilebilir: $M \cdot M^T = I$ ve $\det M = 1$ olduğu için M bir ortogonal matristir.

3-boyutlu Öklid uzayında bir parametrelili homotetik hareket

$$\begin{bmatrix} Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} hA & C \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

dönüşümüyle verilir. Burada Y ve X sırasıyla, R' sabit uzay ve R hareketli uzayın aynı noktasının konum vektörleridir. Ayrıca h , A ve C sırasıyla homotetik skaler, ortogonal matris ve öteleme vektörü olarak adlandırılan s parametresine göre sürekli türevlenebilir fonksiyonlardır (Duldul, 2020). $Q(s, \theta) = \cos \theta + \sin \theta \mathbf{t}(s)$ birim kuaterniyonu $S^3 \subset R^4$ de bir fonksiyon ve $\mathbf{t}(s) = (t_1, t_2, t_3)$ de $\Omega(s)$ merkez eğrisinin teğet vektörü olsun. O halde ψ lineer dönüşüme karşılık gelen M matrisi (19) denkleminde yerine yazılarak

$$M = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta + \sin^2 \theta (T_1^2 - T_2^2 - T_3^2) & -2 \sin \theta (\cos \theta T_3 - \sin \theta T_1 T_2) & 2 \sin \theta (\cos \theta T_2 + \sin \theta T_1 T_3) \\ 2 \sin \theta (\cos \theta T_3 + \sin \theta T_1 T_2) & \cos^2 \theta + \sin^2 \theta (T_2^2 - T_1^2 - T_3^2) & 2 \sin \theta (\sin \theta T_2 T_3 - \cos \theta T_1) \\ 2 \sin \theta (\sin \theta T_1 T_3 - \cos \theta T_2) & 2 \sin \theta (\cos \theta T_1 + \sin \theta T_2 T_3) & \cos^2 \theta + \sin^2 \theta (T_3^2 - T_2^2 - T_1^2) \end{bmatrix} \quad (21)$$

matrisi elde edilir (Aslan ve ark., 2016; Aslan, 2017). $\{\mathbf{t}(s), \mathbf{n}(s), \mathbf{b}(s)\}$, $\Omega(s)$ birim hızlı merkez eğrisinin Serret-Frenet çatısı olsun. $Q(s, \theta) \times \mathbf{n}(s)$ kuarterniyonu kullanılarak (1) ve (2) eşitliklerinden kanal yüzeyi ve tüp yüzeyi

$$K(s, \theta) = \Omega(s) - r(s)r'(s)\mathbf{t}(s) \pm r(s)\sqrt{1-r'^2(s)} Q(s, \theta) \times \mathbf{n}(s), \quad (22)$$

$$T(s, \theta) = \Omega(s) + rQ(s, \theta) \times \mathbf{n}(s) \quad (23)$$

eşitlikleri ile verilir. $K(s, \theta)$ kanal yüzeyinin homotetik hareket ile ifadesi

$$K(s, \theta) = \gamma(s) + \sigma(s)M \mathbf{n}(s) \quad (24)$$

ile verilir. Burada $\gamma(s) = \Omega(s) - r(s)r'(s)\mathbf{t}(s)$, $\sigma(s) = \pm r(s)\sqrt{1-r'^2(s)}$ ve $\mathbf{n}(s)$, $\Omega(s)$ eğrisinin birim normalidir. $T(s, \theta)$ tüp yüzeyinin homotetik hareket ile ifadesi

$$T(s, \theta) = \Omega(s) + rM \mathbf{n}(s) \quad (25)$$

dir. Burada $\Omega(s)$ homotetik hareketin öteleme vektörü, r homotetik skalası M ortogonal matris $\mathbf{n}(s)$, $\Omega(s)$ eğrisinin birim normalidir (Aslan ve ark., 2016; Aslan, 2017; Gok, 2017).

3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde, q -çatısı kullanarak kuarterniyonlar yardımıyla $\tilde{K}(s, \theta)$ kanal ve $\tilde{T}(s, \theta)$ tüp yüzeylerinin denklemleri elde edilmiştir. Buna ek olarak bu yüzeylerin kuarterniyon yardımıyla birinci ve ikinci temel formları, Gauss ve ortalama eğrilik karakterizasyonları hesaplanmıştır ve bazı sayısal örnekler verilmiştir.

Teorem 3.1. R^3 uzayında alınan $\Omega(s)$ birim hızlı eğrisinin q -çatısı $\{\mathbf{t}(s), \mathbf{n}_q(s), \mathbf{b}_q(s)\}$ olsun. $\tilde{K}(s, \theta)$ kanal yüzeyinin merkez eğrisi $\Omega(s)$ ve $S^3 \subset R^4$ de $Q(s, \theta) = \cos \theta + \sin \theta \mathbf{t}(s)$ birim

kuaterniyon ve $Q(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)$ kuaterniyonu göz önüne alındığında kanal yüzeyinin parametrik denklemi

$$\tilde{K}(s, \theta) = \Omega(s) - r(s)r'(s)\mathbf{t}(s) \pm r(s)\sqrt{1-r'^2(s)} Q(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s) \quad (26)$$

dir. Ayrıca $Q(s, \theta)$ birim kuaterniyonu için $\psi: R^3 \rightarrow R^3$ matris dönüşümü kullanılarak $\tilde{K}(s, \theta)$ kanal yüzeyinin homotetik hareket ile ifadesi

$$\tilde{K}(s, \theta) = \gamma(s) + \sigma(s)M \mathbf{n}_q(s) \quad (27)$$

ile verilir. Burada $\gamma(s) = \Omega(s) - r(s)r'(s)\mathbf{t}(s)$, $\sigma(s) = \pm r(s)\sqrt{1-r'^2(s)}$ ve $\mathbf{n}_q(s)$, $\Omega(s)$ eğrisinin kuasi normalidir.

İspat: $Q(s, \theta) = \cos \theta + \sin \theta \mathbf{t}(s)$ birim kuaterniyon ve $\mathbf{n}_q(s)$, $\Omega(s)$ birim hızlı eğrisinin saf kuasi normal vektörü olsun. O halde $Q(s, \theta)$ ve $\mathbf{n}_q(s)$ kuaterniyonlarının kuaterniyon çarpımı (16) da yerine yazılırsa $Q(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s) = \cos \theta \mathbf{n}_q(s) + \sin \theta \mathbf{b}_q(s)$ dir. (9) denklemi göz önüne alınırsa kanal yüzeyi (26) elde edilir. Diğer taraftan (20) denklemde homotetik hareketin öteleme vektörü, homotetik skalası ve ortogonal matrisi sırasıyla, $\gamma(s) = \Omega(s) - r(s)r'(s)\mathbf{t}(s)$, $\sigma(s) = r(s)\sqrt{1-r'^2(s)}$ ve M olduğu göz önüne alınırsa (27) elde edilir.

Sonuç 3.2. $\tilde{T}(s, \theta)$ bir tüp yüzeyi ve $\Omega(s)$ de bu tüp yüzeyinin merkez eğrisi olsun. $Q(s, \theta) = \cos \theta + \sin \theta \mathbf{t}(s)$ birim kuaterniyon ve $\{\mathbf{t}(s), \mathbf{n}_q(s), \mathbf{b}_q(s)\}$, $\Omega(s)$ eğrisinin q-çatısı olsun. $Q(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)$ kuaterniyon çarpımı kullanılarak tüp yüzeyinin parametrik denklemi

$$\tilde{T}(s, \theta) = \Omega(s) + r(Q(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \quad (28)$$

olarak elde edilir. $Q(s, \theta)$ birim kuaterniyonu için $\psi: R^3 \rightarrow R^3$ matris dönüşümü kullanılarak $\tilde{T}(s, \theta)$ tüp yüzeyinin homotetik hareket ile ifadesi

$$\tilde{T}(s, \theta) = \Omega(s) + rM \mathbf{n}_q(s) \quad (29)$$

dir. Burada $\Omega(s)$ homotetik hareketin öteleme vektörü, r homotetik skalası M de ortogonal matrisidir.

Teorem 3.3. \mathbb{R}^3 uzayında alınan $\Omega(s)$ birim hızlı eğrisinin q -çatısı $\{t(s), n_q(s), b_q(s)\}$ olsun. $\tilde{T}(s, \theta)$ tüp yüzeyinin merkez eğrisi $\Omega(s)$ ve $S^3 \subset \mathbb{R}^4$ de $Q(s, \theta) = \cos \theta + \sin \theta t(s)$ birim kuaterniyon olmak üzere $Q(s, \theta) \times n_q(s)$ kuaterniyon çarpımının birinci mertebeden kısmi türevleri

$$\text{i) } \frac{\partial}{\partial s} (Q(s, \theta) \times n_q(s)) = (Q_s(s, \theta) \times n_q(s)) + (Q(s, \theta) \times n'_q(s)) = (\cos \theta n'_q(s) + \sin \theta b'_q(s))$$

$$\text{ii) } \frac{\partial}{\partial \theta} (Q(s, \theta) \times n_q(s)) = (Q_\theta(s, \theta) \times n_q(s)) = (-\sin \theta n_q(s) + \cos \theta b_q(s))$$

dır.

İspat: i) $Q(s, \theta) = \cos \theta + \sin \theta t(s)$ birim kuaterniyon ve $n_q(s)$ saf kuasi normal vektörü olsun. $Q_s(s, \theta)$ ve $n_q(s)$ kuaterniyonlarının kuaterniyon çarpımı kullanılarak (16) da yerine yazılırsa

$$\begin{aligned} (Q_s(s, \theta) \times n_q(s)) &= (\sin \theta t'(s) \times n_q(s)) = -\sin \theta \langle t'(s), n_q(s) \rangle + \sin \theta t'(s) \wedge n_q(s) \\ &= -\sin \theta \langle k_1 n_q(s) + k_2 b_q(s), n_q(s) \rangle + \sin \theta (k_1 n_q(s) + k_2 b_q(s)) \wedge n_q(s) \\ &= -k_1 \sin \theta \langle n_q(s), n_q(s) \rangle + k_2 \sin \theta b_q(s) \wedge n_q(s) \\ &= -k_1 \sin \theta - k_2 \sin \theta t(s) \end{aligned} \quad (30)$$

Benzer şekilde $Q(s, \theta)$ birim kuaterniyon ve $n'_q(s)$ saf kuasi normal vektörü (16) da yerine yazılırsa

$$\begin{aligned} (Q(s, \theta) \times n'_q(s)) &= (\cos \theta + \sin \theta t(s)) \times n'_q(s) = -\sin \theta \langle t(s), n'_q(s) \rangle + \cos \theta n'_q(s) + \sin \theta t(s) \wedge n'_q(s) \\ &= -\sin \theta \langle t(s), n'_q(s) \rangle + \cos \theta n'_q(s) + \sin \theta t(s) \wedge n'_q(s) \\ &= -\sin \theta \langle t(s), -k_1 t(s) + k_3 b_q(s) \rangle + \cos \theta n'_q(s) + \sin \theta (t(s) \wedge -k_1 t(s) + k_3 b_q(s)) \\ &= k_1 \sin \theta + \cos \theta n'_q(s) + \sin \theta k_3 t(s) \wedge b_q(s) \\ &= k_1 \sin \theta + \cos \theta n'_q(s) - k_3 \sin \theta n_q(s) \end{aligned} \quad (31)$$

(30) ve (31) taraf tarafa toplanırsa

$$\begin{aligned}
 (Q_t(s, \theta) \times n_q(s)) + (Q(s, \theta) \times n'_q(s)) &= -k_1 \sin \theta - k_2 \sin \theta t(s) + k_1 \sin \theta + \cos \theta n'_q(s) - k_3 \sin \theta n_q(s) \\
 &= -k_2 \sin \theta t(s) + \cos \theta n'_q(s) - k_3 \sin \theta n_q(s) \\
 &= \cos \theta n'_q(s) + \sin \theta (-k_2 t(s) - k_3 n_q(s)) \\
 &= \cos \theta n'_q(s) + \sin \theta b'_q(s)
 \end{aligned}$$

elde edilir. Böylece ispat tamamlanır.

ii) $Q(s, \theta) = \cos \theta + \sin \theta t(s)$ birim kuaterniyon ve $n_q(s)$ saf kuasi normal vektör olsun. Bu durumda $Q_\theta(s, \theta)$ ve $n_q(s)$ kuaterniyonlarının kuaterniyon çarpımı ile ispat tamamlanır.

Sonuç 3.4. \mathbb{R}^3 uzayında $\Omega(s)$ birim hızlı eğrisi $\tilde{T}(s, \theta)$ tüp yüzeyinin merkez eğrisi olmak üzere, $Q(s, \theta) = \cos \theta + \sin \theta t(s)$, $S^3 \subset \mathbb{R}^4$ de bir birim kuaterniyon ve $\{t(s), n_q(s), b_q(s)\}$, $\Omega(s)$ eğrisinin q-çatısı ve $n_q(s)$, $\Omega(s)$ eğrisinin kuasi normal vektörü olsun. $Q(s, \theta) \times n_q(s) = \cos \theta n_q(s) + \sin \theta b_q(s)$ kuaterniyonunun ikinci mertebeden kısmi türevleri

$$i) \frac{\partial^2}{\partial s^2} (Q(s, \theta) \times n_q(s)) = (Q_{ss}(s, \theta) \times n_q(s) + 2Q_{s\theta}(s, \theta) \times n'_q(s) + Q(s, \theta) \times n''_q(s)) = \sin \theta b''_q(s) + \cos \theta n''_q(s)$$

$$ii) \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial}{\partial s} (Q(s, \theta) \times n_q(s)) \right) = (Q_{s\theta}(s, \theta) \times n_q(s)) + (Q_\theta(s, \theta) \times n'_q(s)) = -\sin \theta n'_q(s) + \cos \theta b'_q(s)$$

$$iii) \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} (Q(s, \theta) \times n_q(s)) = (Q_{\theta\theta}(s, \theta) \times n_q(s)) = (-\cos \theta - \sin \theta t(s)) \times n_q(s) = -\cos \theta n_q(s) - \sin \theta b_q(s)$$

dır.

Sonuç 3.5. \mathbb{R}^3 uzayında $\Omega(s)$ birim hızlı eğrisi $\tilde{T}(s, \theta)$ tüp yüzeyinin merkez eğrisi olmak üzere $Q(s, \theta) = \cos \theta + \sin \theta t(s)$, $S^3 \subset \mathbb{R}^4$ de bir birim kuaterniyon ve $\{t(s), n_q(s), b_q(s)\}$, $\Omega(s)$ eğrisinin q-çatısı ve $n_q(s)$, $\Omega(s)$ eğrisinin kuasi normal vektörü olsun. $\tilde{T}(s, \theta)$ yüzeyinin birim normal vektörü ,

$$\mathbf{n}_q(s, \theta) = \frac{\left(\mathbf{t}(s) + r(Q_s(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s) + Q(s, \theta) \times \mathbf{n}'_q(s)) \right) \wedge \left(r(Q_\theta(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right)}{\left\| \left(\mathbf{t}(s) + r(Q_s(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s) + Q(s, \theta) \times \mathbf{n}'_q(s)) \right) \wedge \left(r(Q_\theta(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right) \right\|} = Q_{\theta\theta}(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)$$

dır.

Sonuç 3.6. $\Omega(s)$ birim hızlı eğrisi IR^3 uzayında $\tilde{T}(s, \theta)$ tüp yüzeyinin merkez eğrisi olmak üzere $Q(s, \theta) = \cos \theta + \sin \theta \mathbf{t}(s)$, $S^3 \subset R^4$ de bir birim kuaterniyon ve $\{\mathbf{t}(s), \mathbf{n}_q(s), \mathbf{b}_q(s)\}$, $\Omega(s)$ eğrisinin q-çatısı ve $\mathbf{n}_q(s)$, $\Omega(s)$ eğrisinin kuasi normal vektörü olsun. $\tilde{T}(s, \theta)$ yüzeyinin birinci ve ikinci temel formun katsayıları sırasıyla,

$$E_q = \left\| \mathbf{t}(s) + r \frac{\partial}{\partial s} (Q(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right\|^2$$

$$F_q = r^2 \left\langle \frac{\partial}{\partial s} (Q(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)), \frac{\partial}{\partial \theta} (Q(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right\rangle$$

$$G_q = r^2$$

ve

$$e_q = \left\langle \mathbf{t}'(s) + r \left(\frac{\partial^2}{\partial s^2} (Q(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right), \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} (Q(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right\rangle$$

$$f_q = r \left\langle \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial}{\partial s} (Q(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right), \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} (Q(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right\rangle$$

$$g_q = r$$

dır.

Sonuç 3.7. $\Omega(s)$ birim hızlı eğrisi IR^3 uzayında $\tilde{T}(s, \theta)$ tüp yüzeyinin merkez eğrisi olmak üzere $Q(s, \theta) = \cos \theta + \sin \theta \mathbf{t}(s)$, $S^3 \subset R^4$ de bir birim kuaterniyon ve $\{\mathbf{t}(s), \mathbf{n}_q(s), \mathbf{b}_q(s)\}$, $\Omega(s)$ eğrisinin q-çatısı ve $\mathbf{n}_q(s)$, $\Omega(s)$ eğrisinin kuasi normal vektörü olsun. $\tilde{T}(s, \theta)$ yüzeyinin K_q Gauss ve H_q ortalama eğriliği sırasıyla,

$$K_q = \frac{\left\langle \mathbf{t}'(s) + r \left(\frac{\partial^2}{\partial s^2} (Q(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right), \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} (Q(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right\rangle - \left\langle \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial}{\partial s} (Q(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right), \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} (Q(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right\rangle^2}{\left\| \mathbf{t}(s) + r \left(\frac{\partial}{\partial s} (Q(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right) \right\|^2 - r^2 \left\langle \frac{\partial}{\partial s} (Q(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)), \frac{\partial}{\partial \theta} (Q(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right\rangle^2}$$

$$H_q = \frac{\left\| \mathbf{t}(s) + r \frac{\partial}{\partial s} (\mathcal{Q}(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right\|^2 + r \left\langle \mathbf{t}'(s) + r \left(\frac{\partial^2}{\partial s^2} (\mathcal{Q}(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right), \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} (\mathcal{Q}(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right\rangle - 2r^2 \left\langle \frac{\partial}{\partial s} (\mathcal{Q}(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)), \frac{\partial}{\partial \theta} (\mathcal{Q}(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right\rangle \left\langle \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial}{\partial s} (\mathcal{Q}(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right), \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} (\mathcal{Q}(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right\rangle}{2r \left(\left\| \mathbf{t}(s) + r \frac{\partial}{\partial s} (\mathcal{Q}(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right\|^2 - r^2 \left\langle \frac{\partial}{\partial s} (\mathcal{Q}(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)), \frac{\partial}{\partial \theta} (\mathcal{Q}(s, \theta) \times \mathbf{n}_q(s)) \right\rangle^2 \right)}$$

dır.

Örnek 1: $\Omega(s) = (\cos s, \sin s, 1)$ birim hızlı eğri olsun. $\mathbf{k}_z = (0, 0, 1)$ izdüşüm vektörüne sahip z-ekseni yönündeki q-çatısı

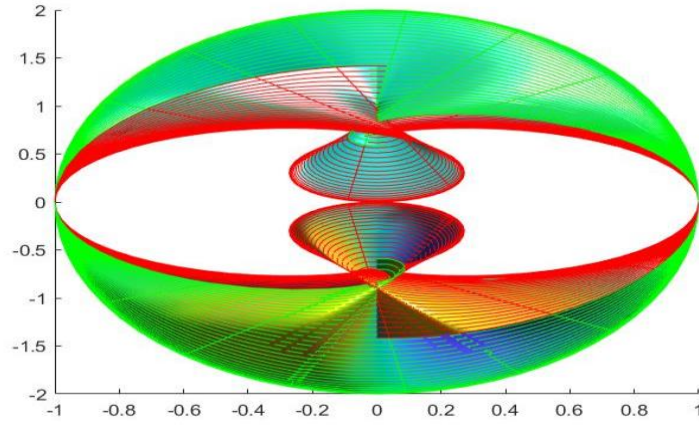
$$\mathbf{t}(s) = (-\sin s, \cos s, 0), \quad \mathbf{n}_q(s) = (\cos s, \sin s, 0), \quad \mathbf{b}_q(s) = (0, 0, 1)$$

olarak elde edilir. O halde $\mathcal{Q}(s, \theta) = \cos \theta + \sin \theta \mathbf{t}(s)$ birim kuaterniyonu için ψ dönüşümü (21) deki M matris temsili

$$M = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \cos 2s & -\sin^2 \theta \sin 2s & -\cos s \sin 2\theta \\ -\sin^2 \theta \sin 2s & \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \cos 2s & \sin s \sin 2\theta \\ \sin 2\theta \sin s & -\sin s \sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix}$$

olarak elde edilir. (27) deki denklemde $r(s) = \sin s$ alınırsa böylece kanal yüzeyi

$$\begin{aligned} \tilde{K}(s, \theta) &= \Omega(s) - r(s)r'(s)\mathbf{t}(s) \pm r(s)\sqrt{1-r'^2(s)}M\mathbf{n}_q(s) \\ &= (\cos s, \sin s, 1) + \frac{1}{2}\sin 2s(-\sin s, \cos s, 0) \pm \sin^2 s(\cos s \cos 2\theta, \sin s \cos 2\theta, \sin s \cos s \sin 2\theta - \sin^2 s \cos s \sin 2\theta) \\ &= \begin{pmatrix} \cos s - \frac{1}{2}\sin 2s \sin s \pm \sin^2 s \cos s \cos 2\theta, \\ \sin s + \frac{1}{2}\sin 2s \cos s \pm \sin^2 s \sin s \cos 2\theta, \\ 1 \pm \sin^2 s(\sin s \cos s \sin 2\theta - \sin^2 s \cos s \sin 2\theta) \end{pmatrix}. \end{aligned}$$



Şekil 1: q-çatısı kullanarak reel kuaterniyonlarla oluşturulan kanal yüzeyi

Örnek 2. $\Omega(t) = \left(\frac{2}{\sqrt{13}} \cos t, \frac{3}{\sqrt{13}}, \frac{2}{\sqrt{13}} \sin t \right)$ bir eğri olsun. $\mathbf{k}_z = (0, 0, 1)$ izdüşüm vektörüne sahip z-ekseni yönündeki q-çatı vektörleri

$$\mathbf{t}(t) = (-\sin t, 0, \cos t), \quad \mathbf{n}_q(t) = (0, 1, 0), \quad \mathbf{b}_q(t) = (-\cos t, 0, -\sin t)$$

olarak elde edilir. O halde $Q(t, \theta) = \cos \theta + \sin \theta \mathbf{t}(t)$ birim kuaterniyonu için ψ nin M matris temsili

$$M = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \cos 2t & -\sin 2\theta \cos t & -\sin^2 \theta \sin 2t \\ \sin 2\theta \cos t & \cos 2\theta & \sin 2\theta \sin t \\ -\sin^2 \theta \sin 2t & -\sin 2\theta \sin t & \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \cos 2t \end{bmatrix}$$

olarak elde edilir. Böylece Sonuç (3.2) den tüp yüzeyini $\tilde{T}(t, \theta) = \Omega(t) + rM \mathbf{n}_q(t)$ olarak alabiliriz.

O halde

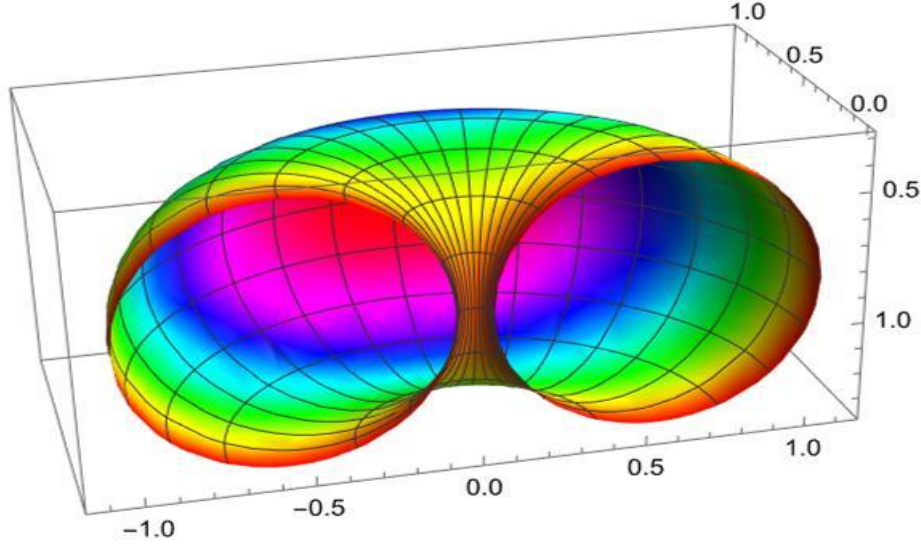
$$\tilde{T}(t, \theta) = \Omega(t) + rM \mathbf{n}_q(t)$$

$$= \left(\frac{2}{\sqrt{13}} \cos t, \frac{3}{\sqrt{13}}, \frac{2}{\sqrt{13}} \sin t \right) + r(-\sin 2\theta \cos t, \cos 2\theta, -\sin 2\theta \sin t)$$

$$= \left(\frac{2}{\sqrt{13}} \cos t - r \sin 2\theta \cos t, \frac{3}{\sqrt{13}} + r \cos 2\theta, \frac{2}{\sqrt{13}} \sin t - r \sin 2\theta \sin t \right)$$

$r = \frac{1}{2}$ alınırsa Şekil 2'deki tüp yüzeyi elde edebiliriz.

$$\tilde{T}(t, \theta) = \left(\frac{2}{\sqrt{13}} \cos t - \frac{1}{2} \sin 2\theta \cos t, \frac{3}{\sqrt{13}} + \frac{1}{2} \cos 2\theta, \frac{2}{\sqrt{13}} \sin t - \frac{1}{2} \sin 2\theta \sin t \right)$$



Şekil 2. q-çatısı kullanarak reel kuaterniyonlarla oluşturulan tüp yüzeyi

$\tilde{T}(t, \theta)$ tüp yüzeyin birinci temel form ve ikinci temel formun katsayıları sırasıyla

$$E_q = \left(\frac{2}{\sqrt{13}} - \frac{1}{2} \sin 2\theta \right)^2, \quad F_q = 0, \quad G_q = 1$$

ve

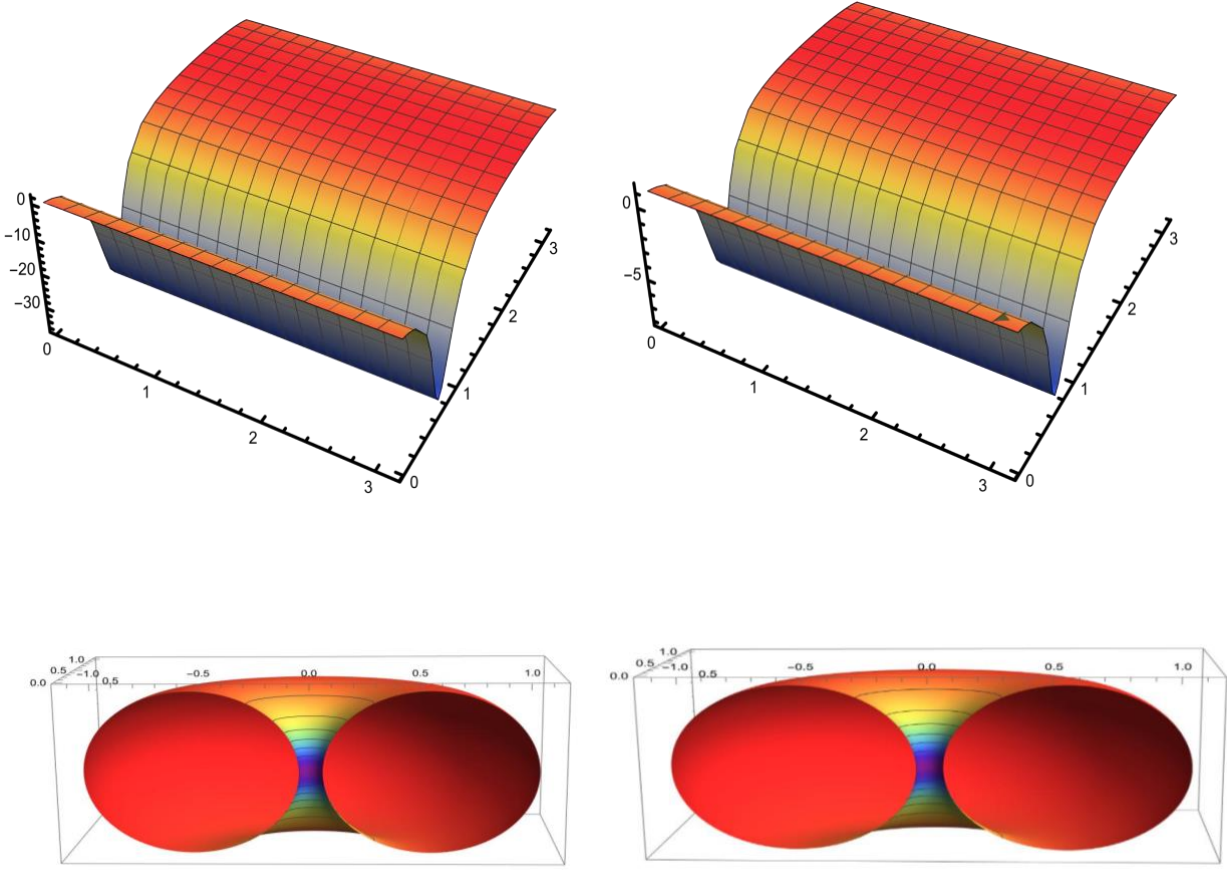
$$e_q = \left(-\frac{2}{\sqrt{13}} \sin 2\theta + \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \right), \quad f_q = 0, \quad g_q = 2$$

dir. Bu yüzeyin Gauss ve ortalama eğriliği sırasıyla,

$$K_q = \frac{338 \sin 2\theta (-45 + 13 \cos 4\theta + 16 \sqrt{13} \sin 2\theta)}{(4\sqrt{13} - 13 \sin 2\theta)^3},$$

$$H_q = \frac{\sqrt{2} (388 - 260 \cos 4\theta - 167 \sqrt{13} \sin 2\theta + 13 \sqrt{13} \sin 6\theta)}{(45 - 13 \cos 4\theta - 16 \sqrt{13} \sin 2\theta)^{\frac{3}{2}}}$$

olarak hesaplanır.



Şekil 3. Gauss ve ortalama eğrilik fonksiyonlarının yüzey üzerindeki grafikleri ve varyasyonu

Örnek 3. $\Omega(t) = (3t, 4t, 1)$ bir eğri olsun. $\mathbf{k}_z = (0, 0, 1)$ izdüşüm vektörüne sahip z-ekseni yönündeki q-çatısı

$$\mathbf{t}(t) = \left(\frac{3}{5}, \frac{4}{5}, 0 \right), \mathbf{n}_q(t) = \left(\frac{4}{5}, -\frac{3}{5}, 0 \right), \mathbf{b}_q(t) = (0, 0, -1)$$

olarak elde edilir. O halde $Q(t, \theta) = \cos \theta + \sin \theta \mathbf{t}(t)$ birim kuaterniyonu için ψ nin M matris temsili

$$M = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta - \frac{7}{25} \sin^2 \theta & \frac{24}{25} \sin^2 \theta & \frac{4}{5} \sin 2\theta \\ \frac{24}{25} \sin^2 \theta & \cos^2 \theta + \frac{7}{25} \sin^2 \theta & -\frac{3}{5} \sin 2\theta \\ \frac{4}{5} \sin 2\theta & \frac{3}{5} \sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix}$$

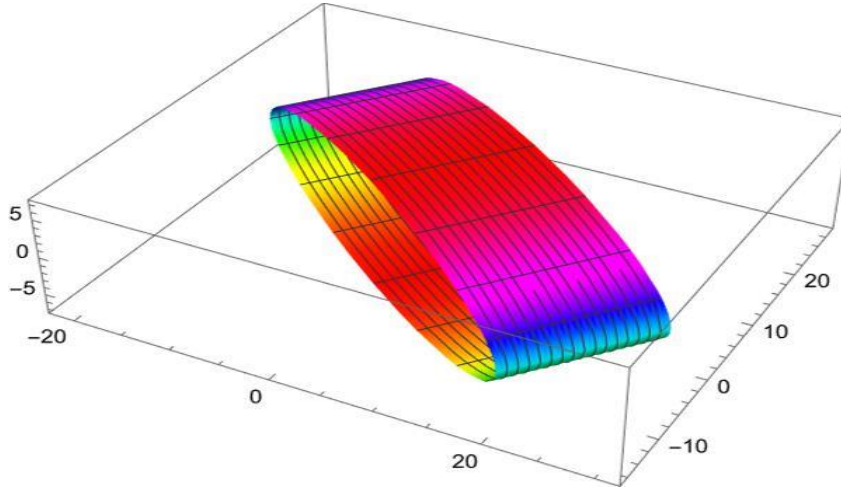
olarak elde edilir. Böylece Sonuç (3.2) den tüp yüzeyini $\tilde{T}(s, \theta) = \Omega(t) + rM \mathbf{n}_q(t)$ olarak alabiliriz.

O halde

$$\begin{aligned}\tilde{T}(t, \theta) &= \Omega(t) + rM \mathbf{n}_q(t) \\ &= (3t, 4t, 1) + r \left(\frac{4}{5} \cos 2\theta, -\frac{3}{5} \cos 2\theta, \frac{7}{25} \sin 2\theta \right) \\ &= \left(3t + r \cdot \frac{4}{5} \cos 2\theta, 4t - r \cdot \frac{3}{5} \cos 2\theta, 1 + r \cdot \frac{7}{25} \sin 2\theta \right)\end{aligned}$$

$r = 25$ alınırsa

$$\tilde{T}(t, \theta) = (3t + 20 \cos 2\theta, 4t - 15 \cos 2\theta, 1 + 7 \sin 2\theta)$$



Şekil 4. q-çatısı kullanarak reel kuaterniyonlarla oluşturulan tüp yüzeyi

$\tilde{T}(t, \theta)$ tüp yüzeyin birinci temel form ve ikinci temel formun katsayıları sırasıyla

$$E_q = 25, F_q = 0, G_q = (14)^2 + (48 \sin 2\theta)^2$$

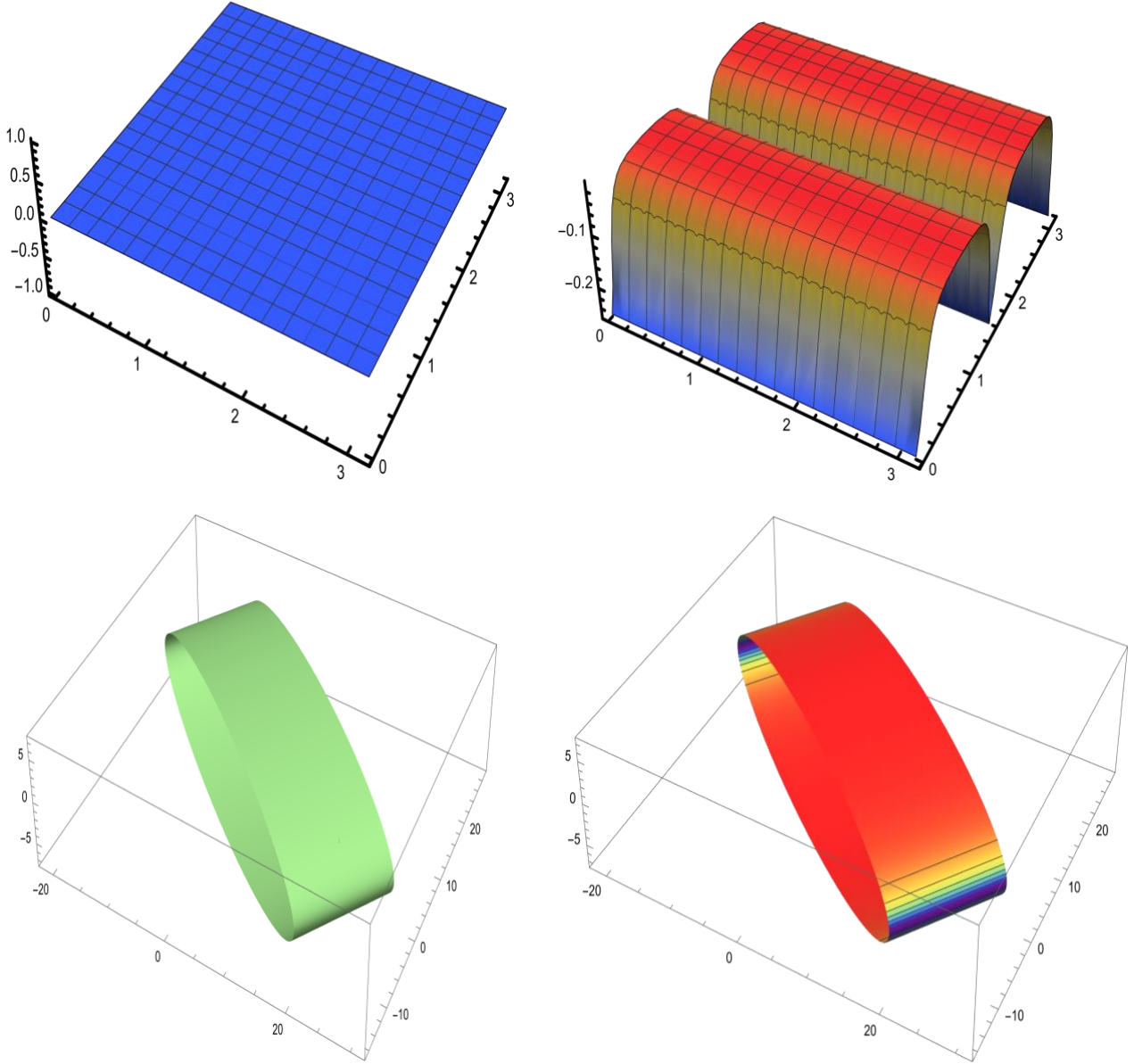
ve

$$e_q = 0, f_q = 0, g_q = \frac{700}{\sqrt{(7^2 + (24 \sin 2\theta)^2)}}$$

dir. Bu yüzeyin Gauss ve ortalama eğriliği sırasıyla,

$$K_q = 0, H_q = -\frac{175}{2(337 - 288\cos 4\theta)^{\frac{3}{2}}}$$

olarak hesaplanır.



Şekil 5. Gauss ve ortalama eğrilik fonksiyonlarının yüzey üzerindeki grafikleri ve varyasyonu

Örnek 4. $\Omega(t) = (t, t, t)$ bir eğri olsun. $k_z = (0, 0, 1)$ izdüşüm vektörüne sahip z-ekseni yönündeki q -çatısı

$$t(t) = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}} \right), n_q(t) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}}, 0 \right), b_q(t) = \left(\frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{6}}, -\frac{2}{\sqrt{6}} \right)$$

olarak elde edilir. O halde $Q(t, \theta) = \cos \theta + \sin \theta t$ birim kuaterniyonu için ψ nin M matris temsili

$$M = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta - \frac{1}{3} \sin^2 \theta & -\frac{1}{\sqrt{3}} \sin 2\theta + \frac{2}{3} \sin^2 \theta & \frac{1}{\sqrt{3}} \sin 2\theta + \frac{2}{3} \sin^2 \theta \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \sin 2\theta + \frac{2}{3} \sin^2 \theta & \cos^2 \theta - \frac{1}{3} \sin^2 \theta & \frac{2}{3} \sin^2 \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin 2\theta \\ \frac{2}{3} \sin^2 \theta + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin 2\theta & \frac{1}{\sqrt{3}} \sin 2\theta + \frac{2}{3} \sin^2 \theta & \cos^2 \theta - \frac{1}{3} \sin^2 \theta \end{bmatrix}$$

olarak elde edilir. Böylece Sonuç (3.2) den tüp yüzeyini $\tilde{T}(t, \theta) = \Omega(t) + rM \mathbf{n}_q(t)$ olarak alabiliriz.

O halde

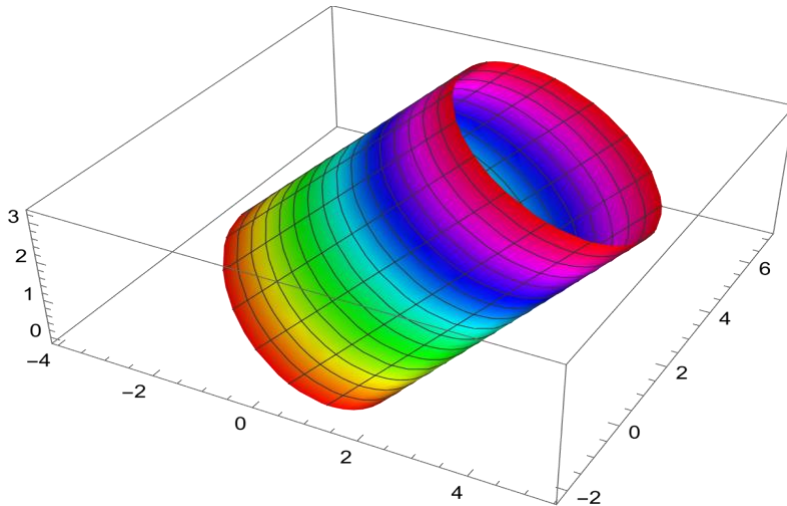
$$\tilde{T}(t, \theta) = \Omega(t) + rM \mathbf{n}_q(t)$$

$$\begin{aligned} &= (t, t, t) + r \left(\frac{1}{\sqrt{2}} (\cos 2\theta - \sin^2 \theta) + \frac{1}{\sqrt{6}} \sin 2\theta, \frac{1}{\sqrt{6}} \sin 2\theta + \frac{1}{\sqrt{2}} (\sin^2 \theta - \cos 2\theta), 0 \right) \\ &= \left(t + r \frac{1}{\sqrt{2}} (\cos 2\theta - \sin^2 \theta) + \frac{1}{\sqrt{6}} \sin 2\theta, t + r \left(\frac{1}{\sqrt{6}} \sin 2\theta + \frac{1}{\sqrt{2}} (\sin^2 \theta - \cos 2\theta) \right), t \right) \end{aligned}$$

$r = \sqrt{6}$ alınır

$$\tilde{T}(t, \theta) = \left(t + \sqrt{3} (\cos 2\theta - \sin^2 \theta) + \sin 2\theta, t + (\sin 2\theta + \sqrt{3} (\sin^2 \theta - \cos 2\theta)), t \right)$$

sonucu elde edilir.



Şekil 6. q-çatısı kullanarak reel kuaterniyonlarla oluşturulan tüp yüzeyi

$\tilde{T}(t, \theta)$ tüp yüzeyin birinci temel form ve ikinci temel formun katsayıları sırasıyla

$$E_q = 3, F_q = (2 + 2\sqrt{3}) \cos 2\theta, G_q = (3\sqrt{3} \sin 2\theta + 2 \cos 2\theta)^2 + (3\sqrt{3} \sin 2\theta - 2\sqrt{3} \cos 2\theta)^2$$

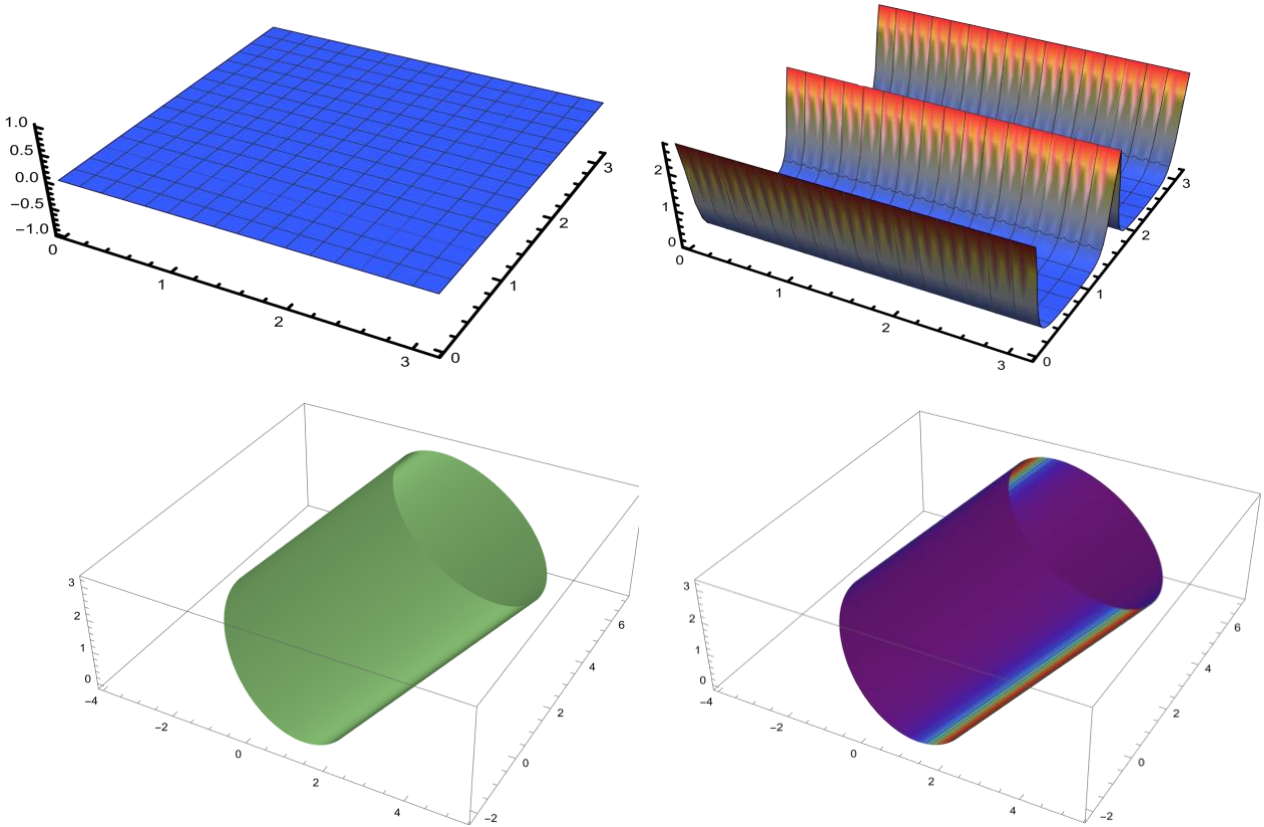
ve

$$e_q = 0, f_q = 0, g_q = \frac{12\sqrt{3} + 36}{\sqrt{16 \cos^2 2\theta + (12\sqrt{3} - 36) \sin 2\theta \cos 2\theta + 162 \sin^2 2\theta}}$$

dir. Bu yüzeyin Gauss ve ortalama eğriliği sırasıyla,

$$K_q = 0, H_q = \frac{36\sqrt{3}}{(85 - 77 \cos 4\theta)^{\frac{3}{2}}}$$

olarak hesaplanır.



Şekil 7. Gauss ve ortalama eğrilik fonksiyonlarının yüzey üzerindeki grafikleri ve varyasyonu

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, q-çatısı yardımıyla oluşturulan kanal ve tüp yüzeylerini farklı bir bakış açısı getirilerek kuaterniyon gösterimi oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan bu yüzeylerin Gauss ve ortalama eğriliği gibi karakterizasyonları elde edilmiştir. Kanal ve tüp yüzeyleri birçok alanda kullanıldığı gibi tıp alanında özellikle damar, aort, bağırsak yapılarının tasarımında yaygınlıkla kullanılmaktadır. Bu nedenden dolayı çalışmamızda elde edilen sonuçların literatüre önemli katkılarda bulunulacağı düşünülmektedir.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Aslan, S., Yaylı, Y. (2016). Canal surfaces with quaternions. *Adv Appl Clifford Alg* 26, 31-38.
- Aslan, S. (2017). Kuaterniyonların Diferansiyel Geometrisi. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Celik, S., Karadağ, H. B., & Kuşak Samancı, H. (2023). The Conchoidal Twisted Surfaces Constructed by Anti-Symmetric Rotation Matrix in Euclidean 3-Space. *Symmetry*, 15(6), 1191.
- Dede, M., Ekici, C., & Tozak, H. (2015). Directional tubular surfaces. *International Journal of Algebra*, 9(12), 527-535.
- Dede, M., Ekici, C., Gorgulu, A. (2015). " Directional q-frame Along a Space curve. *IJARCSSE*, 5, 775-780.
- Do Carmo, M. (1976). *Differential Geometry of Curves and Surfaces*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Dogan, F., & Yaylı, Y. (2011). On the curvatures of tubular surface with Bishop frame. *Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series A1 Mathematics and Statistics*, 60(1), 59-69.
- Dogan, F., & Yaylı, Y. (2012). Tubes with Darboux frame. *Int. J. Contemp. Math. Sci*, 7(16), 751-758.
- Dogan, F. (2012). Genelleştirilmiş Kanal Yüzeyleri. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Duldul, M. (2020). Two and three dimensional regions from homothetic motions. *Appl. Math. ENotes* 10, 86–93.
- Gok, I. (2017). Quaternionic Approach of Canal Surfaces Constructed by Some New Ideas. *Advanced in Applied Clifford Algebras*; 27(2); 1175-1190.

- Gray, A., Abbena, E., Salamon, S. (2017). Modern differential geometry of curves and surfaces with Mathematica. CRC press.
- Hacısalıhoğlu, H.H. (1994). Differential Geometry; Academic Press Inc.: Ankara, Turkey.
- Hacısalıhoğlu, H. H., (1983). Hareket Geometrisi ve Kuaterniyonlar Teorisi, Gazi Üniversitesi Yayınları.
- Kazan, A., & Karadağ, H. B. (2019). Embankment Surfaces in Euclidean 3-space and their visualizations. Communications in Mathematics and Applications, 10(3), 617.
- Kazan, A., Altın, M., & Yoon, D. W. (2021). Geometric Characterizations of Canal Hypersurfaces in Euclidean Spaces. arXiv preprint arXiv:2111.04448.
- Koyuncu, F. (2020). Yönlendirilmiş Tüp Yüzeyler. Yüksek Lisans Tezi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Kilis.
- Maekawa, T., Patrikalakis, N. M., Sakkalis, T., & Yu, G. (1998). Analysis and applications of pipe surfaces. Computer Aided Geometric Design, 15(5), 437-458.
- Ozdemir, M. (2020). Kuaterniyon ve Geometri, Altın Nokta Yayınları.
- Sabuncuoğlu, A. (2010) Differential Geometry; Nobel Yayın Dağıtım: Ankara, Turkey.
- Xu, Z., Feng, R., & Sun, J. G. (2006). Analytic and algebraic properties of canal surfaces. Journal of Computational and Applied Mathematics, 195(1-2), 220-228.

Termal Olarak Aktive Edilmiş Karbonat İçerikli Kil Tipi Bor Üretim Atığından Su Liçiyle Lityum Kazanımı

Merve ALADAĞ¹ , Mehmet ERDEM^{2*} 

Öz

Lityum iyon pillerin üretimi ve cam, seramik, ilaç ve nükleer endüstrilerdeki yaygın kullanımı nedeniyle lityuma olan talep her geçen gün artmaktadır. Özellikle elektrikli araç ve mobil cihazların üretimiyle birlikte lityum ihtiyacının 2025 yılına kadar iki kattan fazla artacağı tahmin edilmektedir. Artan talebi karşılamak için mevcut kaynakların yetersiz olması, alternatif ikincil kaynak arayışını zorunlu kılmaktadır. Karbonat içeren kil tipi bor yatakları ve %0.65'e kadar lityum (Li₂O) içeren bor üretim atıkları lityum üretimi için potansiyel bir kaynaktır. Bu çalışmada, doğrudan termal olarak aktive edilen bor üretim atıklarından lityumun liç koşulları araştırılmıştır. Bu amaçla; atık 600-800°C arasında değişen farklı sıcaklıklarda ve sürelerde termal olarak aktive edilmiş, elde edilen ürünlerin mineralojik ve morfolojik özellikleri belirlendikten sonra aktive ürünlerden lityumun su ile liçi incelenmiştir. Atık içerisindeki dolomit, kalsit, montmorillonit ve tobermoritin 650°C'den itibaren monticellit (CaMgSiO₄) dönüşmeye başladığı ve 700°C'nin üzerinde kil yapısının bozulduğu ve tüm dönüşümlerin tamamlandığı belirlenmiştir. 750 ve 800°C'de aktive edilen örneklerde yüzeysel erimelerle partikül yüzeylerinde kapanmaların ve partikül çaplarının büyüdüğü tespit edilmiştir. En yüksek liç verimi (%85) optimize edilen şartlar altında (sıvı/katı oranı:20, sıcaklık:50°C, temas süresi:30 dk) partikül yüzeyinin daha gözenekli ve pürüzlü olduğu ve mineralojik dönüşümlerin önemli oranda tamamlandığı 700°C'de 120 dk süreyle aktive edilen örnekten elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lityum, Termal aktivasyon, Liç, Bor atığı.

Lithium Recovery from Thermally Activated Carbonate-hosted Clay-type Boron Production Waste with Water Leaching

Abstract

The demand for lithium is increasing due to the production of lithium-ion batteries and its widespread use in the glass, ceramics, pharmaceutical and nuclear industries. It is estimated that the need for lithium will more than double by 2025, especially with the production of electric vehicles and mobile devices. Insufficient available resources to meet the increasing demand necessitates the search for alternative secondary resources. Carbonate-hosted clay-type boron deposits and boron production wastes containing up to 0.65% lithium (Li₂O) are potential source to meet the lithium demand. In this study, the leaching conditions of lithium from boron production waste activated thermally were investigated. For this purpose, firstly, the waste was thermally activated at different temperatures ranging from 600-800°C, and the mineralogical and morphological properties of the obtained products were determined. Then, the dissolution of lithium from each activated sample by water leaching was examined. It was determined that dolomite, calcite, montmorillonite, and tobermorite in the waste started to transform into monticellite (CaMgSiO₄) from 650°C, and above 700°C the clay structure was degraded and all thermo-chemical transformations were completed. It was observed that melting occurred on the outer surfaces of the particles and accordingly, the pores closed and the particle diameters increased at 750 and 800°C. The highest leaching efficiency (85%) was obtained under the optimized conditions (liquid/solid:20, temperature: 50°C, contact time: 30 min) from the sample activated at 700°C for 120 min where the particle surface was more porous and rougher and the mineralogical transformations were significantly completed.

Keywords: Lithium, Thermal activation, Leaching, Boron waste.

¹Firat Üniversitesi, Keban Meslek Yüksekokulu, Çevre Koruma ve Kontrol Programı, Elazığ, Türkiye, marin@firat.edu.tr

^{2*}Hacettepe Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye, merdem@hacettepe.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Lityum iyon pillerin eşsiz üstünlükleri lityumu yeni pil teknolojilerinin önemli hammaddesi haline getirmiştir. Özellikle elektrikli araç ve mobil cihazların yaygın üretimiyle birlikte lityuma olan ihtiyacın 2025 yılına kadar iki kattan fazla artacağı tahmin edilmektedir (Li ve ark., 2019; X. Zhang ve ark., 2020).

1980'li yıllara kadar gerekli lityum mineral bazlı kaynaklardan üretilirken, artan ihtiyaç ve mevcut kaynakların tükenmesiyle birlikte, lityum üretiminde salamuralar kullanılmaya başlanmıştır (Kavanagh ve ark., 2018). Ancak lityum içeriği açısından ekonomik değeri olan konsantre salamuralar da çok sınırlı olup, daha çok "Lityum Üçgeni" olarak adlandırılan Arjantin, Bolivya ve Şili'nin de aralarında bulunduğu Güney Amerika'da yer almaktadır (Kesler ve ark., 2012; Li ve ark., 2019). Yaygın kullanımına rağmen hammadde kaynaklarının dünya genelindeki bu dengesiz dağılımı, birçok ülkenin lityum tedarikinde zorluk yaşamasına neden olmaktadır (Cabeza ve ark., 2015; Rosales ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2019). Bu durum lityum ihtiyacının karşılanmasında mevcut cevher kaynaklarının yanı sıra diğer kaynakların da (killer, atık lityum iyon piller, deniz suyu gibi) etkin bir şekilde değerlendirilmesini zorunlu hale getirmiştir (Celep ve ark., 2022). ABD jeolojik araştırmalar raporunda 2023 yılında küresel lityum rezervlerinin yaklaşık 26 milyon ton olduğu, lityum tüketimindeki yıllık ortalama artışın ise %41 olduğu bildirilmiştir. Tüketimdeki bu artışın aynı şekilde devam etmesi halinde, küresel lityum tüketiminin 2030 yılında 2 milyon tonu, 2045 yılında ise 362 milyon tonu aşması beklenmektedir. Lityum iyon piller için genişleyen pazar ve bunun sonucunda hızla artan talep karşısında mevcut rezervlerin yetersiz kalacağı ve kısa sürede tükeneceği de ifade edilmektedir (Bae & Kim, 2021). Lityum kaynaklarının yetersizliği, ürünlerin özelliklerinden ödün vermeden ikame maddelerin bulunması, böylece yüksek lityum talebinden kaynaklanan baskının hafifletilmesi ve dünya çapında lityum kaynaklarının rezerve edilmesi küresel boyutta bir stratejik öncelik haline gelmiştir (Guo ve ark., 2021). Artan ihtiyaçlar, hammadde kaynaklarının dengesiz dağılımı ve aşırı fiyat artışları nedeniyle spodümen, lepidolit, zinnwaldit gibi mineral kaynakların, eskiden ekonomik olmayan diğer bazı kil içerikli minerallerin, lityum içerikli ikincil atıkların ve deniz suyunun da ekonomik hale geldiği görülmektedir (Anik Hasan ve ark., 2023; Bertau ve ark., 2017; Flexer ve ark., 2018; Li ve ark., 2019; Swain, 2017).

Doğadaki bolluklarından dolayı lityum içeren kil esaslı kaynaklar lityum eldesinde öncelikli ilgi görmüştür (Wen ve ark., 2020; Zhu ve ark., 2021). Kil tipi cevherlerden lityumun kavurma/kalsinasyon yöntemleri ile ekstraksiyonu için çok sayıda araştırmanın yapıldığı ve bazı başarılı proseslerin geliştirildiği görülmektedir. Yöntemde; konsantre cevher, yapı içerisine hapsolmuş minör bileşen lityumun serbest bırakılması ve çözünür forma dönüştürülmesi için önce bazı katkı maddeleri ile birlikte yüksek sıcaklıklarda kavrulmakta, daha sonra lityum uygun bir liç

reaktifi ile ekstrakte edilebilmektedir (Abouzeid, 2008; Hariharan vd., 2014; Meshram vd., 2014). Ancak, lityumun serbestleştirilmesinde yapıdaki mineral fazların oldukça önemli olduğu ve her biri için ayrı araştırıldığı görülmektedir. Örneğin, Obut vd. tarafından boraks kilinden lityum eldesi için killi yapıya H_2SO_4 kavurma işlemi uygulanmıştır. Çalışmada kil- H_2SO_4 karışımı $750^\circ C$ 'de kavurulmuş ve daha sonra su liçi ile %86 lityum içeren bir liç çözeltisi elde edilmiştir (Obut ve ark., 2022). Killi yapının bozunarak lityumu çözünürleştirmek amacıyla sülfatlayıcı kavurma Gu vd. ve Zhu vd. tarafından da denenmiştir. Çalışmalarda seyreltik sülfürik asit ve ferrik sülfat çözeltisi ile $500-800^\circ C$ arasında kavru lan numunelerden lityumun %73 oranında su ile ekstrakte edilebildiği rapor edilmiştir (Gu ve ark., 2020; Zhu ve ark., 2021). Crocker vd. %0.3-0.6 Li içeren montmorilloniti $KCl-CaSO_4$ ve $CaCO_3-CaSO_4$ ile karıştırıp $1000^\circ C$ 'de kavurarak elde ettikleri ürünlerden lityumu sırasıyla %81 ve %90 oranında çözebilmişlerdir. Ayrıca, $900^\circ C$ 'de kireçtaşı ve alçıtaşı karışımıyla kavurulmuş ürün içindeki lityumun, çözünür Li_2SO_4 'e dönüştürülmesiyle de geri kazanılabileceği gösterilmiştir (Crocker & Lien, 1987). Killi yapılardan kavurma ve su liçi ile ilgili yapılan bazı diğer çalışmalarda da lityumun; β -spodümenine $CaCl_2$ ilavesiyle $900^\circ C$ 'de 2 saat kavrulmasıyla elde edilen ürünün $60^\circ C$ 'de 1 saat liçiyle %90'ının (Barbosa ve ark., 2015), α -Spodümenin $CaCl_2$ ilavesiyle $1000^\circ C$ 'de 1 saat kalsine edilmesiyle %85'inin (Fosu ve ark., 2022), β -Spodümen- Na_2CO_3 karışımının $400^\circ C$ 'de 10 saat süreyle kalsine edilen ürünün $60^\circ C$ 'de liçiyle %86'sının (Grasso ve ark., 2022), lepidolit- $FeSO_4$ karışımının $850^\circ C$ 'de kavrulmasıyla elde edilen üründen %93'ünün ve lepidolit- K_2SO_4 karışımının $900^\circ C$ 'de 2 saat boyunca kavrulmasıyla elde edilen kalsine üründen $90^\circ C$ 'de 3 saatlik liç ile %93'ünün çözelti fazına alınabildiği rapor edilmiştir (Luong ve ark., 2014).

Ülkemiz açısından önemli alternatif lityum kaynaklarından biri; kayda değer miktarda lityum içeren karbonat içerikli ve kil bazlı bor üretim atıklarıdır. Bor üretim atıkları halihazırda binlerce ton varlığı, üretime bağlı olarak her gün önemli miktarlarda açığa çıkması ve lityum içeriği ile dikkat çeken önemli bir atıktır. Bu önemle atıklardan lityumun kavurma-liç işlemiyle geri kazanılması amacıyla da bazı çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla, Ertan tarafından yapılan bir çalışmada; atık $CaCl_2$ ve $NaCl$ ile 1/0.3/0.2 oranında karıştırılmış ve $950^\circ C$ 'de 1 saat süreyle kavrulmuş kil yapısı bozulmuştur. Örneğin $85^\circ C$ 'de su liçi ile lityumun %85'in üzerinde çözeltiye alındığı rapor edilmiştir (Ertan, 2020). $CaCl_2$ ve $NaCl$ karışımı ile benzer bir araştırma da Şensöz ve Sayın tarafından yapılmıştır. Hazırlanan atık ve tuz karışımının (atık/0.6 $NaCl$ +0.4 $CaCl_2$) $900^\circ C$ 'de 1 saat kavrulup, 0.4 M H_2SO_4 çözeltisi ile 1 saat liç edilmesiyle lityumun % 89.61 oranında ekstrakte edilebildiği bildirilmiştir (Şensöz & Sayın, 2023). Obut vd. tarafından da atıktan sülfürik asit kavurma-su liçiyle lityum çözünürlüğü incelenmiştir. Çalışmada; atık, asit/atık oranı 180 olacak şekilde sülfürik asit ile karıştırılmış, $750^\circ C$ 'de 1 saat kavurulmuş ve elde edilen örnek su liçine tabi tutularak %85.7 lityum liç verimi elde edilebilmiştir (Obut ve ark., 2022). Yine aynı atık- $CaCO_3-CaSO_4$ karışımının $1100^\circ C$ 'de 2 saat süreyle kavrulmasıyla lityum %87 oranında ekstrakte edebilmiştir (Lee ve ark., 2016). Tüm bu

çalışmalardan görüldüğü gibi, asıl amaç; killi yapı içerisinde hapsolmuş minör bileşen lityumu mineralojik yapıyı termo-kimyasal olarak bozarak lityumu serbestleştirmek/çözünür forma getirmek ve kolay liç olmasını sağlamaktır. Bu amaçla da H_2SO_4 , $CaCO_3$, $CaSO_4$, $CaCl_2$, $NaCl$, Na_2CO_3 gibi çeşitli katkı maddelerin de kullanılabilmesi gösterilmiştir. Ancak bor atığı, kilin yapısını bozabilecek önemli miktarda dolomit ve kalsitten oluşan karbonatları da içermektedir. Bu özellik, ilave kimyasallara gerek olmadan atığın doğrudan termal aktivasyonu ile kil yapısının bozulabileceğini göstermektedir. Termal aktivasyonla önce yapıdaki karbonatlar ayrışacak, oluşan CaO/MgO kil ile reaksiyona girerek kil yapısını bozacak ve sonunda lityum serbestleşecek ve suda çözünür özelliği nedeniyle de suya geçecektir. Ayrıca karbonatların termal ayrışması sonucunda oluşan karbondioksit yapıdan uzaklaşacak ve katı bakiye termal aktivasyon ürünüdeki lityum konsantrasyonu kütledeki azalma nedeniyle ham atığa göre artacaktır. Bu sayede, termal aktivasyon için ilave kimyasala gerek olmadan ve birim atık kütlesi başına daha az enerji harcanarak daha yüksek lityum içerikli bir termal ürün elde edilmiş olacaktır. Şu ana kadar bor atıklarına lityum ekstraksiyonu için doğrudan termal aktivasyon uygulandığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu bilgiler ışığında yapılan bu çalışmada, ana bileşen olarak karbonatlar ve kil içeren bor atığının doğrudan termal aktivasyonu ve termal ürünlerden lityumun çözünürlüğü araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Bor Üretim Atığının Temini ve Hazırlanması

Çalışmada kullanılan atık, tinal cevherinden bor üretiminin yapıldığı Eskişehir Kırka Eti Bor tesislerinden temin edilmiştir. Bor ekstrakte edildikten sonra ekstraksiyon artığı olarak açığa çıkan ve atık depolama sahasında geniş bir alana depolanmış olan daha çok karbonat içerikli ve kil esaslı atığın sahayı temsil edebilecek şekilde alınabilmesi için önce depolama alanında otuz adet farklı örnekleme noktası tespit edildi. Daha sonra her bir örnekleme noktasından farklı derinliklerden eşit miktarlarda örnekler alındı. Toplanan örnekler temiz betondan yapılı düz bir alana dökülerek iyice karıştırılarak homojene edildi ve dörtleme yöntemiyle yaklaşık 150 kg temsili örnek alındı. Laboratuvarda önce oda sıcaklığında 15 gün süreyle ara ara karıştırılarak kurutuldu. Kurutulan örnekler bir bıçaklı öğütücüde (Spice Herb Grinder-IC-25B) öğütüldü ve bir etüvde $105^{\circ}C$ 'de 8 saat kurutuldu. Kuru örnekler elenerek -100 mesh tane boyutundaki fraksiyonu hazırlandı ve ağzı kapaklı pet kaplarda muhafaza edilerek deneylerde kullanıldı.

2.2. Termal Aktivasyon İşlemleri

Atığın termal aktivasyonu Nüve marka MF120 model kül fırınında, 600, 650, 700, 750 ve 800°C sıcaklıklarında ve 120, 180, 210 ve 240 dk farklı sürelerde gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 105°C’de kurutulmuş belirli miktardaki atık bir porselen krozeğe koyulmuş ve belirlenen aktivasyon sıcaklığında ve farklı sürelerde kavrulmuştur. Her işlem sonunda soğutulan örnekler tartılarak önce ağırlık değişimleri belirlenmiş ve bir öğütücüde oluşan topakların dağıtılması için öğütülmüştür. Kimyasal, mineralojik ve morfolojik olarak karakterize edilen her bir örnek ayrı ayrı liç işlemine tabi tutulmuş ve lityum liçi üzerine termal aktivasyon sıcaklığı ve süresinin etkisi incelenmiştir.

2.1. Liç Deneyleleri

Liç deneyleleri; çalkalamalı, erlen tutuculu ve sıcaklık kontrolü yapılabilen su banyosu (GFL-1083) içerisine yerleştirilmiş 250 ml hacmindeki kesikli reaktörlerde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada sıvı/katı oranı 20 olacak şekilde sabit tutularak lityum liç verimi üzerine temas süresi (15-180 dk arası) ve liç sıcaklığının (25, 50 ve 75°C) etkileri incelenmiştir. Bu amaçla; öncelikle arzu edilen sıvı/katı oranını sağlayacak miktardaki örnek alınarak 100 ml saf su içeren 250 ml’lik erlenlere ilave edilmiş, karışımlar farklı temas süreleri ve sıcaklıklarda ayrı ayrı çalkalanmıştır. Her bir liç işlemi sonunda karışımlar mavi bant filtre kağıdından süzölmüş ve süzöntülerde lityumla birlikte atıktan çözeltiliye geçen kalsiyum ve magnezyum analizleri yapılmıştır.

2.3. Analiz ve Ölçümler

Atık içermiş olduğu bileşenlerin belirlenmesi ve bu bileşenlerin hangi kristal yapıda olduğunun ortaya koyulması için kimyasal ve mineralojik analizlere tabi tutulmuştur. Kimyasal analizler için örnekler hem yaş yöntemle, hem de akredite olan Kanada’da bulunan ACME Analitik Laboratuvar Hizmetleri Ltd. Şti.’ye yaptırılmıştır. Yaş yöntem analiz için; 0.1 g örnek geliştirilen metoda göre 12 ml %65 HNO₃ + %35 HCl asitleri çözeltilisi 65 ml hacimli teflon (PTFE) çözümlerleştirme reaktörlerine koyulmuş ve reaktör CEM marka (Mark Xpres model) mikrodalga çözümlerleştirme cihazında %85 oranındaki güçle 180°C’ye ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 30 dk bekletilerek eritiş tamamlanmıştır. İşlem sonunda teflon reaktöre 2 ml HF eklenip ardından asit çözeltilisi karışımı ile son hacim 50 ml’ye tamamlanmıştır. Analizler dört paralel örnekle yürütölmüş ve elde edilen sonuçların ortalaması alınarak kimyasal bileşimler belirlenmiştir. Her bir örnek Perkin Elmer AAnalyst800 model atomik absorpsiyon spektrofotometresi kullanılarak elementel olarak analiz edilmiştir. Kimyasal bileşimler ayrıca Philips PW-2404 model dalga boyu dağılım X-Işını Floresans Spektrofotometre (XRF) cihazı

ile, mineralojik analizler ise Shimadzu XRD-6000 model X-Işını Difraktometresi (XRD) ile belirlenmiştir. Atığa uygulanacak termal aktivasyon şartlarını belirlemek ve termal aktivasyonlardaki değişimleri yorumlamak amacıyla atığa termogravimetrik (TG/DSC, TA Instruments SDT Q600 Simultane DSC) analiz uygulanmış atığın termal davranışı da incelenmiştir. Atık, termal aktivasyon ürünleri ve liç işlemler sonrası kalan katı bakiyelerin morfolojik özelliklerindeki değişimler SEM-EDX (Zeiss EVO MA10) analizleriyle, partikül boyutlarındaki değişimler ise mastersizer (MALVERN Nano ZS90) ile incelenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

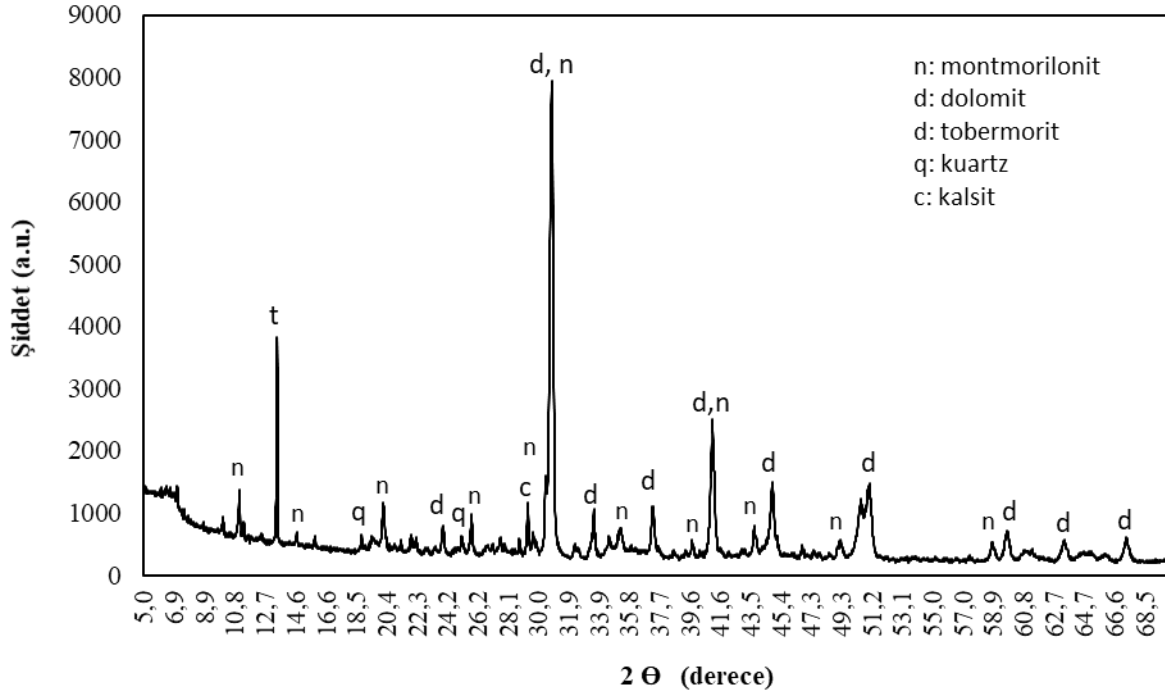
3.1. Atığın Özellikleri

Tablo 1 ve Şekil 1 sırasıyla çalışmada kullanılan bor üretim atığının kimyasal bileşimi ve mineralojik yapısına ait XRD desenini göstermektedir. Tablo 1'den görüldüğü gibi atık ana bileşen olarak kalsiyum, magnezyum, bor ve sodyumla birlikte minor bileşen olarak ekonomik değere sahip 1720 mg/kg oranında lityum içermektedir. XRF analiziyle de atığın % 11.2 B₂O₃, % 34.2 CaO, % 20.3 MgO, % 22.3 SiO₂, % 8.42 Na₂O, % 1.34 K₂O, % 1.96 Al₂O₃ ve % 0.23 Fe₂O₃ içerdiği belirlenmiştir.

Tablo 1. Bor atığının kimyasal bileşimi

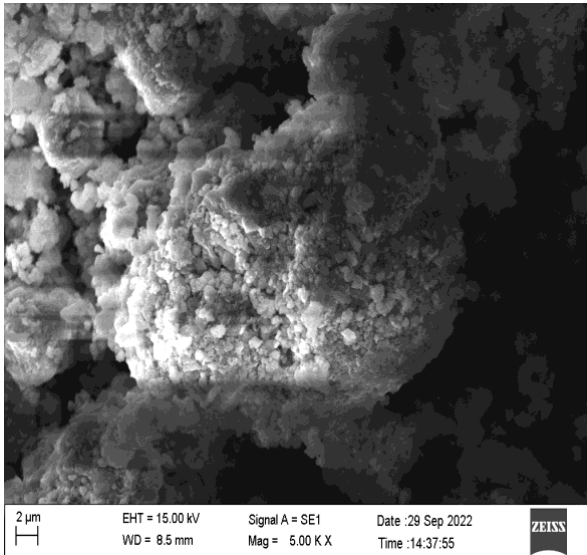
Ca	Mg	B	Na	Al	K	Fe	P	S	Li
%	%	%	%	%	%	%	%	%	mg/kg
11.86	8.70	3.49	3.092	0.42	0.37	0.16	0.002	0.12	1720

XRD analizi atığın başlıca dolomit, kalsit, montmorillonit, tobermorit ve kuvars minerallerini içerdiğini göstermektedir (Şekil 1). Dolomit ve montmorillonite ait olan 7500'in üzerindeki pik şiddeti bu iki kristalin yapıdaki ana bileşenler olduğunun önemli bir göstergesidir. Mineral fazdaki yoğunluk ve buna bağlı pik şiddetindeki yüksekliğin, yapıdaki bazı kristal yapıları minör bileşenlerin gürültü içerisinde baskılanmasına ve bu nedenle mineralojik tanımlanamamasına neden olduğu söylenebilir. Stishovite ve kuvars kristal yapıları atıkta silisli yapının varlığına işaret ederken, tobermorit ise montmorillonit/smektit grubu kil minerallerinin varlığını doğrulamaktadır (Şekil 1).

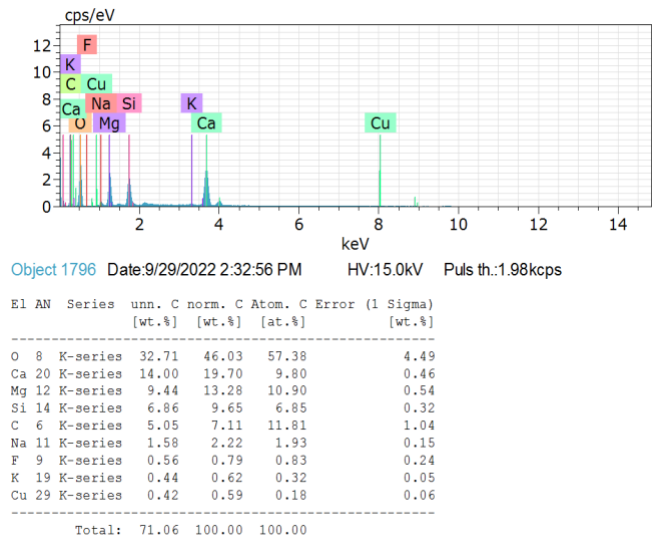


Şekil 1. Bor üretim atığının XRD deseni

SEM-EDX analizleri ile atığın morfolojik ve yüzeysel elementel bileşimi de incelenmiştir (Şekil 2 ve 3). SEM görüntüsü atığın pürüzlü bir yüzeye ve küresel tanecikli yapıya sahip olduğunu gösterirken, EDX analizleri atığın yüksek miktarda Ca, Mg, Si, O, C, K ve Na içerdiğini göstermektedir.



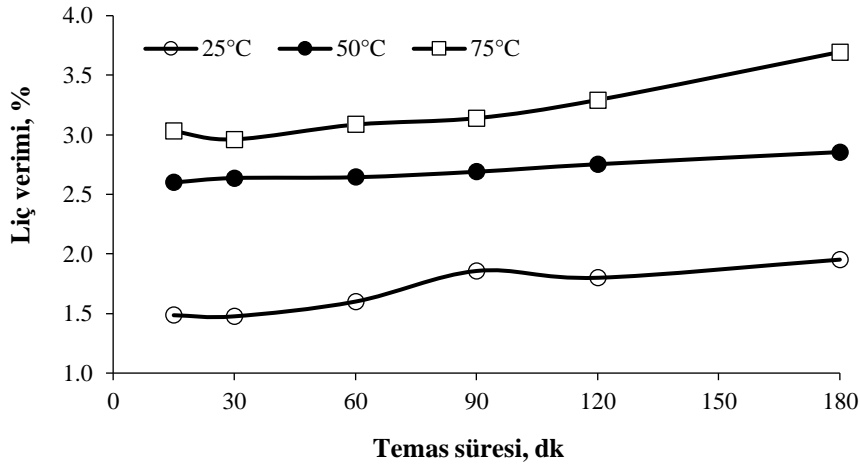
Şekil 2. Bor üretim atığının SEM görüntüsü



Şekil 3. Bor üretim atığının EDX analiz sonucu

3.1. Bor Atığından Lityum Liçi

Bor atığından lityumun atmosferik koşullar altında doğrudan su liçi ile ekonomik olarak ekstrakte edilip edilemeyeceğini belirlemek amacıyla, 25, 50 ve 75°C sıcaklıklarında temas süresine bağlı olarak liç deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4'te verilmiştir. Kil yapısında hapsolmuş lityumun atıktan liç veriminin oldukça düşük olduğu, artan temas süresi ve liç sıcaklıklarının dahi liç verimini değiştiremediği tespit edilmiştir. 180 dk temas süresi ve 75°C sıcaklığa rağmen atıktaki lityumun yalnızca %3.7 gibi çok düşük bir kesri çözünebilmiştir. Killi ve kireçli yapı içerisinde minör bir bileşen olarak bulunan lityumun, özellikle kil tarafından sarmalanmış olması serbestleşmesinde önemli bir direnç oluşturduğu ve liç olmasına engel olduğu söylenebilir. Bu durum atıktan lityumun kazanılabilmesi için kil yapısının bozulmasının gerekli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Bor üretim atığından lityum liçinin sıcaklık ve temas süresine bağlı değişimi

3.2. Termal Aktivasyon ve Aktivasyon Ürünlerinden Lityum Liçi

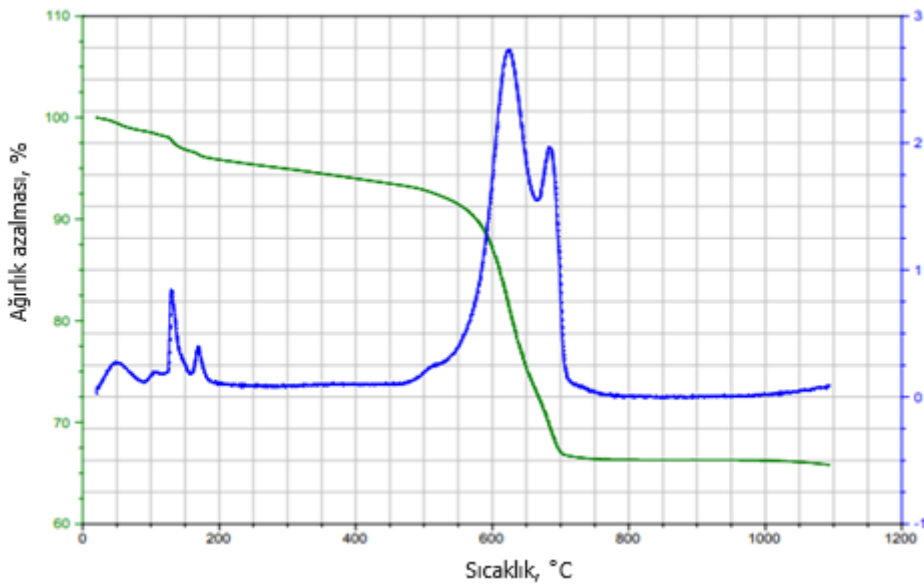
3.2.1. Termal aktivasyon

Liç proseslerinde değerli bileşenin yüksek oranda çözünürlüğünün sağlandığı en uygun teknik ve ekonomik şartların belirlenmesi son derece önemlidir. Özellikle proses maliyetini belirleyen çözücü türü ve derişimi, sıcaklık ve temas süresi gibi işletme parametrelerinin çevresel açıdan da uygun olması arzu edilir. Bu nedenle atmosferik şartlarda su liçiyle değerli bileşenlerin kazanımı hem ekonomik ve hem de çevresel açıdan en uygun yöntem olarak kabul edilir. Ancak yapılan denemelerde, atığın kilimsi yapısı nedeniyle lityumun serbestleşemediği ve bu nedenle atıktan

doğrudan su liçiyile lityum çözünürlüğünün çok düşük kaldığı tespit edilmiştir. Oysa atığın mineralojik bileşiminde kille birlikte karbonatlı bileşenlerin bulunması, kil yapısının uygun sıcaklıkta yürütülecek termal bir aktivasyonla bozulabileceğini göstermektedir. Bu durumu incelemek amacıyla atığa TGA/DSC analizi uygulanmış ve atığın termal davranışına bağlı olarak aktivasyon koşulları hakkında ön bilgiler elde edilmiştir.

Şekil 5 atığa ait TGA ve DSC eğrilerini göstermektedir. Sıcaklık artışına bağlı olarak 25-200°C ve 550-700°C sıcaklık aralıklarında önemli ağırlık kayıplarının olduğu görülmektedir. 200°C'ye kadar meydana gelen yaklaşık %4'lük ağırlık kaybının, yapıdaki nemin ve bağlı suyun uzaklaşmasından kaynaklandığı söylenebilir. 550-700°C sıcaklık aralığında ise yaklaşık %24 oranında önemli ağırlık kaybının varlığı görülmektedir. Bu sıcaklıklar yapıdaki karbonatların parçalandığını gösterir (Duminuco ve ark., 1998). Atığın bileşimi dikkate alındığında meydana gelen yaklaşık %24'lük ağırlık kaybının, termal ayrışma yoluyla yapıdan ayrılan karbondioksitin kütlesine de karşılık geldiği hesaplanabilir. 700°C'nin üzerinde ise kütlenin sabit kaldığı ve ağırlık kayıplarının olmadığı görülmektedir. Bu durum mevcut sıcaklık aralığında dolomit ve kalsitin termal olarak ayrıştığını ve 700°C'de termal dönüşümlerin tamamlandığını ifade etmektedir.

Şekil 5'teki DSC eğrisi, düşük sıcaklıklarda dehidroksilasyonun ve yüksek sıcaklıklarda kalsinasyonun endotermik reaksiyonlarının olduğunu ve yüksek sıcaklıktaki fazların kristalleşmesi nedeniyle yaklaşık 700°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çeşitli ekzotermik reaksiyonların meydana geldiğini göstermektedir. 625°C'de gözlenen yüksek yoğunluklu ekzotermal pikin ve 665°C'de gözlenen endotermal pikin ana dolomit ve kalsit fazlarının ayrışması ve baskın montisellit (CaMgSiO₄) kristal yapılı fazların oluşumu ile ilişkilidir.



Şekil 5. Bor üretim atığının TGA ve DSC eğrileri

Termal aktivasyon işlemleri yüksek enerji gerektiren maliyetli proseslerdir. Maliyet açısından termal aktivasyonun tamamlandığı süreyi optimize etmek çok önemlidir. Bu nedenle çalışmada atıklara her sıcaklık için farklı zamanlarda termal aktivasyon işlemi uygulanmış, kütle ve liç veriminde herhangi bir değişimin olmadığı zaman aktivasyonun tamamlandığı an olarak kabul edilmiştir. Yapılan çalışmalarda 120 dakikadan daha uzun süre aktive edilen ürünlerden çözünmüş lityum miktarının değişmediği belirlenmiştir. Bu nedenle lityum çözünürlüğünde 120 dk termal aktivasyona tabi tutulmuş örneklerle deneyler yapılmıştır. Farklı sıcaklık ve sürelerde aktive edilen numunelerdeki ağırlık kayıpları ve 120 dk süreyle aktive edilen örneklerin lityum içerikleri Tablo 2'de verilmiştir. Termal aktivasyonda sıcaklık artışına bağlı olarak %32.7'ye varan oranlarda ağırlık azalmaları meydana gelmiştir. Ağırlık azalmalarının 700°C'den hemen hemen değişmemesi yine termal dönüşümlerin tamamlandığını göstermektedir. Bu değişimler atığın termal bozunma eğrisindeki (TGA) 700°C'den sonra değişmeyen kütsel azalmalarla da uyumludur (Şekil 5).

Tablo 2. Termal aktivasyondaki ağırlık azalmaları ve lityum içerikleri

Temas süresi, dk	Ağırlık kaybı, %				
	600°C	650°C	700°C	750°C	800°C
120	20.82	27.65	31.68	32.16	32.27
180	22.58	27.96	31.85	32.2	32.44
210	22.71	28.19	32.70	32.29	32.45
240	22.79	28.42	32.70	32.44	32.62
Li içeriği, mg/kg	2096	2217	2303	2318	2342

Termal aktivasyon ile yapının nasıl değiştiğini belirlemek amacıyla her aktivasyon ürünü XRD analizine tabi tutularak mineral fazındaki değişimler incelenmiştir. Şekil 6 her bir termal ürünün ve ham atığın XRD kırınım desenini göstermektedir. Örneklerin XRD kırınım desenleri, ham atıkta baskın olan dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), kalsit (CaCO_3), montmorillonit ve kuvars (SiO_2) kristal yapılarının 600°C'ye kadar pek değişmediğini, fakat yükselen sıcaklıkla birlikte Eşitlik 1'e göre ayrışıp azalmaya başladığını göstermektedir.

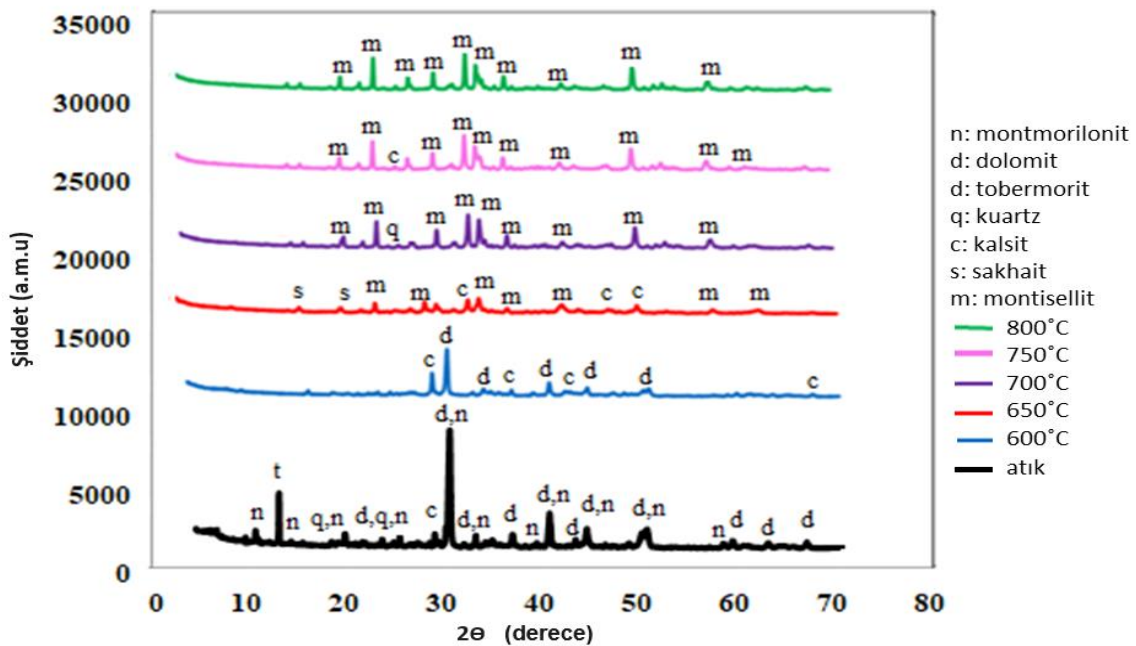


650°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, termal aktivasyonun etkisiyle karbonatlar ayrışmaya başlar ve sonunda oksitlerine dönüşürken açığa çıkan CO_2 yapıdan uzaklaşır. Bu işlemin 700°C'de çok etkili olduğu görülmektedir (Şekil 6). Sıcaklık arttıkça alkali oksitler asidik bileşenlerle reaksiyona girmekte ve sonunda kil yapısı yok olmaktadır. Bu durum XRD desenlerinden mevcut fazların 650°C'den itibaren olivin grubu Ca-Mg silikat bileşiği olan montisellit (CaMgSiO_4)

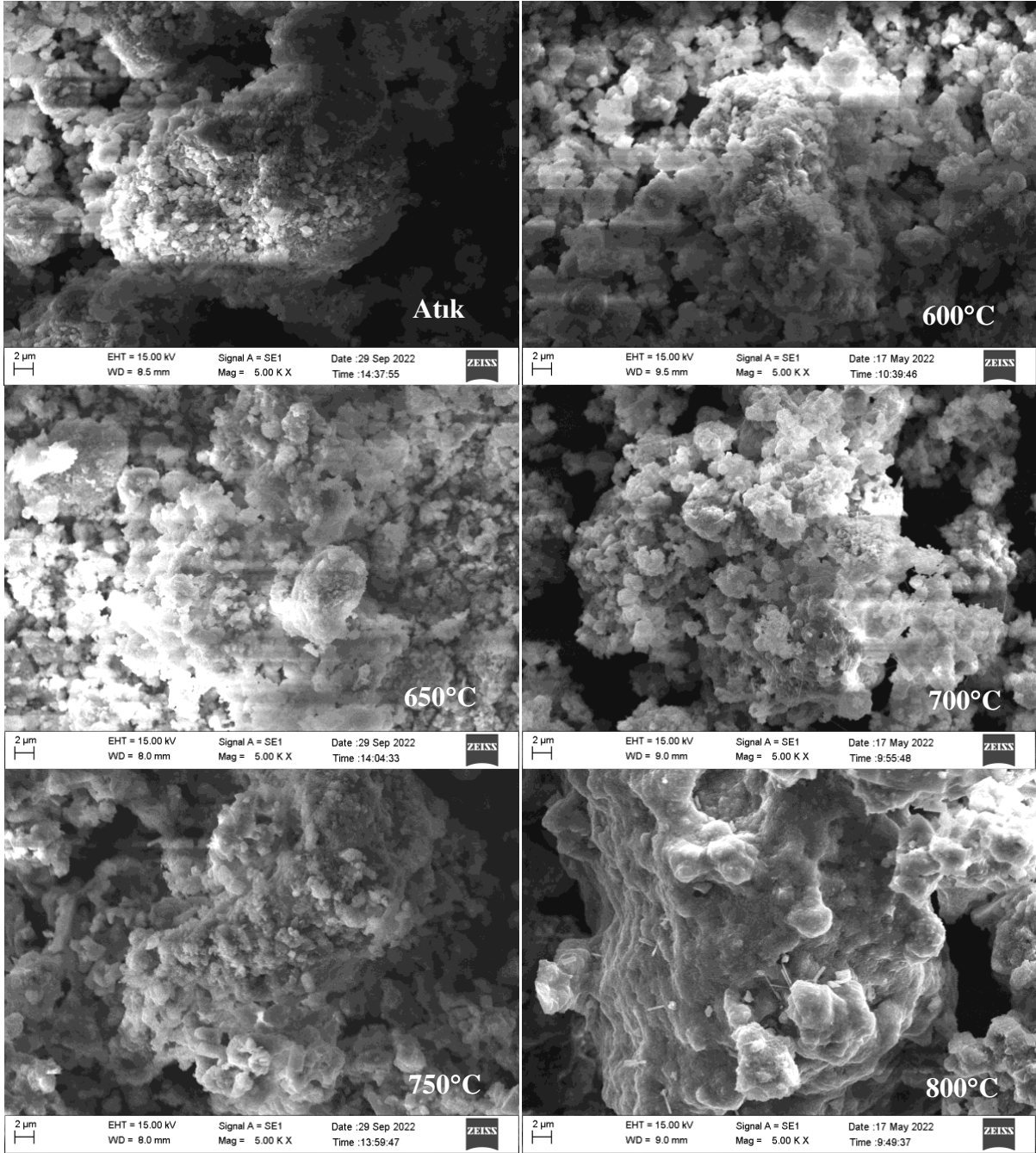
minerallerine dönüşmeye başladığıyla kendini göstermektedir. Bu değişim dolomitin azalmasını da açıklamaktadır. Dolomitin 700°C'nin üzerinde tamamen kaybolmasıyla kilin de yapısal yok olduğu görülmektedir (Şekil 6). 800°C'de mineral faz olarak yalnızca montisellit mevcuttur. Montisellit, killi yapıdaki CaO ve/veya MgO'nun silika ile ısının etkisiyle reaksiyonundan oluşmuştur (Eşitlik 2). Bu oluşum alkali oksitler-kuvars ara yüzeyinde 650-700°C sıcaklık aralığında başlayıp 800°C'de tamamlanmıştır. Benzer sonuçlar aynı yaklaşımla boksit içerikli kil mineralinin 300-900°C aralığında termal aktivasyonu ile lityumun H₂SO₄ liçi ile kazanımının incelendiği bir araştırmada da rapor edilmiştir. Gu ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada kil yapısının önce dehidratasyonla bozunmaya başladığı, sıcaklık artışıyla lityum çözünürlüğünün 600°C'ye kadar hızla arttığı, ancak 700°C'nin üzerinde çözümlerin azaldığı ifade edilmiştir. Killi yapıların genellikle termal aktivasyonla yaklaşık 700°C'nin üzerinde bozunduğu ve kili oluşturan yapıların oksitlerine dönüştüğü değişik çalışmalarda da ortaya koyulmuştur (Lee ve ark., 2016; Gu ve ark., 2020; Zhu ve ark., 2021).



Uygulanan termal aktivasyona bağlı olarak elde edilen her bir termal ürünün morfolojik özellikleri SEM analizi ile de incelenmiştir. Şekil 7'de her bir örneğe ait verilen SEM görüntüleri, kalsine ürünlerin gözenekli ve pürüzlü yapısının 700°C'ye kadar pek değişmediğini, ancak 750°C'den itibaren gözeneklerin kapanmaya başladığını, 800°C'de ise yüzeysel erimelerin olduğu ve gözeneklerin önemli oranda kapandığını göstermektedir.



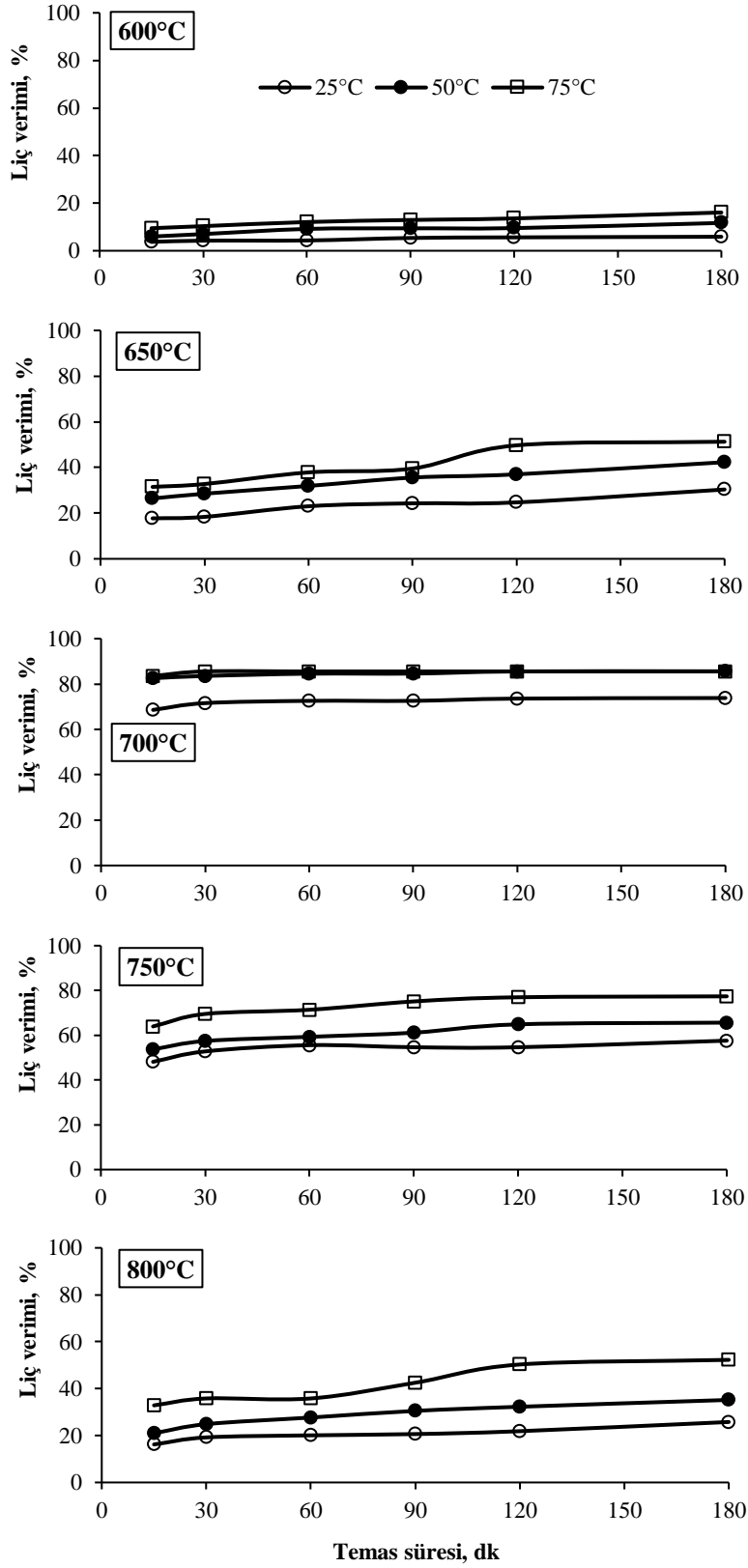
Şekil 6. Bor üretim atığı ve farklı sıcaklıklarda elde edilen termal ürünlerinin XRD deseni



Şekil 7. Bor üretim atığı ve termal aktivasyon ürünlerinin SEM görüntüleri

3.2.2. Termal aktivasyon ürünlerinden lityum liçi

600-800°C arasındaki farklı sıcaklıklarda aktive edilen örneklerden lityumun suyla liçi kesikli sistemde, sıvı/katı oranı 20 olacak şekilde sabit tutularak farklı temas sürelerinde (15-180 dk) ve liç sıcaklıklarında (25, 50 ve 75°C) ayrı ayrı incelenmiştir. Elde edilen veriler Şekil 8'de verilmiştir. Şekilden görülebileceği gibi, en düşük liç verimleri 600°C'de kalsine edilen örnekten elde edilmiştir. Örnekteki lityum en yüksek liç sıcaklığı olan 75°C ve en uzun temas süresi olan 180 dk sonunda bile en fazla %16 oranında liç olmuştur. Bu sıcaklıkta dolomit ve kalsitin varlığı, killi yapının tam



Şekil 8. Termal aktivasyon ürünlerinden lityum liçi üzerine temas süresi ve liç sıcaklığının etkisi

ayırışmadığı XRD analizleriyle tespit edilmiştir (Şekil 6). Bu durum ve elde edilen düşük liç verimleri yapıdaki lityumun serbestleşemediğini göstermektedir. Yapıdaki kalsit ve dolomitin 650°C sıcaklıkta ayırışmaya başlamasıyla birlikte liç veriminin %51'e, termal dönüşümlerin hemen hemen tamamlandığı 700°C'de ise %85'e yükseldiği görülmektedir. Benzer sonuçlar boksit içerikli killerden lityumun kazanıldığı çalışmada da rapor edilmiştir (Gu ve ark., 2020). XRD kırınım desenlerinden (Şekil 6) ve SEM görüntülerinden (Şekil 7) de görülebileceği gibi, tüm reaksiyonların 700°C'de tamamlanması ve bu sıcaklıkta partikül yüzeylerinin oldukça pürüzlü ve gözenekli bir yapıya sahip olması, lityumun 30 dk gibi daha kısa bir sürede serbest kalmasına ve çözünmesine neden olmuştur.

700°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise lityum liç verimlerinin tekrar düşmeye başladığı görülmektedir (Şekil 8). 750°C'de aktive edilen örnekten lityum liç oranı %77'ye (75°C ve 180 dk sonunda) düşerken, 800°C'de %52'ye (75°C ve 180 dk sonunda) düşmüştür. Bu durum, Şekil 7'deki SEM görüntülerinden de görüldüğü gibi, artan sıcaklığa bağlı olarak yüzeylerde meydana gelen kısmi erimelerle gözenekli yüzeylerin kapanması ve bu sayede çözünmeye maruz kalan yüzey alanının da azalmasıyla açıklanabilir. Yüzeysel erimeler yapı içerisinde yer alan lityumun tekrar hapsedilmesine neden olmuştur.

Termal aktivasyonda, karbonatların ısıl ayrışması sırasında karbondioksitin yarattığı parçacık içi basınçla yapısal parçalanma ve tane boyutunda küçülmenin meydana geldiği belirlenmiştir (Tablo 3). Ancak 750°C'den sonra tane boyutu tekrar artmaya başlamıştır. Tane boyutundaki bu artışlar, yüksek sıcaklıklarda parçacık yüzeylerinde meydana gelen erimeye bağlanabilir. Bu erimeler gözeneklerin kapanmasına, lityumun yapı içerisinde yeniden hapsedilmesine ve heterojen çözünme veriminin azalmasına neden olmuştur. Minerallerin camsı geçiş sıcaklıklarına yaklaşması sonucu çözünmeye maruz kalan yüzey alanının azalması ve tane boyutunun artması, yüksek sıcaklıklarda liç veriminin düşmesine neden olmuştur. Şekil 7'de verilen örneklerin SEM görüntüleri de bu sonucu doğrulamaktadır.

Tablo 3. Atık ve termal aktivasyon ürünlerinin partikül boyut dağılımları

Örnek	d0.10, μm	d0.50, μm	d0.90, μm
Atık	4.505	29.215	113.362
600°C	1.470	17.311	67,070
650°C	5.704	14.908	60.140
700°C	4.167	12.644	58.960
750°C	11.037	20.467	64.017
800°C	12.574	44.579	125.233

Sonuç olarak; bor üretim atığından doğrudan su liçiyile çözünürleştirilemeyen lityumun, atığın 700°C’de 120 dk süreyle doğrudan termal aktivasyonu, 50°C’de su liçiyile 30 dk sonunda %85 oranında ekstrakte edilebildiği tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürde kavurma-liç yöntemiyle aynı atıktan ve kil içerikli minerallerden lityumun ekstrakte edilmeye çalışıldığı çalışmaların sonuçlarıyla (Tablo 4) kıyaslandığında, lityum liç veriminin doğrudan termal aktivasyon su liçi çalışmalarında elde edilen %85-89.61 oranındaki liç verimleriyle hemen hemen aynı olduğu tespit edilmiştir. Tablo 4’ten de görüldüğü gibi, hemen hemen tüm kavurma işlemlerinde kil yapısını bozmak amacıyla atığa değişen oranlarda CaCl₂, CaCO₃, CaSO₄, NaCl ve H₂SO₄ gibi kimyasallar eklenmiş ve daha yüksek sıcaklıklarda kavurma işlemleri uygulanmıştır. Atığa ilave edilen kimyasallar nedeniyle de atıkta en düşük %50 oranında bir seyrelmenin meydana geldiği de görülmektedir. Bu durumda her ne kadar yüksek lityum liç verimleri elde edilse de, seyrelme etkisiyle daha düşük derişimli lityum liç çözeltileri elde edilmiş olunacaktır. Bu durum aslında lityumun

Tablo 4. Elde edilen sonuçların aynı atıkla yapılan çalışmaların sonuçlarıyla kıyaslanması

Aktivasyon reaktifi	Karışım oranı	Sıcaklık, °C	Aktivasyon süresi, dk	Liç reaktifi	Li liç verimi,	Referans
-	-	700	120	Su	%85	<i>Bu çalışma</i>
Atık+CaCl ₂ +NaCl	1/0.3/0.2	950	60	Su	%85	Ertan, 2020
Atık+NaCl+CaCl ₂	1/0.6/0.4	900	60	0.4 M H ₂ SO ₄	%89.61	Şensöz & Sayın, 2023
Atık+H ₂ SO ₄	1/180	750	60	Su	%85.7	Obut ve ark., 2022
Atık+CaCO ₃ +CaSO ₄		1100	120	Su	%87	Lee ve ark., 2016
Atık +CaCO ₃ +CaSO ₄	10/6/6	800 850 900	30	Su	%66 %62 %64	Ulusoy ve Gülmez, 2016
Atık+CaCO ₃ +CaSO ₄ +NaCl	10/4/4/4	800 850 900	30	Su	%81 %83 %82	Ulusoy ve Gülmez, 2016
Boraks kili kavurma	-	500-600		H ₂ SO ₄	%73.61	Gu ve ark., 2020
Lepidolit kavurma	-	800	14 saat	HCl	%88	Nogueira ve ark., 2014
Lepidolit+CaCl ₂	4/3	900	40	Su	%95	Liu ve ark., 2021
Lepidolit+NaCl+CaCl ₂	1/0.2/0.3	750	45	Su	%93	Zhang ve ark., 2020
Lepidolit+K ₂ SO ₄ +KOH	1/1/1.5	900	120	Su	%93	Su ve ark., 2020
Lepidolit+K ₂ SO ₄ +CaSO ₄	1/0.2/0.25	900	60	H ₂ SO ₄	%95	Zhou ve Wen, 2014
α-Spodümen+Na ₂ SO ₄	1/0.7	1000	60	Su	%94	Qui ve ark., 2022
α-Spodümen+Na ₂ CO ₃	1/2	400	60	Su	%86	Rosales ve ark., 2019
α-Spodümen+Na ₂ CO ₃	1/1	850	60	H ₂ SO ₄	%100	Lee, 2018
α-Spodümen+CaCl ₂	1/2	1000	60	Su	%85	Fosu ve ark., 2022
α-Spodümen+HF+H ₂ SO ₄	1/3/2	100	180	H ₂ SO ₄	%96	Feng ve ark., 2018

çözüldüğü kazanımında bir dezavantaj oluşturacaktır. Ayrıca, uygulanan sıcaklıkların da daha yüksek olduğu görülmektedir. Gerek yüksek enerji gerekliliği ve gerekse de ilave edilen kimyasal katkıların getireceği ek maliyetler nedeniyle mevcut prosesler direkt termal aktivasyon prosesine göre oldukça pahalı prosesler olacaktır. Bu nedenlerle karbonat içerikli ve kil yapılı bor üretim atıklarının doğrudan termal aktivasyonu ile lityumun su liçinin şu ana kadar geliştirilen proseslere göre daha avantajlı olacağı söylenebilir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Termal olarak aktifleştirilmiş bor üretim atıklarından lityumun su liçiyle kazanımının araştırıldığı bu çalışmada; yüksek karbonat içerikli ve kil esaslı bor üretim atığının 700°C’de 120 dk doğrudan termal aktivasyonu ile yapıdaki kalsit ve dolomitten oluşan karbonatların bozunarak oksitlerine dönüştüğü ve oluşan alkali oksitlerin de kille reaksiyona girerek kil yapısını bozduğu tespit edilmiştir. Aktivasyonda yapı içerisindeki bileşenlerin termokimyasal reaksiyonlarının sonucunda killi yapı içerisine hapsolmuş lityumun serbestleştiği ve 30 dk gibi kısa bir sürede su ile %85 oranında liç olduğu belirlenmiştir. Kayda değer miktarda lityum içeriğine sahip bor üretim atıklarından lityumun çözünerek geri kazanımı açısından, geliştirilen termal aktivasyon prosesi ve su liçinin; var olan proseslere göre ilave kimyasala gerek duyulmaması, daha çevre dostu bir proses olması ve daha düşük sıcaklıklarda yürütülmesi nedenleriyle daha avantajlı olduğu ortaya koyulmuştur.

Teşekkür

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından MF.19.35 protokol numaralı proje ile desteklenmiştir. Katkılarından dolayı FÜBAP’a teşekkür ederiz.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Abouzeid, A.-Z. M. (2008). Physical and thermal treatment of phosphate ores — An overview. *International Journal of Mineral Processing*, 85(4), 59–84. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2007.09.001>
- Anik Hasan, Md., Hossain, R., & Sahajwalla, V. (2023). Critical metals (Lithium and Zinc) recovery from battery waste, ores, brine, and steel dust: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 178, 976–994. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.08.069>
- Bae, H., & Kim, Y. (2021). Technologies of lithium recycling from waste lithium ion batteries: a review. *Materials Advances*, 2(10), 3234–3250. <https://doi.org/10.1039/D1MA00216C>
- Barbosa, L. I., González, J. A., & Ruiz, M. del C. (2015). Extraction of lithium from β -spodumene using chlorination roasting with calcium chloride. *Thermochimica Acta*, 605, 63–67. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2015.02.009>
- Bertau, M., Voigt, W., Schneider, A., & Martin, G. (2017). Lithium Recovery from Challenging Deposits: Zinnwaldite and Magnesium-Rich Salt Lake Brines. *ChemBioEng Reviews*, 4(6), 360–376. <https://doi.org/10.1002/cben.201700011>
- Cabeza, L. F., Gutierrez, A., Barreneche, C., Ushak, S., Fernández, Á. G., Inés Fernández, A., & Grágeda, M. (2015). Lithium in thermal energy storage: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1106–1112. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.096>
- Celep, O., Yazıcı, E. Y., & Deveci, H. (2022). Cevherlerden ve tuzlu su kaynaklarından lityum kazanımı. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 61(2), 105–120. <https://doi.org/10.30797/madencilik.1010286>
- Crocker, L. & Lien, R. H. (1987). *Lithium and its recovery from low-grade nevada clays*.
- Duminuco, P., Messiga, B., & Riccardi, M. P. (1998). Firing process of natural clays. Some microtextures and related phase compositions. *Thermochimica Acta*, 321(1–2), 185–190. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(98\)00458-4](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(98)00458-4)
- Ertan, B. (2020). Chlorination roasting process for extraction of valuable metals in boron clays. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26(7), 1267–1272. <https://doi.org/10.5505/pajes.2019.90836>
- Feng Y.L, Fu X.R, Liu Y. (2018). Study on preparation of lithium carbonate from lithium mica, *Light Metal* (4) 19–19, 23.
- Flexer, V., Baspineiro, C. F., & Galli, C. I. (2018). Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Science of The Total Environment*, 639, 1188–1204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.223>
- Fosu, A. Y., Kanari, N., Bartier, D., Vaughan, J., & Chagnes, A. (2022). Novel extraction route of lithium from α -spodumene by dry chlorination. *RSC Advances*, 12(33), 21468–21481. <https://doi.org/10.1039/D2RA03233C>
- Grasso, M. L., González, J. A., & Gennari, F. C. (2022). Lithium extraction from β -LiAlSi₂O₆ using Na₂CO₃ through thermal reaction. *Minerals Engineering*, 176, 107349. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107349>
- Gu, H., Guo, T., Wen, H., Luo, C., Cui, Y., Du, S., & Wang, N. (2020). Leaching efficiency of sulfuric acid on selective lithium leachability from bauxitic claystone. *Minerals Engineering*, 145, 106076. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106076>
- Guo, X., Zhang, J., & Tian, Q. (2021). Modeling the potential impact of future lithium recycling on lithium demand in China: A dynamic SFA approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110461. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110461>
- Hariharan, S., Werner, M., Hänchen, M., Zingaretti, D., Baciocchi, R., & Mazzotti, M. (2014). Dissolution Kinetics of Thermally Activated Serpentine for Mineralization at Flue Gas Conditions. *Energy Procedia*, 63, 5887–5891. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.622>
- Kavanagh, L., Keohane, J., Garcia Cabellos, G., Lloyd, A., & Cleary, J. (2018). Global Lithium Sources— Industrial Use and Future in the Electric Vehicle Industry: A Review. *Resources*, 7(3), 57. <https://doi.org/10.3390/resources7030057>
- Kesler, S. E., Gruber, P. W., Medina, P. A., Keoleian, G. A., Everson, M. P., & Wallington, T. J. (2012). Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore Geology Reviews*, 48, 55–69. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.05.006>

- Lee, W.-J., Yoon, S., Chon, C.-M., Heo, C.-H., Lee, G.-J., Lee, B.-H., & Murat, C. (2016). Lithium Extraction from Smectitic Clay Occurring in Lithium-bearing Boron Deposits in Turkey. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 29(4), 167–177. <https://doi.org/10.9727/jmsk.2016.29.4.167>
- Lee, S. (2018). Extraction of lithium from spodumene by alkali fusion (Doctoral dissertation, Department of Energy Systems Engineering, *The Graduate School, Seoul National University*).
- Li, H., Eksteen, J., & Kuang, G. (2019). Recovery of lithium from mineral resources: State-of-the-art and perspectives – A review. *Hydrometallurgy*, 189, 105129. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.105129>
- Liu L, Liu L, Zhang L, Wang W, Liu HZ, Cao YH. (2021). Research on recovery of lithium from lepidolite concentrate by chlorination roasting and water leaching. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)* (2), pp. 72-76.
- Luong, V. T., Kang, D. J., An, J. W., Dao, D. A., Kim, M. J., & Tran, T. (2014). Iron sulphate roasting for extraction of lithium from lepidolite. *Hydrometallurgy*, 141, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.09.016>
- Meshram, P., Pandey, B. D., & Mankhand, T. R. (2014). Extraction of lithium from primary and secondary sources by pre-treatment, leaching and separation: A comprehensive review. In *Hydrometallurgy* (Vol. 150, pp. 192–208). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.10.012>
- Nogueira, C., Margarido, F., Vieceli, N., Durão, F., & Guimarães, C. (2014). Comparison of processes for lithium recovery from lepidolite by H₂SO₄ digestion or HCl leaching. In *MMME'14-International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering* (pp. 72-1).
- Obut, A., Aktosun, Z., Girgin, İ., Devenci, H., & Yörükoğlu, A. (2022). Characterization and treatment of clayey waste using a sulfuric acid roasting-water leaching process for the extraction of lithium. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. <https://doi.org/10.37190/ppmp/149635>
- Qiu, S., Sun, T., Zhu, Y., Liu, C., & Yu, J. (2022a). Direct Preparation of Water-Soluble Lithium Salts from α -Spodumene by Roasting with Different Sulfates. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(1), 685-697
- Rosales, G. D., Resentera, A. C. J., Gonzalez, J. A., Wuilloud, R. G., & Rodriguez, M. H. (2019). Efficient extraction of lithium from β -spodumene by direct roasting with NaF and leaching. *Chemical Engineering Research and Design*, 150, 320–326. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.08.009>
- Su, H., Ju, J., Zhang, J., Yi, A., Lei, Z., Wang, L. & Qi, T. (2020). Lithium recovery from lepidolite roasted with potassium compounds. *Minerals Engineering*, 145, 106087.
- Şensöz, H., & Sayın, Z. E. (2023). Recovery of lithium from solid waste clays of Emet colemanite beneficiation plant by roasting and acid leaching method. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*.
- Swain, B. (2017). Recovery and recycling of lithium: A review. *Separation and Purification Technology*, 172, 388–403. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.08.031>
- Wen, H., Luo, C., Du, S., Yu, W., Gu, H., Ling, K., Cui, Y., Li, Y., & Yang, J. (2020). Carbonate-hosted clay-type lithium deposit and its prospecting significance. *Chinese Science Bulletin*, 65(1), 53–59. <https://doi.org/10.1360/TB-2019-0179>
- Zhang, X., Aldahri, T., Tan, X., Liu, W., Zhang, L., & Tang, S. (2020). Efficient co-extraction of lithium, rubidium, cesium and potassium from lepidolite by process intensification of chlorination roasting. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 147, 107777. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107777>
- Zhang, Y., Hu, Y., Wang, L., & Sun, W. (2019). Systematic review of lithium extraction from salt-lake brines via precipitation approaches. *Minerals Engineering*, 139, 105868. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105868>
- Zhou, J., & Wen, X. (2014). Extraction of lithium from lepidolite by sulfate process. *Inorganic Salt Industry*, 46(3), 41-44.
- Zhu, L., Gu, H., Wen, H., & Yang, Y. (2021). Lithium extraction from clay-type lithium resource using ferric sulfate solutions via an ion-exchange leaching process. *Hydrometallurgy*, 206, 105759. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105759>

Rulman Titreşim Verilerinden Derin Öğrenme Tabanlı Arıza Tespiti

Engin OĞUZAY^{1*} , Murat BALTA² 

Öz

Rulman titreşimlerinin analizi, bir makinenin mekanik bileşenlerinin genel sağlığı hakkında bilgi sağlayabilir. Bu çalışmada, endüstride yaygın olarak kullanılan motor mekaniklerindeki kusurları tespit etmek ve üretim verimliliğini artırmak için derin öğrenme algoritmaları hem 1 boyutlu hem de 2 boyutlu veri uzaylarına entegre edilmiştir. Popüler ve kapsamlı Case Western Reserve Üniversitesi (CWRU) rulman veri kümesi kullanılarak on farklı sınıf üzerinde çalışılmıştır; bu veri kümesi üç tür hata (dış bilezik, bilye ve iç bilezik) ve sağlıklı bir sınıf içermektedir. Rulman titreşim sinyali dört şekilde ele alınmıştır: orijinal titreşim verilerinin kullanılması, orijinal verilerden özelliklerin çıkarılması, orijinal verilere STFT uygulanması ve STFT uygulanmış verilerden özelliklerin çıkarılması. KNN, SVM ve 1D WDCNN gibi makine öğrenimi yaklaşımları 1 boyutlu verilere uygulanmıştır. Ayrıca 2 boyutlu veri uzayında STFT dönüşümü uygulanmış ve EfficientNetB0, EfficientNetB1, ResNet18 ve 2D WDCNN kullanılarak farklı istatistiksel metriklerle performans ölçümleri yapılmıştır. 2 boyutlu uzayda derin öğrenme yöntemleri %100 doğruluk elde etmiştir.

Anahtar Kelimeler: Motor Yatağı Titreşimi, Derin Öğrenme, Sinyal Sınıflandırma, Endüstriyel Arıza Tanıma.

Deep Learning Based Fault Detection from Bearing Vibration Data

Abstract

Analysis of bearing vibrations can provide information on the overall health of a machine's mechanical components. In this study, deep learning algorithms were integrated in both 1-D and 2-D data spaces to detect defects in motor mechanics commonly utilized in industry, and to increase production efficiency. Ten different classes were studied using the popular and comprehensive Case Western Reserve University (CWRU) bearing dataset, which includes three types of faults - the outer race, the ball, and the inner race - as well as a healthy class. The bearing vibration signal was handled in four ways: using the original vibration data, extracting features from the original data, applying STFT to the original data, and extracting features from the STFT-applied data. Machine learning approaches such as KNN, SVM, and 1D WDCNN were applied to the 1-D data. Additionally, STFT transformation was applied in the 2-D data space, and performance measurements were made with different statistical metrics using EfficientNetB0, EfficientNetB1, ResNet18, and 2D WDCNN. In the 2-D space, deep learning methods achieved 100% accuracy.

Keywords: Motor Bearing Vibration, Deep Learning, Signal Classification, Industrial Fault Recognition.

¹Maltepe Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Bilgisayar Programcılığı Bölümü, İstanbul, Türkiye, enginoguzay@maltepe.edu.tr

²Maltepe Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği, İstanbul, Türkiye, muratballta@gmail.com

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 09.02.20234

Kabul/Accepted: 29.06.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Giriş

Algılayıcı ölçüm teknolojilerinin ilerlemesi ve dünya çapında Endüstri 4.0 kavramının yaygınlaşmasıyla birlikte, akıllı ölçüm uygulamaları ve akıllı arıza teşhis yöntemleri endüstriyel ortamlarda büyük ilgi çekmeye başlamıştır. Bu akıllı ölçüm uygulamaları (Berghian-Grosan ve ark., 2024), makine öğrenmesi ve veri işleme algoritmaları (Oğuzay, 2013) ile desteklenerek, endüstriyel makineler ve cihazlardaki anormalliklerin tespit edilmesi (Anagün ve ark., 2023) ve arızaların yüksek başarı oranlarıyla önceden tahmin edilmesine imkân tanımaktadır. Böylelikle de yakın zamanda arızalanma riski olan endüstriyel cihazlar önceden tespit edilebilmekte, gerekli önlemler alınabilmekte ve bakımları en efektif şekilde yapılabilmektedir. Özellikle üretimde kullanılan makinelerin bakımlarının yapılması hem üretimin devam etmesine hem de makinelerde yaşanabilecek arızaların önlenmesine yardımcı olabilmektedir. Mevcut teknolojik gelişmeler altında endüstride yaygın olarak kullanılan bakım yaklaşımları 3 temel kategoride incelenmektedir (Ran ve ark., 2019):

Reaktif Bakım (Reactive Maintenance) yaklaşımında, bakım işlemi cihazda bir arıza oluşuktan sonra gerçekleştirilir. Cihazın bozulana kadar çalışmasına izin verilir.

Önleyici Bakım (Preventive Maintenance) yaklaşımında, bakım işlemi belirli sayıdaki iş parçası kullanımı sonrası ya da belirli zaman periyotlarında planlı bir şekilde gerçekleştirilir.

Kestirimci Bakım (Predictive Maintenance) yaklaşımında, bakım işlemi cihazdan çeşitli yöntemlerle toplanan verilerin analiz edilmesiyle gerçekleştirilir.

Oldukça büyük bir kısmı makine öğrenmesi modellerine dayanan veriye dayalı yöntemler, akıllı ölçüm ve arıza tespiti yaklaşımlarının merkezinde yer almaktadır (Carvalho ve ark., 2019; P. Kumar ve ark., 2020; Lei ve ark., 2020). Akıllı arıza teşhisi ve ölçüm uygulamaları için veriye dayalı yöntemlerin etkin tasarımı ve kullanımı, başarılı bir hata tespit ve teşhis süreci ihtimalini de arttırmaktadır. Kestirimci bakım uygulamalarında, akıllı bir arıza teşhisi yaklaşımı için geleneksel makine öğrenmesi algoritmaları kullanıldığında, çoğu zaman bir sensor ölçümüyle elde edilen sinyalden gelen ham veriler (örn. titreşim, akım, vb.) zaman düzleminde veya frekans düzleminde analiz edilmektedir (Hendrickx ve ark., 2020; Yoo, 2019). Fakat verilerin zaman düzleminde analiz edilmesi frekans bilgilerini, frekans düzleminde analiz edilmesi de zaman bilgilerini içermediği için birçok uygulama oldukça sınırlı kalmaktadır. Günümüzde teknolojik gelişmeler sonucu artan hesaplama kapasiteleri sayesinde zaman serilerini sadece tek bir düzlemde incelemek yerine çeşitli dönüşümlerle zaman-frekans düzlemine aktarmak ve hem zaman hem de frekans bilgilerinden faydalanmak da mümkün bir hale gelmektedir.

Klasik makine öğrenmesi modellerinde motor arıza tespiti, özellik çıkarımı ve arıza tespiti için faydalı özniteliklerin seçimi aşamalarını içerir (Ertarğın ve ark., 2023). Makine öğrenmesi modeli

aracılığıyla arıza tahmin ve teşhisi sürecinin kalitesini artırmaya yardımcı olabilecek ve toplanan veriyi en iyi şekilde temsil edebilecek olan özniteliklerin çıkarılması ve seçilmesi oldukça zahmetli ve uzmanlık gerektiren bir iştir (Caesarendra ve ark., 2017). Her ne kadar yararlı ve temsil kapasitesi yüksek öznitelikler elde edilmiş olsa da değişen çalışma koşulları veya süreç sapmaları nedeniyle arızaları önceden yüksek tutarlılıkla teşhis etmek de her zaman mümkün olmamaktadır. Son yıllarda, makine öğrenmesi modellerinin bir alt sınıfı olarak ortaya çıkan derin öğrenme modelleri, arıza tespiti ve kestirimci bakım uygulamalarında umut verici sonuçlar göstermiştir (Hoang ve ark., 2019). Derin öğrenme modellerinin bu denli yetkin çözümler üretebilmesinin temel sebebi; verilerdeki gürültüye karşı daha gürbüz ve ham verilerden herhangi bir uzmanlık gerektirmeden gerekli öznitelikleri çıkarma, eleme ve seçim prosedürlerini ortadan kaldırabilmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, derin öğrenme algoritmalarının zaman serisi analizi için güçlü birer araç olması da (Fawaz ve ark., 2019; Långkvist ve ark., 2014), üretimde kullanılan cihazlara bağlı algılayıcılardan elde edilen verilerin analizi için güçlü bir potansiyele sahiptir.

Akıllı arıza tespit ve teşhis uygulamaları için derin öğrenme yaklaşımlarının yaygın kullanımı genellikle algılayıcılar yardımıyla, uzun bir zaman çerçevesinde toplanan büyük miktardaki sinyal verileri üzerinden gerçekleştirilmektedir (Aydın ve ark., 2024). Algılayıcılardan toplanan büyük miktarda zaman serisi verileri, bir derin öğrenme modeline girdi olarak sağlanır ve eğitim sürecinde kullanılır. Daha sonra, eğitilen model ile daha önceden hiç görülmemiş olan veri örnekleri üzerinde arıza tespiti ve sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilir. Bu çalışmada ise mevcut çalışmalardan farklı olarak, toplanan veriler Dalgacık Dönüşümü (Wavelet Transform) ve Kısa Zamanlı Fourier Transformasyonu (Short-Time Fourier Transform) ile 2 boyutlu görsellere dönüştürülecek ve sonrasında farklı Evrişimli Sinir Ağı (ESA) mimarileri yardımıyla analiz edilerek hata sınıfları tespit edilmeye çalışılacaktır.

Rulmanlar dönen makinenin önemli bir parçasıdır. Rulman arızalarının teşhisi, dönen makinelerde; ölümcül ve ekonomik kayıpların önlenmesi açısından önemlidir. Rulmanın arızalı olası durumunda insana ve çevreye önemli zararlar verebilmektedir. Rulmanın belirli bir kısmında bir anormallik meydana geldiğinde, rulman titreşim sensörü sinyalinin özellikleri normal durumdaki titreşim modelinden farklıdır ve bu da sinyalin frekans karakteristiğini değiştirir (Yoo ve ark., 2023). Bu çalışmada endüstride kullanılan motorlu mekaniklerin arıza tespiti bulmak için spesifik olarak rulman verisi üzerinde çalışılmış ve derin öğrenme yaklaşımı ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan modelleme sistemi; otonom araçlar, güvenlik sistemleri ya da biyomedikal cihazlar gibi birçok veri toplamaya elverişli cihaz için de hayata geçirmek temelde mümkündür. Bu bağlamda incelenen literatür ışığında günümüzde oldukça popüler olan ve yüksek başarımlı sergileyen derin öğrenme yaklaşımları kullanılmıştır. Çıkış noktası endüstriyel üretim ortamları olan bu çalışmada geliştirilen modeli; otonom

araçlar, güvenlik sistemleri ya da biyomedikal cihazlar gibi birçok veri toplamaya elverişli cihaz için de hayata geçirmek temelde mümkündür. Dolayısıyla bu tez çalışmasının sonuçları uygulandığında, üretim ve lojistik gibi endüstriyel ortamlarda yaygın bir şekilde kullanılan cihaz ve araçlardan toplanan verilerin anlamlı bir şekilde işlenmesi ve olası hataları en aza indirgeyerek iş gücü, maliyet, can ve mal kaybı gibi istenmeyen unsurları minimize edilmesi mümkündür.

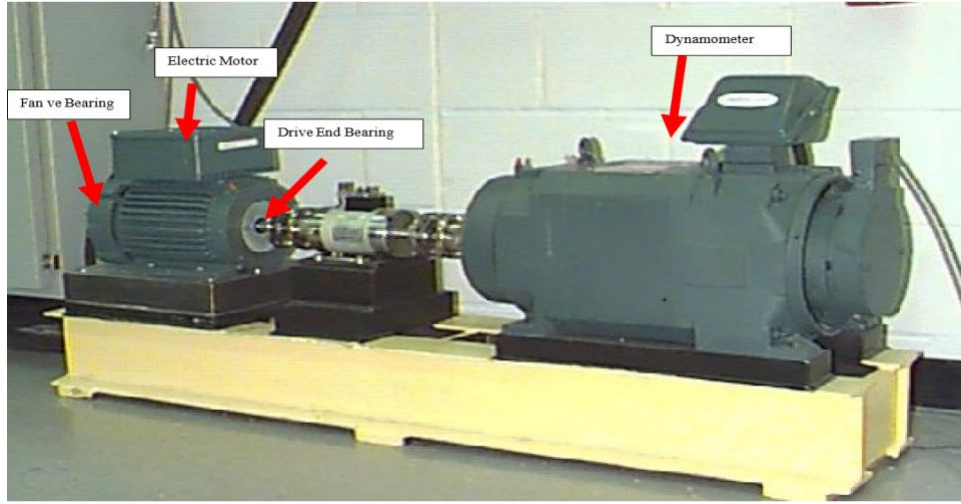
Bu çalışmada motor rulman titreşim verisi kesitlere bölünerek üzerine STFT uygulanarak hata teşhis hedeflenmiştir. Ayrıca 1-B ve 2-B şeklinde sinyal verisi ele alınmıştır. Veri boyutu indirgemenin performansa etkisini analiz etmek için öznitelik çıkarma uygulanmıştır. Orjinal veya STFT uygulanmış 2B veri üzerinde ESA yöntemlerinden EfficientNetB0 kullanarak 100% doğruluk oranı ile hata tespiti yapılmıştır. Ayrıca Gauss gürültüsü durumunda +5 PSNR bozulma ile doğruluk oranı orjinal veri için 95% olarak ölçülürken, -5 PSNR durumunda 75% doğruluk elde edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Dataset

Bu çalışmada CWRU rulman verisi tercih edilmiştir. Şekil 1 'de CWRU veri setinde rulman titreşim verileri alma sistemi (CASE University) görülmektedir. Kullanılan CWRU literatürde motor hata bozukluğu tespiti için en fazla analiz edilen verisetidir. Veriseti oluşturulurken test rulmanları farklı motor milini kullanarak ölçümler yapılmıştır. Kusurlar Elektrik Deşarjlı İşleme (EDM) yöntemi ile tek bir noktadan verilerek oluşturulmuştur. Kullanılan millerin çapları inç (milimetre) ile kusurlar adlandırılmıştır. Toplamda 3 farklı mil tercih edilmiştir:

- 0.007 inç (0.178 milimetre)
- 0.014 inç (0.356 milimetre)
- 0.021 inç (0.533 milimetre)



Şekil 1. CWRU veri setinde rulman titreşim verileri alma sistemi (CASE University).

Rulmanın 3 parçasından 1'inde bulunan her bir kusur için bir zaman serisi vardır:

- Bilye
- İç yuva
- Dış yuva

Telemetri ölçümleri, sistemdeki 3 konuma yerleştirilmiş 3 hızlandırıcıdan gelmektedir:

- Tahrik ucu (DE)
- Fan ucu (FE)
- Baz (BA)

Bu tezde kullanılan veri seti aşağıdaki özellikleri barındırmaktadır:

- Motora uygulanan 1 HP yük
- Şaft dönüş hızı 1772 revolutions per minute (RPM)
- İvme ölçerlerin 48 khz örnekleme frekansı
- Toplamda 10 çeşit sinyal vardır. Sinyallerin uzunluğu tablo 1'de gösterilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan CWRU verisetinde toplamda 10 sınıf vardır. Normalde 3 kategoride ve farklı uzunluktaki miller kullanılarak oluşturulmuştur. Mil uzunlukları 0.007 inç, 0.0014 inç ve 0.0021 inç olarak kullanılarak dış bilezik hatası (OR), iç bilezik hatası (IR) ve bilya hatası (BA) oluşturulmuştur.

2.2. Veri Seti Ön İşleme

Öznitelik çıkarmak literatürde sinyali bölütlerken pencere uzunluğu 784 veya 1024 tercih edilmiştir. Bu 1024 veya 784 seçildiğinde kare olarak matrise dönüştürmek kolay olmaktadır. Pencere

boyutu çok küçük seçildiğinde örnek sayısı çok fazla olduğu için aşırı-öğrenme (over-fitting) durumu oluşmaktadır. Çok yüksek seçilmesi durumunda örnek sayısı çok az olmakta ve sınıflandırma performansı direkt 100% vermektedir. Bu çalışmada rulman titreşim sinyalinden 1x784 kesitler alınmıştır. STFT ile öznitelik elde edilmesi durumunda örnekleme frekansı (FS): 784, pencere: Hann, segment boyutu: 64, örtüşme oranı: 300 olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. CWRU veriserti sınıf detayları.

Class	Details	Uzunluk
7_OR	OR_007_6_1: Outer race fault (0.007 inch, data collected from 6 O'clock position)	1454609
14_OR	OR_014_6_1: Outer race fault (0.014 inch, 6 O'clock)	484483
21_OR	OR_021_6_1: Outer race fault (0.021 inch, 6 O'clock)	505554
7_BA	Ball_007_1: Ball defect (0.007 inch)	487384
14_BA	Ball_014_1: Ball defect (0.014 inch)	486224
21_BA	Ball_021_1: Ball defect (0.021 inch)	243938
7_IR	IR_007_1: Inner race fault (0.007 inch)	486224
14_IR	IR_014_1: Inner race fault (0.014 inch)	381890
21_IR	IR_021_1: Inner race fault (0.021 inch)	244339
N	Normal_1: Normal	483903

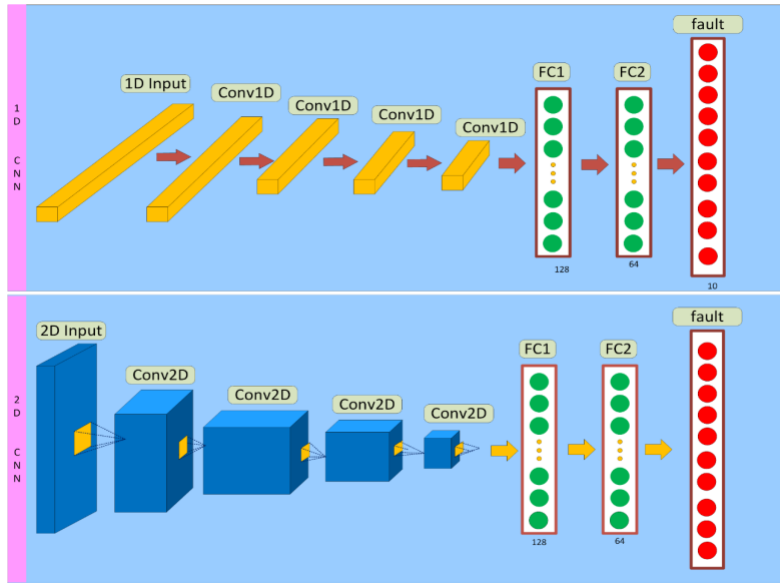
Örtüşme (overlap) oranı 300 olarak, yaklaşık olarak 0.38* pencere boyutu oranında belirlenmiştir. Bu şekilde yapmamızın sebebi kesitlerdeki hata oranını daha iyi tespit etmektir. Düşük boyutlarda kesikler alındığında titreşim sinyalindeki anlamlı bilgi ihmal edilmektedir. Bundan dolayı sezgisel olarak tam sayı çıkması açısından pencere 0.38 ile çarpılmıştır. Deney aşamasında; 1B verilere makine öğrenmesi uygulanmadan önce standart normalizasyon yapılarak öznitelikler [0-1] aralığına çekilmiştir. Ayrıca sınıf adları CNN yöntemlere uygun hale getirmek için one-hot-encoding uygulanmıştır. Bilindiği gibi sinir ağlarının son katmanlarında sınıf sayısı kadar düğüm (node) bulunmaktadır. CNN yapılarının son katmanları da öznitelik ve sınıflandırma katmanlarından oluşmaktadır. Tablo 1’de sınıf detayları ve sinyal uzunlukları gösteren CWRU veriserti tablosunda toplamda 10 sınıf olduğu için sınıf adları 1x10 vektör şeklinde gösterilmiştir. Yani toplamda 10 düğüm kullanılacaktır.

2.3. Sınıflandırma

Makine öğrenimi ve derin öğrenme yöntemleri tüme varım ve tümünden gelim şeklinde çalışmaktadırlar. Derin öğrenme insan beyninin taklit edilmiş hali şeklinde çalışır ve metin, imge ve sinyal gibi örüntüleri benzer şekilde ele almaktadır. İlk derin öğrenme yöntemi perceptron (Minsky ve ark., 1969) algoritmasına dayanmaktadır. Daha sonraları (Lecun ve ark., 1998) LeNet5 şeklinde 2

boyutlu CNN algoritmasını doküman sınıflandırma problemi için önermiştir. CNN yöntemleri geçmişte sınıflandırma problemleri için kullanılmasına rağmen SVM ve öznelik çıkarma yöntemlerinin gölgesinde kalmışlardır.

2012 ImageNet sınıflandırma yarışmasında AlexNet yapısı LeNet5 yapısını güncelleyerek tekrardan derin öğrenmenin gücünü ortaya çıkarmışlardır. Derin öğrenmenin en büyük avantajı imgeden otomatik olarak öznelik çıkarabilmektedir. Derin öğrenme ile bir imgeyi sadece 4, 8 veya 16 öznelik ile göstermek mümkündür.



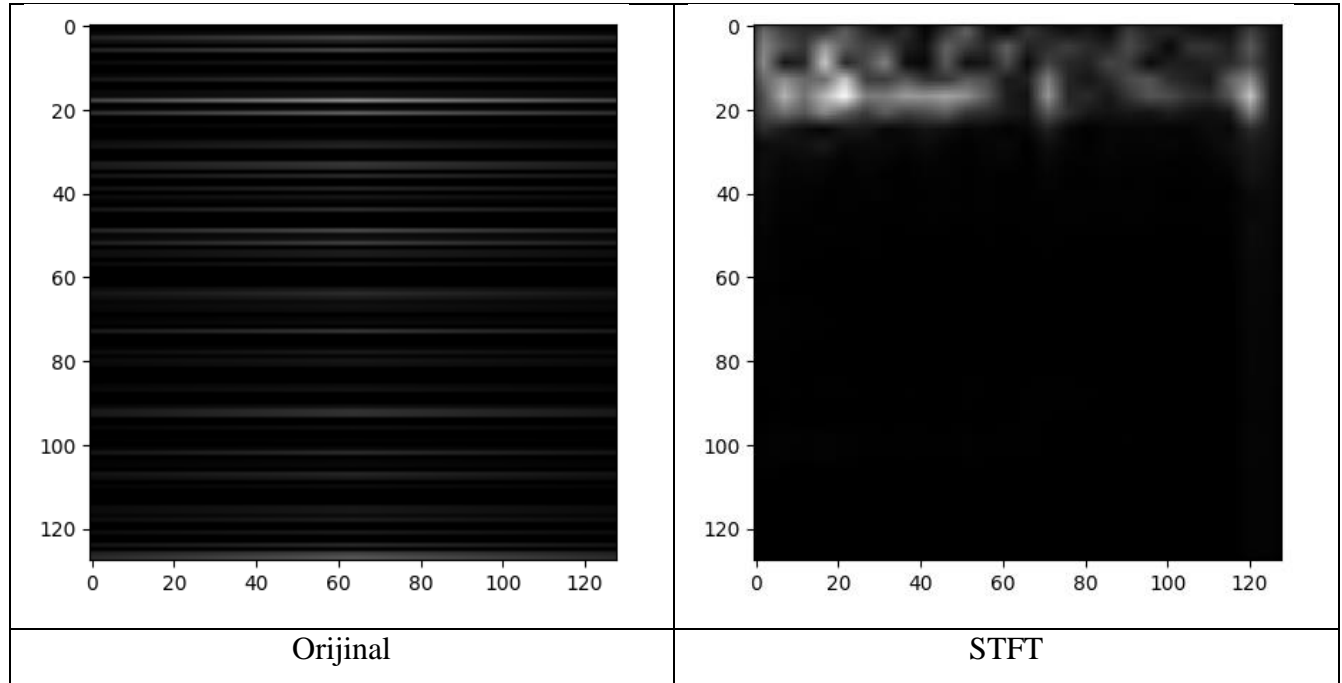
Şekil 2. Derin öğrenme ile sınıflandırmanın gösterimi.

Şekil 2’de derin öğrenme ile hata tanınmanın gösterimi yapılmıştır. Görüldüğü rulan verisi 1B veya 2B şeklinde ele alınabilmektedir. 1B CNN yapısında sinyal verisi vektör şeklinde katmanlara gönderilerek farklı transformasyonlardan geçirilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi CNN katman çıktıları tam bağımlı katmanlara (fully connected layers) gönderilerek sınıflar için ayırt edici öznelikler çıkartılmaktadır. 2B CNN yapılarında ise rulan titreşim verisi resim formatında 2B evrişimsel katmanlara iletilerek kademeli olarak boyut indirgeme yapılmaktadır. Benzer şekilde yine tam bağımlı katmanlar vasıtasıyla daha düşük boyutta ve ayırt ediciliği yüksek öznelikler elde edilmektedir.

Bu çalışmada rulan titreşim verilerinden kusur tespiti için genelde tercih edilen WDCNN mimarisi modifiye eklemeler yapılarak kullanılmıştır. WDCNN yönteminin temel hipotezi şu şekildedir. VGG16 yapısında imgeler 3x3 filtrelerden geçirilerek sınıflandırma yapılmaktadır. Bu şekildeki bir uygulamanın doğru olduğunu vurgulamaktadır. Fakat 2048x1 boyunda bir sinyali 3x1 filtre ile konvolüsyon yapıldığında sinyaldeki gerçek bilginin uzun katmanlı CNN mimarisinde saklanamayacağı

hipotezini savunmaktadır. Bunun için “İlk Katmanda Büyük Çekirdek” (First Layer with Wide Kernel) uygulamanın daha iyi gerçekçi ve daha iyi öznetelik seti oluşturacağını söylemektedir.

Bu çalışmanın deney süreçlerinde WDCNN yönteminin benzeri bir mimari geliştirilerek deneyler yapılmıştır. Eğer girdi verisi 2B ise 2B WDCNN yöntemi kullanılmıştır. Diğer türlü ise 1B WDCNN yöntemi devreye konulmuştur. Girdi verisi boyutu WDCNN için 128x128x3 iken 1B WDCNN için 1x784 olarak belirlenmiştir. Tüm yöntemlerde benzer şekilde eğitim yapılmıştır. Şekil 3’te 2B verinin görselleştirilmesi mevcuttur.



Şekil 3. Orijinal ve STFT veriye ait 2B görüntüleme.

3.Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada dengesiz veri seti (imbalanced dataset) durumu gözlenmektedir. Tüm sınıfların örnek sayısı incelendiğinde 7_OR sınıfının örnek sayısı çok fazladır. Bu durum dengesiz veri seti gerçeğini göstermiştir. Bundan dolayı denklem (1)’de görüldüğü tek doğruluk metriği kullanmak yerine denklem (6)’da AUC skor, denklem (5)’de Cohen’s Kappa skor, denklem (4)’de F1 skor gibi dengesiz veri seti problemini gözetilen metrikler tercih edilmiştir. Ayrıca yöntemlerin denklem (2)’de görüldüğü gibi kesinlik (precision) ve denklem (3)’de görüldüğü gibi hassasiyet (recall) değerleri de hesaplanmıştır. Doğru Pozitif (TP) ve Doğru Negatif (TN) modelin doğru olarak tahminlediği, Yanlış Pozitif (FP) ve Yanlış Negatif (FN) ise modelin yanlış olarak tahminlediği alanlardır.

$$\text{Doğruluk (Accuracy)} = (TP + TN) / (TP + TN + FP + FN) \quad (1)$$

$$\text{Kesinlik (Precision)} = (TP) / (TP + FP) \quad (2)$$

$$\text{Duyarlılık (Recall)} = (TP) / (TP + FN) \quad (3)$$

$$\text{F1 Skorlama (F1 Score)} = 2 * (\text{Recall} * \text{Precision}) / (\text{Recall} + \text{Precision}) \quad (4)$$

$$Po = (TP + TN) / (TP + TN + FP + FN)$$

$$Pe = ((TP + FN) * (TP + FP) + (FP + FN) * (FN + TN)) / ((TP + FN + FP + FN))^2$$

$$\text{Cohen'in Kappa Testi (Cohen's Kappa)} = (Po - Pe) / (1 - Pe) \quad (5)$$

$$\text{Doğru Pozitif Oranı (True Positive Rate) (TPR)} = (TP) / (TP + FN)$$

$$\text{Yanlış Pozitif Oranı (False Positive Rate) (FPR)} = (FP) / (FP + TN) \quad (6)$$

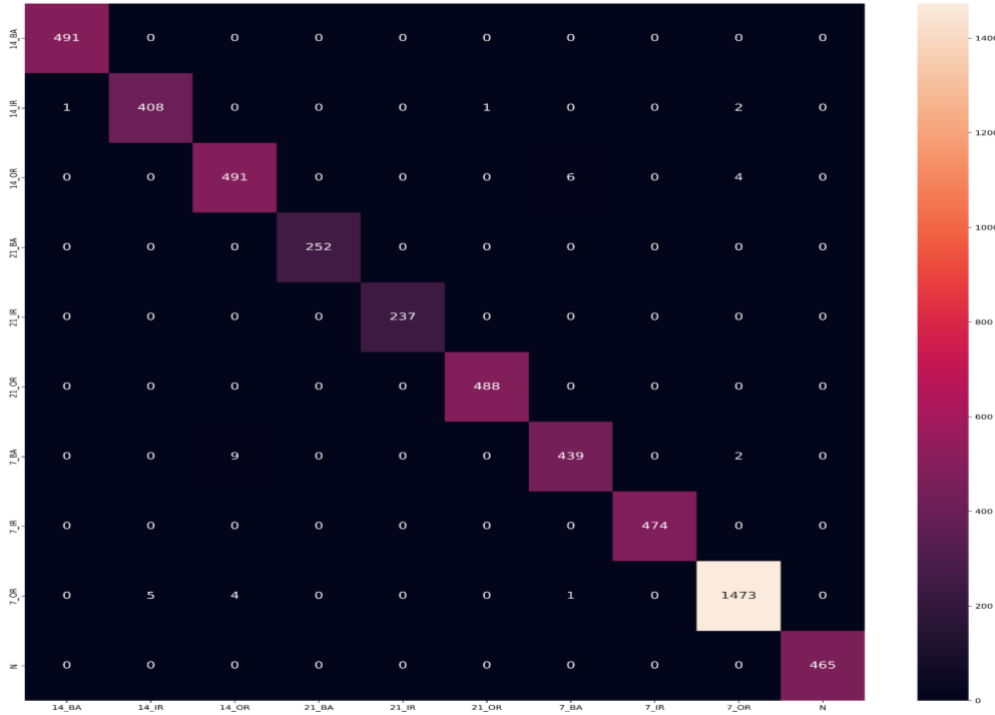
3.1. 1 Boyutlu Özelliklerin Değerlendirilmesi

Bu çalışmada makine öğrenmesi ve derin öğrenmenin rulman titreşim verilerinden hata tespiti için kapasitesi analiz edilmiştir. Kullanılan yöntemlerin karşılaştırmalı olarak performansını ortaya çıkarmak için en bilindik metrikler kullanılmıştır. Makine öğrenmesi yöntemleri olarak KNN ve SVM tercih edilmiştir. Derin öğrenme yöntemi olarak 1D WDCNN yapısı önerilmiştir.

Tablo 2. 1B Verilerden elde edilen performans sonuçları.

Data	Method	Size	ACC	AUC	Cohen's	F1	Precision	Recall
Original	KNN	784	69%	0.9052	0.6424	0.6808	0.7443	0.6769
	SVM	784	78%	0.9814	0.7444	0.7429	0.7988	0.7530
	WDCNN	784	99%	0.9999	0.9923	0.9938	0.9937	0.9939
STFT Applied	KNN	784	95%	0.9891	0.9386	0.9418	0.9421	0.9418
	SVM	784	100%	0.9998	0.9945	0.9954	0.9947	0.9961
	WDCNN	784	99%	0.9999	0.9940	0.9944	0.9946	0.9943

Tablo 2’te verilen performans metrikleri incelendiğinde bütün metrikler arasında doğrusal bir ilişki vardır. Bir modelin accuracy (doğruluk) değeri yüksek ise diğer metrik skorlarında yüksek olduğu tespit edilmiştir. Orijinal rulman titreşim verisetinden en yüksek skorlar 1B WDCNN ile 99%, 0.9999, 0.9923 ve 0.9938 oranında ACC, AUC, Cohen’s ve F1 performansları verdiği gözlenmiştir. Yine ilginç olarak STFT geçirilmiş veride tüm yöntemler yüksek skor vermiştir. STFT verilerinden elde edilen istatistiksel özellikler kullanılıncaya performans büyük oranda düşmüştür.



Şekil 4. 1B original test verisinin karışıklık-matrisi

Genel olarak karışıklık-matrisi gösteriminde hangi sınıfların birbirine çok benzediğini tespit edebiliriz. Bunun için düşük performanslı modelin sonuçlarına odaklanabiliriz. Şekil 4'te verilen orijinal veriden elde edilen öznelikler kullanıldığında 1B WDCNN yöntemi 88% ile düşük performans verdiği gözlenmektedir. En çok hata yapılarak sınıflandırılan sınıf çiftleri; 14_BA ve 14_OR, 7_BA ve 14_IR, 7_OR ve 21_IR olarak görülmektedir. İlginç bir çıkarım olarak Normal (N) sınıfın 7 örneği 14_BA sınıfına atanmıştır. Genel dağılıma bakıldığında 7_OR tüm diğer sınıflarla çok benzer olduğu görülmekte ve yüksek hata skorun oluşmasına sebep olmuştur. Bir diğer çıkarım olarak 21_BA sınıfı diğerlerinden kolayca ayrılabilirdiği not edilmiştir.

3.1.2 Boyutlu Özelliklerin Değerlendirilmesi

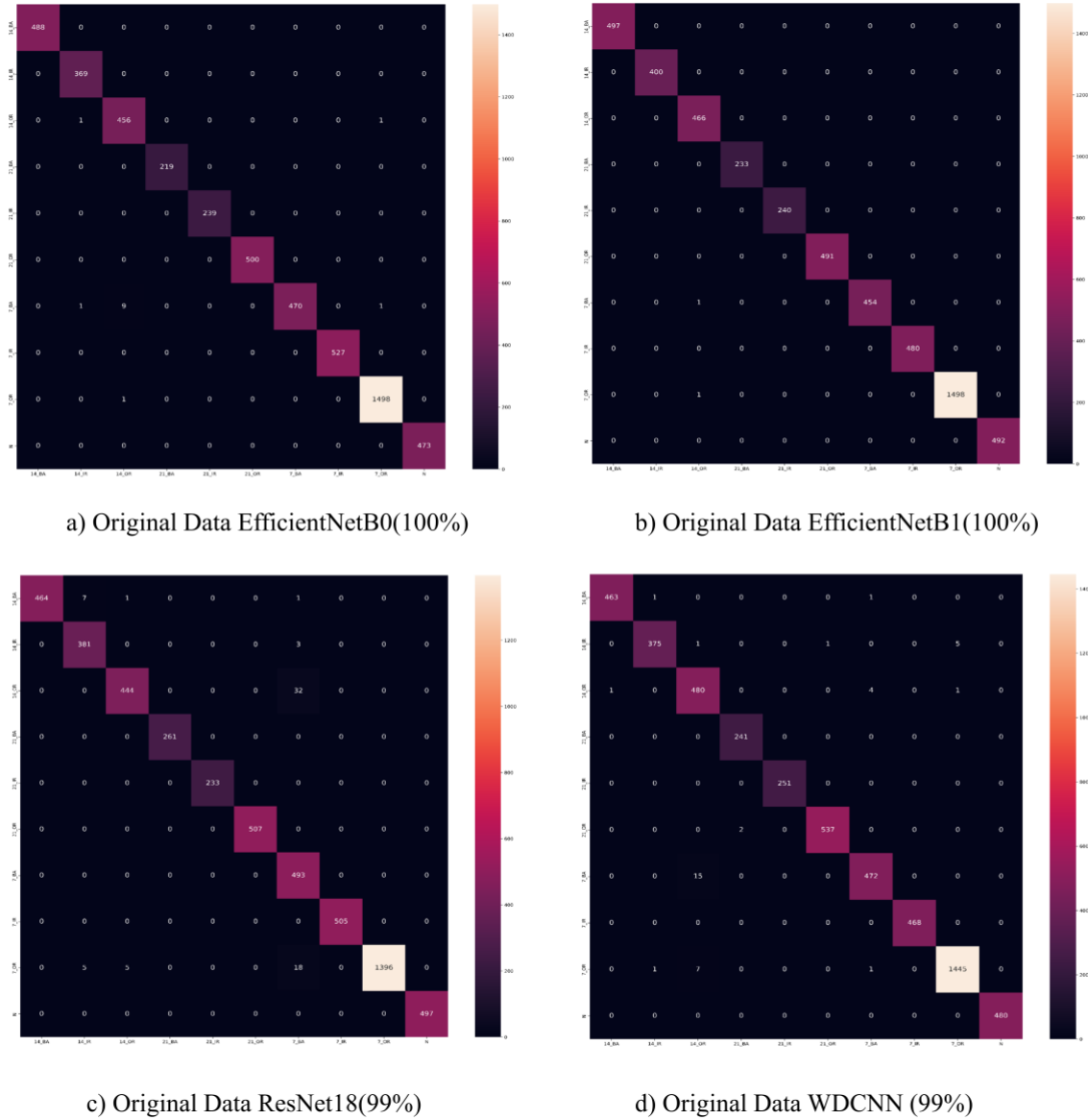
Bu bölümde veriler 2 boyutlu olarak ele alınarak imge formatı şeklinde (H, W, 3) şeklinde CNN modellerine gönderilerek performans ölçümü yapılmıştır. Tablo 3'te EfficientNetB0, EfficientNetB1, ResNet18 ve 2B WDCNN şeklinde dört farklı model ile performans ölçümü yapılmıştır. Vektörleri imge formatına dönüştürmek için 1x784 boyutu yeniden şekillendirilerek 28x28 formatına dönüştürülmüştür. EfficientNet ve ResNet18 yapıları için minimum imge boyutunu sağlamak için 28x28 matrisleri 128x128

formatına dönüştürülmüştür. Sonra 3 kere birleştirme yapılarak 128x128 formatı elde edilmiştir. Bunun nedeni matrisleri bir araya getirerek 3 boyutlu imge oluşturmaktır.

Tablo 3. 2B Verilerden elde edilen performans sonuçları.

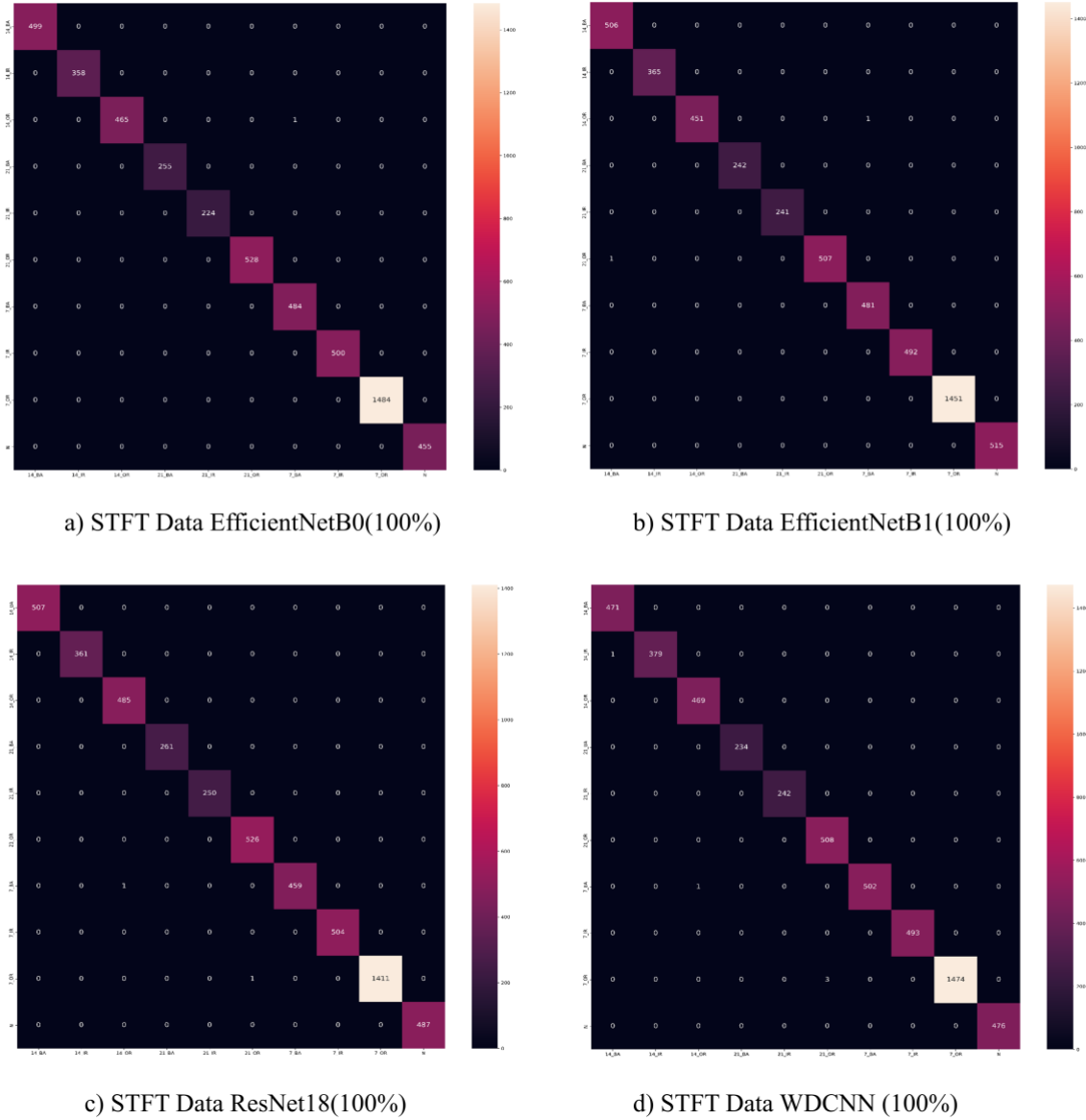
Data	Method	Size	ACC	AUC	Cohen's	F1	Precision	Recall
Original	EfficientNetB0	128X128	100%	1.0000	0.9969	0.9972	0.9972	0.9972
	EfficientNetB1	128X128	100%	1.0000	0.9996	0.9996	0.9996	0.9997
	ResNet18	128X128	99%	1.0000	0.9842	0.9868	0.9857	0.9886
	WDCNN-2D	128X128	99%	0.9999	0.9909	0.9922	0.9920	0.9924
STFT	EfficientNetB0	128X128	100%	1.0000	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998
	EfficientNetB1	128X128	100%	1.0000	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996
	ResNet18	128X128	100%	1.0000	0.9996	0.9997	0.9996	0.9996
	WDCNN-2D	128X128	100%	1.0000	0.9989	0.9992	0.9990	0.9993

Tablo 3'te 2B şeklinde veriyi ele aldığımızda performans değerlerini göstermektedir. Tabloda verilen sonuçlar referans alındığında, en yüksek tanıma performansının EfficientNetB0 ile STFT verisi için sergilemiştir. Cohen's Kappa metriği temel alındığında EfficientNetB0 ve EfficientNetB1 yarış içinde olduğu görülmektedir. Diğer yandan ResNet18 yönteminin orijinal verisetinde F1 skorunun göreceli olarak biraz düşük olduğu not edilmiştir. STFT verisi için tüm yöntemler 100% tanıma oranı vermiştir.



Şekil 5. 1B verisetlerinden 1B WDCNN ile edilen özneliklerin PC1 ve PC2 analizi.

Şekil 5'te 2B şeklinde veriyi ele aldığımızda performans değerlerini göstermektedir. Tabloda verilen karışıklık matrisleri detaylı bir şekilde incelendiğinde orijinal veride EfficientNetB0 yönteminin 7_OR, 14_OR ve 14_IR sınıfları için bir elin parmakları kadar örnekler hatalı sınıflandırılmıştır. En fazla hatanın ResNet18 modeli 7_BA sınıfı için verdiği görülmektedir. WDCNN modelinin ise 14_OR sınıfını tanımada biraz zayıf yetenekte olduğu vurgulanabilir. En güzel sonuçları ortaya çıkaran EfficientNetB1 yönteminin sadece 14_OR sınıfına ait 2 örneği yanlış sınıflandırdığı söylenebilir. 7_OR sınıfının test örneğinin sayısının fazla olmasından kaynaklı hataların oluştuğu sonucuna varılabilir.



Şekil 6. 2B STFT test verisi için 2B CNN yöntemlerine ait karışıklık-matrisleri.

Şekil 6’da STFT transformundan geçirilen verinin 2B sınıflandırması ile edilen karışıklık matrislerini göstermektedir. Şekilde verilen karışıklık matrislerine göre STFT verisinde EfficientNetB0 yönteminin sadece 7_BA sınıfındaki bir örneği 14_OR sınıfına hatalı olarak atadığı görülmektedir. Benzer sınıflandırmayı EfficientNetB1 için gözlenmiştir. WDCNN yönteminin 14_OR’deki 1 örneği 7_BA sınıfına, 21_OR’deki 3 örneği 7_OR sınıfına ve 14_BA’deki 1 örneği 14_IR sınıfına hatalı olarak atadığı not edilmiştir. En az hata veren modellerden biri olan ResNet18 modeli 14_OR’deki 1 örneği 7_BA sınıfına, 21_OR’deki 1 örneği 7_OR sınıfına atadığı dikkate alınabilir.

3.3. Gauss Deney Değerlendirilmesi

Farklı bir deney olarak orijinal veriye gürültü eklendikten sonra STFT uygulandığında performans değişimi not edilmiştir. STFT uygulayınca elde edilen spectrogramın çok etkili olmadığı ve bunun nedeni Fourier dönüşümün bozulan sinyalin trendini yakalayamamasıdır. Doğruluk değerlerine bakılınca SNR +5 db ile 89% STFT uygulanmasından elde edildiği görülmektedir. Ayrıca yüksek gürültü (-5 db) ile sinyalin bozulması durumunda ise 57% sınıflandırma performansı sergilemiştir.

Tablo 4. Gauss gürültüsü eklenince WDCNN performans sonuçları.

Data	SNR	Size	ACC	AUC	Cohen's	F1	Precision	Recall
Original	+5	128x128	95%	0.9971	0.9407	0.9482	0.9519	0.9467
	-5	128x128	75%	0.9675	0.7121	0.7491	0.7512	0.7493
STFT	+5	128x128	89%	0.9906	0.8733	0.8814	0.8841	0.8812
	-5	128x128	57%	0.9002	0.4999	0.5450	0.5426	0.5486

Gauss gürültüsü eklenince elde ettiğimiz performans değerler orijinal ve STFT verileri için karşılaştırılmalı olarak Tablo 4'te gösterilmiştir. Bu deneyde hipotez olarak gürültü eklemenin derin öğrenmenin performansını ne ölçüde düşüreceği sorusuna cevap aranmaktadır. Performans metrikleri olarak Accuracy(ACC), AUC, Cohen's Kappa, F1, Precision, Recall kullanılmıştır. Deney için SNR -5 ve SNR 5 bozulmanın sonuçları üzerinde yorumlama yapılmıştır.

Tablo 4'teki sonuçları karşılaştırdığımızda tüm yöntemlerin Accuracy değerleri düşmüştür. Verilen doğruluk oranları analiz edildiğinde WDCNN yöntemi; orijinal ve STFT verisi için 95%, 75%, 89% ve 57% şeklinde performans verebilmiştir. Detaylı inceleme yapıldığında ise AUC skorların 0.9'un üzerinde olmasının olumlu olduğu vurgulanabilir. Performans metriklerinden Cohen's Kappa değerleri ile F1 skoru değerleri arasında doğrudan bağlantı olduğu gerçeği gözlenmiştir. Gerçeğe yakın olan +5 db SNR bozulması durumunda bile derin öğrenme yüksek tanıma vermiştir.

3.4. Literatür karşılaştırılması

Önerdiğimiz yöntemlerin performansı son zamanlardan önerilen yaklaşımlarla karşılaştırılmıştır. Tablo 5'te tüm yöntemlerin doğruluk performansı, ele aldığı sınıf sayısı ve uygulanan derin öğrenme/makine öğrenimi hakkında bilgi verilmiştir. 2D CNN yöntemlerin 1D CNN yöntemlerinden daha başarılı olduğu açıkça görülmektedir. Bunun nedeni 2B düzlemde konvolüsyon yapıldığında uzaysal bilgi korunmaktadır. 1B uzayda komşuluk bilgisi ihmal edilmekte ve düşük performans ile

sonuçlanmaktadır. Ayrıca daha önce denenmemiş olan EfficientNetB0 ve EfficientNetB1 yöntemlerin performansı da CWRU very seti üzerinden analiz edilmiştir.

Tablo 5. Önerilen yöntemin literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılması.

Method	#Class	Accuracy	Reference
1D WDCNN	10	99.00%	(Zhang ve ark., 2017).
1D CNN + MLP	4	93.88%	(Eren ve ark., 2019).
Naive Bayes	6	98.21%	(Zhang ve ark., 2018)
1D CNN Ensemble	10	96.42%	(Han ve ark., 2020)
2D CapsuleNetwork +LSTM	10	99.00%	(Zhang ve ark., 2022).
2D CNN	10	98.50%	(Magar ve ark., 2021)
1D CNN + LSTM	6	99.77%	(Khorram ve ark., 2021).
1D WDCNN+ ND	4	91.00%	(Miettinen ve ark., 2022).
1D WDCNN + org. data	10	99%	Önerdiğimiz
1D SVM + STFT	10	100%	Önerdiğimiz
2D EfficientNetB0 + org. data	10	100%	Önerdiğimiz
2D EfficientNetB0 + STFT	10	100%	Önerdiğimiz
2D EfficientNetB1+ org. data	10	100%	Önerdiğimiz

4. Sonuçlar ve Öneriler

Rulmanlar dönen makinenin önemli bir parçasıdır. Rulmanın arızalı olası durumunda insana ve çevreye önemli zararlar verebilmektedir. Bundan dolayı rulman arızalarından kaynaklı makine hatasını mümkün olan en kısa sürede tespit etmek önemlidir. Bu çalışmada makine öğrenimi ve derin öğrenme, hata tespiti için potansiyel olarak bir araç olarak görülmüş ve elde edilen titreşim sinyallerinin daha hızlı ve etkili bir şekilde işlenebildiği görülmüştür. CWRU veriseti üzerinden ham (raw) ve frekans alanında 1B ve 2B şeklinde sınıflandırma yapılmıştır. 1B veri hazırlanma sürecinde belirlenen sabit pencere boyutu belirlenerek ele alınmıştır. Ayrıca 1B veriye STFT uygulanarak veri frekans alanında işlenmiştir. Boyut indirgeme için veriden istatistiksel öznitelikler elde edilerek performans değerlendirmesi yapılmıştır. 2B veriyi oluşturmak için 1x784 boyutundaki vektör yeniden şekillendirilerek 28x28 boyutunu dönüştürülerek matris formatına dönüştürülmüştür. Daha sonra 28x28 matris 128x128x3 üst-örnekleme yapılarak spektrogram alanında sınıflandırma yapılmıştır.

Elde edilen bulgular, istatistiksel metriklerden Accuracy, AUC, Cohen's Kappa, F1, Precision ve Recall üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, 1-B orijinal veri üzerinde uygulanınca en yüksek başarı sonucun WDCNN ile 99% olduğu görülmektedir. İlginç bir bulgu olarak STFT uygulanan veride SVM ile 100% doğruluk elde edilmiştir. Öznitelik çıkarılarak yapılan deneylerde ise daha düşük başarı elde edilmiştir. Ayrıca 2-B spektrogram üzerinde yapılan deneylerde derin öğrenme

yöntemlerinden EfficientNetB0, EfficientNetB1, ResNet18 ve WDCNN mimariler ile 100% doğruluk oranı verdiği gözlenmektedir.

Yazarların Katısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Anagün, Y., Işık, Ş., ve Çakır, F. H. (2023). Surface roughness classification of electro discharge machinedvsurfaces with deep ensemble learning. *Measurement*, 215, 112855.
- Aydın, İ., Aydın, E., Akın, E., Kaner, S. (2024). Derin Evrişimsel Sinir Ağ Mimarisi ve Zaman Frekans Gösterimini Kullanılarak Büyük Güçlü Motor Arızalarının Tespiti. *EMO Bilimsel Dergi*, 14(1), 51-59.
- Berghian-Grosan, C., Isik, S., Porav, A. S., Dag, I., Ay, K. O., ve Vithoukas, G. (2024). Ultra-high dilutions analysis: Exploring the effects of potentization by electron microscopy, Raman spectroscopy and deep learning. *Journal of Molecular Liquids*, 401, 124537.
- Caesarendra, W., ve Tjahjowidodo, T. (2017). A Review of Feature Extraction Methods in Vibration-Based Condition Monitoring and Its Application for Degradation Trend Estimation of Low-Speed Slew Bearing. *Machines*, 5(4), 1-28. <https://doi.org/10.3390/machines5040021>
- Carvalho, T. P., Soares, F. A., Vita, R., Francisco, R. d., Basto, J. P., ve Alcalá, S. G. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>
- Ertarğın, M., Yıldırım, Ö., ve Orhan, A. (2023). Motor Yataklarında Meydana Gelen Arızaları Tespit Etmek için Yeni Bir Tek Boyutlu Konvolüsyonel Sinir Ağı Modeli. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 35(2), 669-678. <https://doi.org/10.35234/fumbd.1292390>
- Eren, L., Ince, T., ve Kiranyaz, S. (2019). A Generic Intelligent Bearing Fault Diagnosis System Using Compact Adaptive 1D CNN Classifier. *Journal of Signal Processing Systems*, 91, 179–189. doi:s11265-018-1378-3
- Fawaz, H. I., Forestier, G., Weber, J., Idoumghar, L., ve Muller, P.-A. (2019). Deep learning for time series classification: a review. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 33, Lhassane Idoumghar & Pierre-Alain Muller. doi:10.1007/s10618-019-00619-1
- Han, S., ve Jeong, J. (2020). An Weighted CNN Ensemble Model with Small Amount of Data for Bearing Fault Diagnosis. *Procedia Computer Science*, 175, 88-95. doi:j.procs.2020.07.015
- Hendrickx, K., Meert, W., Mollet, Y., Gyselinck, J., Cornelis, B., Gryllias, K., ve Davis, J. (2020). A general anomaly detection framework for fleet-based condition monitoring of machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 139, 1-21. doi:j.ymssp.2019.106585

- Hoang, D.-T., ve Kang, H.-J. (2019). A survey on Deep Learning based bearing fault diagnosis. *Neurocomputing*, 335, 327-335. doi:j.neucom.2018.06.078
- Khorram, A., Khalooei, M., ve Rezghi, M. (2021). End-to-end CNN + LSTM deep learning approach for bearing fault diagnosis. *Applied Intelligence*, 51, 736–751. doi:s10489-020-01859-1
- Kumar, P., ve Hati, A. S. (2020). Review on Machine Learning Algorithm Based Fault Detection in Induction Motors. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28, 1929–1940. doi:s11831-020-09446-w
- Långkvist, M., Karlsson, L., ve Loutfi, A. (2014). A review of unsupervised feature learning and deep learning for time-series modeling. *Pattern Recognition Letters*, 42, 11-24. doi:j.patrec.2014.01.008
- Lecun, Y., Member, Ieee, Bottou, L., Bengio, Y., ve Haffner, P. (1998). Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86, 2278 - 2324. doi:10.1109/5.726791
- Lei, Y., Yang, B., Jiang, X., Jia, F., Li, N., ve Nandi, A. K. (2020). Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 138, 1-39. doi:106587
- Magar, R., Ghule, L., Li, J., Zhao, Y., ve Farimani, A. B. (2021). FaultNet: A Deep Convolutional Neural Network for Bearing Fault Classification. *IEEE Access*, 9, 25189-25199. doi:10.1109/ACCESS.2021.3056944
- Miettinen, J., Nikula, R.-P., Keski-Rahkonen, J., Fagerholm, F., Tiainen, T., Sierla, S., ve Viitala, R. (2022). Whitening CNN-Based Rotor System Fault Diagnosis. *Applied Sciences*, 12(9), 1-22. doi:10.3390/app12094411
- Minsky, M. L., ve Papert, S. A. (1969). *Perceptron: an introduction to computational geometry*. ISBN.
- Ran, Y., Zhou, X., Lin, P., Wen, Y., ve Deng, R. (2019). A Survey of Predictive Maintenance: Systems, Purposes and Approaches. *arXiv preprint arXiv:1912.07383*, XX(XX), 1-36.
- Oğuzay, E. (2013). Veri madenciliği ile geliştirilen bir akıllı buzdolabı ve market sepet analizi sistemi. Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Yoo, Y.-J. (2019). Fault Detection of Induction Motor Using Fast Fourier Transform with Feature Selection via Principal Component Analysis. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20, 1543–1552. doi:10.1007/s12541-019-00176-z
- Yoo Y, Jo H ve Ban S-W. (2023). Lite Efficient Deep Learning Model for Bearing Fault Diagnosis Using the CWRU Dataset. *Sensors*. 2023; 23(6):3157. <https://doi.org/10.3390/s23063157>
- Zhang, N., Wu, L., Yang, J., ve Guan, Y. (2018). Naive Bayes Bearing Fault Diagnosis Based on Enhanced Independence of Data. *sensors*, 18(2), 1-17. doi:10.3390/s18020463
- Zhang, W., Peng, G., Li, C., Chen, Y., ve Zhang, Z. (2017). A New Deep Learning Model for Fault Diagnosis with Good Anti-Noise and Domain Adaptation Ability on Raw Vibration Signals. *sensors*, 17(2), 1-21. doi:10.3390/s17020425
- Zhang, X., Kong, J., Zhao, Y., Qian, W., ve Xu, X. (2022). A deep-learning model with improved capsule networks and LSTM filters for bearing fault diagnosis. *Signal, Image and Video Processing*, 17, 1325–1333. doi:10.1007/s11760-022-02340-x

Armox 500T Zırh Çeliği İçeren Hibrit Zırh Plakalarının 7.62 mm Tam Metal Kaplama Mermi Karşısındaki Balistik Davranışının Deneysel ve Sayısal Olarak Araştırılması

Mehmet ÖZER¹, Kaan FERİKEL², İbrahim Kutay YILMAZÇOBAN³, Tayfur Kerem DEMİRCİOĞLU^{4*}, Fatih BALIKOĞLU⁵, Can ÇİVİ⁶

Öz

Bu çalışmada, Armox 500T zırh çeliği, Aramid/epoksi laminat kompozit ve Alüminyum bal peteği malzemelerinin tekli ve çoklu hibrit zırh yapıları çeşitli kombinasyonlarla bir araya getirilmiş ve balistik performansları araştırılmıştır. Deneysel çalışma, namlu çıkış hızı 847 ± 10 m/s olan 7.62×51 mm tam metal kaplama mermi ile balistik testler gerçekleştirilmiştir. Balistik darbe levhanın vurma yüzeyine dik gelecek şekilde atış yapılarak gerçekleştirilmiştir. Balistik test levhaları 250×250 mm boyutlarına sahip olup kalınlıkları ise malzeme konfigürasyonuna göre farklılık göstermiştir. Sonlu elemanlar analizi LS-Dyna programında açık zaman entegrasyonu yöntemi ile yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda, monolitik çelik ve hibrit oluşan zırh yapısı balistik koruma sağlamamıştır. Bununla birlikte, metal ve kompozit levhaların hibritleşmesi ile sönmülenen balistik darbe enerji miktarı artırmıştır. Ayrıca, çalışmaya dahil edilen tüm zırh kombinasyonları ağırlık ve kalınlık açısından değerlendirilmiş birbirlerine üstünlükleri belirlenmeye çalışılmıştır. Hibritleşme ile elde edilen enerji sönmüleme değerleri, plakaların ağırlığındaki artışa göre daha büyük bir yüzdesel artış sergilemiştir. Zırh kombinasyonlarının sonlu elemanlar analizi neticeleri deneysel veriler ile karşılaştırılması sağlanmış ve iyi uyum gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Balistik, Sonlu Eleman Analizi, Armox 500T, Alüminyum bal peteği, Aramid/epoksi.

Experimental and Numerical Investigation of the Ballistic Behaviour of Hybrid Armor Plates Containing Armox 500T Armour Steel Against 7.62 mm Full Metal Jacket Bullet

Abstract

In this study, single and multiple hybrid armour structures made of Armox 500T armour steel, Aramid/epoxy laminate composite, and Aluminium honeycomb materials were combined in a variety of configurations to investigate their ballistic performance. Ballistics tests were conducted using 7.62×51 mm full metal jacket bullets with a muzzle velocity of 847 ± 10 m/s. The ballistic impact was made by shooting perpendicular to the striking surface of the plate. The ballistic test plates were 250×250 mm and their thickness varied based on the material configuration. Finite element analysis was conducted using the explicit time integration approach in the LS-Dyna software. The experimental study demonstrated that the armour structure consisting of monolithic steel and hybrid did not provide ballistic protection. However, with the hybridization of metal and composite sheets, the amount of energy absorbed from ballistic impact has increased. In addition, all armour combinations included in the research were tested in terms of weight and thickness, with the goal of determining their superiority over each other. The absorbed energy values achieved by hybridization exhibit a greater percentage increase compared to the increase in weight of plates. The finite element analysis results of the armour combinations were compared against experimental data, showing good agreement.

Keywords: Ballistic, Finite Element Analysis, Armox 500T, Aluminium honeycomb, Aramid/epoxy.

¹Balıkesir Üniversitesi, Bigadiç Meslek Yüksekokulu, Balıkesir, Türkiye, ozet@balikesir.edu.tr

^{2,3}Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye, kaanferikel@gmail.com kyilmaz@sakarya.edu.tr

^{4,5}Balıkesir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye, tkerem@balikesir.edu.tr fatih@balikesir.edu.tr

⁶Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye, can.civi@cbu.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Patlama etkisi ve darbelere karşı korunmada Armox zırh çelikleri, kritik öneme sahip malzemelerdir ve bu alanda lider konuma sahip oldukları bilinmektedir. Savunma sanayisine yönelik uygulamalara bakıldığında Armox çelikleri, piyade savaş araçları, tanklar, devriye araçları, mayın temizleme araçları ve zırhlı personel taşıyıcılarda ana zırh malzemesi olarak kullanıldığı görülmektedir. Bunun yanında, Armox zırh çelikleri ürün gamının askeri ve diğer sivil uygulamalarına da çokça rastlanılmaktadır (Popławski ve ark., 2020). Örneğin; banka araçları, güvenlik kapıları, zırhlı veri merkezleri, zırh korumalı binalar ve mayın kafesleri gibi başlıca uygulamalar karşımıza çıkabilmektedir.

Literatürde, Armox 500T çeliği diğer armox çeliği üyeleri arasında daha fazla talep görmesinin nedeni ise, zıt özelliklerinin benzersiz kombinasyonuna sahip olmasıdır. Martenzitik özelliğe sahip olan bu çelik, yüksek tokluk, sertlik ve gerilme mukavemeti sergilemektedir (Valpolini, 2013). Armox 500T'yi diğer armox sınıfına ait çeliklerden ayıran bir başka özelliği ise gerek makineyle gerekse el işçiliğiyle işlenebilirliğinin daha kolay olmasıdır. Armox 500T'yi penetrasyon ve patlama koruması için vazgeçilmez kılan durum sertliği ve tokluğu arasındaki mükemmel dengedir.

Literatürde, Armox 500T çelikleri ile ilgili bir dizi çalışma bulunmaktadır ve bunların çoğu seramik ve çelik levhadan yapılmış eklenti zırhın darbe direnci ile ilgilidir (Bekci ve ark., 2021; Coufal ve ark., 2022; Garašić ve ark., 2019; Göçmen ve ark., 2023; Kumlu ve ark.; Mao ve ark., 2024). Senthil ve ark. (2017) yumuşak çelik plakaların 7.62 AP mermilerine karşı balistik direncini, ABAQUS/Explicit programında sayısal simülasyonlar yoluyla incelemiştir. Mermiler, farklı kalınlıktaki hedef plakalara değişen geliş açılarında çarpmıştır. Genel olarak, hedef eğikliği arttıkça hedefin direncinin arttığı bulunmuştur. Mermi sekmesinin kritik açısının, hedef kalınlıktaki artışla azaldığı bulunmuştur. Yumuşak çelik hedeflerin verilen tüm kalınlıkları için balistik limit değerleri sayısal olarak elde edilmiştir. Paman ve ark. (2020) çalışmalarında çok katmanlı bir zırh modülüne ait malzeme katmanlarının optimal sırasını ve kalınlıklarını hem 7.62 zırh delici mermiye karşı balistik direnç hem de minimum ağırlık sağlamak amacıyla sayısal simülasyon ve balistik deneyler ile belirlemişlerdir. Metodoloji, üç farklı metal alaşımına uygulanarak gösterilmiştir: Armox-500T, Ti-6Al-4V ve Al-2024. AUTODYN-3D kodu kullanılarak bu üç malzemenin balistik darbe davranışını incelemek için önce sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmişlerdir. Balistik deneyler sırasıyla 5.5, 8.5 ve 13 mm kalınlığa sahip Armox-500T/Ti-6Al-4V/Al-2024 dizisinin 7.62 mm zırh delici mermiye karşı en iyi dirence sahip yapı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, tek tip malzemelerin performansı, optimize edilmiş üç katmanlı bir zırh modülü ile karşılaştırılmıştır. Kompozit modülünün ağırlık açısından Armox-500T, Al-2024' e göre verimli olduğu ve zırh kalınlığı bakımından ise Al-2024 'e göre daha iyi performansa sahip olduğu bulunmuştur. Ti-6Al-4V

malzemesinin ise ağırlık ve kalınlık verimliliğinin kompozit modül ile karşılaştırılabilir olduğu bulunmuştur. Yeter (2019) Armox 500T ve Alüminyum 7075-T6 plakalarının düşük ağırlık ve balistik darbe yüklerine karşı hasar modlarını araştırmıştır. Başlangıç hızı 800 m/s olan 7.62 API mermisine karşı, 10 mm Armox-500T ve 26 mm Al7075-T6 plakalar balistik koruma sağlamıştır. Ağırlık düşme testi sonuçlarında ise Armox-500T plakasının maksimum darbe yüklerinin Al7075-T6 malzemeye kıyasla daha yüksek olduğu ve deformasyon miktarının da daha az olduğu gözlemlenmiştir. Farklı kalınlık ve yönlerde Armox 500T ve Al7075-T6 malzemelerinin çeşitli kombinasyonlarından oluşan farklı hibrit modeller tanımlamıştır. Bu tasarımlar birbirleriyle karşılaştırılarak balistik darbe yüklerine daha dayanıklı olanlar belirlenmiştir.

Farklı bir çalışmada ise, yüksek sertliğe sahip birincil seramik katmanlar ön tarafta kullanılmıştır (De Oliveira Braga ve ark., 2018). Bunun nedeni, çekirdek uç geometrisini bozarak, mümkün olduğu kadar fazla deformasyona uğratıp delme gücünü azaltmaktır (Da Silva ve ark., 2014). İkincil zırh olarak, balistik kompozit malzeme kullanılmasıdaki amaç ise, mermi kinetik enerjinin mümkün olduğu kadar geniş alana yayılmasını sağlayıp enerjiyi absorbe etmesidir (Pirvu ve Deleanu, 2018). Bu nedenle elyaflardaki spesifik enerji emilme hızı önemlidir. Zırh yapısı içerisinde merminin daha fazla mesafe kat etmesi, enerji yayılımı için yüzey temas alanını artırır böylece daha yüksek balistik limite çıkılması sağlanır (Sabet ve ark., 2009).

Saleh ve ark. (2016), Armox 500T plakanın 7.62 mm APM2 mermisine gösterdiği balistik tepkisi üzerine sayısal analizler yapmıştır. Sayısal modellemede kullandıkları değerleri, malzemenin tepkilerini, yarı statik test deneyleri ve Split Hopkinson testi kullanılarak yüksek gerinim oranı deneylerinden elde etmişlerdir. Deneysel olarak belirlenen bu yüksek gerinim oranı verileri, akış gerilimi için Johnson- Cook (J-C) hesaplama modellerine ve plakanın kırılma modeli için literatür kaynaklı parametrelere dahil etmişlerdir. Artık gerilimin, ARMOX 500T zırh çeliğinin balistik performansı üzerindeki rolü hakkındaki sonuçlar raporlanmıştır. Iqbal ve ark. (2016), Armox 500T çeliğinin, zırh delici (API) mermisinin balistik etkisine karşı değişen gerilme durumu, gerilme hızı ve sıcaklık altındaki davranışını incelemek için ayrıntılı bir araştırma yapmışlardır. Çalışmasında, Armox 500T çeliği için kalibre edilmiş J-C modeli, Split Hopkinson testi ile gerçekleştirilen yüksek gerinim hızı gerginliği sayısal olarak simüle edilmesiyle doğrulamıştır. Balistik deneyler, 8 ve 10 mm kalınlığında Armox 500T çelik hedef plakalara, ortalama 830 m/s hıza sahip 7.62 ve 12.7 API mermilerle atışlar yapılmıştır. Bunun yanında, hedef için kalibre edilmiş J-C modeli ve mermi malzemesi kullanılarak sonlu eleman programında simülasyonları gerçekleştirmişlerdir. Hesapladıkları hasar modlarının ve artık hızların deneylerle doğru bir şekilde uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, hedef materyalin balistik sınırı sayısal olarak elde edilmiş ve elde edilen değerler RECHT-IPSON ampirik model aracılığıyla doğrulandığını da vurgulamışlardır. Kędzierski ve ark. (2015) 7.62×54 B32 zırh delici (AP) merminin normal etkisine maruz kalan iki katmanlı zırhın

optimizasyonu üzerine bir araştırma yürütmüşler. Alümina Al_2O_3 'ün alüminyum alaşım AA2024-T3 veya zırh çeliği Armox 500T ile desteklendiği iki durum için analizler yapılmıştır. Panelin delinme sonrası artık hızını ve panelin alansal yoğunluğunu en aza indirecek şekilde katman kalınlıklarını belirlemişlerdir. Sayısal analizler, LS-DYNA, LS-OPT ve HyperMorph yazılımları ile yapılmıştır. Zırh çeliği, mermi malzemesi ve alüminyum alaşımının tepkisi J-C modeli ile tanımlanmıştır. Ayrıca alümina malzemeyi Johnson-Holmquist modeli ile tanımlamışlardır. Bu bağlamda, optimizasyon süreci, en hafif panelin alansal yoğunluğunun Al_2O_3 -Arnox 500T ve Al_2O_3 -AA2024-T3 için sırasıyla 71.07 kg/m^2 ve 71.82 kg/m^2 olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmada, $7.62 \times 51 \text{ mm}$ tam metal kaplama (FMJ) mermisine karşı koruma sağlayan tek bileşenli 4 mm kalınlığında Armox 500T zırh çeliği plakası aramid-epoksi kompozit ve alüminyum bal peteği malzemeler ile hibritleşmesi sağlanarak balistik performansları incelenmiştir. Bu bağlamda çalışmanın deneysel ve sayısal açıdan uyumlu olduklarının doğrulanması ve kalınlık artışına bağlı olarak balistik direnç ve artık hız değişimi sunulmuştur.

2. Materyal ve Metot

2.1. Malzeme

Balistik teste tabi tutulan zırh çeliği malzemesi İsveç- SSAB (SSAB, 2024) firmasından temin edilmiştir. Armox 500T'nin mekanik özellikleri 480–540 HBW sertlik değeri, 1250 MPa akma dayanımı, 1450–1750 MPa çekme dayanımı ve 32J /- 42°C darbe enerjisine sahip olduğu SSAB firmasının ürün kataloğunda belirtilmiştir. Balistik teste tabi tutulan zırh çeliği plaka $250 \times 250 \times 10$ mm boyutlarındadır. Tablo 1' de Armox 500T'nin kimyasal kompozisyonu, Tablo 2'de ise temel mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Armox 500T'deki maksimum alaşım elementi içeriği (SSAB, 2024).

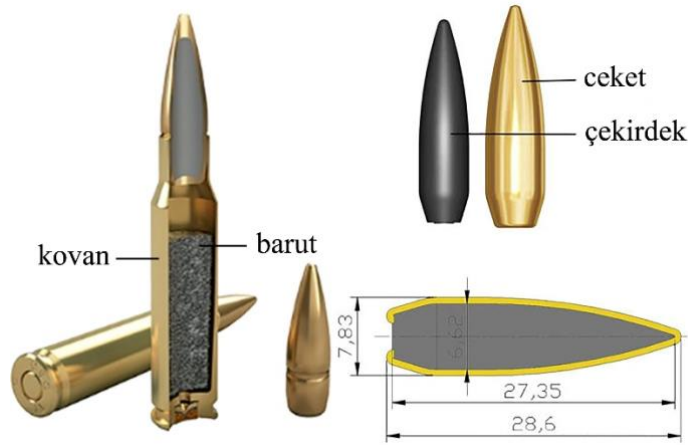
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
0.32%	0.4%	1.2%	0.015%	0.010%	1.01%	1.18%	0.7%	0.005%

Tablo 2. Armox 500T temel mekanik özellikleri (SSAB, 2024).

Özellikler	Sembol	Birim	Değer
Sertlik	HBW	-	480-540
Darbe tokluk at -40 °C (Charpy)	KV	J	32
Akma dayanımı	$R_{p0.2}$	MPa	1250
Çekme dayanımı	R_m	MPa	1450-1750
Uzama	A_5	%	8
Uzama	A_{50}	%	10

Not: A_5 (ekstansometre aralığı 5 mm), A_{50} (ekstansometre aralığı 50 mm)

Yapılan çalışmada, NIJ 0108.01 Seviye III-A (Stewart, 1985) testlerinde tercih edilen 7.62×51 mm FMJ tam metal kaplama mermisi kullanılmıştır. Balistik test koşulları Bölüm 2.2.'de detaylı olarak açıklanmıştır. Bunun yanında, hedef plaka, hız ölçerler ve silah arasındaki mesafe durumu ve mermi hızı aynı standart doğrultusunda düzenlenmiştir. Bu nedenle testler öncesinde mermi hızı, kovan içindeki barut miktarı ile ayarlanmış 7.62×51 mm M80 NATO FMJ mermisi için 847 ± 10 m/s hız aralığında tutulmuştur. Şekil 1'de testlerde ve analizde kullanılan 7.62×51 mm tam metal kaplama merminin boyutları ve kısımları verilmiştir. 7.62×51 mm tam metal kaplamalı merminin özellikleri Tablo 3'te gösterilmiştir.



Şekil 1. Balistik testlerde ve analizde kullanılan 7.62×51 mm tam metal kaplama (FMJ) mermi ve boyutları.

Tablo 3. 7.62×51 mm tam metal kaplama (FMJ) mermisinin teknik özellikleri.

Kullanılan Mermi	7.62 mm FMJ
Mermi Çekirdek Çapı	7.83 mm
Mermi Çekirdek Ağırlığı	9.60 g
Mermi Kovan Ağırlığı	11.84 g
Mermi Uzunluğu	28.6 mm
Barut Miktarı	2.768 ± 0.005 g

Kevlar 29 veya muadili para-aramid liflerinden dokunmuş kumaş (Twaron CT709), alan ağırlığı 200 g/m^2 olan, balistik kurşun geçirmez yelek imalatında kullanılan, yüksek performanslı, hafif, su-tutmaz aramid elyaf kumaştır. Alüminyum bal peteği panel, alan ağırlığı 5.0 kg/m^2 olan, hücre çapı yaklaşık 9 mm, folyo kalınlığı yaklaşık 50 -70 μm , eğilme rijitlik değeri $21900 \text{ kNm}^2/\text{m}$, hafif paneldir. Deneysel çalışmada kullanılacak olan zırh plakalarını tanımlayan kodlama, toplam kalınlık ve toplam ağırlık bilgileri Tablo 4' te sunulmuştur.

Tablo 4. Balistik test plaka detayları.

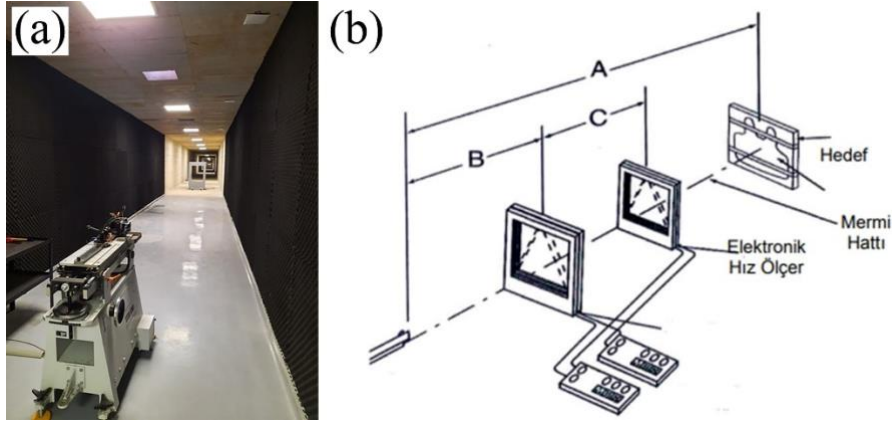
Zırh Plakası	Kod	Toplam Kalınlık (mm)	Toplam Ağırlık (g)	Ağırlık Artışı (%)
4mm Çelik	4A	4	2130	-
4mm Çelik+6 kat Aramid fiber	4A6K	6.7	2310	8.5
4mm Çelik+12 kat Aramid fiber	4A12K	9.4	2480	16.4
4mm Çelik+6 kat Aramid fiber +10mm Alüminyum bal peteği	4A6K10B	16.7	2700	26.8

Literatürden elde edilen bilgiler doğrultusunda yüksek sertliğe sahip malzemenin ön tarafa konumlandırılması gerektiği çünkü mermi çekirdeğinin uç geometrisini bozarak mermiyi mümkün olduğu kadar fazla deformasyona uğratarak delme gücünü azaltması şeklinde anlatılmıştır (Palta vd., 2018; Peng vd., 2022). Öte yandan ikincil zırh olarak ise balistik kompozit malzeme kullanılmasıdır ki bu durum literatürde merminin kinetik enerjisinin mümkün olduğu kadar geniş alana yayılmasını sağlayıp enerjinin absorbe edilmesi amaçlanmaktadır. Zira zırh yapısı içerisinde merminin daha fazla mesafe kat etmesi enerji yayılımı için yüzey temas alanını artırır böylece daha yüksek balistik limite çıkılması sağlanır şeklinde anlatılmıştır. Son olarak arka tarafta nispeten daha güncel malzeme olan Alüminyum bal peteği kullanılmıştır. Bu durum ise merminin öndeki katmanlardan geçmesi halinde kalan enerjisini absorbe etmek maksadıyla kullanılmıştır.

2.2. Balistik Testler

Armox 500T çeliği zırh plakası balistik testi, Balıkesir ilindeki ZSR Patlayıcı San. A.Ş. firmasında bulunan kapalı atış poligonunda gerçekleştirilmiştir. Balistik test düzeneği “NIJ 0108.01 Ballistic Resistant Protective Materials” standart kapsamında III. koruma seviyesinde ayarlanmıştır (Stewart,1985). Balistik testler kapalı poligonda gerçekleştirilmiştir. Kapalı poligonda iklimlendirme mevcut ve ortam sıcaklığı 22 °C de sabit tutulmaktadır. Bu ortam sıcaklığı standartta verilen 20-28 °C dereceleri arasındadır. Hibrit hale getirme işlemi için herhangi bir yapıştırıcı kullanılmamıştır. Uygun ölçülerde hazırlanmış olan plakalar daha önce belirtilmiş olan sırayla zırh plakası tutucusu içine sırayla dizilmiş ve plaka tutucu 4 kenarından rijit bir şekilde sabitlenerek, balistik test için mermi atışına hazır hale getirilmiştir. Sonlu elemanlar modelinin sınır koşullarında bu duruma dikkat edilmiş ve detaylı bilgi 2.3.2. kısmında verilmiştir. Ayrıca, testler 7.62×51 mm M80 tam metal kaplama mermisi ile Prototipa marka balistik atış düzeneği kullanılarak yapılmıştır (Şekil 2). Test plakalarına standarda uygun olarak 5 atış yapılmıştır. Mermilerin plaka üzerinde oluşturduğu hasarları temsil eden detaylı tek bir fotoğrafa makalede verilmiştir (Bkz. Şekil 4-7). Standartta belirtildiği gibi test numuneleri için destek macunu kullanılmamıştır. Test sonrası komple delinme olmayan 6A

plakasının lokal deplasman değeri derinlik kumpası ile belirlenmiştir. III. koruma seviyesinde test plakası ve namlu arası mesafe 15 metre olacak şekilde sağlanmıştır (Stewart, 1985).



Şekil 2. (a) ZSR A.Ş. firmasında kapalı poligonda bulunan Prototypa marka atış düzeneği ve (b) şematik test standardı (NIJ 0108.01) (Stewart, 1985).

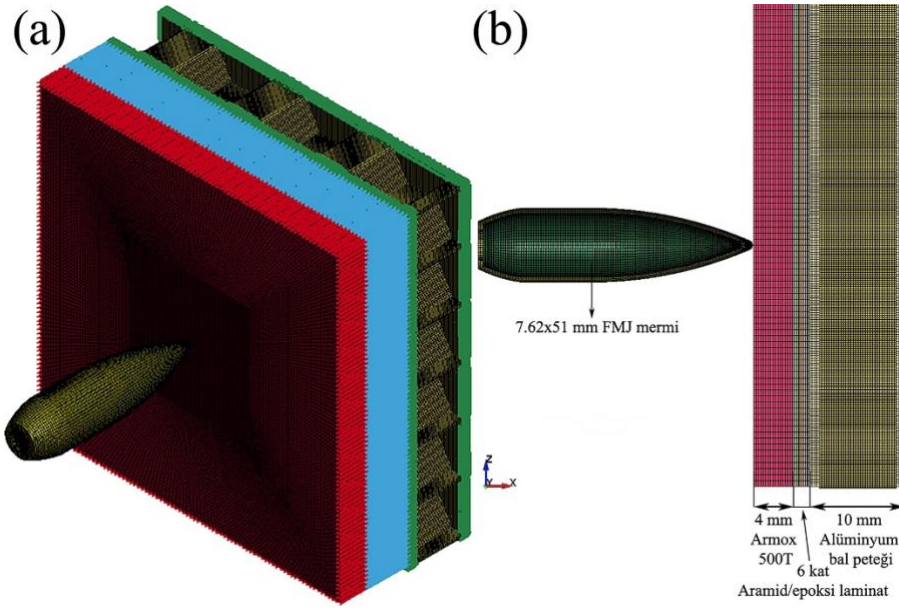
2.3. Sonlu Elemanlar Analizi

2.3.1. Çözüm Metodu

Sonlu elemanlar analizi LS-Dyna programında gerçekleştirilmiştir. Numerik Analizin tamamı LS-Prepost programında hazırlanmıştır. Açık (explicit) zaman entegrasyonu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözümler yapılmıştır. 7.62x51 mm FMJ M80 mermi, 4 mm ArmoX 500 zırh çeliği, 24 kat aramid /epoksi laminat kompozit ve 10 mm Alüminyum bal peteği katmanlarından oluşmuş hibrit kompozit zırh plakası sonlu elemanlar modeli görüntüsü Şekil 3b’ de verilmiştir. Mermi ve plaka boyutları Bölüm 2.1. de verilmiştir. Programın yaptığı “Adım-Süresi” hesabı, temas ilişkisinin daha iyi çalışması için 0.85 faktörü ile CONTROL_TIMESTEP kartı ile küçültülmüştür. Ayrıca “HOURGLASS” enerjileri ve CONTROL_ENERGY kartı eklenerek hesaba katılmıştır.

2.3.2. Sınır Koşulları

Deneysel çalışmalarda kullanılan plaka tutucu düzeneğine uygun olacak şekilde her hedef plakasının dört (4) kenar yüzeyleri, her serbestlik derecesinden tutulup tamamen sabitlenmiştir (Şekil 3a). Merminin çarpma doğrultusundaki hibrit plaka dizilimine ait sayısal model kesiti Şekil 3b de verilmiştir. Sonlu elemanlar modelinde Mermi ağırlığı 9.60 gramdır.



Şekil 3. Sayısal modelin ayrıntıları (a) serbestlik derecesi sıfırlanan noktalar ve (b) kesit görüntüsü.

2.3.3. Temas İlişkisi

Penetrasyon sırasında mermi bileşenleri ve hedefler arasındaki teması programa tanımlamak için `ERODING_SURFACE_TO_SURFACE` seçilmiştir. Hedeflerin ve mermilerin kendi içlerindeki temas ilişkisi ile `ERODING_SINGLE_SURFACE` temas algoritmaları kullanılmıştır. “ERODING” temas algoritmasının seçilmesinin sebebi, temasta bulunan yüzeyler deforme oldukça veya aşındıkça, temas yüzeylerinin algoritma içinde güncellenmesidir. Ayrıca temas kartları içerisinde, opsiyonel olan `SOFT` seçeneği 2 (Pinball teması segmentlere dayalı tepki formülü) olarak seçilmiştir. Doğruluğu arttırmak için, temasa giren her bir parça arasındaki, seçilen temas ilişkisinde kullanılması gereken “adım-süresi” ve “temas-rijitliği” elle hesaplanıp programa tanımlanmıştır. Deneysel çalışmaların sonucunda, kevlar katlar arasında delaminasyon oluşmadığı göz önünde bulundurularak, katlar arasındaki laminasyon ilişkisinin tanımlanması için `TIED_SURFACE_TO_SURFACE` temas algoritması kullanılmıştır. Laminasyon temas ilişkilerinde `SOFT` seçeneği varsayılan (0) olarak seçilmiştir.

2.3.4. Eleman Ağı Yapısı (Mesh)

Eleman ağı (Mesh) bahsedildiği üzere LS-Prepost programında hazırlanmıştır. Sayısal modellerin ağı yapısı detayları Tablo 5’te verilmiştir. Hedef plakaların (ArmoX 500 ve Kevlar) deformasyonunun asıl gerçekleştiği alanda daha sıkı bir ağı yapısı kullanılmış ve asıl deformasyon

bölgesinden uzaklaştıkça eleman boyutu büyütülmüştür. Bu sayede işlem gücü ihtiyacı, sistem gereksinimleri ve işlem süresi ihtiyaçları düşürülmüştür. Diğer tüm parçalar gibi kevlar da katı olarak modellenmiş ve malzeme modeli detayından 0-90 açıları tanımlanmıştır. Bal peteği yapısında, yapının iç kısmında duvar genişliği 0.2 mm olduğu ve düzgün altı yüzlü eleman yapısı (Hexahedral) korunmak istediği için, tamamen 0.2 mm eleman boyutu sabit olacak şekilde ağ yapısı oluşturulmuştur. Mermi bileşenlerinin ağ yapısında, son derece yüksek oranda tamamen düzgün altı yüzlü eleman yapısı kullanılmıştır.

Tablo 5. Sonlu elemanlar analiz detayları.

Katman	Eleman Boyutu	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı
Armox 500	0.25-0.625	276480	296497
Kevlar-Tek Kat	0.25-0.625	17280	34882
Bal Peteği	0.2	802730	1073217
Kurşun Çekirdek	0.25-0.07 (Köşelerde)	75075	75441
Bakır Ceket	0.25	14560	21843

2.3.5. Malzeme Modelleri

Armox500T çelik plakanın malzeme modeli olarak, şekil değiştirme hızının dinamik olarak değiştiği durumlarda (Hyper-Velocity çarpışmalar gibi) şekil değiştirme hızından etkilenmeden yüksek doğruluk sağlayabilmesi ve sağlıklı davranışını koruyabildiği için MAT_015_JOHNSON_COOK materyal modeli kullanılmıştır. Öte yandan bir başka sunduğu avantaj ise, yaygın olarak ulaşılabilen seviyedeki deneyler üzerine yapılan, standart haline gelmiş belirli sayısal analizler ile materyal modeli parametrelerinin tamamen belirlenebilmesinin yanında, hasara uğrama mekanizmasının son derece detaylı olup birden fazla kriteri aynı anda uygulatabilmesidir. Bu durum, malzemeye ait parametrelerin girilmesi ardından, kuvvetler sonucu doğacak akma gibi mekanik özelliklerin etki ettiği ve farklı türdeki gerilmelerin neden olduğu kırılma ve şekil değiştirme hasarlarının belirlenebilmesini sağlamaktadır. Literatür de ve kılavuzlarda görüldüğü üzere ikisi de ayrı ayrı hesaplanıp, sonuç gerilmelerin birleşimi ile hasar meydana gelir. Bu sayede, materyalde kırılma gerçekleşmese bile çatlaklar oluşur.

Mermi bileşenlerinin modellenmesi için ve bal peteği yüzleri için, işlem gücünden ve çözüm süresinden tasarruf sağlamak amacıyla, balistik konusunda materyal davranışının doğruluğunun, çatlak gelişmesi ve kırılma mekanizması dışında, MAT_015_JOHNSON_COOK (Hub ve Komenda, 2009) ile aynı olması ve işlem gücü gerekliliği arasında optimum seviyeyi sunan MAT_098_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK malzeme modeli olarak seçilmiştir (Patton ve Hart, 2024).

Bal peteği yapısı için, MAT_024_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY seçilmiştir. İşlem gücü ihtiyacının düşük olması, bükülme ve ezilme gibi durumlar için kullanılan bu kart, bal peteği yapısının sergileyeceği davranış göz önünde bulundurulunca en uygunu olarak bulunmuştur (Gunes vd., 2019). Tablo 6’da izotropik malzeme özellikleri verilmiştir.

Tablo 6. Sayısal modellemede kullanılan izotropik malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri (Hub ve Komenda, 2009; Gunes vd., 2019).

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı
Armox 500	8129	200	0.30
Kurşun	11350	13.8	0.42
Bakır	8912	172.1	0.33
Bal Peteği	2730	70	0.33
Alüminyum 3003 H-19			
Bal Peteği Yüzü	2713	68.9	0.33
Alüminyum 1100 H-14			

Lamine edilmiş Kevlar Plakaların malzeme modeli için mikro-mekanik tabanlı, MAT_058_SOLID_LAMINATED_COMPOSITE_FABRIC malzeme modeli kullanılmıştır. Bu materyal modeli, malzemenin üç eksendeki özelliklerini ve hasar için dayanım kriterlerini kullanmaktadır ve aynı zamanda hasarı belirlerken bu kriterlerin her birini kontrol edebilmektedir. Literatürde (Tepedüzü ve Karakuzu, 2019) bulunan malzeme özelliklerine ilave olarak yarı statik batma deneyi gerçekleştirilip, normal ekseninde batma direnci ve basınca bağlı kırılma değerleri hesaplanmıştır. Kevlar 29/epoksi ortotropik malzeme özellikleri Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Kompozit laminat sayısal modele ait ortotropik malzeme sabitleri (Tepedüzü ve Karakuzu, 2019).

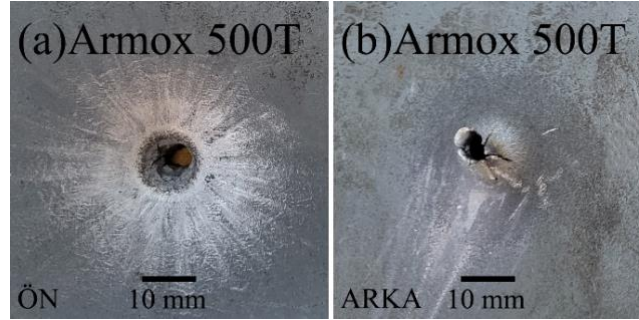
Elastisite Modülü X (GPa)	Elastisite Modülü Y (GPa)	Elastisite Modülü Z (GPa)
17.20	17.20	10.40
Kayma Modülü XY (GPa)	Kayma Modülü YZ (GPa)	Kayma Modülü ZX (GPa)
5.50	3.30	3.30
Poisson Oranı XY	Poisson Oranı XZ	Poisson Oranı YZ
0.20	0.12	0.12

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Deneysel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması

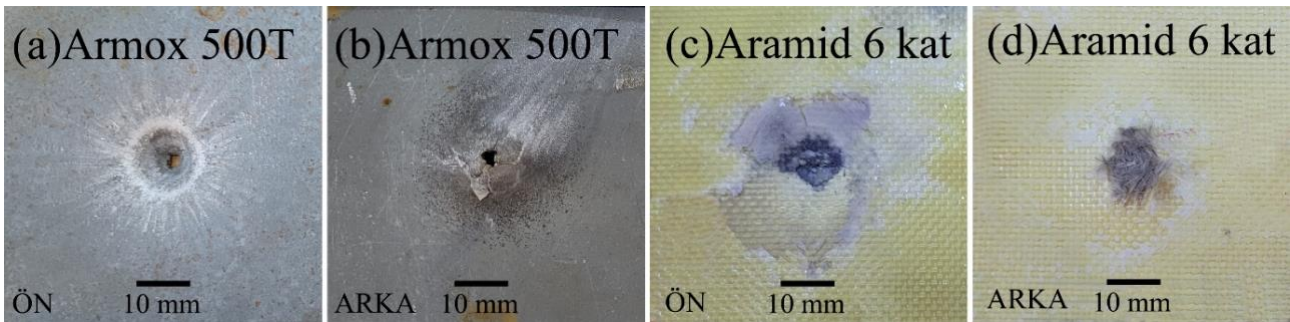
Kalınlığı 4 mm ve ağırlığı 2130 g olan 250×250 mm’lik Armox 500T çeliği zırh plakasının balistik test sonucu Şekil 4’ de verilmiştir. Sonlu elamalar analiz sonucu ise Şekil 8a’ da verilmiştir. Analiz neticesinde ise 500 m/s olarak belirlenmiştir (Şekil 9). Test sonuçlarından görüldüğü üzere 4 mm kalınlığındaki Armox 500T’den oluşan tek katmanlı zırh plakası 7.62 tam metal kaplama

mermisine karşı balistik dayanım gösterememiş, test tam delinme olarak sonuçlanmıştır (Şekil 4a, b). Plakanın arka yüzeyinde ise taç yaprak oluşumunun görüldüğü tam penetrasyon gerçekleşmiştir (Şekil 4b).



Şekil 4. 4mm Armox 500T çeliği zırh plakasının balistik test sonucu.

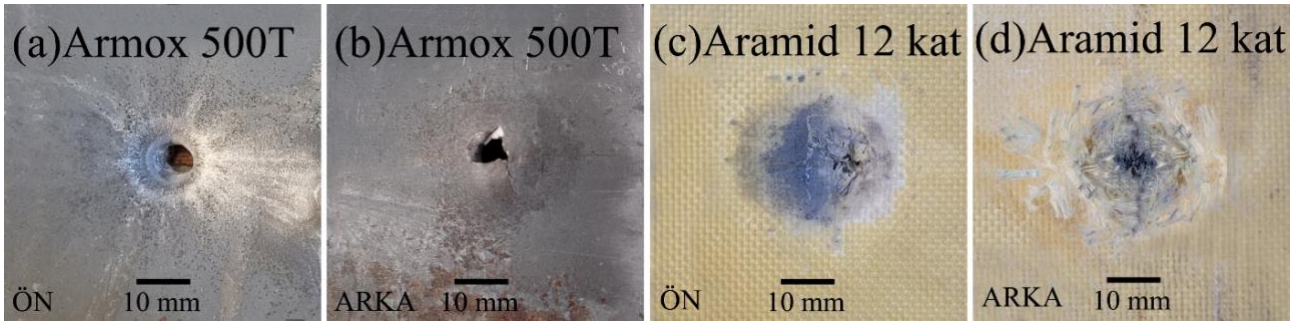
Toplam kalınlığı 6.7 mm ve toplam ağırlığı 2310 g olan 250×250mm’lik Armox 500T ve 6 kat Aramid /epoksi laminat kompozit plakalarından oluşan zırh yapısının balistik test sonucu Şekil 5’te verilmiştir. Bu hibrit plaka 4A plakası ile karşılaştırıldığında ağırlık artışı %8.5’tir. Analiz neticesinde mermi çıkış hızı 435 m/s olarak belirlenmiştir (Şekil 9). Sonuçlardan görüldüğü üzere 4 mm kalınlığındaki Armox 500T ve 6 kat Aramid /epoksi laminat kompozit plakalarından oluşan çoklu katmanlı zırh plakası 7.62 tam metal kaplama mermisine karşı balistik dayanım gösterememiş test tam delinme olarak sonuçlanmıştır (Şekil 5 a-d). Aramid /epoksi laminat plakanın arka yüzeyinde liflerin parçalanması ve kırılması şeklinde görülen tam penetrasyon durumu gerçekleşmiştir (Şekil 5c, d). Sonlu elemanlar analizi neticesi test verilerini doğrulamıştır (Şekil 8b).



Şekil 5. 4mm Armox 500T ve 6 kat Aramid /epoksi laminat kompozit zırh plakasının balistik test sonucu.

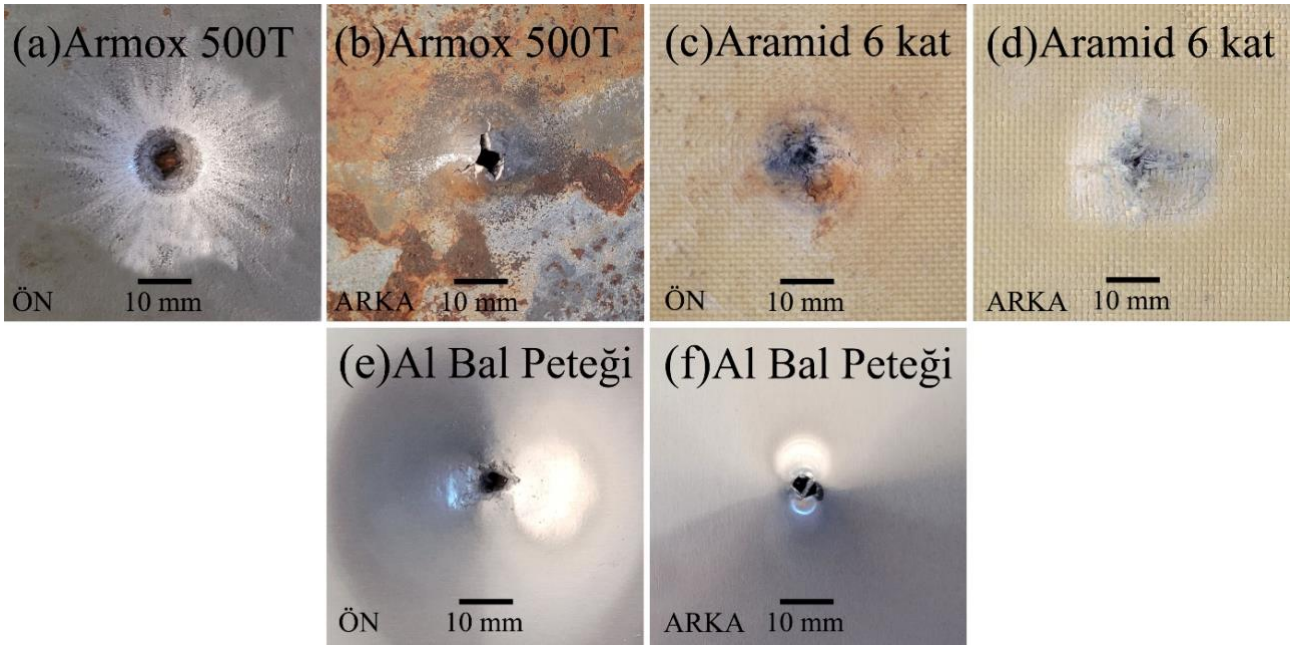
Toplam kalınlığı 9.4mm ve toplam ağırlığı 2480 g olan 250×250 mm’lik Armox 500T ve 12 kat Aramid /epoksi laminat kompozit plakalarından oluşan zırh yapısının balistik test sonucu Şekil 6’da verilmiştir. Bu yapıdaki ağırlık artışı 4A monolitik plaka ile kıyaslandığında %16.4’ tür. Analiz neticesinde mermi çıkış hızı 365 m/s olarak belirlenmiştir (Şekil 9). Sonuçlardan görüldüğü üzere 4 mm kalınlığındaki Armox 500T ve 12 kat Aramid /epoksi laminat kompozit plakalarından oluşan

çoklu katmanlı zırh plakası 7.62 tam metal kaplama mermisine karşı balistik dayanım gösterememiş test tam delinme olarak sonuçlanmıştır (Şekil 6 a-d). Aramid /epoksi laminat plakanın arka yüzeyinde liflerin parçalanması ve kırılması şeklinde görülen tam penetrasyon durumu gerçekleşmiştir (Şekil 6c, d). Sonlu elemanlar analizi neticesi test verilerini doğrulamıştır (Şekil 8c). 4A numunesi ile kıyaslandığında aramid/epoksi katmanların zırh çeliği arkasında kullanılması ile 4A6K ve 4A12K numunelerinin enerji sönümlenme değerleri artmıştır (Tablo 8). Literatürde benzer neticeler elde edilmiştir. Kompozit levhaların, zırh çeliği malzemelerinin arka yüzeyinde kullanılması balistik artık hızların düşmesine ve neticesinde absorbe edilen enerji miktarlarının artışına neden olmuştur (Palta vd., 2018).



Şekil 6. 4mm Armox 500T ve 12 kat Aramid /epoksi laminat kompozit zırh plakasının balistik test sonucu.

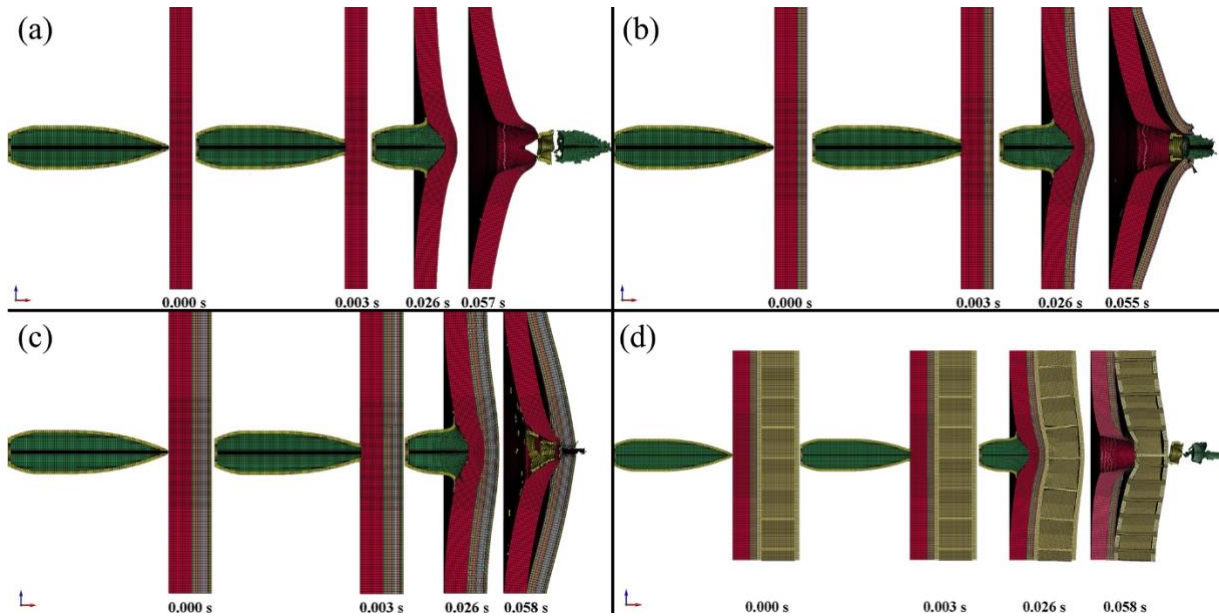
Toplam kalınlığı 16.7 mm ve toplam ağırlığı 2700 g olan 250×250mm’lik Armox 500T, 6 kat Aramid /epoksi laminat kompozit ve 10 mm Alüminyum bal peteğinden oluşan zırh yapısının balistik test sonucu Şekil 7’de verilmiştir. Bu hibrit zırh plakasının ağırlık artışı ise 4A ile mukayese edildiğinde %26.8 olmuştur. Analiz neticesinde mermi çıkış hızı 255 m/s olarak belirlenmiştir (Şekil 9). Sonuçlardan görüldüğü üzere 4 mm kalınlığındaki Armox 500T ve 6 kat Aramid /epoksi laminat kompozit plakalarından oluşan çoklu katmanlı zırh plakası 7.62 tam metal kaplama mermisine karşı balistik dayanım gösterememiş test tam delinme olarak sonuçlanmıştır (Şekil 7 a-d). Sonuçlardan görüldüğü üzere 4 mm kalınlığındaki Armox 500T, 6 kat Aramid /epoksi laminat kompozit ve 10 mm Alüminyum bal peteği içeren hibrit zırh plakası 7.62×51 mm tam metal kaplama mermisine karşı balistik dayanım gösterememiş test tam delinme olarak sonuçlanmıştır (Şekil 7 a-f). Aramid /epoksi laminat plakanın arka yüzeyinde liflerin parçalanması ve kırılması şeklinde görülen tam penetrasyon durumu gerçekleşmiştir (Şekil 7c, d). Alüminyum bal peteği plakada ise tıpkı çelik katmanda olduğu gibi mermi çıkış tarafında taç yaprak hasar modu oluşmuştur (Şekil 7f). Tam delinme hasar modu hibrit yapıda sonlu elemanlar analizi neticeleri ile doğrulanmıştır (Şekil 8d). Bal peteğinin hibrit yapıya eklenmesi ile monolitik (4A) ve ikili hibrit (4A6K) yapıya nazaran sönümlenen enerji miktarında artış sağlanmıştır (Tablo 8). Literatürde alüminyum bal peteği yapıların balistik darbe enerji sönümlemede olumlu etkiye sahip olduğu raporlanmıştır (Rathod vd., 2022).



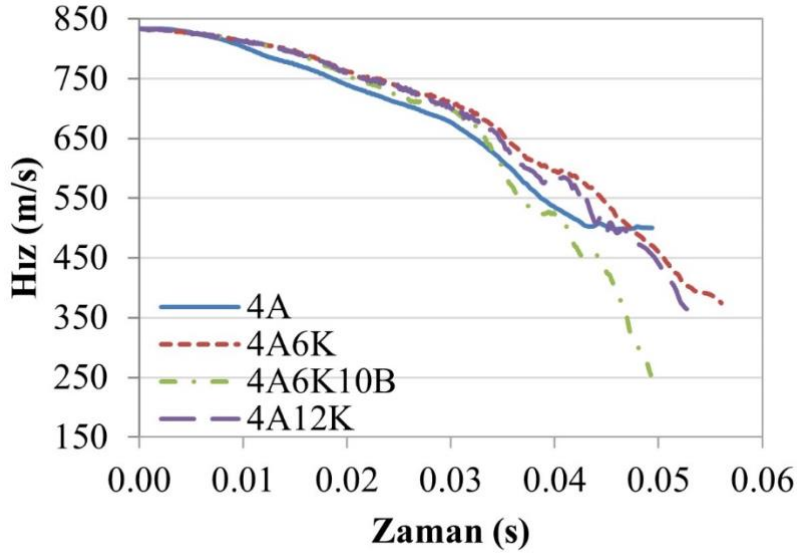
Şekil 7. 4mm Armox 500T, 6 kat Aramid /epoksi laminat kompozit ve 10mm Alüminyum bal peteği zırh plakasının balistik test sonucu.

Tablo 8. Balistik test plakalarının deneysel ve sayısal sonuç detayları.

Kod	Namlu Çıkış hızı (m/s)	Artık Hız (m/s)		Sönümlenen Enerji (J)	
		Deneysel	Sayısal	Deneysel	Sayısal
4A		474	500	2365	2244
4A6K	847±10	412	435	2629	2535
4A12K		346	365	2869	2804
4A6K10B		242	255	3162	3131



Şekil 8. Sonlu elemanlar analizi neticeleri (a) 4mm Armox 500T çeliği zırh plakasının balistik test sonucu, (b) 4mm Armox 500T ve 6 kat Aramid /epoksi laminat, (c) 4mm Armox 500T ve 12 kat Aramid /epoksi laminat, (d) 4mm Armox 500T, 6 kat Aramid /epoksi laminat kompozit ve 10mm Alüminyum bal peteği.



Şekil 9. Mermi başlangıç ve artık hız-zaman grafiği.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada Armox 500T zırh çeliği, Aramid /epoksi laminat kompoziti ve Alüminyum bal peteği malzemelerinin tekli, çoklu ve hibrit zırh yapıları çeşitli kombinasyonlarla bir araya getirilmiştir. Oluşturulan zırh plakalarının balistik darbe yüklerine karşı hasar dirençleri incelenmiştir. Zırh plakalarının yüksek hızlı darbe yükleri altındaki davranışları araştırmacılar açısından oldukça önem arz eden bir konudur. Monolitik çelik plaka ve hibrit çelik, kompozit ve bal peteği katmanlardan oluşan çoklu zırh plakaları 7.62 x 51 mm tam metal mermi (FMJ) mermi tehdidine karşı balistik koruma sağlamamış, fakat hibritleşme test plakalarında sönmülenen enerji miktarını artırmıştır. Hibritleşme ile elde edilen enerji sönmüleme değerlerindeki artış, plakaların ağırlığındaki artışa göre daha yüksek çıkmıştır. Balistik koruma sağlamak amacıyla ilerleyen çalışmalarda kompozit katman sayısında artış sağlanarak testlerin devam etmesi planlanmaktadır.

Bu konu hakkında daha sonra çalışma yapmak isteyen araştırmacılar için balistik testlerde zırh delici mermi kullanımını ayrıca mermi eksenine göre plakaların farklı açılarla konumlandırılarak balistik testlerin gerçekleştirilebileceğini öneririz.

Teşekkür

Bu çalışma Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Birimi 2023-020 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. ZSR Patlayıcı San. A.Ş. firmasına poligonlarını kullandığı ve iş birliği yaptığı için teşekkürlerimizi sunarız.

Yazarlar, Ansys ve LS-DYNA desteğini dikkate alarak Dr. Yılmazçoban'ın "İKY Araştırma Grubu" nun çözüm ortağı olan "Numesys, Türkiye" ye teşekkür ederler.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Bekci, M. L., Canpolat, B. H., Usta, E., Güler, M. S., and Cora, Ö. N. (2021). Ballistic performances of Ramor 500 and Ramor 550 armor steels at mono and bilayered plate configurations. *Engineering Science Technology, an International Journal*, 24(4), 990-995.
- Coufal, V., Křest'an, J., and Vnouček, M. (2022). Ballistic Resistance of ARMOX Advance according to NATO standard AEP-55 STANAG 4569. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Da Silva, M., Stainer, D., Al-Qureshi, H., and Hotza, D. (2014). Ceramic armors for ballistic applications: a review. *Cerâmica*, 60, 323-331. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132014000300003>
- De Oliveira Braga, F., Da Luz, F. S., Monteiro, S. N., and Lima Jr, É. P. (2018). Effect of the impact geometry in the ballistic trauma absorption of a ceramic multilayered armor system. *Journal of materials research technology*, 7(4), 554-560. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.06.019>
- Garašić, I., Jurica, M., Ilkić, D., and Barišić, A. (2019). Determination of ballistic properties on ARMOX 500T steel welded joint. *Engineering Review: Međunarodni časopis namijenjen publiciranju originalnih istraživanja s aspekta analize konstrukcija, materijala i novih tehnologija u području strojarstva, brodogradnje, temeljnih tehničkih znanosti, elektrotehnike, računarstva i građevinarstva*, 39(2), 186-196.
- Göçmen, Y., Erdogan, C., and Yalçinkaya, T. (2023). A numerical ballistic performance investigation of Armox 500T steel through ductile damage models. *Engineering Fracture Mechanics*, 292, 109658.
- Gunes, R., Arslan, K., Apalak, M. K., and Reddy, J. N. (2019). Ballistic performance of honeycomb sandwich structures reinforced by functionally graded face plates. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 21(1), 211-229. <https://doi.org/10.1177/109963621668946>
- Hub, J., and Komenda, J. (2009). Ballistic's Resistance of Steel Plate Hardox upon Impact of Non Penetrating Projectiles. *Advances in Military Technology*, 4(2), 79-91.
- Iqbal, M. A., Senthil, K., Sharma, P., and Gupta, N. (2016). An investigation of the constitutive behavior of Armox 500T steel and armor piercing incendiary projectile material. *International Journal of Impact Engineering*, 96, 146-164.
- Kędzierski, P., Morka, A., Sławiński, G., and Niezgoda, T. (2015). Optimization of two-component armour. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 63(1).
- Kumlu, U., AKAR, M. A., Başer, D., Hükümdar, Ö., and Karaçor, B. Ballistic evaluation of armor plates at different angles. In (pp. 230).

- Mao, K., Toussaint, G., Komrakova, A., and Hogan, J. D. (2024). High-velocity impact failure modeling of Armox 500T steel: Model validation and application to structural design. *International Journal of Impact Engineering*, 183, 104790.
- Palta, E., Gutowski, M., and Fang, H. (2018). A numerical study of steel and hybrid armor plates under ballistic impacts. *International Journal of Solids Structures*, 136, 279-294. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.12.021>.
- Patton, E. G., and Hart, R. J. (2024). Experimental and computational investigation into the damage mechanisms in composite metal hybrid panels subjected to high pressure blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 190, 104970. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2024.104970>.
- Peng, L., Tan, M., Zhang, X., Han, G., Xiong, W., Al Teneiji, M., and Guan, Z. (2022). Investigations of the ballistic response of hybrid composite laminated structures. *Composite Structures*, 282, 115019. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115019>.
- Paman, A., Sukumar, G., Ramakrishna, B., and Madhu, V. (2020). An optimization scheme for a multilayer armour module against 7.62 mm armour piercing projectile. *International Journal of Protective Structures*, 11(2), 185-208.
- Pirvu, C., and Deleanu, L. (2018). Ballistic testing of armor panels based on aramid. In *Ballistics*. IntechOpen.
- Popławski, A., Kędzierski, P., and Morka, A. (2020). Identification of Armox 500T steel failure properties in the modeling of perforation problems. *Materials Design*, 190, 108536.
- Rathod, S., Khaire, N., and Tiwari, G. (2022). A comparative study on the ballistic performance of aramid and aluminum honeycomb sandwich structures. *Composite Structures*, 299, 116048. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116048>.
- Sabet, A. R., Beheshty, M. H., and Rahimi, H. (2009). Experimental study of sharp-tipped projectile perforation of GFRP plates containing sand filler under high velocity impact and quasi-static loadings. *Polymer Composites*, 30(10), 1497-1509.
- Saleh, M., Luzin, V., Kariem, M. M., and Ruan, D. (2016). Analysis of the residual stress in ARMOX 500T armour steel and numerical study of the resultant ballistic performance. *Residual Stresses*, 437.
- Senthil, K., Iqbal, M. A., and Gupta, N. (2017). Ballistic resistance of mild steel plates of various thicknesses against 7.62 AP projectiles. *International Journal of Protective Structures*, 8(2), 177-198.
- SSAB, (2024). <https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/files/en/armox/armox-protectionsteel-in-buildings-en.pdf?m=20170619110513>, Erişim Tarihi: 28 Şubat 2024.
- Stewart, J. K. (1985). Ballistic resistant protective materials—NIJ standard 0108.01. Washington: National Institute of Justice.
- Tepeduzu, B., and Karakuzu, R. (2019). Ballistic performance of ceramic/composite structures. *Ceramics International*, 45(2), 1651-1660. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.042>.
- Valpolini, P. (2013). Passive armour: the final barrier. *Supplement to Armada Int*, 37(2), 22-28.
- Yeter, E. (2019). Damage resistance investigation of Armox 500T and Aluminum 7075-T6 plates subjected to drop-weight and ballistic impact loads. *Sakarya University Journal of Science*, 23(6), 1080-1095.

In Vitro Antiproliferative, Antibacterial, and Anti-Angiogenic Studies of Triethanolamine-Based Salts

Hüseyin AKBAŞ^{1*}, Seçil ERDEN TAYHAN², Sema BİLGİN³

Abstract

The triethanolammonium (TEA) cation associated with the anion cyclopropanecarboxylate, mercaptoacetate, trichloroacetate, and 4-dodecylbenzenesulfonate led to the formation of TEA-based salts. The antibacterial activity of the TEA salts was examined against some bacteria and the obtained results were used to calculate minimal inhibitory concentrations (MICs) values. Additionally, the antiproliferative activities of TEA salts were examined *in vitro* on breast cancer cell line. Furthermore, *in vitro* scratch assay was performed by HUVECs (human vascular endothelial cell line) to assess the anti-angiogenic effect of these salts. These compounds did not dramatically differentiate the cell viability of cancer cells. On the other hand, it was demonstrated that TEA salts blocked human endothelial cell migration slightly. Therefore, these compounds were determined to have a limited ability to inhibit angiogenesis.

Keywords: Anti-angiogenic effect, Antiproliferative effect, Antibacterial effect, Triethanolammonium salts.

Trietanolamin Esash Tuzların In Vitro Antiproliferatif, Antibakteriyel ve Anti-Anjiyojenik Çalışmaları

Öz

Siklopropankarboksilat, merkaptoasetat, trikloroasetat ve 4-dodesilbenzenesülfonat anyonları ile trietanolamonyum (TEA) katyonu TEA esash tuzların oluşumuna yol açtı. TEA tuzlarının antibakteriyel aktivitesi bazı bakterilere karşı incelendi ve elde edilen sonuçlar minimum inhibitör konsantrasyon (MİK) değerlerinin hesaplanmasında kullanıldı. Ek olarak, TEA tuzlarının antiproliferatif aktiviteleri meme kanseri hücre hattı üzerinde *in vitro* olarak incelendi. Ayrıca, bu tuzların anti-anjiyojenik etkisini değerlendirmek için HUVEC'ler (insan vasküler endotel hücre hattı) tarafından *in vitro* çizik analizi yapılmıştır. Bu bileşikler, kanser hücrelerinin hücre canlılığını kayda değer düzeyde değiştirdi. Öte yandan TEA tuzlarının insan endotel hücre göçünü bir miktar engellediği gösterildi. Dolayısıyla, bu bileşiklerin anjiyogenezi engelleme konusunda sınırlı yeteneğe sahip olduğu belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Anti-anjiyojenik etki, Antiproliferatif etki, Antibakteriyel etki, Trietanolamonyum tuzları.

¹Tokat Gaziosmanpaşa University, Science and Arts Faculty, Department of Chemistry, Tokat, Türkiye, huseyin.akbas@gop.edu.tr

²Tokat Gaziosmanpaşa University, Faculty of Pharmacy, Department of Pharmaceutical Biotechnology, Tokat, Türkiye, seçil.erden@gop.edu.tr

³Tokat Gaziosmanpaşa, Tokat Vocational School of Health Services, Department of Medical Laboratory Techniques, Tokat, Türkiye, sema.bilgin@gop.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 04.03.2024

Kabul/Accepted: 18.07.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Introduction

Protatranes, or TEA salts, are representative of a class of compounds known as atranes, which consist of $[\text{NH}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_3]^+$ cations and anions of protic acid (X^-) (Voronkov et al., 2009; Voronkov et al., 2014; Kondratenko et al., 2016; Gruzdev et al., 2018). Research has demonstrated that the conversion of biologically active carboxylic acids into their TEA salts increases their biological activity and broadens their action spectrum (Voronkov et al., 2002; Voronkov and Baryshok, 2010; Adamovich et al., 2018; Adamovich and Mirskova, 2018; Kondratenko and Kochina, 2021). Due to these properties, they have found wide application in medicine and agriculture as drugs with a broad spectrum of action and growth-promoting drugs. As an immunomodulator and adaptogen, TrekrezanTM (Cresacin) drug is composed of the TEA salt of 2-methylphenoxyacetic acid (Voronkov et al., 2007; Antuganov et al., 2019). Apart from that, there are cresacin's analogs chlorocresacin (triethanolammonium 2-methyl-4-chlorophenoxyacetate) (Mirskova et al., 2010), and new water-soluble aspirin analogs (ethanolammonium acetylsalicylate) without side effects (Adamovich et al., 2012). Miranda et al. (2019) developed a method for improving the biopharmaceutical properties of Furosemide, a loop diuretic widely used to treat hypertension and edema associated with kidney, liver, and heart failure. The drug and triethanolamine were combined to obtain a pharmaceutical salt, which was characterized. In addition, the TEA of 1-propylimidazole-4,5-dicarboxylic acid has been shown to have anticonvulsant properties. The acid itself has convulsant properties (Brusina et al., 2018).

The biological activities of TEA salts against some yeasts and fungi were also investigated (Mirskova et al., 2003; Mirskova et al., 2008; Akbaş et al., 2020). Alcohol yeast *Saccharomyces cerevisiae* is effectively stimulated by TEA salts (Privalova et al., 2017). Kondratenko et al. (2017) investigated the biological activities of TEA salts of biologically effective carboxylic acids (cinnamic, benzoic, oxalic, malonic, succinic, salicylic and citric acids) against *Rhizopus oryzae* fungus and caused an boost in the biomass of the fungus by 8-24%. TEA salts of cinnamic, benzoic and malonic acids were found to have a positive effect on seed germination and growth characteristics of cress (*Lepidium sativum* L.) sprouts (Kondratenko et al., 2020), and these salts were reported to exhibit selective activity against *Staphylococcus aureus* bacteria (Kondratenko et al., 2020; Lukyanova et al., 2020).

In the present study, the TEA salts consisting of tris(2-hydroxyethyl)ammonium cation $\{[\text{NH}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_3]^+\}$ and anions of different organic acids have been obtained, and these are tris(2-hydroxyethyl)ammonium cyclopropanecarboxylate (**1**), tris(2-hydroxyethyl)ammonium 2-mercaptoacetate (**2**), tris(2-hydroxyethyl)ammonium 2,2,2-trichloroacetate (**3**) and tris(2-hydroxyethyl)ammonium 4-dodecylbenzenesulfonate (**4**). The microdilution method was adopted to

examine the antibacterial activities of TEA salts for some gram-positive and gram-negative bacteria. Additionally, the antiproliferative effects of TEA salts on MDA-MB-231, one of the most commonly used breast cancer cell lines in medical exploration, were examined *in vitro*. In addition, to determine whether TEA salts have an effect on angiogenesis, a preliminary *in vitro* scratch assay was performed. Human umbilical cord vein endothelial cells (HUVECs) were used in this analysis.

2. Materials and Methods

2.1. Chemicals

Triethanolamine, cyclopropanecarboxylic acid, mercaptoacetic acid, trichloroacetic acid and 4-dodecylbenzenesulfonic acid, MTT (3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyltetrazolium bromide), 5-fluorouracil were purchased from commercial sources and used without further purification. All of other cell culture reagents were commercially obtained from Biological Industries.

2.2. Syntheses of TEA Salts

The TEA salts (**1-4**) have previously been reported (Odinokov et al., 1984, Toshimutu 1994, Akyoshi et al., 1994, Environmental Protection Agency 2014). These salts were synthesized from stoichiometric amounts of the triethanolamine as cation and the different acids (cyclopropanecarboxylic acid, mercaptoacetic acid, trichloroacetic acid and 4-dodecylbenzenesulfonic acid) as anions. The synthesized salts were stored in a vacuum oven at 80°C for 48 h to remove excess moisture formed during the reaction, and the dried salts were sealed with laboratory parafilm to prevent moisture contamination.

2.3. Determination of TEA Salts' Antiproliferative Effects

The antiproliferative effects of TEA salts on the MDA-MB-231 breast cancer cell line were studied by MTT analysis. MDA-MB-231 breast cancer cells were cultivated in Dulbecco's Modified Eagle's Medium (DMEM) with 10% fetal bovine serum (FBS) for this analysis. 5×10^4 cells/ml of cultured cells were seeded in 96-well plates and incubated overnight at 37°C in a humidified atmosphere containing 5% CO₂. They were then treated with 11 different concentrations of TEA salts (0.05-50 µg/ml) for 24h and 48h. A stock solution of the TEA salts was prepared in DMSO (final concentration is <0.1% in culture medium) and filter sterilized. 5-Fu was chosen as the positive control reagent due to its widespread use in conventional chemotherapy. The medium used in the

plate was taken, and a medium containing 10% (v/v) MTT was added to the cells. The cells were incubated for 3h in a 5% CO₂ incubator at 37 °C in the dark. At the end of the 3h incubation, the medium containing MTT was withdrawn from the cells, and the formed formazan crystal moieties were dissolved by adding DMSO. Cell culture plates were read in a microplate reader (Tecan, Switzerland) at a wavelength of 570 nm, and absorbance values were recorded. Using the commonly known formula, the percentage of viable cells was calculated (İnan et al., 2018).

2.4. Determination of Anti-Angiogenic Properties of TEA Salts

In vitro scratch assay was performed to assess the activity of TEA salts that affect angiogenesis by HUVECs (human vascular endothelial cell line) (İspir et al., 2019). In this work, firstly, the cell viability test was performed to determine the effective dose of compounds on HUVECs by MTT analysis which is described in detail above. Then taking into account the specified dose, *in vitro* scratch assay described below was applied. HUVECs were plated (5×10^4 cells/well) on six well culture dishes in an appropriate culture medium. When cells reached more than 80 % confluency, the cell monolayer was wounded by a sterile 200µl (yellow) pipette tip and all the wells were rinsed with phosphate buffer saline (PBS). Then cells were treated with the most effective dose (25µg/ml) of TEA salts which was determined by MTT cell viability assay in the previous experimental stage. Photographs were taken with a inverted light microscope every 24h for two days after the application of the salts and the percentage of the cell migration was calculated. These values were compared with negative control and evaluated whether the TEAs had antiangiogenic potential.

2.5. Antibacterial Susceptibility Testing

To find new antimicrobial drugs to utilize against some bacteria, the antibacterial properties of TEA salts were investigated in the current work. The MICs were studied to learn more about the antibacterial activity by MIC dilution methods (Erden Tayhan et al., 2018). The compounds **1-4** were evaluated for their *in vitro* antibacterial activities against two gram-negatives (G-), *Klebsiella pneumonia* and *Pseudomonas aeruginosa*, and one gram-positive (G+), *Staphylococcus aureus*. Bacterial strains of *Staphylococcus aureus* [ATCC 25923 (G+)], *Pseudomonas aeruginosa* [ATCC 27853 (G-)], *Klebsiella pneumonia* [ATCC 15380 (G-)] were utilized. Microorganisms were cultivated in the exponential phase in nutritional broth at 37°C for 18 h and then were diluted with new broth medium to a final concentration of 10^4 CFU ml⁻¹. By calculating the MIC using the microdilution method in a 96-well microtiter plate, *in vitro* antibacterial activity was examined. In sterile 96-well plates with a bacterial broth medium, serial two-fold dilutions of the investigated

substances were prepared in concentrations ranging from 50 mg/ml to 0.392 mg/ml. For 24h, the inoculation plates were incubated at 37°C. Using a microplate reader (Tecan, Switzerland), the optical density of each well was measured at 620 nm after 24h. The bacterial inhibition percentage (IC %) was determined with the commonly known formula (Lavorgna et al., 2019). The tested substances were dissolved in DMSO and then diluted to a 10% DMSO concentration in a nutrient-liquid medium. The solvent control test was used to examine how 10% DMSO affected the growth of bacteria. It was observed that 10% DMSO did not prevent microbial growth. Additionally, the two-fold serial dilution test used in the current experiment caused the concentration of DMSO to fall (the working concentration was 5% and below) steadily. Each test included sterility and growth controls. Three times each of the trials were conducted and the mean results were used.

3. Findings and Discussion

3.1. The Antiproliferative Properties of TEA Salts

MTT cell viability studies revealed that TEA salts had no appreciable impact on cell viability (Figure 1). Only **1** and **4** inhibited cancer cell viability weakly at higher doses (50 and 25 µg/ml) at the first 24h. At the second day, compounds have been shown to lose their antiproliferative effects.

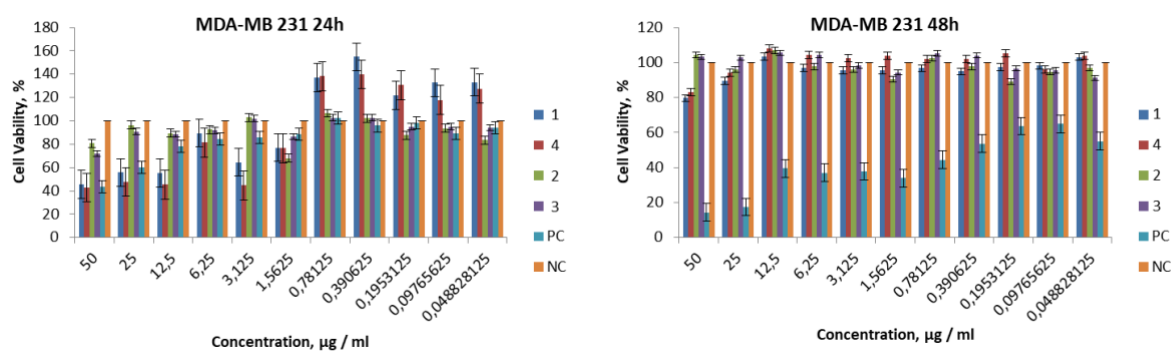


Figure 1. The effect of different concentrations of TEA salts on the viability of MDA-MB-231 at 24h and 48h (PC: positive control – 5Fu, NC: negative control).

Protic molten salts have rarely been tested for anticancer studies (Elmas et al., 2020; Akbaş et al., 2023). It has also been shown that in salts with the same cation, the compounds lose their antiproliferative effects on the second day (Akbaş et al., 2020).

3.2. The Anti-angiogenic Activity of the TEA Salts

In this work, firstly the cell viability test was performed to determine the effective dose of compounds on HUVECs by MTT analysis. As a result, the percentage of cell viabilities was calculated and shown in Figure 2.

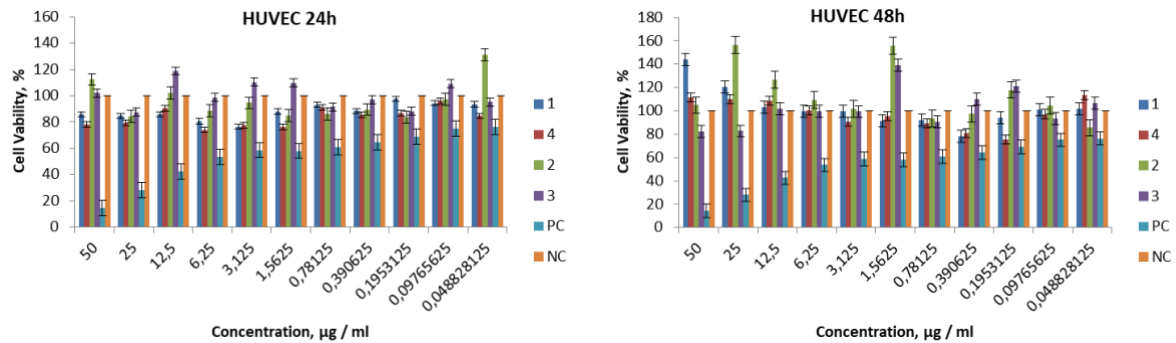


Figure 2. The effect of different concentrations of TEA salts on the viability of HUVEC at 24h and 48h (PC: positive control – 5Fu, NC: negative control).

Subsequently, taking into account the indicated dose (25 µg/ml), the cell migration assay was carried out by *in vitro* scratch analysis to determine whether TEA salts were able to inhibit HUVEC angiogenesis. Representative images and quantitative data were shown in Figure 3 and Figure 4.

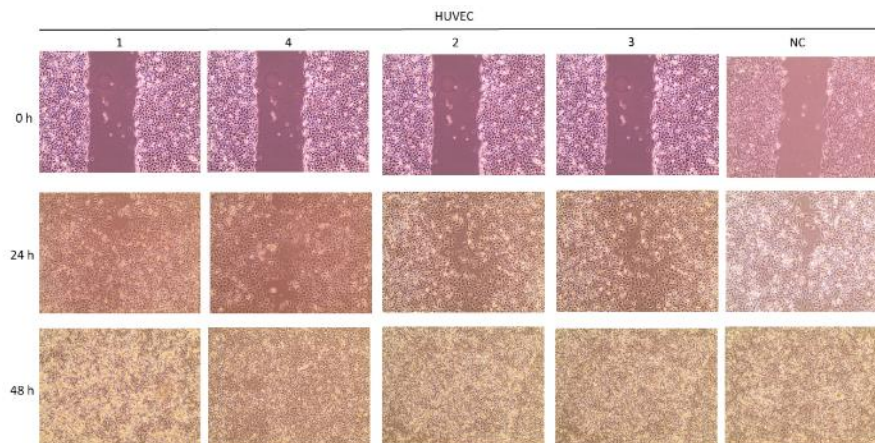


Figure 3. Effect of TEA salts on the migration of HUVEC in wound assay. Wounded monolayers of HUVEC were incubated for 24h and 48h alone (negative control) and in the presence of TEA salts (25 µg/ml). Magnification 4x.

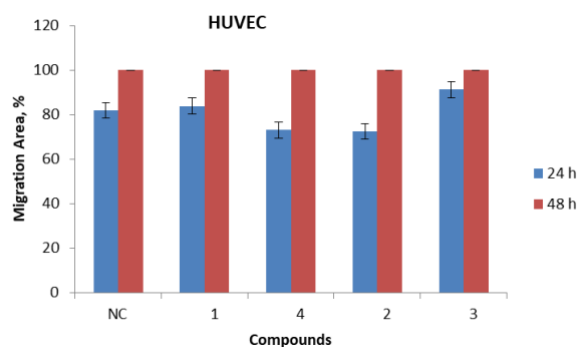


Figure 4. Effect of TEA salts on the migration of HUVEC. Wound healing assay showing inhibition of angiogenesis after 24h and 48h of exposure to TEA salts (25 $\mu\text{g/ml}$).

When Figures 3 and 4 were examined, it was shown that TEA salts (25 $\mu\text{g/ml}$) slightly inhibited HUVEC migration, which is one of the important basic steps in angiogenesis. Therefore, these compounds were determined to have a limited ability to inhibit angiogenesis.

3.3. Antibacterial Susceptibility Testing

To find new potential antimicrobial agents to utilize against some bacteria, the antibacterial activities of the TEA salts were investigated in the current study. Both G+ and G- bacteria's cell growth was suppressed by all of the synthesized compounds. The most active compounds were **2** and **3**, indicating a big reduction in bacterial growth. Additionally, the other salts, **1** and **4**, inhibited cell proliferation more slightly. The calculated percent inhibition of bacterial growth by the TEA salts was plotted and shown in Figure 5.

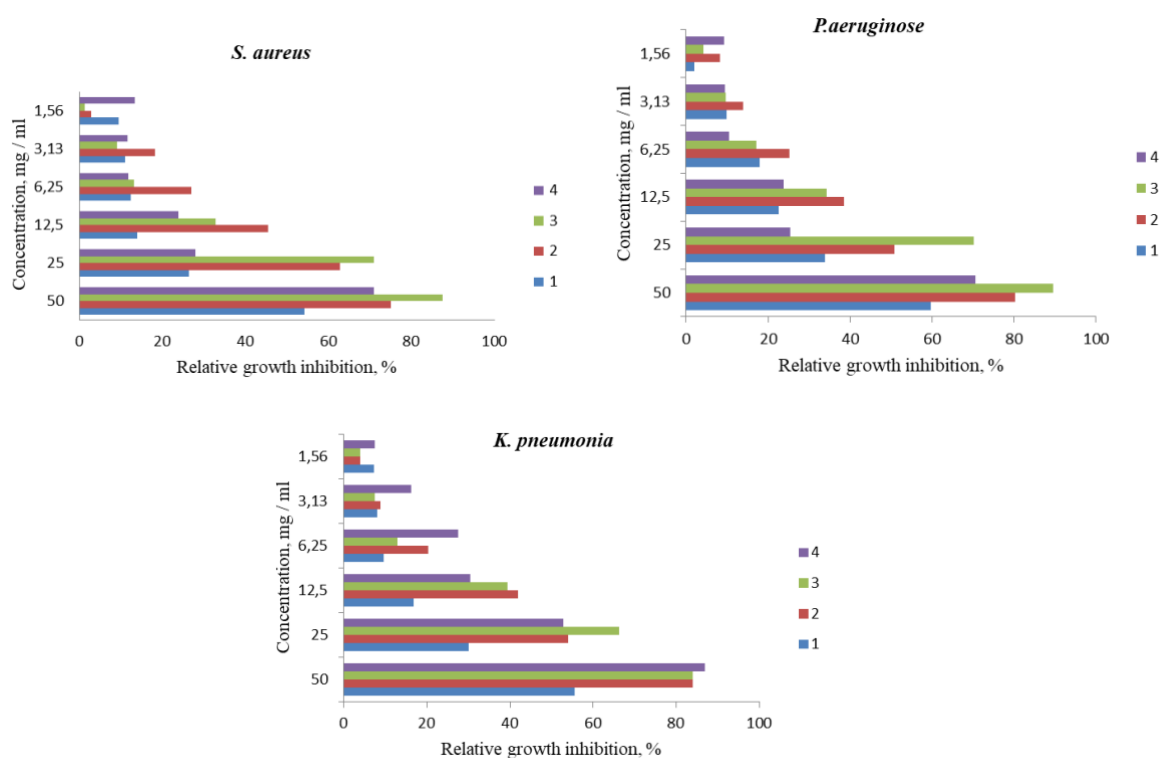


Figure 5. The calculated percent inhibition of *S. aureus* (G+), *P. aeruginosa* (G-) and *K. pneumoniae* (G-) growth by the TEA salts.

Minimum inhibitory concentrations of the compounds against different bacterial strains (MIC values) were reported in Table 1.

Table 1. The determined MIC values (mg/ml) of compounds for ATCC bacterial strains.

Compounds	<i>Staphylococcus aureus</i> (G+)	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> (G-)	<i>Klebsiella pneumoniae</i> (G-)
1	50	50	50
2	25	50	25
3	25	25	25
4	50	50	25

By choosing the appropriate organic cation, it is possible to tune important biological differences in antibacterial properties. Whether the cation is polar or nonpolar affects the MIC values. This can be explained by the fact that cations with high polarity are more likely to remain in an aqueous solution rather than hydrophobic cell membranes and therefore bind themselves to their anions, that is, the ion trapping effect (Trapp et al., 2010; Ferraz et al., 2014). Thus, the relevant salts become trapped in an aqueous solution and hydrolyze. Moreover, salts **1**, **2**, and **3** exhibited a better MIC value compared to salts containing carboxylate anion with long alkyl chain length (Akbaş et al., 2020). With the molecular docking score, the effect of the alkyl chain and the electronegative atom in the anion directly contributed to the antimicrobial activity, which is consistent with the

experimental data. Adding a fluorine atom to an anion increases the highest antimicrobial activity among chlorine, bromine, and iodine (Kumer and Khan, 2021). In addition, almost all of the triethanolammonium salts tested in the literature exhibited noticeable activity against *Staphylococcus aureus* bacteria (Kondratenko et al., 2020). The results indicate that a possible growth inhibition occurs in the presence of salt at a low MIC concentration. It indicates the potential use of the salts used here as antibacterial drugs against resistant strains at very low concentrations.

4. Conclusions and Recommendations

Four triethanolammonium-based salts were synthesized by acid-base neutralization of triethanolamine with organic acids. These TEA salts are soluble in polar solvents (water, alcohol, etc.). The tested TEA salts were promising antibacterial compounds against *S. aureus*, *P. aeruginosa*, *K. pneumoniae*. Furthermore, **2** and **3** were the most effective derivative for inhibiting bacterial growth. The potent antibacterial activity of these four triethanolammonium-based compounds indicates their useful therapeutic application against bacterial infection. Additionally, TEA salts were investigated for their biological activity in cultured breast cancer cell lines. These compounds did not dramatically differentiate the cell viability of cancer cells. Furthermore, it was demonstrated that TEA salts blocked human endothelial cell migration slightly. Especially, **2** and **4** which contained sulfur atoms in their anions inhibited the cell migration into the denuded area more than the negative control. This result is compatible with previous publications showing that inorganic sulfur inhibits the expression and activation of angiogenesis-related genes, such as EGFR, in cancer cells (Ha et al., 2013). These findings provide significant preliminary data for using TEA salts in inhibiting angiogenesis and identifying promising drug candidates for further pharmacological evaluation. In addition, additional research is required to investigate the anti-carcinogenic effects of TEA salts containing inorganic sulfur.

Acknowledgments

This section is where one can acknowledge and thank the individuals and/or institutions who helped with and supported the author(s) with her/his/their research.

Authors' Contributions

Hüseyin Akbaş synthesized triethanolamine-based salts. Seçil Erden Tayhan and Sema Bilgin performed biological activity experiments. Hüseyin Akbaş, Seçil Erden Tayhan, and Sema Bilgin contributed to the writing of the article.

Statement of Conflicts of Interest

There is no conflict of interest between the authors.

Statement of Research and Publication Ethics

The author declares that this study complies with Research and Publication Ethics.

References

- Adamovich, S.N., and Mirskova, A.N., (2018). Synthesis of immunoactive tris(2-hydroxyethyl)ammonium 1-R-indol-3-ylsulfanyl(sulfonyl)acetates. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 91, 469-472.
- Adamovich, S.N., Mirskov, R.G., Mirskova, A.N., and Voronkov, M.G., (2012). Biologically active protic (2-hydroxyethyl) ammonium ionic liquids. Liquid aspirin. *Russian Chemical Bulletin*, 61, 1260-1261.
- Adamovich, S.N., Oborina, E.N., and Mirskova A.N., (2018). Synthesis and pharmacological activity of tris(2-hydroxyethyl)ammonium 4-chlorophenylsulfonylacetate. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 91, 701-705.
- Akbaş, H., Yıldırım, A., Menevşe, Ş., and Gökşen, N., (2020). Antiproliferative and antimicrobial effects of tris(2-hydroxyethyl)ammonium-based protic ionic liquids with some fatty acids. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10, 2021-2027.
- Akbaş, H., Erden Tayhan S., and Bilgin, S., (2023). A novel approach to determine anti-proliferative, anti-migratory and anti-microbial properties of 2-phenylethylammonium carboxylate molecular salts. *Indian Journal of Chemistry*, 62, 207-216.
- Akyoshi, O., Takao, K., Shinichi, K., and Yasuhide, Y., (1994). Shampoos and hair rinses containing thioglycolic acid. *Espacenet*, Patent Number: JPH06116124A.
- Antuganov, D., Timofeev, V., Timofeeva, K., Antuganova, Y., and Kondratenko, Y.A., (2019). Evaluation of protic ionic liquids based on triethanolammonium and tris(hydroxymethyl)methylammonium salts as buffers for ⁶⁸Ga-radiolabelling of PSMA-HBED-CC. *Chemistry Select*, 4, 12524-12527.
- Brusina, M.A., Nikolaev, D.N., Fundamenskii, V.S., Gurzhii, V.V., Zolotarev, A.A., Selitrenikov, A.V., Zevatskii, Y.E., Potapkin, A.M., Ramsh, S.M., and Piotrovskii, L.B., (2018). Water-soluble form of 1-alkyl(aryl)imidazole-4,5-dicarboxylic acids. structure and anticonvulsant activity of the triethanolammonium salt of 1-propylimidazole-4,5-dicarboxylic acid. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 52, 299-303.
- Elmas, G., Okumuş, A., Kılıç, Z., Özbeden, P., Açıık, L., Çağdaş Tunalı, B., Türk, M., Çerçi, N.A., and Hökelek, T., (2020). Phosphorus-nitrogen compounds. Part 48. Syntheses of the phosphazanium salts containing 2-pyridyl pendant arm: Structural characterizations, thermal analysis, antimicrobial and cytotoxic activity studies. *Indian Journal of Chemistry -Section A*, 59, 533-550.
- Environmental Protection Agency, (2014). Amine salts of alkyl (C₈-C₂₄) benzenesulfonic acid (olmethylaminopropylamine, isoprodvlamine, mono-, di-, and teiethanolamine); exemption from the requirement of a tolerance. *Federal Register*, 79, 28444-28447.

- Erden Tayhan, S., Bilgin, S., and Elmastaş, M., (2018). Evaluation of the wound healing potential of teucroside. *International Journal of Chemistry and Technology*, 2, 16-19.
- Ferraz, R., Teixeira, V., Rodrigues, D., Fernandes, R., Prudencio, C., Noronha, J.P., Petrovski, Z., and Branco, L.C., (2014). Antibacterial activity of Ionic Liquids based on ampicillin against resistant bacteria. *RSC Advances*, 4, 4301-4307.
- Gruzdev, M.S., Shmukler, L.E., Kudryakova, N.O., Kolker, A.M., and Safonova, L.P., (2018). Synthesis and properties of triethanolamine-based salts with mineral and organic acids as protic ionic liquids. *Journal of Molecular Liquids*, 249, 825-830.
- Ha, A.W., Hong, K.H., Kim, H.S., and Kim, W.K., (2013). Inorganic sulfur reduces cell proliferation by inhibiting of ErbB2 and ErbB3 protein and mRNA expression in MDA-MB-231 human breast cancer cells. *Nutrition Research and Practice*, 7, 89-95.
- İnan, A., Sünbül, A.B., İkiz, M., Erden Tayhan, S., Bilgin, S., Elmastaş, M., Sayın, K., Ceyhan, G., Köse, M., and İspir, E., (2018). Half-sandwich Ruthenium(II) arene complexes bearing the azo-azomethine ligands: Electrochemical, computational, antiproliferative and antioxidant properties. *Journal of Organometallic Chemistry*, 870, 76-89.
- İspir, E., İkiz, M., Inan, A., Sünbül, A.B., Erden Tayhan, S., Bilgin, S., Köse, M., Elmastaş, M., (2019). Synthesis, structural characterization, electrochemical, photoluminescence, antiproliferative and antioxidant properties of Co(II), Cu(II) and Zn(II) complexes bearing the azo-azomethine ligands. *Journal of Molecular Structure*, 1182, 63-71.
- Kondratenko, Y., Kochina, T., Fundamensky, V., Ignatyev, I., Panikorovskii, T., and Nyanikova G., (2016). Triethanolammonium salicylate-protic alkanolammonium ionic liquid. *Journal of Molecular Liquids*, 221, 1218-1124.
- Kondratenko, Y.A., and Kochina, T.A., (2021). Contribution of the scientific school of academician m.g. Voronkov to the development of the chemistry of biologically active atranes (protatranes and hydrometallatranes) (a review). *Russian Journal of General Chemistry*, 91, 2331-2351.
- Kondratenko, Y.A., Gurzhii, V.V., Panova, G.G., Anikina, L.M., Udalova, O.R., Krutikov, V.I., Ugol'kov, V.L., and Kochina, T.A., (2020). Biological activity of protic ionic liquids based on tris(2-hydroxyethyl)ammonium salts and the crystal structure of tris(2-hydroxyethyl)ammonium malate. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 65, 1407-1415.
- Kondratenko, Y.A., Nyanikova, G.G., Molchanova, K.V., and Kochina, T.A., (2017). Characteristics of protic ionic liquids based on triethanolammonium salts of biologically active carboxylic acids and their impact on the growth properties of the *Rhizopus oryzae* fungus. *Glass Physics and Chemistry*, 43, 445-451.
- Kumer, A., and Khan, M.W., (2021). Synthesis, characterization, antimicrobial activity and computational exploration of ortho toluinium carboxylate ionic liquids. *Journal of Molecular Structure*, 1245, 131087.
- Lavorgna, M., Iacovino, R., Russo, C., Donato, C.D., Piscitelli, C., and Isidori, M., (2019). A new approach for improving the antibacterial and tumor cytotoxic activities of pipemidic acid by including it in trimethyl- β -cyclodextrin. *International Journal of Molecular Sciences*, 20, 416.
- Lukyanova, S.V., Gefan, N.G., Adamovich, S.N., Oborina, E.N., Khaptanova, N.V., Kuznetsov, V.I., Ostyak, A.S., Kosilko, V.S., and Balakhonov S.V., (2020). Study of the effect of a biologically active compound tris(2-hydroxyethyl)ammonium 4-chlorophenylsulfanylacetate on the growth of listeria monocytogenes and staphylococcus aureus. *Acta Biomedica Scientifica*, 5, 47-53.
- Miranda, J.A., Garneró, C., Chattah, A.K., Oliveria, Y.S., Ayala, A.P., and Longhi, M.R., (2019). Furosemide: triethanolamine salt as a strategy to improve the biopharmaceutical properties and photostability of the drug. *Crystal Growth & Design*, 19, 2060-2068.
- Mirskova, A.N., Adamovich, S.N., Mirskov, R.G., and Voronkov, M.G., (2010). Tris-(2-hydroxyethyl)ammonium 2-methyl- and 2-methyl-4-chlorophenoxyacetate serve as effective inhibitors of thrombocyte aggregation and antioxidants. *Doklady Biological Sciences*, 433, 244-246.
- Mirskova, A.N., Levkovskaya, G.G., Mirskov, R.G., and Voronkov, M.G., (2008). Hydroxyalkylammonium salts of organylsulfanyl(sulfonyl)acetic acids-New stimulators of biological processes. *Russian Journal of Organic Chemistry*, 44, 1478-1485.
- Mirskova, A.N., Levkovskaya, G.G., Stupina, A.G., Chkhenkeli, V.A., and Voronkov, M.G., (2003). The effect of tris-(2-hydroxyethyl)ammonium aroxy-, arylthio-, and arylsulfonylacetates on the vital activity of bifidobacteria. *Doklady Biological Sciences*, 390, 239-241.
- Odinokov, S.E., Glazunov, V.P., and Nabiullin, A.A., (1984). Infrared spectroscopic studies of hydrogen bonding in triethylammonium salts. Part 3.-Strong hydrogen bonding. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 2: Molecular and Chemical Physics*, 80, 899-908.

- Privalova, E.A., Tiguntseva, N.P., Adamovich, S.N., Mirskov, R.G., and Mirskova, A.N., (2017). Tris(2-hydroxyethyl)ammonium arylchalcogenylacetates, growth stimulants of alcohol yeast *Saccharomyces cerevisiae*, *Russian Chemical Bulletin*, 66, 1320-1324.
- Toshimitsu, K., (1994). Water-base ink composition for ball-point pen. *Espacenet*, Patent Number: JPH06100826A.
- Trapp, S., Franco, A., and Mackay, D., (2010). Activity-based concept for transport and partitioning of ionizing organics. *Environmental Science and Technology*, 44, 6123-6129.
- Voronkov, M.G., Adamovich, S.N., and Ushakov, I.A., (2014). Aroxyprotatranes: aroxy derivatives of tris-(2-hydroxyethyl)ammonium. *Russian Journal of General Chemistry*, 84, 340-342.
- Voronkov, M.G., Albanov, A.I., Aksamentova, T.N., Adamovich, S.N., Chipanina, N.N., Mirskov, R.G., Kochina, T.A., Vrazhnov, D.V., and Litvinov, M.Y., (2009). Tris(2-hydroxyethyl)ammonium salts: 2,8,9-trihydroprotatranes. *Russian Journal of General Chemistry*, 79, 2339-2346.
- Voronkov, M.G., and Baryshok, V.P., (2010). Atranases as a new generation of biologically active substances. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 80, 514-521.
- Voronkov, M.G., Kolesnikova, O.P., Rasulov, M.M., and Mirskova, A.N., (2007). Pharmacological activity and clinical effects of trecrezan and other tris-(2-hydroxyethyl)ammonium salts of arylheteroacetic acids (A review). *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 41, 244-248.
- Voronkov, M.G., Mirskova, A.N., and Levkovskaya, G.G., (2002). Carcinostatic, protective, and adaptive activities of tris-(2-hydroxyethyl)ammonium salts of arylheteroacetic acids. *Doklady Biological Sciences*, 386, 404-406.

A Comparison of Alternative GIS Data Model Methods for Landslide Susceptibility Mapping with XGBoost and SHAP

Şevket BEDİROĞLU^{1*} 

Abstract

Geographic Information Systems and machine learning algorithms suggest good alternatives for producing landslide susceptibility maps. In the process of producing these maps with machine learning, alternative data model options exist. Success rate of analyses may change according to the preferred data method. In this study, 6 different machine learning models were created by passing different data models with the XGBoost algorithm. Study area is located in the cities of Ordu and Giresun, Turkiye. 14 different factors and related geographic data layers were used. As a result of the study, the most successful model performance was achieved by taking the average values of all pixels of the combined landslide record polygons (Accuracy=0,88, Precision=0,86, F1 score=0,87). SHAP method was applied for better interpretation of machine learning results. The susceptibility map produced with the ideal model, overlapped with 57.556 buildings in the region. The buildings were classified in 4 groups (low, moderate, high, and very high) and mapped, indicating their risk level.

Keywords: Landslide susceptibility mapping, machine learning, SHAP, GIS, geospatial data model.

XGBoost ve SHAP ile Heyelan Duyarlılık Haritalaması İçin Alternatif CBS Veri Modeli Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Öz

Coğrafi Bilgi Sistemleri ve makine öğrenimi algoritmaları, heyelan duyarlılık haritalarının üretilmesi için iyi alternatifler önermektedir. Bu haritaların makine öğrenmesi ile üretilmesi sürecinde alternatif veri modeli seçenekleri mevcuttur. Tercih edilen veri yöntemine göre analizlerin başarı oranı değişebilir. Bu alışmada XGBoost algoritması ile farklı veri modellerini geçerek 6 farklı makine öğrenmesi modeli oluşturulmuştur. Çalışma alanı Türkiye'nin Ordu ve Giresun illerinde bulunmaktadır. 14 farklı faktör ve ilgili coğrafi veri katmanları kullanıldı. Çalışma sonucunda en başarılı model performansı, birleştirilmiş heyelan kayıt poligonlarının tüm piksellerinin ortalama değerleri alınarak elde edilmiştir. Makine öğrenmesi sonuçlarının daha iyi yorumlanması için SHAP yöntemi uygulandı. İdeal model ile üretilen duyarlılık haritası, bölgedeki 57.556 bina ile örtüştü. Binalar 4 grupta (düşük, orta, yüksek ve çok yüksek) sınıflandırılarak risk düzeyleri belirtilerek haritalanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Heyelan duyarlılık haritası, Makine öğrenmesi, SHAP, CBS, Coğrafi veri modeli

¹Gaziantep University, City and Regional Planning Dep., Gaziantep, Turkiye, sbediroglu@gantep.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 05.03.2024

Kabul/Accepted: 28.05.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Introduction

Landslide susceptibility (LS) is the spatial distribution of the probability of the occurrence of landslides as determined by various investigators (Youssef and Pourghasemi, 2021; Constantin et al., 2011). Landslide susceptibility mapping (LSM) is a functional method to avoid and reduce losses from landslide hazards (Hong, 2023). There are many sub-methods for creating LSM, including statistical methods, traditional machine learning (ML) methods, deep learning methods, etc. (Zhao et al., 2022). Due to the increase in flood events, there is a need to implement new models to enhance the prediction capability of flood and landslide hazards (Prasad et al., 2021; Hong et al. 2018). More hybrid and different models are applied in LSM. Each combination gives excellent prediction performance for LS mapping; besides this, further exploration and application of more set-based methods are needed (Chen and Li, 2020; Hong et al., 2020; Abedini et al., 2019; Pham et al., 2019; Wu et al., 2017).

ML and deep learning techniques have been proven to be powerful and promising tools in many geotechnical applications as well as in landslide identification (Wang et al., 2020; Li et al., 2019; Ching and Phoon, 2018; Lo and Leung, 2018; Papaioannou and Straub, 2017). Integration of terrain modelling and GIS analysis provides a toolset for rapid spatial prediction of landslide hazards (Gorsevski et al., 2006). ML methods are popular for detecting landslide areas. ML methods provide support in the process of determining the parameters of where landslide events will occur (Pham et al., 2020).

The quality of training datasets has a crucial influence on the accuracy of LSM (Hong et al., 2020). The performance of LS models is dependent on the number of training samples and their quality. This is more impactful when the training data is scarce (Sameen et al., 2020). As it is difficult to reach landslide records stored in the geographic data format in many parts of the world, these scarce data must be processed correctly. This process is relevant to ML studies for getting more accurate and effective results.

Most of the previous studies focused on the model development process, which consists of adjusting hyperparameters or obtaining hybrid models created by combining several methods (Fanos and Pradhan, 2019; Pradhan and Sameen, 2018). Other researchers have studied several approaches to improve the performance of LS maps (Sameen et al., 2020; Hong et al., 2018; Hussin et al., 2016; Mezaal et al., 2017; Yilmaz, 2010; Nefeslioglu et al., 2008). LS maps were created using machine learning in various scientific studies in Turkey. Orhan et al., 2020 aimed trying different machine learning models for creating LS maps. Akinçi et al., 2020 measured Random Forest performance results for same purpose. Sahin 2022, studied on free and open-source semi-automatic feature engineering tools for creating LS maps. Kavzoglu and Teke 2022, measured performances of ensemble machine learning algorithms.

This paper is structured as follows. Ideal spatial data model was investigated for generating LS maps with Geographic Information Systems (GIS) and XGBoost algorithm. Two different crossover groups were created. In the first group, the presence data of the landslides is classified into groups such as recent, relict(old), or combined. In the second group, while transferring data from GIS dataset to ML, the data was separated into two classes. Central point of the landslide or average of all the pixels in polygon of the landslide record. By crossing three different comparison sample groups, 6 different analysis results were formed. In previous studies, there were fewer studies focusing on the behaviour of LS mapping performance on different data models than in this study. The results of these analyses were evaluated in a comparative manner.

2. Material and Methods

2.1. Study Area

Study area includes Ordu and Giresun cities located in the northeast region of Türkiye. Cities are located between latitudes of 40°13' - 41°08' and longitudes of 36°57' - 39°14' (Figure 1). Ordu city is 6001 km² and Giresun city is 6934 km². The characteristics of these two neighbouring cities such as topography, and land structure are similar.

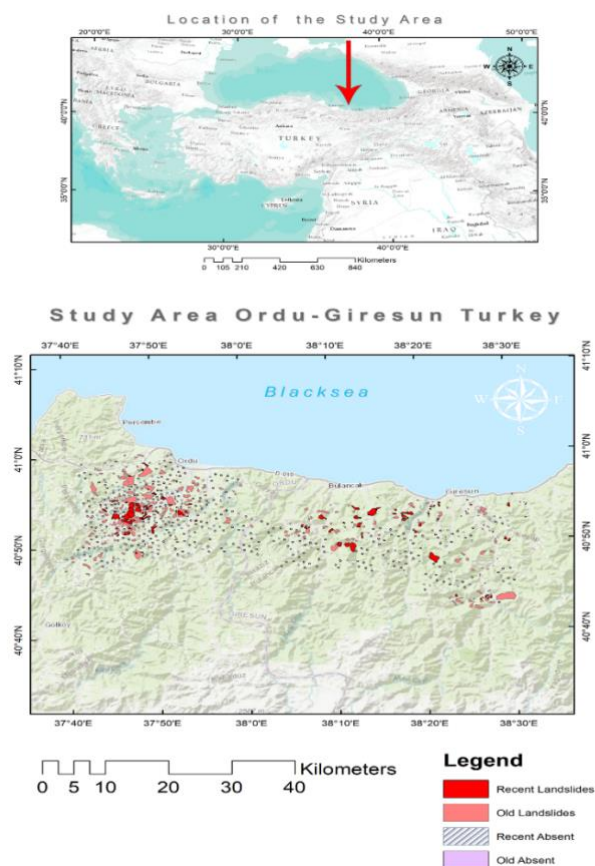


Figure 1. Study area

Ordu and Giresun are coastal cities and the mountains of this region are perpendicular to the sea. The region is rich in streams, and there are streams in all canyons. In the natural vegetation; there are spruce, pine (larice), alder, beech, carp, oak, and chestnut trees. Seedlings of hazelnuts and kiwis dominate agricultural land. According to the Köppen climate classification, the climate in the Black Sea region is classified as oceanic climate (Cfb) and subtropical rainy climate (Cfa) (Orman ve Su İşleri Bakanlığı, 2023). The area is rainy in all seasons and has a temperate climate with the thermal characteristics of the sea. The greatest amount of precipitation occurs during the fall months. The average annual precipitation is 1590 mm and the average number of rainy days is 163 days. The average annual temperature in the region is 14 oC. The region starts at sea level at an altitude of 0 and extends to an altitude of 2000. Land use and active population in the region are changeable due to the season. People live in coastal areas during the winter months and migrate to villages and highland settlements in high-altitude regions in the spring and summer months. Land use in the region is transforming rigidly due to human-made structures. Landslides occur frequently in the region. Figure 2 shows the settlement pattern in an active landslide zone and the studies carried out after the landslide in Ordu / Kabaduz. Due to floods and landslides that occurred in Giresun, 2020 or Ordu, 2023, a significant amount of life and property has been lost.



a- Post-landslide field studies from study area

b- A landslide zone from study area

Figure 2. Landslide risky areas and settlements in study area

2. 2. Methodology Schema

A methodology schema showing all steps of study is given in Figure 3. Python was preferred as programming language because it is compatible with rich ML libraries such as Scikit-Learn. Pandas library was also used. Jupyter-lab platform was used for creating and running ML. Scripts were written in Python language. Brief explanation of methods is given in the sections below. ArcMap was used at the GIS analysis and spatial data visualisation stages. AutoCAD was used for processing a small amount of CAD based data (almost all of the data was provided in GIS format).

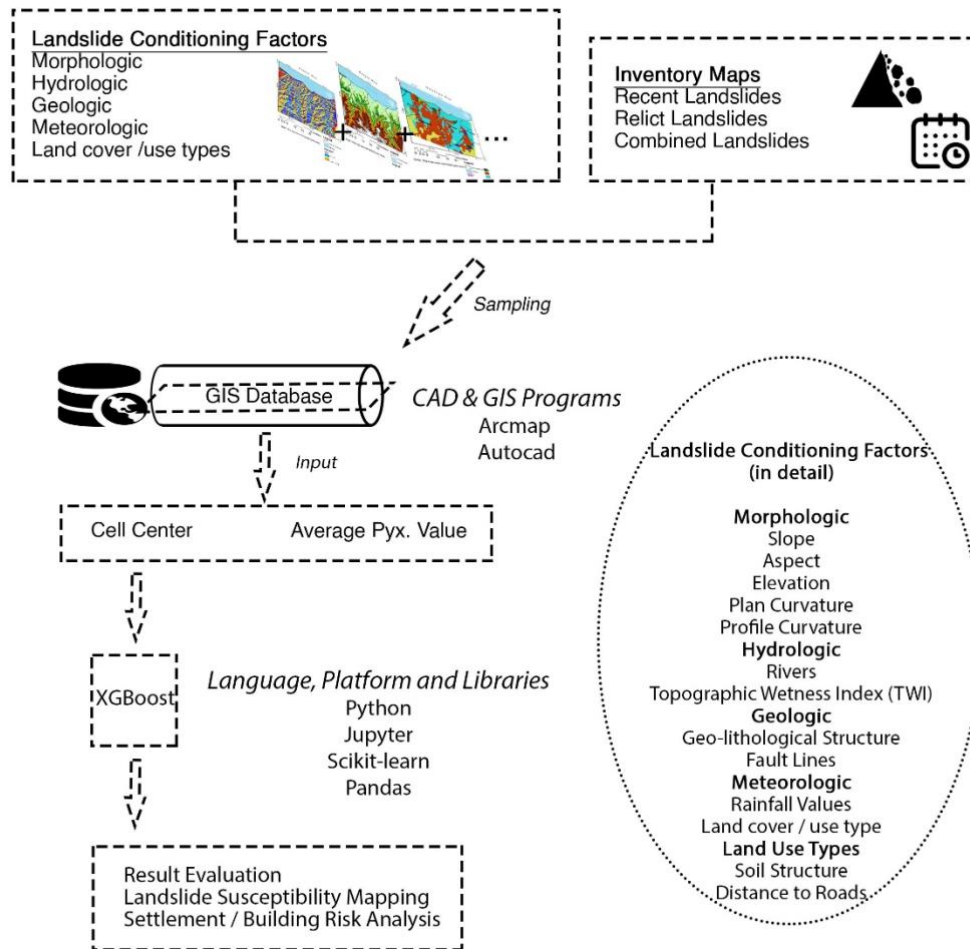


Figure 3. Methodology schema

2.3. Classification of Landslide Inventory Data

In era of GIS and integration of ML, one of the challenging problems that researchers need to solve is how the data model should be structured. In general, raw datasets in GIS cannot be directly ready for use in ML algorithms. Some problems arise in the process of producing LSM with ML. When converting GIS data into information, diversity of parameters is high, and these options will affect analysis results positively or negatively. The fact that datasets are produced according to different scales, sensitivity, accuracy, or data format (vector/raster) increases diversity. Spatiotemporal parameter of the preferred dataset is also an important criterion. Should we work with recent data, relict data or a combination of both? Also, preparation of positive / negative landslide data to be used by ML algorithms has an important effect, especially in solving classification problems. In the final stage, how to transfer information from the final datasets created in this study to the data of the factors affecting the landslide in raster format, and the choices to be made on pixel-based methods, can directly affect the results. It is aimed to state alternatives in this section and planned to compare alternative input and output choices in the following sections.

2.3.1. Presence Data

2.3.1.1. Recent Landslide Records

There are some classification types depending on whether the landslides are up-to-date or not. They vary by country with criteria such as records of landslide events, time of data collection, active-passive status, etc. In this study, records of landslide events in the last 10 years have been evaluated as "recent landslide records". 248 different "recent landslide records" in the pilot study area are organised in GIS data format. The data is collected from Türkiye's landslide public institutions producing records, MTA (Maden Tetkik Arama) and other different sources.

2.3.1.2. Relict Landslide Records

Landslide records that occurred more than 10 years ago and have not been repeated recently were evaluated as data for relict landslide records. In the area studied, 572 different landslides were collected according to this criterion.

2.3.1.3. Combined Landslide Records

Combined landslide record data is combination of recent and relict records in same data. Recent, relict landslide records were merged into same dataset (820 landslides) and this dataset. All these three datasets are shown in Figure 1.

2.3.2. Absence Data

Landslide absence data also play an important role in regional LSM based on statistical models, since they can suppress the statistical model's overestimation of the LS, thus enabling its ability to reasonably divide the area into high-susceptibility areas and low-susceptibility areas (Hong et al., 2019; Zhu et al., 2018). The reason behind creating and using absence data is to teach ML the difference between landslide and non-landslide areas. This way, the ML algorithm can define characteristics of independent variable parameters, such as LS. The perception of this difference helps ML make better decisions in the process of LSM. Absence data is important for teaching non-landslide areas to the computer and determining the parameters of the landslide event comparatively. In the study area, absence data for 248 recent landslides, 572 relict landslides, and 820 combined landslides were created randomly. It is considered important to ensure that the average sizes of

"presence landslide data" and "absence landslide data" are close to each other. Absence landslide record data takes 0 as an attribute before being used in ML.

2.4. Landslide Conditioning Factors and Related GIS Dataset

13 different factors affecting the occurrence of landslide events were determined based on different literature studies. These factors are considered in five classes: morphological, hydrological, geological, meteorological, and land cover / use types. Morphological factors (Hong et al., 2020) are; slope aspect, elevation, plan curvature, and profile curvature. Hydrological factors (Yi et al., 2020; Fang et al., 2020; Wang et al., 2019; Shirzadi et al., 2018) are distance to the river and topographic wetness index (TWI). Geological factors (Yi et al., 2020; Nsengiyumva and Valentino, 2020; Pourghasemi et al., 2020) are geo-lithological structure and distance to fault. The meteorological factor is the maximum rainfall value in m2 per month. Land cover / use type factors (Nsengiyumva and Valentino, 2020; Wang et al., 2019) are land use types, distance to roads, and soil structure. Each landslide affecting factor corresponds to a GIS data layer in the database. Table 1 shows metadata information about the collected GIS dataset, such as source of data, accuracy of data, original and final format of data, and current literature studies using related data. Graphical views of collected datasets related to these factors are given in Figure 3. In addition to these landslide conditioning factors, landslide inventory data was collected and inserted into the GIS dataset.

2.5. Cell Center or Average Value within All Pixels Overlaying Landslide Record Polygons

In the process of analysing the factors affecting landslide occurrence with ML and producing LS maps, the choice of the correct data model is important. Landslide data is in polygon format and may cover small, medium or large areas. When transferring landslide data to ML as a dependent variable, it must be transferred as a single value. Because this value will be overlapped with pixel-based dependent variables (factors affecting landslide formation) in the ML environment. While obtaining this single value; there are alternatives such as taking the value of a point in the middle of the landslide polygon (geometric center), taking a random point or taking the average values of the pixels inside the polygon.

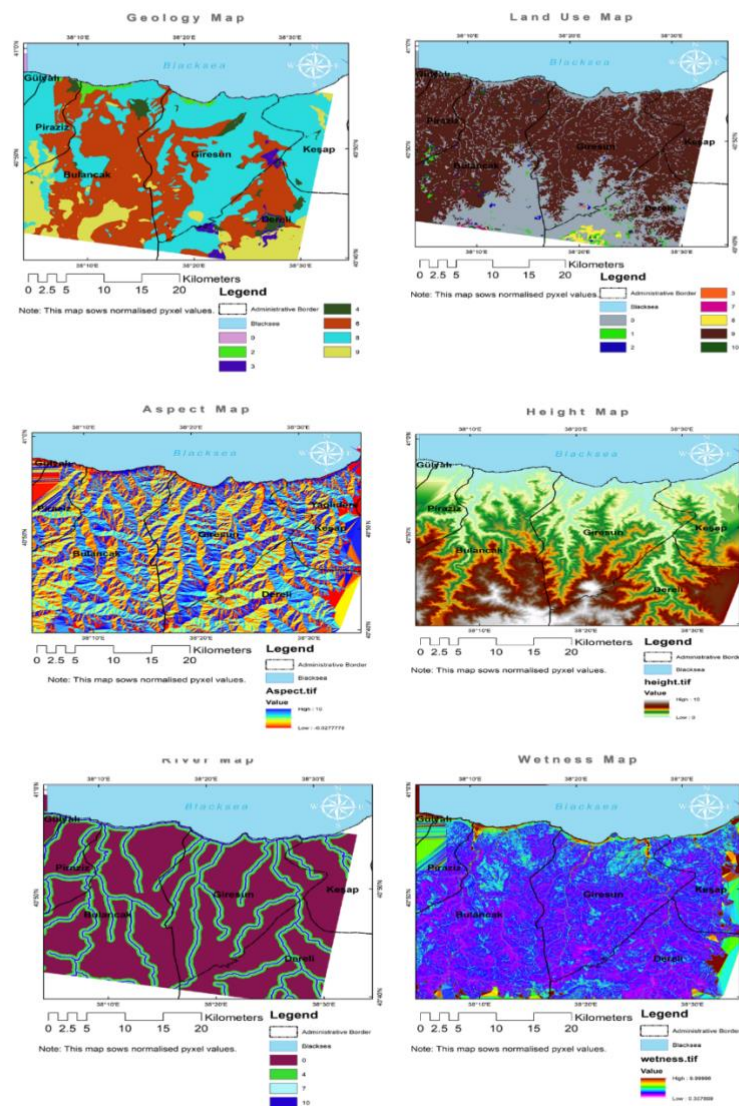
Table 1. Detailed information about GIS dataset

Data name	Source	Original Format / Accuracy	Last Format / Parameter	Current Literature Studies
Slope	General Command of Mapping (TR)	Vector / 5 mt	Raster / Degree	Lima et al., 2023; Hong, 2023; Xiao and Zhang, 2023; Saygin et al., 2023; Laura et al., 2023; Pham et al., 2020; Pourghasemi et al., 2020; Zhao et al., 2022;
Aspect	General Command of Mapping (TR)	Raster / 5 mt	Raster / Aspect Value	Chen and Li, 2020; Fang, 2020; Hong et al., 2020; Pham et al., 2020; Pourghasemi et al., 2020; Nsengiyumva and Valentino, 2020; Zhao et al., 2022; Lima et al., 2023; Hong, 2023; Laura et al., 2023
Elevation	General Command of Mapping (TR)	Vector / 5mt	Raster / Height Value	Hong, 2023; Xiao and Zhang, 2023; Laura et al., 2023; Arabameri et al., 2021; Chen and Chen, 2021; Ngo et al., 2021; Zhao et al., 2022; Lima et al., 2023
Plan Curvature	General Command of Mapping (TR)	Raster / 5 mt	Raster / Plann Curv. Value	Chen and Li, 2020; Fang, 2020; Hong et al., 2020; Pourghasemi et al., 2020; Nsengiyumva and Valentino, 2020; Arabameri et al., 2021; Chen and Chen, 2021; Ngo et al., 2021; Lima et al., 2023; Hong, 2023; Laura et al., 2023; Huang et al., 2023
Profile Curvature	General Command of Mapping (TR)	Raster / 5 mt	Raster / Profile Curv. Value	Chang et al.,2020; Chen and Li, 2020; Fang, 2020; Arabameri et al., 2021; Chen and Chen, 2021; Lima et al., 2023; Hong, 2023; Laura et al., 2023; Huang et al., 2023
River	Government Water Org.	Vector / 4 mt	Raster / Distance to River in meters	Hong et al., 2020; Nsengiyumva and Valentino, 2020; Pourghasemi et al., 2020; Sameen et al., 2020; Wang et al., 2020a; Yi et al., 2020;Arabameri et al., 2021; Chen and Chen, 2021; Zhao et al., 2022; Hong, 2023
TWI	Meteorology	Raster / 5 mt	Raster / Index Value	Wang et al., 2020a; Wang et al., 2020b; Arabameri et al., 2021; Chen and Chen, 2021; Hong, 2023
Geolithologic Structure	Mineral Exploration (MTA)	Vector / 10 mt	Raster / Attribute Type	Hong et al., 2020; Nsengiyumva and Valentino, 2020; Pham et al., 2020; Pourghasemi et al., 2020; Yi et al., 2020; Arabameri et al., 2021; Chen and Chen, 2021; Zhao et al., 2022; Lima et al., 2023; Hong, 2023; Laura et al., 2023
Fault Line	Mineral Exploration (MTA)	Vector / 10 mt	Raster / Distance to Fault Line in meters	Pham et al., 2020; Pourghasemi et al., 2020; Wang et al., 2020a; Yi et al., 2020; Arabameri et al., 2021; Ngo et al., 2021; Zhao et al., 2022; Lima et al., 2023; Hong, 2023; Xiao and Zhang, 2023
Land Use Type	Ministry of Agriculture and Food	Vector / 10 mt	Raster / Land Use Type Attribute	Sameen et al., 2020; Yi et al., 2020; Arabameri et al., 2021; Chen and Chen, 2021; Ngo et al., 2021; Zhao et al., 2022; Lima et al., 2023; Hong, 2023; Xiao and Zhang, 2023; Saygin et al., 2023; Laura et al., 2023
Soil	Ministry of Agriculture and Food	Vector / 10 mt	Raster / Soil Quality Attribute	Zhang et al., 2017; Chen and Li, 2020; Fang, 2020; Pourghasemi et al., 2020; Nsengiyumva and Valentino, 2020; Arabameri et al., 2021; Chen and Chen, 2021; Lima et al., 2023; Saygin et al., 2023; Laura et al., 2023
Road	Municipality	Vector / 1 mt	Raster / Distance to Roads	Yi et al., 2020; Arabameri et al., 2021; Chen and Chen, 2021; Ngo et al., 2021; Zhao et al., 2022; Lima et al., 2023; Hong, 2023; Xiao and Zhang, 2023
Landslide Records	Mineral Exploration (MTA)	Vector / 5 mt	Raster / Attribute Recent – Relict – Combined	Wang et al., 2020a; Arabameri et al., 2021; Chen and Chen, 2021; Ngo et al., 2021; Zhao et al., 2022; Xiao and Zhang, 2023
Rainfall	Meteorology	Excel / 3 mt	Raster / After Interpolation	Zhang et al., 2017; Chen et al., 2018; Shirzadi et al., 2018; Aghlmand et al., 2020; Chen and Li, 2020; Fang, 2020; Wang et al., 2020b; Arabameri et al., 2021; Ngo et al., 2021; Hong, 2023; Xiao and Zhang, 2023
Building Footprints	Municipality	Vector / 30 cm	Vector / Polygon	Singh et al., 2021; Fu et al., 2020; Ciampalini et al., 2014; Martha et al., 2013

2.6. Cell Center or Average Value within All Pixels Overlaying Landslide Record Polygons

In the process of analysing the factors affecting landslide occurrence with ML and producing LS maps, the choice of the correct data model is important. Landslide data is in polygon format and may cover small, medium or large areas. When transferring landslide data to ML as a dependent variable, it must be transferred as a single value. Because this value will be overlapped with pixel-based dependent variables (factors affecting landslide formation) in the ML environment. While obtaining this single value; there are alternatives such as taking the value of a point in the middle of the landslide polygon (geometric center), taking a random point or taking the average values of the pixels inside the polygon.

Graphical view of Rasterised and Normalised Input GIS Datasets



Note: Pixel values are normalised, data attribute information is given at paper

Figure 4. Graphical view of input GIS dataset

In this study, the geometric center of the landslide was taken as an alternative to represent the landslide areas. Alternatively, the mean value of all pixels in overlapping the relevant level with the landslide area was taken (Figure 5). The data obtained from calculations made with these two different methods and all the input layers have been prepared for ML. Presence and absence data of Recent, Relict and a were arranged and made available in 3 different ML algorithms to be tested comparatively.

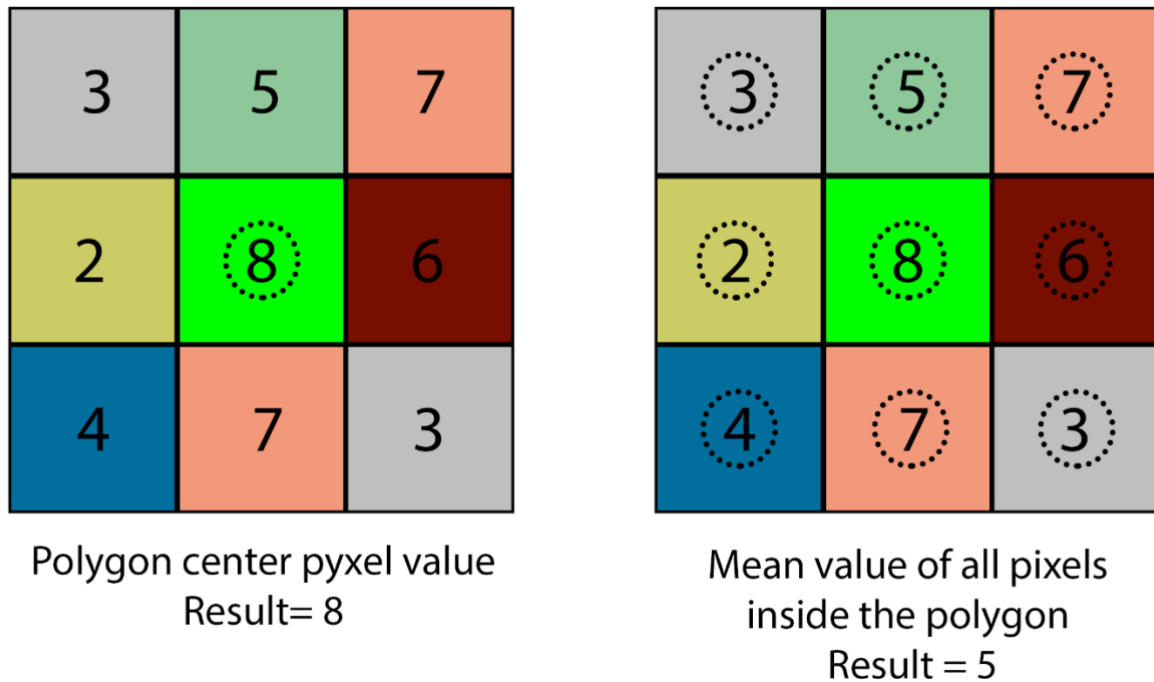


Figure 5. Differences between cell center and average value methods

2.7. Gradient Boosting and XGBoost

Gradient Boosting Decision Tree (GBDT) is a sub-group of decision forests that includes models like XGBoost, CatBoost, and LightGBM (Sagi and Rokach, 2021). XGBoost, or eXtreme Gradient Boosting, stands as a seminal advancement in machine learning, renowned for its exceptional predictive performance and versatility across diverse domains. Among the machine learning methods used in practice, gradient tree boosting is one technique that shines in many applications. Tree boosting has been shown to give state-of-the-art results on many standard classification benchmarks (Li., 2010; Chen and Guestrin, 2016). XGBoost was mainly designed for speed and performance using gradient-boosted decision trees. It represents a way for machine boosting, or in other words applying boosting to machines, initially done by Tianqi Chen (Dhaliwal

et al., 2018). Gradient tree boosting is also known as gradient boosting machine (GBM) or gradient boosted regression tree (GBRT) problems.

2.8. Building GIS Based Machine Learning Model

ML model is shown at methodology section. ML learning model of this study has 6 main alternatives. These alternatives occur while crossing A) landslide inventory data type (3 alternatives) B) cell center or average pixel value data, the method used to transfer information inside the input landslide polygon to ML (2 alternatives). So, crossing these alternatives (3*2) generates 6 different alternatives.

Normalising the values of landslide conditioning factors using the min–max method helps getting better results (Sameen et al., 2020). In this method, the largest and smallest values in a group of data are handled. All other data is normalized to these values. Calculation formula of normalisation min-max method is given below.

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

During ML analyses normalized independent variables (X values) were used. Training / test split method was applied for the validation process (70% train, 30% test). In addition, the k-fold cross validation method was applied as k = 10 and compared with the training / test split method. Since there is no significant difference in terms of performance, the training / test split method, which is a practical method, was preferred in all following analyses. Primitive models were defined directly with independent variables. After performing the error tests and performance analyses, the model tuning phase was started. At this stage, the most appropriate parameters were found with the GridSearchCV method by assigning values at different intervals to the parameter "C", and the analyses were performed with that parameter.

3. Results and Discussion

3.1. Model Performance Comparison of Alternatives

This paper aims producing LSM with high prediction accuracy. Assessment of prediction accuracy and performance of the models there are alternative methods (Pourghasemi et al., 2020; Rahmati et al., 2017). Cross-validation results can be produced quantitatively and graphically by means of Accuracy, Precision, F1 Score or confusion matrix. According to the analysis methodology applied in the study, performance analyses were carried out under 2 different classes. A) landslide inventory data type B) cell center or average pixel value data. For this purpose, XGBoost tuned model

result success scores were compared. Table 2 shows model performances and success scores such as Accuracy, Precision and F1 score.

When the model performance is evaluated on the basis of the landslide date, the findings are as follows. In all combinations of methods and landslide analysis models, the analyses performed with "Combined Landslide Data" gave the highest performance. The best performance in terms of Accuracy, Precision and F1Score criteria was in the analyses performed with "Combined Landslide Data". Analyses made with "Recent Landslide Data" ranked second in terms of performance. The lowest performance is the analysis with "Relict Landslide Records". The interpretation of this result assumes that two different reasons may cause this situation. First, changes in the topographical structure and, on the other hand, the fact that the relict landslide zones became more stable compared to the past decreased the function of the "Recent Landslide Records" data. This prediction is currently in the assumption phase and could become a widely accepted rule if supported and validated in several future studies

The result of two different methods applied in the process of transferring landslide data from landslide polygon to the ML environment is the following. Accuracy and precision increases and decreases when averaging all pixels of the landslide data polygon. In this method, the accuracy was 0.86. When the values of the pixel at the center of gravity or the geometric midpoint of the polygon are used, the accuracy decreases to 0.81 (Table 2).

Table 2. Model performance evaluation, accuracy, precision and F1 score

	Accuracy	Precision	F1 Score
Recent L. Pixel Average	0,74	0,72	0,80
Relict L. Pixel Average	0,69	0,68	0,68
Combined L. Pixel Average	0,88	0,86	0,87
Recent L. Pixel Center	0,71	0,70	0,76
Relict L. Pixel Center	0,68	0,67	0,66
Combined L. Pixel Center	0,84	0,81	0,83

3.2. Landslide Conditioning Factor Effect Analysis and SHAP Method

An important issue in multi-factor analyses made with GIS is to detect the individual effects of the input layers on the result. It would be meaningless to use factors that affect the result below acceptable values. In addition, these factors in ML can lead to overfitting problems. In the classification of factors according to the domain, sensitivity analysis, Pearson correlation coefficient (Wang et al., 2020; Chang et al., 2020), spatial heterogeneity (Hong et al., 2019), factor importance or partial response curves (Chen et al., 2018). There are different methods such as (Pourghasemi et

al., 2020). Input factors should be evaluated one by one before evaluating the success performance of the model in ML analysis.

SHAP (SHapley Additive exPlanations) is a game theoretic approach to explain the output of any machine learning model. This approach helps us for better understanding and interpretation of machine learning results. The local explanation using the SHAP values via each individual SHAP value which explains why the ML model gives its decision and the contributions of the predictors/features (Le et al., 2022). The results showed that SHAP analysis can effectively improve machine learning transparency (Ou et al., 2020; Zhang et al., 2023). As it is given at previous page best score was achieved by applying “Combined Landslide Data” and “averaging all pixels of the landslide data polygon”. Results of data model and analysis via XgBoost was evaluated with SHAP method. SHAP method is applied after inserting Python-SHAP analysis codes to Jupyter platform.

Density scatter plot of SHAP values is created for each feature to identify how much impact each feature has on the model output for individuals in the validation dataset (Figure 6). Figure 6 shows SHAP value magnitudes across all samples and we can understand that slope and wetness factors are most dominant factors and curvature, rainfall follow them. Less affecting factors are proximity to river and roads. Figure 7 also shows dependence scatter plot graphics of each input factor used for XGBoost based LSM analysis.

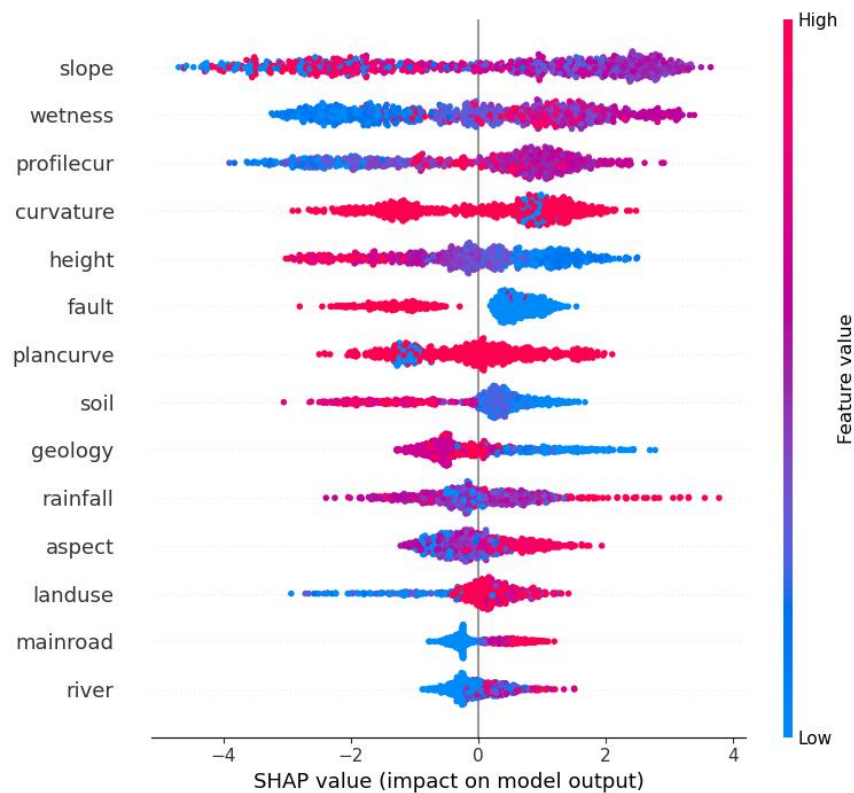


Figure 6. SHAP values (impact on model output)

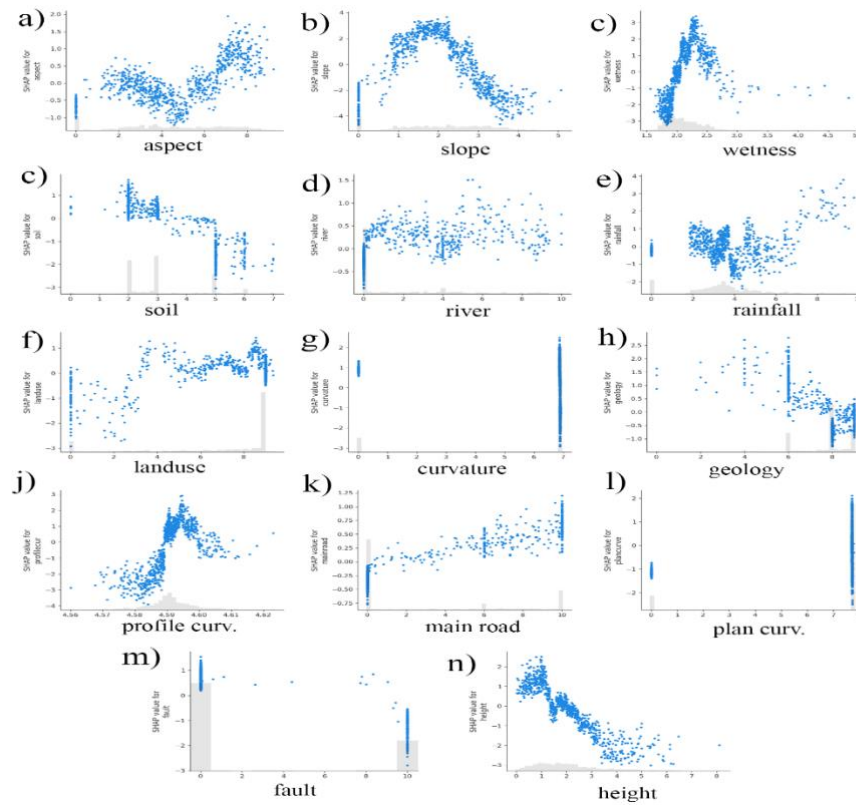


Figure 7. SHAP dependence scatter plots

3.3. Generating LS Maps and Landslide Risk Assessment of Buildings

More accurate susceptibility map can reduce the cost and damage of environmental disasters such as landslides (Chen and Li, 2020). LS map was produced according to the XGBoost results with best data model alternative. While producing this map, ArcMap 10.6 / Spatial Analyst / Map Algebra / Raster Calculator tool was used. Map Algebra is a simple and powerful algebra with which you can execute all Spatial Analyst tools, operators, and functions to perform geographic analysis. Map Algebra supports basic mathematical calculation with overlaying raster based GIS layers such as; multiplying, adding or dividing pixel values. In addition to basic math operations map algebra allows conditional, trigonometric and logarithmic math calculations. The LS map produced by multiplying coefficients with the normalized input layers (Figure 8).

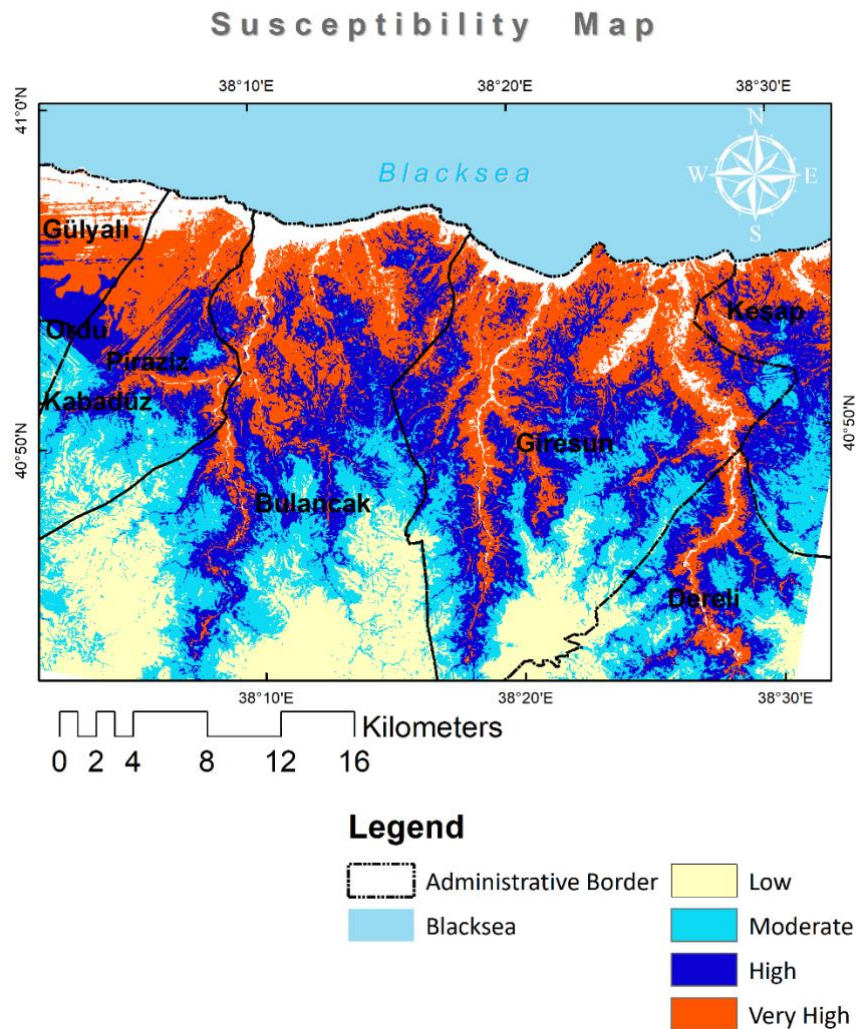


Figure 8. LS map of study area

There are 57.601 buildings in the study area. The analysis of susceptibility to landslides was overlapped with building footprints prepared in GIS environment. The average value of the landslide risk for each building has been calculated. Based on the risk analysis, it was determined that the buildings in the region are: 59% (34.006) low, 30% (17.342) moderate, 10% (5872) high-risk and 1% (291) in very high in terms of landslide risk. Each building is labelled according to its level of risk (Figure 9). The production of risk maps and the pre-determination of potential threats with technology will significantly contribute to the decision-making processes of decision-makers, planners, and managers. Therefore, life and property loss will be reduced and welfare in developing countries will be more sustainable.

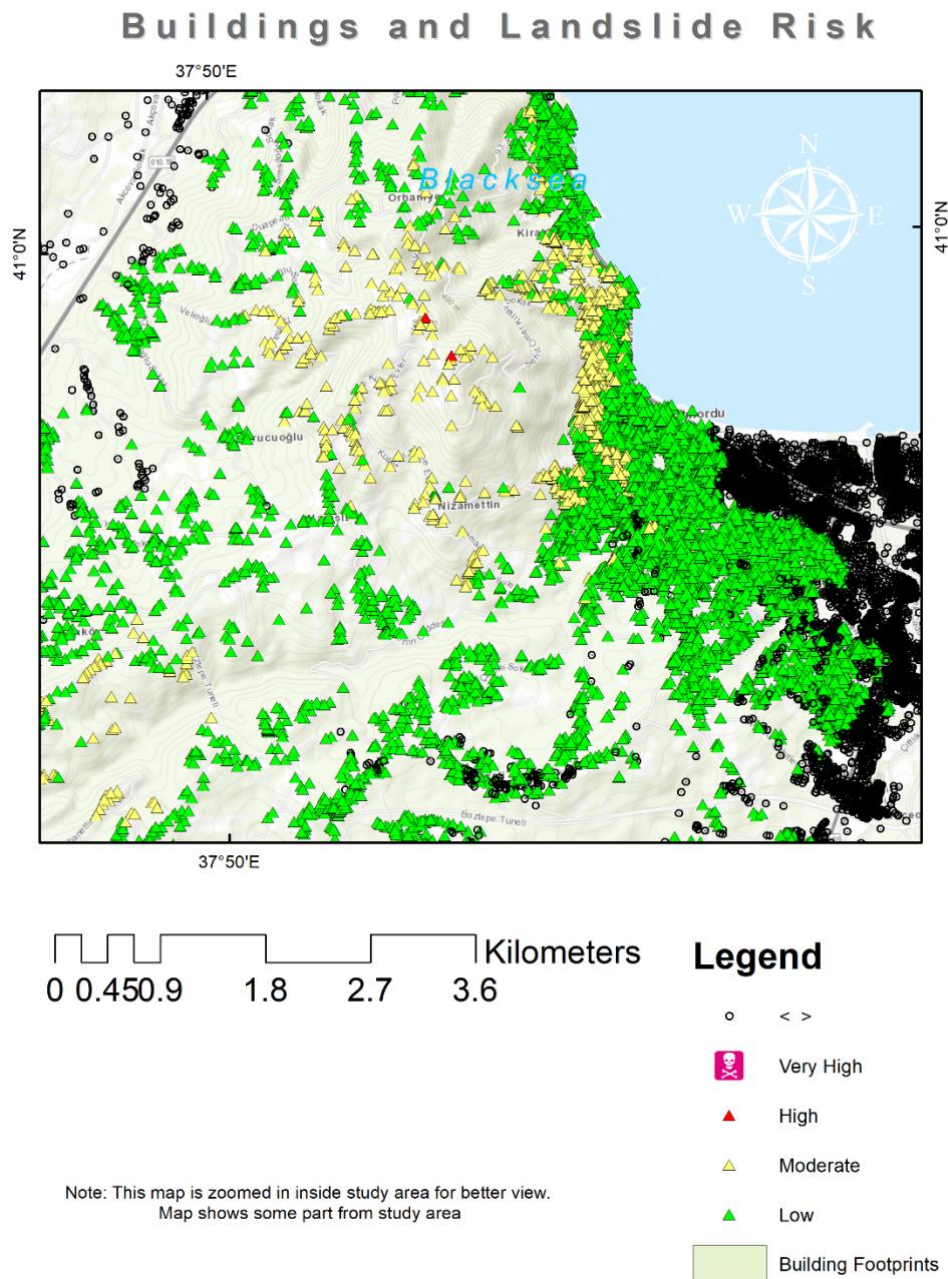


Figure 9. Building risk assessment

4. Conclusions and Recommendations

In this study, LS analysis were made by using XGBoost algorithm. The study was compared by applying different model combinations to be formed based on the characteristic structure of the landslide data and the method of transferring it to the ML environment. Model success comparisons were made using Accuracy, Precision and F1 score. As a result of the study, the most successful model performance was achieved by taking the average values of all pixels of the landslide data polygon in the XGBoost algorithm, combined landslide data. In addition, the study has shown in a

practical way that ML is an effective tool in GIS analysis with multi-criteria structure such as LS map generation and in solving similar GIS problems. Study shows that GIS supported machine learning methods may give efficient results in the process of producing landslide susceptibility maps. The methods / parameters used and the parameters obtained in study are in a structure that can be used directly in regions with landslide risk anywhere in the world. SHAP method is an efficient tool for evaluation and visualization of input ML factors. Each factor may be evaluated in separate or opposing approaches with the help of SHAP. The methods used in the study can be used with some model revisions in analysing not only landslide events but also other types of disaster. In addition, as a result of the hybrid use of machine learning models with multi-criteria decision support systems, it will be beneficial in solving multi-layered problems such as appropriate site or facility location selection for settlement or another purposes. In the future, testing and comparing ML algorithms with different data model combinations will increase our model success performance and bring us closer to ideal solutions and right decisions.

Authors' Contributions

All the paper is designed, created and revised by one author. Author contributed equally to the study.

Statement of Conflicts of Interest

There is no conflict of interest between the authors.

Statement of Research and Publication Ethics

The author declares that this study complies with Research and Publication Ethics.

References

- Abedini M, Ghasemian B, Shirzadi A, Shahabi H, Chapi K, Pham BT, Bin Ahmad B, and Tien Bui D. 2019. A novel hybrid approach of Bayesian Logistic Regression and its ensembles for landslide susceptibility assessment. *Geocarto International*. 34(13):1427-1457.
- Aghdam IN., Varzandeh MHM., and Pradhan B. (2016). Landslide susceptibility mapping using an ensemble statistical index (Wi) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) model at Alborz Mountains (Iran). *Environmental Earth Sciences*. 75(7):553.
- Aghlmand, M., Onur M. İ. and Talaei R. (2020). Heyelan Duyarlılık Haritalarının Üretilmesinde Analitik Hiyerarşi Yönteminin ve Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Kullanımı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Özel Sayı*, S. 224-230, Nisan 2020

- Akinci H., Kilicoglu C., and Dogan S. (2020). Random Forest-Based Landslide Susceptibility Mapping in Coastal Regions of Artvin, Turkey. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020; 9(9):553
- Althuwaynee OF., Pradhan B., Park H-J., and Lee JH. (2014). A novel ensemble bivariate statistical evidential belief function with knowledge-based analytical hierarchy process and multivariate statistical logistic regression for landslide susceptibility mapping. *CATENA*. 114:21-36.
- Althuwaynee OF., Pradhan B., and Lee S. (2016). A novel integrated model for assessing landslide susceptibility mapping using CHAID and AHP pair-wise comparison. *International Journal of Remote Sensing*. 37(5):1190-1209.
- Arabameri, A., Chandra Pal, S., Rezaie, F., Chakraborty, R., Saha, A., Blaschke, T., di Napoli, M., Ghorbanzadeh, O., and Thi Ngo, P. T. (2022). Decision tree based ensemble machine learning approaches for landslide susceptibility mapping. *Geocarto International*, 37(16), 4594–4627. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1892210>
- Atkinson PM., and Massari R. (1998). Generalised Linear Modelling of Susceptibility to Landsliding in the Central Apennines, ITALY. *Computers & Geosciences*. 24(4):373-385.
- Beguería S. (2006). Validation and Evaluation of Predictive Models in Hazard Assessment and Risk Management. *Natural Hazards*. 37(3):315-329.
- Breiman L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*. Kluwer Academic Publishers. 45(1):5-32.
- Chang Z., Du Z., Zhang F., Huang F., Chen J., Li W., and Guo Z. (2020). Landslide Susceptibility Prediction Based on Remote Sensing Images and GIS: Comparisons of Supervised and Unsupervised Machine Learning Models. *Remote Sensing*. 12(3).
- Ciampalini, A., Bardi, F., Bianchini, S., Frodella, W., del Ventisette, C., Moretti, S., and Casagli, N. (2014). Analysis of building deformation in landslide area using multisensor PSInSARTM technique. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, 166–180.
- Chen W., Peng J., Hong H., Shahabi H., Pradhan B., Liu J., Zhu AX., Pei X., and Duan Z. (2018). Landslide susceptibility modelling using GIS-based machine learning techniques for Chongren County, Jiangxi Province, China. *Science of The Total Environment*. 626:1121-1135.
- Chen W. and Li Y. (2020). GIS-based evaluation of landslide susceptibility using hybrid computational intelligence models. *CATENA*. 195:104777.
- Chen T. and Guestrin C. (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '16)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 785–794.
- Ching J. and Phoon K-K. (2019). Constructing Site-Specific Multivariate Probability Distribution Model Using Bayesian Machine Learning. *Journal of Engineering Mechanics*. 145(1):04018126.
- Constantin M., Bednarik M., Jurchescu MC., and Vlaicu M. (2011). Landslide susceptibility assessment using the bivariate statistical analysis and the index of entropy in the Sibiciu Basin (Romania). *Environmental Earth Sciences*. 63(2):397-406.
- Dai FC., Lee CF., and Zhang XH. (2001). GIS-based geo-environmental evaluation for urban land-use planning: a case study. *Engineering Geology*. 61(4):257-271.
- Dehnavi A., Aghdam IN., Pradhan B., and Morshed Varzandeh MH. (2015). A new hybrid model using step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA) technique and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) for regional landslide hazard assessment in Iran. *CATENA*. 135:122-148.
- De Sy V., Schoorl JM., Keesstra SD., Jones KE., and Claessens L. (2013). Landslide model performance in a high resolution small-scale landscape. *Geomorphology*. 190:73-81.
- Fang, Z., Wang, Y., Peng, L., and Hong, H. (2020). Integration of convolutional neural network and conventional machine learning classifiers for landslide susceptibility mapping. *Computers & Geosciences*, 139, 104470.
- Fanos, A. M. and Pradhan, B. (2019). A novel rockfall hazard assessment using laser scanning data and 3D modelling in GIS. *CATENA*, 172, 435–450.
- Feizizadeh B., Shadman Roodposhti M., Jankowski P., and Blaschke T. (2014). A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping. *Computers & Geosciences*. 73:208-221.
- Froude M. and Petley D. (2018). Global fatal landslide occurrence 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*. 1-44.
- Fu, S., Chen, L., Woldai, T., Yin, K., Gui, L., Li, D., Du, J., Zhou, C., Xu, Y., and Lian, Z. (2020). Landslide hazard probability and risk assessment at the community level: a case of western Hubei, China. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20(2), 581–601.
- Girshick, R. (2015). Fast R-CNN. *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision* 1440–1448.

- Greedy F. J. function approximation: a gradient boosting machine. *Annals of Statistics*, 29(5):1189-1232, 2001.
- Gorsevski, P.V., Gessler, P.E., Foltz, R.B. and Elliot, W.J. (2006), Spatial Prediction of Landslide Hazard Using Logistic Regression and ROC Analysis. *Transactions in GIS*, 10: 395-415.
- Guzzetti F., Reichenbach P., Ardizzone F., Cardinali M., and Galli M. (2006). Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*. 81(1):166-184.
- Hong H., Miao Y., Liu J., and Zhu AX. (2019). Exploring the effects of the design and quantity of absence data on the performance of random forest-based landslide susceptibility mapping. *CATENA*. 176:45-64.
- Hong H., Naghibi SA., Pourghasemi HR., and Pradhan B. (2016). GIS-based landslide spatial modeling in Ganzhou City, China. *Arabian Journal of Geosciences*. 9(2):112.
- Hong H., Pradhan B., Sameen MI., Kalantar B., Zhu A., and Chen W. (2018). Improving the accuracy of landslide susceptibility model using a novel region-partitioning approach. *Landslides*. 15(4):753-772.
- Hong H., Liu J., and Zhu AX. (2020). Modeling landslide susceptibility using LogitBoost alternating decision trees and forest by penalizing attributes with the bagging ensemble. *Science of The Total Environment*. 718:137231.
- Hong, H. (2023). Assessing landslide susceptibility based on hybrid Best-first decision tree with ensemble learning model. *Ecological Indicators*, 147, 109968.
- Huang, W., Ding, M., Li, Z.; Zhuang, J., Yang, J., Li, X., Meng, L., Zhang, H., and Dong, Y. An Efficient User-Friendly Integration Tool for Landslide Susceptibility Mapping Based on Support Vector Machines: SVM-LSM Toolbox. *Remote Sens*. 2022, 14, 3408.
- Hussin HY., Zumpano V., Reichenbach P., Sterlacchini S., Micu M., van Westen C., and Bălteanu D. (2016). Different landslide sampling strategies in a grid-based bi-variate statistical susceptibility model. *Geomorphology*. 253:508-523.
- Kavzoglu, T., and Teke, A. (2022). Predictive Performances of Ensemble Machine Learning Algorithms in Landslide Susceptibility Mapping Using Random Forest, Extreme Gradient Boosting (XGBoost) and Natural Gradient Boosting (NGBoost). *Arab J Sci Eng* 47, 7367–7385
- Lary DJ., Alavi AH., Gandomi AH., and Walker AL. (2016). Machine learning in geosciences and remote sensing. *Geoscience Frontiers*. 7(1):3-10.
- Lecun Y., Bottou L., Bengio Y., and Haffner P. (1998). Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*. 86(11):2278-2324.
- Li X., Zhang L., Xiao T., Zhang S., and Chen C. (2019). Learning failure modes of soil slopes using monitoring data. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 56:50-57.
- Li P. (2010). Robust Logitboost and adaptive base class (ABC)Logitboost. In *Proceedings of the Twenty-Sixth Conference Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence(UAI'10)*, pages 302-311, 2010.
- Liu Y., Fan B., Wang L., Bai J., Xiang S., and Pan C. (2018). Semantic labeling in very high resolution images via a self-cascaded convolutional neural network. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 145:78-95.
- Lo MK., and Leung YF. (2018). Bayesian updating of subsurface spatial variability for improved prediction of braced excavation response. *Canadian Geotechnical Journal*. 56(8):1169-1183.
- Mathew J., Jha VK., and Rawat GS. (2009). Landslide susceptibility zonation mapping and its validation in part of Garhwal Lesser Himalaya, India, using binary logistic regression analysis and receiver operating characteristic curve method. *Landslides*. 6(1):17-26.
- Martha, T. R., van Westen, C. J., Kerle, N., Jetten, V., and Vinod Kumar, K. (2013). Landslide hazard and risk assessment using semi-automatically created landslide inventories. *Geomorphology*, 184, 139–150.
- Mezaal MR., Pradhan B., Sameen MI., Mohd Shafri HZ., and Yusoff ZM. (2017). Optimized Neural Architecture for Automatic Landslide Detection from High-Resolution Airborne Laser Scanning Data. *Applied Sciences*. 7(7).
- Nefeslioglu HA., Gokceoglu C., and Sonmez H. (2008). An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. *Engineering Geology*. 97(3):171-191.
- Nguyen H-L., Le T-H., Pham C-T., Le T-T., Ho LS., Le VM., Pham BT., and Ly H-B. (2019). Development of Hybrid Artificial Intelligence Approaches and a Support Vector Machine Algorithm for Predicting the Marshall Parameters of Stone Matrix Asphalt. *Applied Sciences*. 9(15):3172.
- Nsengiyumva, J. B., and Valentino, R. (2020). Predicting landslide susceptibility and risks using GIS-based machine learning simulations, case of upper Nyabarongo catchment. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 1250–1277. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1785555>

- Orhan, O., Bilgilioglu, S. S., Kaya, Z., Ozcan, A. K., and Bilgilioglu, H. (2022). Assessing and mapping landslide susceptibility using different machine learning methods. *Geocarto International*, 37(10), 2795–2820. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1837258>
- Ou C., Liu J., Qian Y., Chong W., and He X. (2020). Rupture risk assessment for cerebral aneurysm using interpretable machine learning on multidimensional data. *Front. Neurol.*, 11.
- Papaioannou I, Straub D. (2017). Learning soil parameters and updating geotechnical reliability estimates under spatial variability – theory and application to shallow foundations. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. 11(1):116-128.
- Park S., and Kim J. (2019). Landslide Susceptibility Mapping Based on Random Forest and Boosted Regression Tree Models, and a Comparison of Their Performance. *Applied Sciences*. 9(5).
- Pham BT., Phong TV., Nguyen-Thoi T., Trinh PT., Tran QC., Ho LS., Singh SK., Duyen TT., Nguyen LT., and Le HQ. (2020). GIS-based ensemble soft computing models for landslide susceptibility mapping. *Advances in Space Research*. 66(6):1303-1320.
- Pham BT., Prakash I., Singh SK., Shirzadi A., Shahabi H., Tran T-T., and Bui DT. (2019). Landslide susceptibility modelling using Reduced Error Pruning Trees and different ensemble techniques: Hybrid machine learning approaches. *CATENA*. 175:203-218.
- Pradhan, B., and Sameen, M. I. (2018). Manifestation of SVM-Based Rectified Linear Unit (ReLU) Kernel Function in Landslide Modelling. In W. Suparta, M. Abdullah, & M. Ismail (Eds.), *Space Science and Communication for Sustainability* (pp. 185–195). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6574-3_16
- Pourghasemi HR., Kornejady A., Kerle N., and Shabani F. (2020). Investigating the effects of different landslide positioning techniques, landslide partitioning approaches, and presence-absence balances on landslide susceptibility mapping. *CATENA*. 187:104364.
- Prasad P., Loveson VJ., Das B., and Kotha M. (2021). Novel ensemble machine learning models in flood susceptibility mapping. *Geocarto International*. 1-23.
- Rahmati O., Tahmasebipour N., Haghizadeh A., Pourghasemi HR., and Feizizadeh B. (2017). Evaluating the influence of geo-environmental factors on gully erosion in a semi-arid region of Iran: An integrated framework. *Science of The Total Environment*. 579:913-927.
- Sagi Ö. and Rokach L. (2021). Approximating XGBoost with an interpretable decision tree, *Information Sciences*, Volume 572, Pages 522-542, ISSN 0020-0255.
- Sahin, E.K. (2023). Implementation of free and open-source semi-automatic feature engineering tool in landslide susceptibility mapping using the machine-learning algorithms RF, SVM, and XGBoost. *Stoch Environ Res Risk Assess* 37, 1067–1092
- Sameen MI., Pradhan B., Bui DT., and Alamri AM. (2020). Systematic sample subdividing strategy for training landslide susceptibility models. *CATENA*. 187:104358.
- Singh, A., Pal, S., and Kanungo, D. P. (2021). An integrated approach for landslide susceptibility–vulnerability–risk assessment of building infrastructures in hilly regions of India. *Environment, Development and Sustainability*, 23(4), 5058–5095. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00804-z>
- T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı. (2016). Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Köppen iklim sınıflandırmasına göre Türkiye iklimi, *Climatology Report*.
- Thi-Thu-Huong L., Kim H., Kang H. and Kim H. (2022). "Classification and Explanation for Intrusion Detection System Based on Ensemble Trees and SHAP Method" *Sensors* 22, no. 3: Url, 2. https://en.wikipedia.org/wiki/Logistic_regression, 2020
- Van Westen CJ., Van Asch TWJ., and Soeters R. (2006). Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 65(2):167-184.
- Wang H., Zhang L., Yin K., Luo H., and Li J. (2021). Landslide identification using machine learning. *Geoscience Frontiers*. 12(1):351-364.
- Wang Y., Fang Z., and Hong H. (2019). Comparison of convolutional neural networks for landslide susceptibility mapping in Yanshan County, China. *Science of The Total Environment*. 666:975-993.
- Wang Y., Feng L., Li S., Ren F., and Du Q. (2020). A hybrid model considering spatial heterogeneity for landslide susceptibility mapping in Zhejiang Province, China. *CATENA*. 188:104425.
- Wu Z., Wu Y., Yang Y., Chen F., Zhang N., Ke Y., and Li W. (2017). A comparative study on the landslide susceptibility mapping using logistic regression and statistical index models. *Arabian Journal of Geosciences*. 10(8):187.
- Yamaguchi, S., and Kasai, M. (2022). A new index representative of seismic cracks to assess post-seismic landslide susceptibility. *Transactions in GIS*, 26, 1040– 1061.

- Yi Y., Zhang Z., Zhang W., Jia H., and Zhang J. (2020). Landslide susceptibility mapping using multiscale sampling strategy and convolutional neural network: A case study in Jiuzhaigou region. *CATENA*. 195:104851.
- Yilmaz I. (2010). The effect of the sampling strategies on the landslide susceptibility mapping by conditional probability and artificial neural networks. *Environmental Earth Sciences*. 60(3):505-519.
- Youssef AM., and Pourghasemi HR. (2021). Landslide susceptibility mapping using machine learning algorithms and comparison of their performance at Abha Basin, Asir Region, Saudi Arabia. *Geoscience Frontiers*. 12(2):639-655.
- Zhang W., Goh ATC., Zhang Y., Chen Y., and Xiao Y. (2015). Assessment of soil liquefaction based on capacity energy concept and multivariate adaptive regression splines. *Engineering Geology*. 188:29-37.
- Zhang W., and Goh ATC. (2016). Multivariate adaptive regression splines and neural network models for prediction of pile drivability. *Geoscience Frontiers*. 7(1):45-52.
- Zhao, Z., He, Y., Yao, S., Yang, W., Wang, W., Zhang, L., and Sun, Q. (2022). A comparative study of different neural network models for landslide susceptibility mapping. *Advances in Space Research*, 70(2), 383–401.
- Zhang, K., Wu, X., Niu, R., Yang, K. and Zhao, L. (2017). The assessment of landslide susceptibility mapping using random forest and decision tree methods in the Three Gorges Reservoir area, China. *Environmental Earth Sciences*. Vol: 11 – 76, pages 1-20
- Zhang J., Ma X., Zhang J., Sun D., Zhou X., Mi C. and Wen H. (2023). Insights into geospatial heterogeneity of landslide susceptibility based on the SHAP-XGBoost model, *Journal of Environmental Management*, Volume 332, 2023, 117357, ISSN 0301-4797.
- Zhu AX., Miao Y., Yang L., Bai S., Liu J., and Hong H. (2018). Comparison of the presence-only method and presence-absence method in landslide susceptibility mapping. *CATENA*. 171:222-233.

Bağımsız Bileşen Analizi ve Makine Öğrenmesi Kullanılarak Omurilik Yaralanması Olan Kişilerden Alınan EEG Sinyallerinden El Hareketlerinin Sınıflandırılması

Ebru SAYILGAN^{1*} 

Öz

Bu çalışmanın temel amacı, Omurilik Yaralanması (OY) olan kişilerin, kol ve el hareketlerinin, kodu çözülebilir nöral bağıntılarını koruduğunu göstermektir. OY'li on kişiden pronasyon, süpinasyon, palmar kavrama, lateral kavrama ve el açma hareketleri düşündürülerek alınan ElektroEnsefaloGrafı (EEG) sinyallerinin ayırt edici hareket bilgisi araştırılmıştır. Bunu yaparken kullanılan yöntemlerde Bağımsız Bileşen Analizi (BBA/ICA) yöntemi hem artefakt gidermede hem de yeni bir yaklaşım olarak öznelik vektörlerini çıkarmada kullanılmıştır. Önerilen yöntemde öznelik vektörleri bağımsız bileşenlerde ortak bilgi matrisi çıkarılarak oluşturulmuştur. Çıkarılan ve seçimi yapılan öznelik vektörleri dört farklı makine öğrenmesi modeli (Destek Vektör Makinesi (DVM), k-En Yakın Komşuluk (k-EYK), AdaBoost ve Karar Ağaçları (KA)) ile test edilmiştir. Model değerlendirme aşamasında aşırı öğrenmenin önüne geçmek için 5-katlamalı çapraz doğrulama ve hata matrisi yöntemleri kullanılmıştır. Sonuç olarak, incelenen beş sınıfa göre elde edilen başarımlar oldukça yüksek çıkmıştır. Deneklerin ortalaması alındığında elde edilen model doğruluk değerleri sırasıyla DVM'de 0.9024 ± 0.0781 , k-EYK'da 0.8582 ± 0.0985 , AdaBoost'ta 0.7924 ± 0.0937 ve KA'da 0.8089 ± 0.0645 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara dayanarak OY olan bireylerin kol ve el hareketlerinin ayırt edicilik performansının önerilen yöntem ile oldukça yüksek sonuçlar verdiği görülmektedir. BBA yöntemine dayalı bir öznelik çıkarma ve DVM modeli ile sınıflandırma metodolojisinin OY'li hastaların rehabilitasyon tedavisinde EEG temelli beyin bilgisayar arayüzü uygulamalarına önemli bir katkısı olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Omurilik yaralanması, EEG, Bağımsız bileşen analizi, Sınıflandırma, Makine öğrenmesi.

Classification of Hand Movements from EEG Signals from Persons with Spinal Cord Injury Using Independent Component Analysis and Machine Learning

Abstract

The main aim of this study is to demonstrate that people with Spinal Cord Injury (SCI) preserve decipherable neural correlates of arm and hand movements. The distinctive movement information of ElectroEncephaloGraphy (EEG) signals obtained by imagining pronation, supination, palmar grasp, lateral grasp and hand open movements from eight subjects with SCI was investigated. In doing so, Independent Component Analysis (ICA) was used in both artifact removal and feature vector extraction as a new approach. In the proposed method, feature vectors were created by extracting the common information matrix in independent components. Extracted and selected feature vectors were tested with four different machine learning models (Support Vector Machine (SVM), k-Nearest Neighbor (kNN), AdaBoost, and Decision Trees (DT)). In the model evaluation phase, 5-fold cross validation and confusion matrix methods were used to prevent over-learning. As a result, according to the five classes the obtained performance is quite high. Depending on all subject's average values, the model accuracies were calculated as 0.9024 ± 0.0781 in SVM, 0.8582 ± 0.0985 in kNN, 0.7924 ± 0.0937 in AdaBoost, and 0.8089 ± 0.0645 in DT, respectively. Based on these results, it is seen that the discrimination performance of arm and hand movements of individuals with SCI is high with the proposed method. It is thought that a feature extraction and classification methodology based on the ICA method and SVM model will make an important contribution to EEG-based brain computer interface applications in the rehabilitation treatment of patients with SCI.

Keywords: Spinal cord injury, EEG, Independent component analysis, classification, Machine learning.

¹İzmir Ekonomi Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, ebru.sayilgan@ieu.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 04.03.2024

Kabul/Accepted: 30.07.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Giriş

Omurilik Yaralanması (OY), omurga içinde bulunan sinir dokusunun çeşitli nedenlerle (trafik kazası, yüksekte düşme, sığ sulara balıklama atlama, ateşli silah yaralanmaları vb.) zarar görmesine verilen genel bir isimdir. OY, birey üzerinde önemli bir sosyal ve ekonomik etkiye sahip olan ve kalıcı olabilecek sakatlığın en önemli nedenlerinden biridir. OY'li hastaların diğer insanlara oranla 28,8 kat daha yüksek bir ölüm riskine sahip olduğu da yapılan araştırmalar sonucunda belirtilmektedir (Leite ve ark., 2019). OY'nin dünya çapındaki yayılma hızının milyonda 440-526 aralığında olduğu tahmin edilmektedir. İnsidans oranı (risk altındaki sağlam kişilerin belirli bir hastalığa yakalanma olasılığını gösteren ölçüt) milyonda 13 ile milyonda 163,4 arasında değişmektedir ve az gelişmiş ülkelerde milyonda 220'ye ulaşmaktadır (Kang ve ark., 2018).

Son yıllarda rehabilitasyon protokollerinin iyileştirilmesi, robotik yardımcı yürüyüş sistemlerinin geliştirilmesi, yeni teknolojilerle tasarlanan rehabilitasyon robotlarının artması vb. ilerlemeler, OY'li hastalara uygulanan rehabilitasyon terapilerine önemli ölçüde katkı sağlamıştır. Bu ilerlemelere rağmen anlamlı bir iyileşme gösteremeyen ciddi düzeyde bozukluğu olan önemli sayıda hasta bulunmaktadır (Nam ve ark., 2017). OY'de fonksiyonel iyileşme mekanizmalarını anlamak ve tedavi yanıtının adımlarını geliştirmek ve yenilikçi yaklaşımların artması OY hastalarına özel tedavilerin geliştirilmesi için çok önemlidir. Yeni kanıtlar, nöro plastisitenin, OY düzeyinde ve beynin kortikal alanlarındaki devrelerin yeniden düzenlenmesi yoluyla duyuşsal, motor ve otonomik işlevlerin geri kazanılmasında önemli bir rolü olduğunu göstermektedir (Athanasiou ve ark., 2012; Liu ve ark., 2012). Mevcut kanıtlar, beyin görüntüleme yöntemlerinden biri olan ElektroEnsefaloGrafı (EEG)'nin OY ile ilgili fonksiyonel bozukluğu ve nöro plastik değişiklikleri değerlendirmek için yararlı bir araç olabileceğini göstermektedir (Hernandez-Rojas ve ark., 2022; Simis ve ark., 2020).

Literatürdeki çalışmalar, EEG ölçümlerinin inme gibi durumlarda Beyin Bilgisayar Arayüzleri (BCI) ve/veya robot yardımcı rehabilitasyonla birlikte motor iyileşmeyi tahmin etmede ve tedavide de yararlı olabileceğini göstermiştir (Sayilgan ve ark., 2021a; Sayilgan ve ark., 2021b; Sayilgan ve ark., 2022). Üst ekstremitenin karmaşık fonksiyonel hareketlerinin kodu, bilgisayar ile insan beyni arasında daha iyi iletişim kurabilmek için hala farklı yöntemler denenerek çözülmeye çalışılmaktadır (Mohseni ve ark., 2020; Ofner ve ark., 2017). Geçtiğimiz yıllarda, motor hayali düşündürülerek yapılan EEG araştırmalarından elde edilen bilgilerin çözümlenmesinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Wang ve ark. (2004) sağ ve sol el hareketlerinin ayırt ediciliğini çalışmış, öznitelik vektörleri olarak uzaysal desenlerin korelasyonunu ve k-en yakın komşuluk (k-EYK) sınıflandırıcısını kullanarak %80'lik ortalama doğruluk elde etmiştir. Schlogl ve ark. (2005) sağ el, sol el, dil ve ayak hareketlerini araştırırken Destek Vektör Makinesini (DVM) kullanmış ve %52 ila

%77 arasında bir doğruluk elde etmiştir. Sreeja ve ark. (2019) sağ el, sol el, dil ve ayak hareketlerini dalgacık enerjilerini öznitelik vektörleri olarak kullanarak, seyreklik sınıflandırıcısı modeli ile sınıflandırmıştır. Bu metodoloji ile %91,48'lik ortalama doğruluk elde etti. Pfurtscheller ve ark. (2009) OY olan hastaların sağ el, sol el ve ayak hareketlerinin motor hayalinin EEG ile görüntülenmesini araştırdılar. Sonuç olarak, Ortak Uzaysal Desenler (OUD) öznitelikleri ve Doğrusal Diskriminant Analizi (DDA) makine öğrenmesi algoritması kullanmıştır. Mohseni ve ark. (2020) bir k-EYK sınıflandırıcı kullanarak beş farklı üst ekstremite hareketini sınıflandırmışlar ve ortalama %94'lük bir sınıflandırma doğruluğu elde etmişlerdir. Ofner ve ark. (2017), düşük frekanslı (< 3 Hz) motor hayali içeren EEG sinyallerinin zaman alanında tek üst ekstremite hareketlerinin kodlanmasını analiz etmiştir. Dirsek fleksiyonu, dirsek ekstansiyonu, önkol pronasyonu, önkol supinasyonu, el açık ve el kapalı olmak üzere altı sınıf hareket uygulamışlardır. Bir DDA sınıflandırıcısı kullanarak ve 15 sağlıklı denek ile yaklaşık %27'lik bir ortalama doğruluk elde etmişlerdir. Ofner ve ark. (2019) el açık, önkol pronasyonu, önkol supinasyonu, palmar kavrama ve lateral kavrama ile servikal OY'li 10 hastayı incelemişlerdir. Düşük frekanslı (<3 Hz) motor hayali EEG sinyallerinden beş sınıflı fonksiyonel hareketlerin kodunu çözmek için bir DDA sınıflandırıcı kullanıldığında ise, %45'lik bir ortalama sınıflandırma doğruluk oranı elde etmişlerdir.

Gerçek operasyonel ortamlarda yaygın EEG gürültülerinden (kas aktivitesi, göz kırpma, göz hareketi ve çevresel gürültü vb.) kaynaklanan yetersiz performans, bilgisayar odaklı teoride kalan sinirbilim araştırmalarının pratikteki BCI uygulamalarına geçişini hâlâ engellemektedir. Bu problemlere çözüm olarak kullanılan Bağımsız Bileşen Analizi (BBA/ICA) beyin sinyallerini artefaktlardan ayırmak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Wang ve Jung, 2012; Dev ve ark., 2022). Görevle ilgili Bağımsız Bileşen (BB) dinamiklerini değerlendirmek için makine öğrenimi algoritmalarının uygulanması, bilişsel durumları tahmin etmekte EEG tabanlı BCI'ların performansını önemli derecede artırdığı kanıtlanmıştır (Kavuri ve ark., 2018; Sai ve ark., 2018; Kang ve ark., 2022; Cao ve Slobounov, 2010; Agarwal ve Zubair, 2021; Khoshnevis ve Sankar, 2020). Örneğin; Cao ve ark. (2010)'nın yaptığı çalışmada travmatik beyin yaralanması geçiren insanlar üzerinden alınan EEG sinyalleri analiz edilirken, Agarwal ve ark. (2021)'nin yaptığı çalışmada alkolik ve alkol kullanmayan insanların beyin aktiviteleri BBA kullanılarak sınıflandırılmaya çalışılmıştır. Bununla birlikte, çoğu BCI'nın yüksek performansla çalışması, bu ilgilenilen BB'lerin ve ardından BBA'nın seçilmesinde manuel müdahale gerektirmektedir. Bu süreçte ilk olarak, mevcut BBA tabanlı modellerin çoğu önceden tanımlanmış bir BB kullanmaktadır. Karmaşık insan davranışlarını sezgisel olarak karakterize etmek için görevle ilgili beyin süreçlerini birleştirmek, yalnızca birkaç belirli sinyal kullanmaktan daha makul bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. İkinci olarak, BB'lerin sırası belirlenmemektedir. Bu nedenle, BBA gerçekleştirildikten sonra otomatik bir BB seçim yöntemi gerekmektedir. Üçüncüsü ise, ölçülen EEG sinyallerindeki durağan

olmama hali, BBA analizinden farklı sonuçlar üretebilmektedir. Diğer deneklerden elde edilen BB'ler büyük ölçüde değişebilmektedir. Yani, bazı BB'ler bir öznenin kayıtlarında bulunurken diğerlerinde bulunmama olasılığı belirlemektedir. Yalnızca bir veya iki belirli BB kullanan çoğu BBA tabanlı BCI sistemi, elde edilen BB'lerin hiçbiri hedeflenen BB'lerle eşleşmezse başarısız olmaktadır. Bu sorunları çözmek için, bu çalışma, BBA tabanlı BCI sistemine çoklu sınıflandırıcılı bir modelin dahil edilmesini önermektedir.

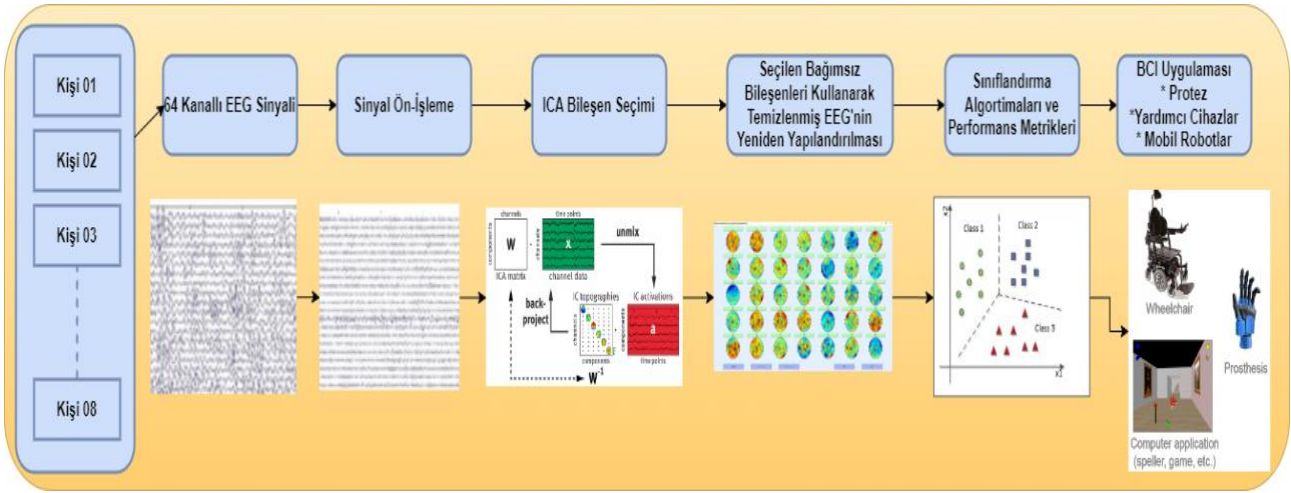
Ayrıca, literatürde BBA kullanılarak yapılan çalışmaların çoğu sağlıklı bireylerden alınan EEG sinyalleri olup OY'lı bireylerden alınan sinyallerle yapılan çalışmalar oldukça kısıtlı olarak karşımıza çıkmaktadır. Diğer taraftan ikili ve üçlü sınıflandırmalar dışında çoklu komut içeren EEG tabanlı BCI çalışmalarındaki tahmin doğruluğunun artırılması için yenilikçi yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle üç ve daha fazla sınıfı yüksek doğrulukla ayırt eden örüntü tanıma algoritmaları ile ilgili çalışmalar çok azdır. Bu nedenlerden dolayı, bu çalışmada, OY hastalarında EEG ile ölçülen beyin aktivitesindeki fonksiyonel değişikliklerin bilinen makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak yüksek doğrulukta sınıflandırılması hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda özellikle 5 (beş) görev sınıflandırma problemlerinde yüksek doğrulukla kullanılacak bir yöntem önerilmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

Önerilen yöntem temel olarak dört adımdan oluşmaktadır:

- (i) MATLAB programı kullanılarak EEG sinyallerinin ön işlenmesi,
- (ii) BBA yöntemi uygulanarak OY'lı insanların EEG sinyallerinden BB'lerin hesaplanması,
- (iii) Pronasyon, supinasyon, avuç içi kavrama, yanal kavrama ve el açık hareketleri düşündürülerek kaydedilen EEG sinyallerinin yaygın kullanılan makine öğrenmesi modelleri ile sınıflandırılması,
- (iv) Sınıflandırmada kullanılan makine öğrenme modellerini değerlendirme metriklerinin hesaplanması ve tüm sinyal işleme süresinin kaydedilmesi.

Adımların akış şeması Şekil 1'de gösterilmektedir.

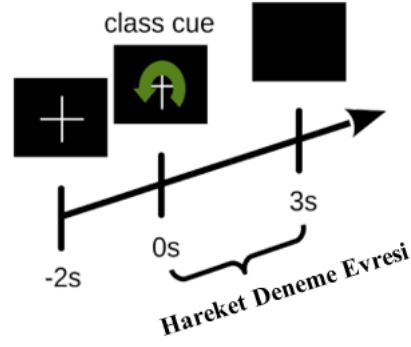


Şekil 1. Bağımsız Bileşen Analizi (ICA/BBA) kullanılarak önerilen yöntembilimin akış şeması

2.1. Veri seti tanımlama

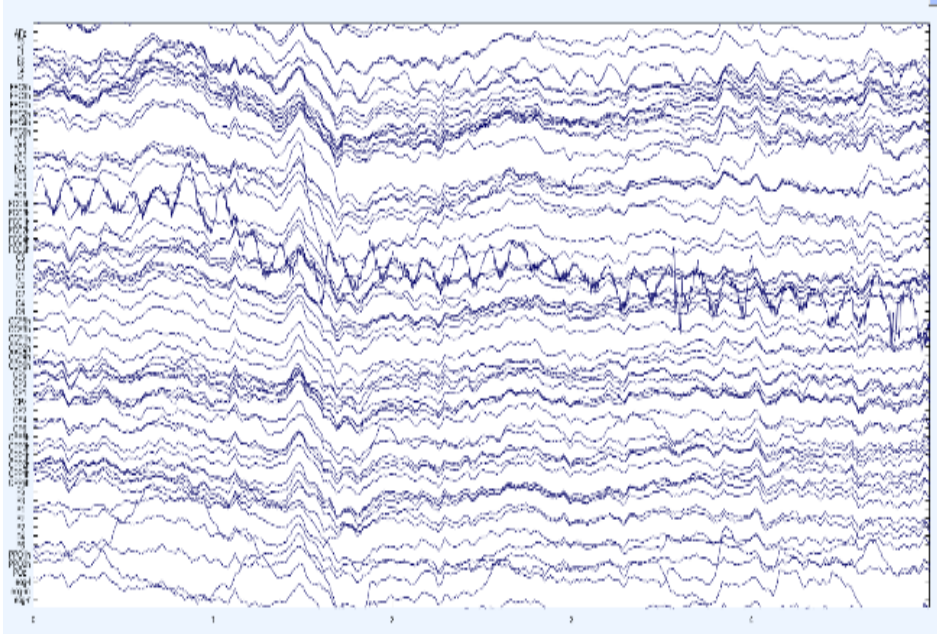
Bu çalışma, Ofner ve ark. (2019)'nın açık erişimli “Attempted arm and hand movements in persons with spinal cord injury” veri setini incelemektedir (Ofner ve ark., 2019). Veri seti, her biri 5 farklı el hareketi deneyen, yaşları 20 ila 59 arasında değişen 10 katılımcıdan elde edilen verileri içermektedir. Bu hareketler: pronasyon, supinasyon, palmar kavrama, yan kavrama ve el açmadır. EEG'yi frontal, santral, parietal ve temporal alanları kapsayan 61 elektrotla ölçmektedirler. Ayrıca burun çevresi göz altına yerleştirilen 3 elektrot ile elektrookülogramı (EOG) ölçülmüştür. Sinyaller, dört adet 16 kanallı g.USBamps biyosinyal amplifikatörü ve bir g.GAMMAsys/g.LADYbird aktif elektrot sistemi (g.tec Medical Engineering GmbH, Avusturya) kullanılarak kaydedilmiştir. Sinyaller 256 Hz'de örneklenmiş ve 0,01 Hz ile 100 Hz arasında değişen bir bant geçiren (8. dereceden Chebyshev filtresi) filtre uygulanmıştır. Güç hattındaki paraziti bastırmak için bir çentik filtresi (50 Hz) uygulanmıştır. Kaydedilen veriler GDF Formatında (Biyosinyaller için Genel Veri Formatı) saklanmıştır.

Katılımcıların her biri bilgisayar ekranının önüne, kollarını kucağındaki yastığa ya da masaya dayayarak oturmaktadırlar ve bilgisayar ekranında verilen talimatları yerine getirmektedirler. Deneme başlangıcında, bir sabitleme çaprazı ve bir bip sesi sunulmaktadır. Katılımcılara Şekil 2’de gösterilen deney ekranına odaklanmaları ve göz hareketlerinden kaçınmak için 5 saniyelik tüm deneme süresi boyunca görüntülenen çapraz işarete bakışlarını odaklamaları istenilmektedir. Ayrıca, katılımcılara deneme süresi boyunca yutkunmaktan ve göz kırpmaktan kaçınmaları talimatını verilmektedir. Hayal edilmesi istenen hareketlerin (pronasyon, supinasyon, avuç içi kavrama, yanal kavrama veya el açık) sınıf işareti, deneme başladıktan 2 saniye sonra 3 saniye boyunca (yani denemenin sonuna kadar) gösterilmektedir.



Şekil 2. Deneme dizisinde -2'de bip sesiyle birlikte bir toplama işareti belirdi; 0'da sınıf işareti sunuldu ve katılımcılar ilgili hareketi yapmayı hayal etti. Denemenin ardından rastgele 1 ila 3 saniyelik bir ara verildi.

Katılımcılar bir hareketi gerçekleştirebilmişlerse, deneme süresinden sonra ilk konumlarına geri dönmektedirler. Her bir hareket için 8 deneme olacak şekilde toplamda 40 deneme kaydedilmiştir. Farklı zamanlarda bu çalışma 9 kez tekrar edilmiştir. Sonuç olarak, sınıf başına toplam 72 deneme yapılmıştır. Hareket hayali ve dinlenme durumuyla ilgili süreler sırasıyla 65 saniye ve 70 saniye sürdü. Katılımcılardan toplanan orijinal veriler, gereksiz bilgilerin ortadan kaldırılması için işlendi. Sonuçta elde edilen veriler 64 satır ve 77123 sütundan oluşan bir matrisin değerleri olarak kullanıldı.



Şekil 3. P01 katılımcısının 64 kanalın tümü için ham EEG sinyali zaman domeni grafiği (y-ekseni “voltaj (μV)” – x-ekseni “zaman (sn.)”).

2.2. Bağımsız Bileşen Analizi (BBA) ile öznitelik çıkarımı

Bağımsız Bileşen Analizi (BBA), çok değişkenli EEG verilerini istatistiksel olarak bağımsız, Gauss olmayan bileşenlerine ayrıştırmak için yaygın olarak kabul edilen bir araç olarak literatürde karşımıza çıkmaktadır. EEG sinyallerini kaynak bileşenlerine ayrıştırmak için kullanılmaktadır.

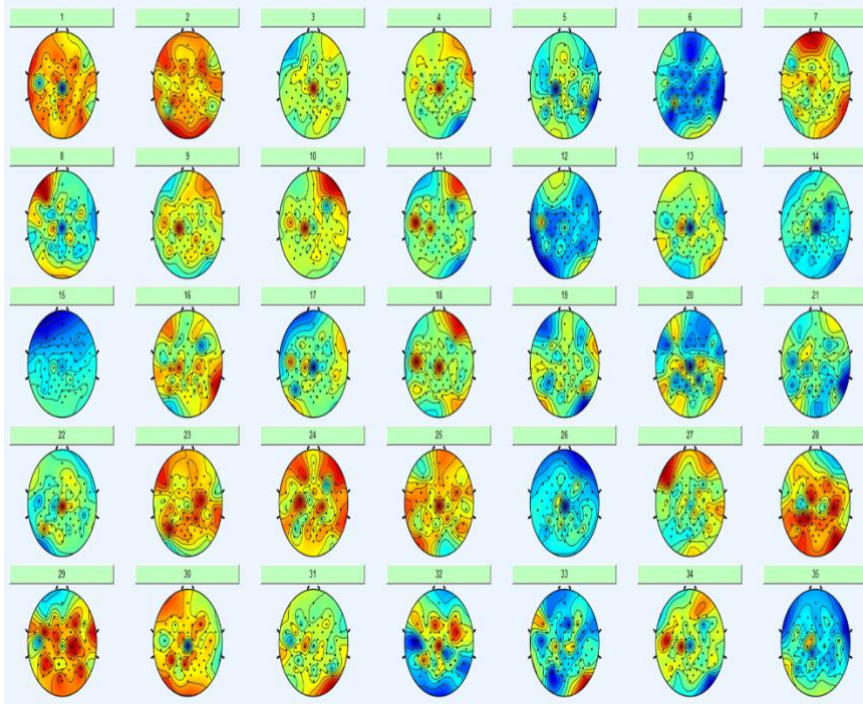
Maksimum düzeyde bağımsız bileşenleri çıkarmak için entropiyi maksimize eden Infomax BBA (Bell ve Sejnowski, 1995), EEG sinyallerini bağımsız bileşenlere (BB'lere / IC'lere) ayırtmak için kullanılmaktadır. Genişletilmiş Infomax BBA (ICA) yöntemi ise, Infomax ayrışımının bir uzantısı olarak, bileşenler arasındaki karşılıklı bilgiyi en aza indirerek ve ortak entropilerini en üst düzeye çıkararak kaynakların Gauss altı ve süper Gauss dağılımını ayırmaktadır. Bu çalışmada sunulan Infomax algoritması, varsayılan ayarlarıyla MATLAB programı kullanılarak EEGLAB araç kutusunun runica komutu kullanılarak uygulanmıştır. Bu bölüm, istatistiksel olarak bağımsız bileşenleri elde etmek için genişletilmiş infomax BBA ayrıştırma yöntemini ve yapay BB'leri tanımayla yönelik işaretleri açıklamaktadır.

İlk olarak EEG sinyalleri denklem (1) ve (2)'ye göre ayrıştırılır:

$$X_{mxn} = A_{mxm} Y_{mxn} \quad (1)$$

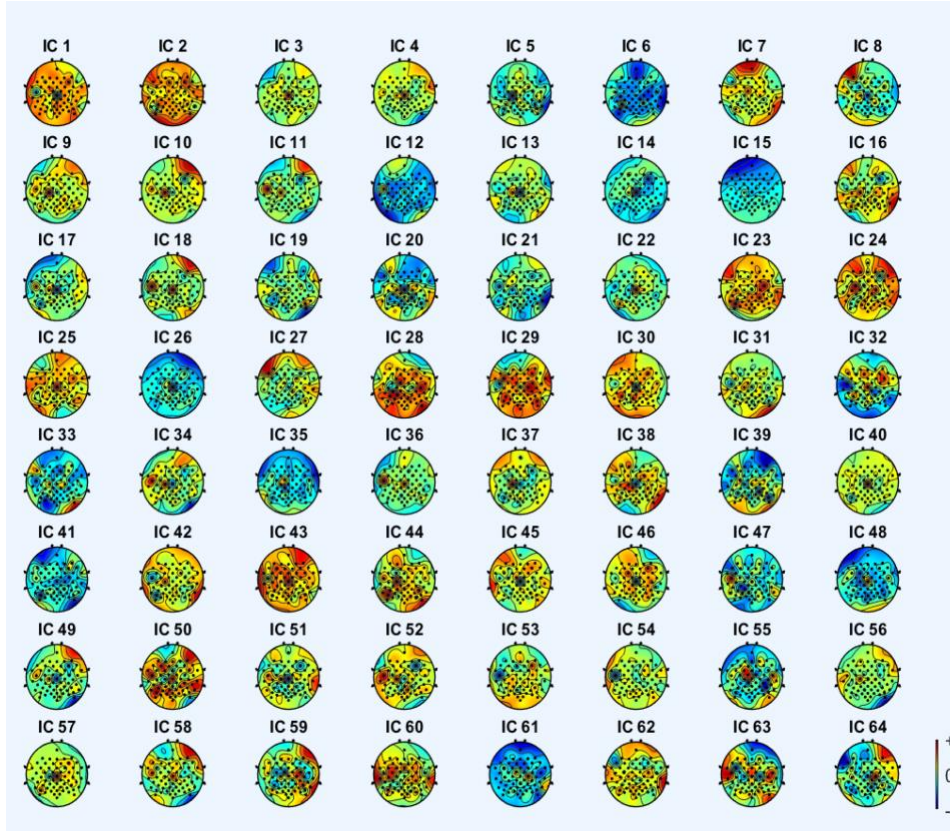
$$Y_{mxn} = W_{mxm} X_{mxn} \quad (2)$$

Burada X, kaydedilen EEG sinyalidir, A, tam sütun sırasına sahip karıştırma matrisidir, Y, EEG sinyallerindeki BB'leri veya kaynakları temsil etmektedir, W, A'nın ters matrisidir ve m ve n, EEG kanallarının ve zaman çerçevelerinin sayısını temsil etmektedir. Göz hareketi, kas hareketi ve elektrik hattı gürültüsü (Demir ve ark., 2022; Chaumon ve ark., 2015) ile güçlü bir şekilde ilişkili olan gürültü BB'leri manuel olarak seçilmektedir. Gürültü BB'leri EEGLAB (Delorme ve Makeig, 2004) kılavuzu ile kolayca belirlenmektedir. Buna ek olarak çıkarılan topografi görüntüleri ile de BB'lerde hangi kanalda aktivasyonun düşük veya yüksek olduğu Şekil 4'te sunulduğu gibi tespit edilebilmektedir. Bu şekilde görülen renk kodları, kırmızı renkli olan bölgeler aktivasyonun en yüksek seviyede seyrettiği ve mavi renkli bölgeler ise aktivasyonun en düşük seviyelerde tespit edildiği bölgeler olarak yorumlanmaktadır. Arada kalan renkler ise sırasıyla sıcak renklerden (kırmızı) soğuk renklere (mavi) geçiş sırasıyla aktivasyon oranını ifade etmektedir. Her bir kanaldan alınan bu topografiler ile verilen göreve bağlı olarak beynin hangi bölgesinin ve/veya lobunun diğerlerine kıyasla daha aktif ve kullanılabilir olduğu bilgisine ulaşılmaktadır. Bu durumdan EEG çalışmalarında kullanılacak minimum kanal sayısı ile beyin bilgisayar arayüzü tasarlama çalışmalarında efektif olarak faydalanılmaktadır. Veri analizi sırasında da veri işleme süresi kısıllacağından gerçek-zamanlı çalışmalar için daha uygun bir yaklaşım olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4. Bağımsız bileşen analizi öncesi beyin aktivasyonu haritalama.

Öznitelik çıkarımı için bileşen alanı, EEG verilerinin BBA kullanılarak ayrıştırılmasından ve gürültü BB'lerinin çıkarılmasından sonra elde edilen BB'lerdir. Örneğin, bileşen uzayında, yeni BB'ler seçim ve çaprazlama işlemi ile üretilmektedir. Yeniden yapılandırılmış EEG sinyalleri, önerilen BBA öznitelik çıkarımı prosedürlerini açıklamaktadır. Tablo 1, önerilen yöntemin tüm hesaplamalarını göstermektedir. Her deneme için gürültü ve temiz BB'ler belirlendikten sonra, eğitim verilerinin etiketine göre her sınıfın yalnızca temiz BB'leri toplanır. Birikmiş BB'ler arasındaki seçim, bağımsızlığa dayalı olarak yapılır. Bu nedenle, yeni BB oluşturmak için her sınıftan BB'ler ortak bilgiye (Papana ve Kugiumtzis, 2009) dayalı olarak sıralanmaktadır. BB'leri seçmek için, Denklem (3) kullanılarak her sınıftaki BB'ler için ortalama karşılıklı bilgiler hesaplanmakta ve bunlar artan düzende sıralanmaktadır. Buna göre BB'ler seçilmektedir. Seçilen BB'ler Şekil 5'te 64 kanallı EEG bileşenleri için sunulmaktadır.



Şekil 5. 64-kanallı EEG sinyalinden çıkarılan Bağımsız Bileşenler (IC / BB).

Ortak bilgi matrisinde $I(X; Y)$ iki ayrık değişken X ve Y şu şekilde tanımlanabilir:

$$I(X; Y) = \sum_{y \in Y} \sum_{x \in X} p(x, y) \log \left(\frac{p(x, y)}{p(x)p(y)} \right) \quad (3)$$

Burada $p(x, y)$, X ve Y 'nin ortak olasılık fonksiyonudur ve $p(x)$ ve $p(y)$, sırasıyla X ve Y 'nin marjinal olasılık dağılım fonksiyonlarıdır. Bileşen uzayındaki seçim sürecinin algoritması, Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Öznitelik çıkarmak için bağımsız bileşen seçimi algoritması.

Bağımsız Bileşen Seçim Algoritması	
1.	BB : Bağımsız bileşen
2.	$D \leftarrow$ Her sınıftaki bileşen sayısı
3.	$K \leftarrow$ Her sınıftan seçilen bileşen sayısı
4.	$[D \times D]$ sıfır matris olan ortak bilgi (MI) matrisi L 'yi başlat
5.	for $i \leftarrow D$ do
6.	for $j \leftarrow D$ do $\setminus j = i+1$
7.	$L(i, j) = MI(BB(i), BB(j))$ (Denklem (3))'e göre MI hesapla
8.	$L(j, i) = L(i, j)$
9.	end for
10.	$A(i) = \frac{1}{D} \sum_{k=1}^D L(i, k)$
11.	end for
12.	A artan düzende sıralanır.
13.	Sıralanan A 'dan ilk- K bileşenlerini seçin:

2.3. Sınıflandırma modelleri ve performans metrikleri

Bu çalışmada kullanılan sınıflandırma modelleri ve performans metriklerinin ölçülmesinde MATLAB programı Classification Learner araç kutusu kullanılmıştır. EEG verilerinin kaydedildiği 64 kanalın tamamı makine öğrenmesi modellerinde kullanılmıştır. Sınıflandırıcı modellerinin parametreleri varsayılan değerler üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilip, seçilmiştir.

2.3.1. Makine öğrenmesi modelleri

2.3.1.1. Destek Vektör Makinesi (DVM)

Hem sınıflandırma hem de regresyon çalışmalarında yaygın olarak kullanılan başarılı bir yaklaşım olan Destek Vektör Makinesi (DVM), denetimli bir makine öğrenimi algoritmasıdır. Verileri sınıflandırmak için, en iyi sınıflandırma performansının gerçekleştirilebileceği hiper düzlem bulundurmaktadır. Veri, hiper düzlemin hangi tarafına düştüğüne bağlı olarak o sınıfın elemanı olarak tanımlanır (Bascil ve ark., 2016). Bu çalışmada, Kernel Radyal Tabanlı Fonksiyon (RBF) kullanan DVM kullanılmıştır.

2.3.1.2. k-En Yakın Komşuluk (k-EYK)

Örüntü tanıma tekniği sınıfına ait olan k-En Yakın Komşuluk (k-EYK) sınıflandırması, parametrik olmayan, uzaklık hesabı temelli bir öğrenme modelidir. Veri seti, eğitim seti ve test seti olmak üzere iki gruba ayrılır ve eğitim setindeki bilgiler kullanılarak öğrenme işlemi gerçekleştirilir. İlk olarak sınıflandırılması gereken örnek ile tüm eğitim veri seti arasındaki mesafe belirlenir. Bir sonraki adım, en kısa mesafeye sahip en yakın "k" adet komşuyu belirlemektir. Son olarak, yeni örneğin sınıfı, bu k en yakın komşunun sınıfları arasından en yaygın olanı olarak belirlenir (Suyal ve Goyal, 2022). k-En Yakın Komşuluk sınıflandırıcısı için k değeri sırasıyla 3-10 aralığında değerler ile denenmiştir. Bu çalışmada sınıflandırıcı olarak en yakın 5 komşu k-EYK seçilmiştir. Uzaklık hesabı için Euclidean metriği kullanılmıştır.

2.3.1.3. AdaBoost

AdaBoost algoritması, sürekli eğitim yoluyla veri sınıflandırma yeteneğini geliştiren basit bir zayıf sınıflandırma algoritması iyileştirme sürecidir. Eğitim örnekleri öğrenilerek ilk zayıf sınıflandırıcı elde edilir ve yanlış örnekler eğitimsiz verilerle birleştirilerek yeni bir eğitim örneği

oluşturulur. Ayrıca bu örnek öğrenilerek ikinci zayıf sınıflandırıcı elde edilmektedir. Yanlış örnek, üçüncü zayıf sınıflandırıcıyı elde etmek için eğitilebilecek başka bir yeni eğitim örneği oluşturmak için eğitilmemiş verilerle birleştirilir. Bu işlemi birçok kez tekrarladıktan sonra, sonunda geliştirilmiş sağlam sınıflandırıcı elde edilmektedir. Doğru sınıflandırma sayısını artırmak için AdaBoost algoritması örneklere farklı ağırlıklar vermektedir. Doğru sınıflandırılan örneklere nispeten düşük ağırlıklar verilir ve yanlış olanların artırılması gerekir, bu da modeli yanlış sınıflandırılan örneklere daha fazla dikkat etmeye zorlamaktadır. Her bir temel ağaç modelini eğitirken, veri setindeki her örneğin ağırlık dağılımının ayarlanması gerekmektedir. Her eğitim verisi değişeceği için eğitim sonuçları da farklı olacaktır ve son olarak tüm sonuçlar toplanmaktadır (Schapire, 2013).

2.3.1.4 Karar ağacı (KA)

Karar ağacı (KA), girdi verilerine dayalı kararlar vermek için akış şeması benzeri bir yapı kullanan tahmine dayalı bir modeldir. Karar ağacı, karar desteğinde kullanılan, kararları ve bunların potansiyel sonuçlarını, şans ihtimallerini, kaynak harcamalarını ve faydayı içeren hiyerarşik bir modeldir. Bu algoritmik model, koşullu kontrol ifadelerini kullanır ve parametrik değildir, denetimli öğrenmedir hem sınıflandırma hem de regresyon görevleri için yararlıdır. Ağaç yapısı, hiyerarşik, ağaç benzeri bir yapı oluşturan bir kök düğüm, dallar, iç düğümler ve yaprak düğümlerden oluşmaktadır (Kotsiantis, 2013).

2.3.2. Makine öğrenmesi modellerini değerlendirme

Bu çalışmada, makine öğrenmesi modellerinin başarımlarını değerlendirmek için literatürde de yaygın kullanılan hata matrisi ve k-katlamalı çapraz doğrulama yöntemleri kullanılmıştır.

2.3.2.1. K- katlamalı çapraz doğrulama

Doğrusal bir model için tipik bir K-katlamalı çapraz doğrulama prosedüründe, veri seti rastgele ve eşit şekilde K parçaya bölünür. Eğitim seti adı verilen veri setinin K - 1 parçasına dayalı olarak bir aday model oluşturulur. Bu aday modelin tahmin doğruluğu daha sonra uzatma kısmındaki (kalan 1'deki) verileri içeren bir test setinde değerlendirilir. Sırasıyla K parçalarının her birini test seti olarak kullanarak ve model oluşturma ve değerlendirme prosedürünü tekrarlayarak, en küçük çapraz doğrulama puanına sahip modeli (tipik olarak ortalama kare tahmin hatası (MSPE)) 'optimal' model olarak seçilir. p bağımsız değişken verildiğinde, toplam $2^p - 1$ olası model vardır. K-katlamalı çapraz doğrulama prosedüründe, her model aslında K kez değerlendirilir. Bu nedenle, model

değerlendirmesinin $K (2^p - 1)$ katı aracılığıyla tek bir 'optimal' model seçilir (Jung, 2018; Wong ve Yeh, 2020). Bu çalışmada K değeri 5 seçilmiştir.

2.3.2.2. Hata matrisi

Makine öğrenmesi model başarımını değerlendirmek için öncelikle hata matrisi hesaplanmaktadır. Hata matrisi her bir sınıflandırma algoritmasının test kümesine verdiği cevapların veri setindeki gerçek değerlerle karşılaştırılması ile oluşturulur. İki-sınıflı problemlerde dört farklı durumdan oluşan hata matrisi Tablo 2’de gösterildiği şekildedir (Ohsaki ve ark., 2017):

Tablo 2. İki sınıflı örüntü tanıma problemi için hata matrisi.

Tahmin edilen	Gerçekte olan	
	Pozitif	Negatif
Pozitif	True Positive	False Positive
Negatif	False Negative	True Negative

• Doğruya doğru (True Positive - TP) • Doğruya yanlış (True Negative - TN) • Yanlışta doğru (False Positive - FP) • Yanlışta yanlış (False Negative - FN) Bu değerlere bağlı olarak sınıflandırıcı performansı olarak doğruluk değeri hesaplanır:

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

$$Özgüllük (Spec) = \frac{TN}{FP+TN} \quad (5)$$

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

$$Doğruluk (CA) = \frac{TP+TN}{TP+FP+TN+FN} \quad (7)$$

$$F1 - Skor (F1) = \frac{2*Prec*Geri \text{ çağırma}}{Prec+Geri \text{ çağırma}} \quad (8)$$

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, önerilen yöntemi test etmek ve matematiksel sonuçlarıyla bir EEG analizi gerçekleştirebilmek için, ilk olarak sinyal normalizasyonu ve artefakt eliminasyonu EEGLAB üzerinden gerçekleştirilmiştir. Yüksek geçişli filtre ve alçak geçişli filtre için tipik ayarlar sırasıyla 0,5-1 Hz ve 35-70 Hz olarak ayarlanmıştır. Yüksek geçişli filtre tipik olarak elektro galvanik sinyaller ve hareket artefaktları gibi yavaş artefaktları filtrelerken, alçak geçişli filtre elektromiyografi sinyalleri gibi yüksek frekanslı artefaktları filtrelemektedir. Ek bir çentik filtresi olarak elektrik güç hatlarının (50 Hz) neden olduğu artefaktı gidermek için Notch filtre kullanılmıştır. Elimine edilen

gürültü ve diğer bozuculardan arınan sinyal üzerinde bağımsız bileşen analizi (BBA) “runICA” algoritması ile MATLAB programı üzerinden EEGLAB araç kutusu kullanılarak yapılmıştır (Delorme ve Makeig, 2004). Bağımsız bileşenler (BB’ler), Şekil 4’te gösterildiği üzere 64 kanal ve her bir katılımcı için çıkarılmıştır. Öznitelik olarak kullanılacak olan bileşenler Tablo 1’de anlatılan ve bu amaçla ilk defa kullanılan seçim algoritması ile değerlendirilip seçilmiştir. Toplamda 10 katılımcı ve 5 farklı görev için çoklu sınıflandırma yöntemi ile motor görevlerin ayırt ediciliği test edilmiştir. Sınıflandırmada kullanılan makine öğrenmesi modelleri ve değerlendirme metrikleri MATLAB programı “Classification Learner” uygulaması üzerinden modellerin algoritmasında parametreler varsayılan olarak seçilerek gerçekleştirilmiştir. Sınıflandırma sonuçları aşağıda sırasıyla Tablo 3’ten Tablo 6’ya kadar her bir makine öğrenmesi algoritması ve tüm katılımcılar için sunulmaktadır.

Tablo 3’te DVM makine öğrenmesi modeli kullanılarak elde edilen sonuçlar verilmektedir. Bu sonuçlara göre, katılımcılar kendi aralarında değerlendirildiğinde en yüksek başarımlar 0.991 doğruluk değeri ile P05 katılımcısına aittir. Bu performans hem DVM modeli için hem de diğer modeller arasında en yüksek sınıflandırma sonucunu vermektedir. Bütün katılımcıların ortalaması alındığında ise elde edilen sonuç 0.9024 ± 0.0781 olmaktadır. Genel ortalamaya bakarak DVM modeli için en yüksek başarıma sahip sınıflandırıcı olarak adlandırabiliriz. Toplam model süreleri açısından irdelendiğinde DVM modelinin 4.262 sn eğitim ve 2.523 sn test süresi ile en kısa 3. sonuç veren algoritma olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 3. DVM kullanılarak elde edilen model performans sonuçları.

	CA	F1	Prec	Spec
P01	0.869	0.869	0.873	0.967
P02	0.981	0.981	0.982	0.995
P03	0.931	0.931	0.932	0.983
P04	0.941	0.941	0.941	0.985
P05	0.991	0.991	0.991	0.998
P06	0.875	0.875	0.878	0.969
P07	0.884	0.885	0.889	0.971
P08	0.747	0.748	0.759	0.937
Ort.±	$0.9024 \pm$	$0.9026 \pm$	$0.9056 \pm$	$0.9756 \pm$
Std.	0.0781	0.0778	0.0743	0.0195

Katılımcı ortalamaları incelendiğinde DVM modelinden sonra ikinci en yüksek başarıma sahip olan model, k-EYK modeli olarak karşımıza çıkmaktadır. k-EYK modeli 0.8582 ± 0.0985 doğruluk

performansı göstermektedir. Ayrıca Tablo 7 incelendiğinde k-EYK modelinin eğitim ve test sürelerinin diğerlerine kıyasla en kısa zamanda sonuç verdiği görülmektedir. Algoritmanın hesaplama süresi gerçek zamanlı BCI uygulamalarında kritik bir öneme sahip olduğundan performans metrikleri kadar sürenin de model seçimini etkileyen bir faktör olduğu yadsınamaz bir gerçektir.

Tablo 4. K-EYK kullanılarak elde edilen model performans sonuçları.

	CA	F1	Prec	Spec
P01	0.853	0.853	0.857	0.963
P02	0.950	0.951	0.954	0.988
P03	0.884	0.885	0.887	0.971
P04	0.922	0.922	0.924	0.980
P05	0.994	0.994	0.994	0.998
P06	0.803	0.803	0.806	0.951
P07	0.716	0.718	0.722	0.929
P08	0.744	0.746	0.758	0.936
Ort. \pm	0.8582 \pm	0.8590 \pm	0.8628 \pm	0.9645 \pm
Std.	0.0985	0.0980	0.0956	0.0245

Tablo 5'te verilen AdaBoost modelinin sonuçları irdelendiğinde kişi bazında elde edilen bazı performanslar yüksek olmakla birlikte (P05 \leftrightarrow 0.909), genel ortalama (0.7924 \pm 0.0937) bazında diğer üç yöntemden de düşük sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu modelden elde ettiğimiz sonuçlara göre önerilen modelin kişiselleştirilmiş bir EEG tabanlı BCI sisteminde kullanılması daha uygundur. AdaBoost modelini eğitim ve test süresi (eğitim \leftrightarrow 2.559 sn, test \leftrightarrow 1.287 sn açısından değerlendirdiğimizde ise modelin ikinci en kısa sürede sonuç veren algoritma olduğunu görmekteyiz. Bu da pratik BCI kullanımı için uygun algoritmalar arasında olduğunu kanıtlamaktadır.

Tablo 5. AdaBoost kullanılarak elde edilen model performans sonuçları.

	CA	F1	Prec	Spec
P01	0.762	0.762	0.768	0.941
P02	0.891	0.891	0.892	0.973
P03	0.787	0.787	0.789	0.947
P04	0.887	0.888	0.888	0.972
P05	0.909	0.909	0.911	0.977
P06	0.747	0.747	0.747	0.937
P07	0.678	0.677	0.678	0.920

P08	0.678	0.680	0.684	0.920
Ort.±	0.7924±	0.7926±	0.7946±	0.9484±
Std.	0.0937	0.0937	0.0930	0.2323

Dördüncü model olan karar ağaçları (KA) algoritmasının sonuçları ise Tablo 6'da sunulmuştur. Bu modelin diğerlerinden farklı olarak en yüksek başarımı P02 katılımcısında 0.894 doğruluk değeri ile elde edilmiştir.

Bütün modeller arasında 3. en yüksek değeri veren algoritmadır. Ancak zaman bakımından incelendiğinde KA modelinin 7.418 sn eğitim ve 3.678 sn test süresi ile en uzun sürede sonuç veren algoritma olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla KA algoritmasının BCI uygulamaları için pratik bir model olmadığı belirtilebilir.

Tablo 6. Karar Ağaçları kullanılarak elde edilen model performans sonuçları.

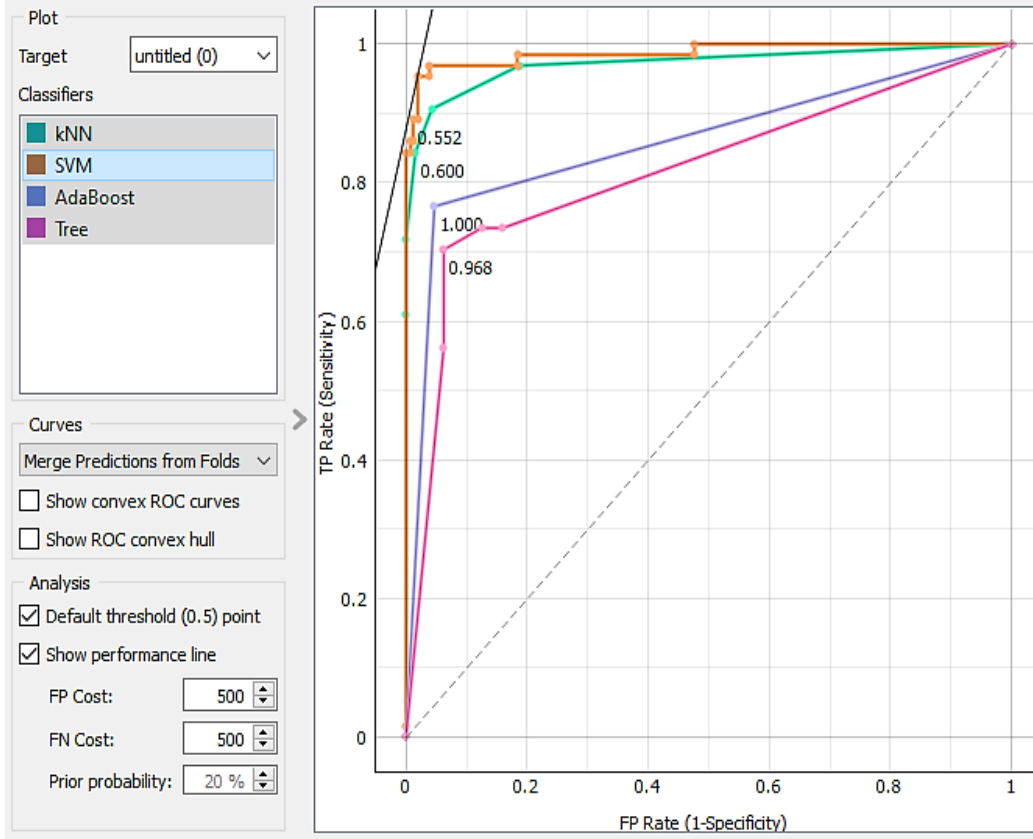
	CA	F1	Prec	Spec
P01	0.759	0.759	0.761	0.940
P02	0.894	0.894	0.895	0.973
P03	0.747	0.746	0.749	0.937
P04	0.866	0.867	0.870	0.966
P05	0.884	0.885	0.886	0.971
P06	0.806	0.805	0.805	0.952
P07	0.784	0.783	0.783	0.946
P08	0.731	0.733	0.737	0.933
Ort.±	0.8089±	0.8090±	0.8108±	0.9522±
Std.	0.0645	0.0647	0.0641	0.0158

Tablo 7. Makine öğrenmesi modellerinin eğitim ve test için kullandıkları toplam süre (saniye-sn).

Model	Eğitim	Test
DVM	4.262	2.523
k-EYK	1.753	1.221
AdaBoost	2.559	1.287
KA	7.418	3.678

Şekil 6'da bu çalışmada kullanılan her bir makine öğrenmesi modelinin grafiksel olarak alıcı işletim karakteristiği (ROC) eğrileri verilmiştir. Bu grafik, farklı sınırlama eşikleri altında duyarlılık ve özgüllük arasındaki ilişkiyi göstermektedir. DVM, k-EYK, AdaBoost ve KA modellerinin farklı duyarlılık ve özgüllük değerlerinde nasıl performans gösterdiğini görsel olarak anlaşılır kılmaktadır. Aynı zamanda makine

öğrenmesi modellerinin doğru sınıflandırma yeteneğini ve yanlış sınıflandırma oranlarını değerlendirmek veya optimize etmek için rehberlik sağlamaktadır. Bu sonuçlara göre performanslar sırasıyla şu şekilde karşımıza çıkmaktadır: DVM, k-EYK, AdaBoost ve KA. Tablolarda elde edilen sonuçlardan farklı olarak ROC eğrisi ile gösterilmek istenen AdaBoost modelinin KA modelinden TP ve FP oranlarına göre daha başarılı performans gösterdiği görülmüştür.



Şekil 6. Farklı makine öğrenimi modelleri için ROC eğrisi.

Makine öğrenmesi modellerinin doğru sınıflandırma yeteneğini ve yanlış sınıflandırma oranlarını değerlendirmek veya optimize etmek için Doğru-Pozitif ve Yanlış-Negatif oranlarını inceleyebildiğimiz bir diğer kriter olan karmaşıklık matrisi de Şekil 7’de sunulmaktadır. Karmaşıklık matrisi bize aynı zamanda sınıfların doğru tahmin edilme oranını da karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Şekil 7’de bu çalışma kapsamında kullanılan makine öğrenmesi modellerinden en yüksek sonucun elde edildiği DVM modelinde sınıfların TPR (Doğru-Pozitif Oranı) ve FNR (Yanlış-Negatif Oranı) başarı oranlarını karmaşıklık matrisi kullanılarak belirtilmiştir. Diğer makine öğrenmesi modellerinde de benzer sonuçlar elde edildiği için sadece DVM modelinin karmaşıklık matrisi verilmiştir. Ayrıca sınıflandırılan el hareketleri arasında “yanal kavrama” görevinin en başarılı sınıflandırma sonucunu verdiği tespit edilmiştir. İkinci başarılı performans olarak “süpinasyon” görevi ve sırasıyla “el açık”, “avuç içi kavrama” ve “pronasyon” görevleri takip etmektedir.

DVM Model

Doğru Sınıf	Supinasyon	93.3%	6.7%				93.3%	6.7%
	Pronasyon	5.3%	81.5%	13.2%			81.5%	18.5%
	El açık		4.5%	91.8%	3.7%		91.8%	8.2%
	Avuç içi kavrama		0.9%	3.4%	88.5%	7.2%	88.5%	11.5%
	Yanal kavrama				3.9%	96.1%	96.1%	3.9%
		Supinasyon	Pronasyon	El açık	Avuç içi kavrama	Yanal kavrama	TPR	FNR
		Tahmin Edilen						

Şekil 7. En başarılı makine öğrenmesi modelinin karmaşıklık matrisi (DVM 90.24%)

Bu araştırma analizinden çıkarılan başarımların performansları literatürde aynı veri setini kullanarak elde edilen sonuçlar ile Tablo 8’de karşılaştırılmıştır. Çalışmalarda kullanılan performansı doğrudan etkileyen öznelik ve makine öğrenmesi modelleri üzerinden doğruluk değerleri baz alınarak değerlendirme yapılmıştır. Bu değerlendirme sonucunda beş sınıf kullanılarak yapılan sınıflandırma çalışmaları arasında uygulanan metodoloji ile en yüksek başarımlar bu çalışmaya aittir.

Tablo 8. Literatürde mevcut aynı veri setini kullanarak yapılan çalışmalar ve elde edilen en yüksek sonuçlar.

Öznelik Çıkarımı	Sınıflandırıcı	Doğruluk Değeri (%)	Referans
—	Katz’s Fractal Dimension (KFD) + DVM	96.47 (2-sınıf)	Akman Aydın, E. 2023
Standart Sapma	1D CNN+LSTM model	75.75 (5-sınıf)	Makouei, S.T.Z. ve ark. 2023
Movement-Related Cortical Potentials (MRCP)	ConvNet AlexNet	76.00 (5-sınıf)	Cancino, S. ve ark. 2023
Dalgacık Paketi, Decomposition (WPD)	Wavelet neural network	85.24 (5-sınıf)	Zhou, X. ve ark. 2021
—	Temporal-Spatial Convolutional Iterative Residual Network)TSCIR-Net	71.11 (5-sınıf)	Mirzabagherian, H. ve ark. 2023
Bağımsız Bileşenlerde Ortak Bilgi Matrisi	DVM	90.24 (5-sınıf)	Bu çalışma

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada temel hedef omurilik yaralanması geçiren insanların başlıca tedavi yöntemi olan rehabilitasyon için EEG tabanlı bir beyin bilgisayar arayüzü tasarımı gerçekleştirmektir. Bu hedef doğrultusunda kullanılan yöntemler çoklu sınıflandırma başarımlarının düşük olması sebebiyle araştırılmaya devam etmektedir. BCI çalışmalarında genellikle OY'lı insanlardan veri toplamanın zorluklarından dolayı genellikle sağlıklı insanlardan alınan veriler üzerinde çalışılmaktadır. Ancak bu çalışmada amacına uygun olarak açık erişimli OY hastalarına ait EEG veri seti üzerinde çalışılmıştır. BCI çalışmalarında karşılaşılan bir diğer zorluk olan çoklu komut üretmek için gereken çoklu sınıflandırma sonuçlarının henüz düşük performanslar göstermesidir. Ancak bu çalışma ile görülmektedir ki, BB bileşenleri temelli öznitelik çıkarımı ve DVM ile sınıflandırılması sonucu OY hastalarından alınan EEG verileri 0.9024 ± 0.0781 değerinde bir başarımla ortaya koymaktadır. Bu sınıflandırma başarımları şans oranı 0.20 olan beş görevi sınıflandırma problemi olarak düşünüldüğünde oldukça yüksek bir değerdir. Bunun yanı sıra diğer uygulanan makine öğrenmesi yöntemleri de kayda değer doğrulukta başarımlar göstermektedirler. Gerçek zamanlı BCI uygulamaları için önemli olan bir diğer ölçüt ise sinyal işleme ve kontrol komutu üretme süresidir. Dolayısıyla uygulanan makine öğrenmesi algoritmaları açısından süreler karşılaştırıldığında en kısa sürede 1.753 ile k-EYK algoritması sonuç vermektedir.

Sonuç olarak BB çıkarımı ve ilk defa öznitelik olarak kullanma yaklaşımıyla oluşturulan yöntem bilim yüksek doğrulukta sonuçlar üretmektedir. Dolayısıyla bu da ideal EEG tabanlı BCI tasarımı için uygun bir metodolojisi olduğunu kanıtlanmaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Agarwal, S., Zubair, M. (2021). Classification of Alcoholic and Non-Alcoholic EEG Signals based on Sliding-SSA and Independent Component Analysis. *IEEE Sensors Journal*, 21(23), 26198-26206. doi: 10.1109/JSEN.2021.3120885
- Akman Aydın, E. (2023). Detection of Movement Related Cortical Potentials from Single Trial EEG Signals. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 11(1): 25-38. doi: 10.29109/gujsc.1083912
- Athanasiou, A., Klados, M. A., Pandria, N., Foroglou, N., Kavazidi, K. R., Polyzoidis, K., Bamidis, P. D. (2012). A Systematic Review of Investigations into Functional Brain Connectivity Following Spinal Cord Injury. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, 517. doi: 10.3389/fnhum.2017.00517
- Bascil, M. S., Tesneli, A. Y., Temurtas, F. (2016). Spectral Feature Extraction of EEG Signals and Pattern Recognition During Mental Tasks of 2-D Cursor Movements for BCI Using SVM and ANN.

Australasian Physical and Engineering Sciences in Medicine, 39, 665–676. doi: 10.1007/s13246-016-0462-x

- Bell, A. J., Sejnowski, T. J. (1995). An Information-Maximization Approach to Blind Separation and Blind Deconvolution. *Neural Computation*, 7(6), 1129–1159.
- Cancino, S., López, J. M., Delgado Saa, J. F., Schettini, N. (2023). ConvNets for Electroencephalographic Decoding of Attempted Arm and Hand Movements of People with Spinal Cord Injury. *Advanced Intelligent System*, 5(12): 2023. doi: 10.1002/aisy.202300094
- Cao, C., Slobounov, S. (2010). Alteration of Cortical Functional Connectivity As A Result of Traumatic Brain Injury Revealed by Graph Theory, ICA, and sLORETA Analyses of EEG Signals. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 18(1), 11-19. doi: 10.1109/TNSRE.2009.2027704
- Chaudhary, S., Taran, S., Bajaj, V., Siuly, S. (2020). A Flexible Analytic Wavelet Transform Based Approach For Motor-Imagery Tasks Classification In BCI Applications. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 187(2020), 105325. doi: 10.1016/j.cmpb.2020.105325
- Chaumon, M., Bishop, D. V., Busch, N. A. (2015). A Practical Guide to The Selection of Independent Components of The Electroencephalogram for Artifact Correction. *Journal of Neuroscience Methods*, 250, 47–63.
- Demir, A., Bekiryazıcı, Ş., Coşkun, O., Eken, R., Yılmaz, G. (2022). Detection and Analysis of Driver Fatigue Stages with EEG Signals. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(5), 643-651.
- Delorme, A., Makeig, S. (2004). EEGLAB: An Open-Source Toolbox for Analysis of Single-Trial EEG Dynamics Including Independent Component Analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, 134(1), 9–21.
- Dev, A., ve ark. (2022). Exploration of EEG-Based Depression Biomarkers Identification Techniques and Their Applications: A Systematic Review. *IEEE Access*, 10, 16756-16781. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3146711
- Hernandez-Rojas, L. G., ve ark. (2022). Brain-Computer Interface Controlled Functional Electrical Stimulation: Evaluation with Healthy Subjects and Spinal Cord Injury Patients. *IEEE Access*, 10, 46834-46852. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3170906
- Jung, Y. (2018). Multiple Predicting k-Fold Cross-Validation for Model Selection. *Journal of Nonparametric Statistics*, 30(1), 197-215. doi: 10.1080/10485252.2017.1404598
- Kang, J. S., Kavuri, S., Lee, M. (2022). ICA-Evolution Based Data Augmentation with Ensemble Deep Neural Networks Using Time and Frequency Kernels for Emotion Recognition from EEG-Data. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 13(2), 616-627. doi: 10.1109/TAFFC.2019.2942587
- Kang, Y., Ding, H., Zhou, H., Wei, Z., Liu, L., Pan, D. Y., Feng, S. Q. (2018). Epidemiology of Worldwide Spinal Cord Injury: A Literature Review. *Neurorestoratology*, 6, 1–9. doi: 10.2147/jn.s143236
- Kavuri, S. S., Veluvolu, K. C., Chai, Q. H. (2018). Evolutionary Based ICA with Reference for EEG μ Rhythm Extraction. *IEEE Access*, 6, 19702-19713. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2821838
- Khoshnevis, S. A., Sankar, R. (2020). Applications of Higher Order Statistics in Electroencephalography Signal Processing: A Comprehensive Survey. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 13, 169-183. doi: 10.1109/RBME.2019.2951328
- Kotsiantis, S. B. (2013). Decision Trees: A Recent Overview. *Artif Intell Rev*, 39, 261–283. doi: 10.1007/s10462-011-9272-4
- Leite, V. F., deSouza, D. R., Imamura, M., Batistella, L. R. (2019). Post-discharge Mortality in Patients with Traumatic Spinal Cord Injury in A Brazilian Hospital: A Retrospective Cohort. *Spinal Cord*, 57, 134–140. doi: 10.1038/s41393-018-0183-y
- Liu, J., Yang, X., Jiang, L., Wang, C., Yang, M. (2012). Neural Plasticity After Spinal Cord Injury. *Neural Regeneration Research*, 7, 386–391.
- Makouei, S.T.Z., Uyulan, Ç. (2023). Classification of the Attempted Arm and Hand Movements of Patients with Spinal Cord Injury Using Deep Learning Approach. doi: 10.1101/2023.07.06.23292320
- Mirzabagherian, H., Menhaj, M. B., Suratgar, A. A., Talebi, N., Abbasi Sardari, M. R., Sajedin, A. (2023). Temporal-Spatial Convolutional Residual Network for Decoding Attempted Movement Related EEG Signals of Subjects with Spinal Cord Injury. *Computers in Biology and Medicine*, 164(2023), 107159. doi: 10.1016/j.compbiomed.2023.107159
- Mohseni, M., Shalchyan, V., Jochumsen, M., Niazi, I. K. (2020). Upper Limb Complex Movements Decoding from Pre-Movement EEG Signals Using Wavelet Common Spatial Patterns. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 183 (2020), 105076. doi: 10.1016/j.cmpb.2019.105076

- Nam, K. Y., Kim, H. J., Kwon, B. S., Park, J. W., Lee, H. J., Yoo, A. (2017). Robot-Assisted Gait Training (Lokomat) Improves Walking Function and Activity in People with Spinal Cord Injury: A Systematic Review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 14(1), 24.
- Ohsaki, M., Wang, P., Matsuda, K., Katagiri, S., Watanabe, H., Ralescu, A. (2017). Confusion-Matrix-based Kernel Logistic Regression for Imbalanced Data Classification. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 29(9), 1806-1819. doi: 10.1109/TKDE.2017.2682249
- Ofner, P., Schwarz, A., Pereira, J., ve ark. (2019). Attempted Arm and Hand Movements Can Be Decoded from Low-Frequency EEG from Persons with Spinal Cord Injury. *Scientific Reports*, 9, 7134. doi: 10.1038/s41598-019-43594-9
- Ofner, P., Schwarz, A., Pereira, J., Muller-Putz, G. R. (2017). Upper Limb Movements Can Be Decoded from The Time-Domain of Low-Frequency EEG. *PLoS One*, 12 (2017), e0182578. doi: 10.1371/journal.pone.0182578
- Papana, A., Kugiumtzis, D. (2009). Evaluation of Mutual Information Estimators for Time Series. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 19(12), 4197–4215.
- Pfurtscheller, G., Linortner, P., Winkler, R., Korisek, G., Muller-Putz G. (2009). Discrimination of Motor Imagery-Induced EEG Patterns in Patients with Complete Spinal Cord Injury. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 104180. doi: 10.1155/2009/104180
- Sai, C. Y., Mokhtar, N., Arof, H., Cumming, P., Iwashashi, M. (2018). Automated Classification and Removal of EEG Artifacts with SVM and Wavelet-ICA. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 22(3), 664-670. doi: 10.1109/JBHI.2017.2723420
- Sayilgan, E., Yuce, Y. K., Isler, Y. (2021). Evaluation of Mother Wavelets on Steady-State Visually-Evoked Potentials for Triple-Command Brain-Computer Interfaces. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 29(5), 2263-2279.
- Sayilgan, E., Yüce, Y., İşler, Y. (2021). Uyarım Frekansının Kestiriminde İstatistiksel Anlamlılığa Dayalı Olarak Seçilen Durağan Durum Görsel Uyarılmış Potansiyellere Ait Dalgacık Özniteliklerinin Değerlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(2), 593-606. doi: 10.17341/gazimmfd.664583
- Sayilgan, E., Yuce, Y. K., Isler, Y. (2022). Investigating The Effect of Flickering Frequency Pair and Mother Wavelet Selection in Steady-State Visually-Evoked Potentials on Two-Command Brain-Computer Interfaces. *Innovation and Research in BioMedical engineering*, 43(6), 594-603. doi: 10.1016/j.irbm.2022.04.006
- Schapire, R. E. (2013). *Explaining AdaBoost*. Editors: Schölkopf B, Luo Z, Vovk V. Empirical Inference. Berlin, Heidelberg, Springer. doi: 10.1007/978-3-642-41136-6_5
- Schlogl, A., Lee, F., Bischof, H., Pfurtscheller, G. (2005). Characterization of Four-Class Motor Imagery EEG Data for The BCI-Competition 2005. *Journal of Neural Engineering*, 2 (2005): L14–22. doi: 10.1088/1741-2560/2/4/L02
- Simis, M., Uygur-Kucukseymen, E., Pacheco-Barrrios, K., Battistella, L. R., Fregni, F. (2020). Beta-Band Oscillations As A Biomarker of Gait Recovery in Spinal Cord Injury Patients: A Quantitative Electroencephalography Analysis. *Clinical Neurophysiology*, 131, 1806–1814.
- Sreeja, S.R., Samanta, D. (2019). Classification of Multiclass Motor Imagery EEG Signal Using Sparsity Approach. *Neurocomputing*, 368 (2019): 133–145. doi: 10.1016/j.neucom.2019.08.037
- Suyal, M., Goyal, P. (2022). A Review on Analysis of k-Nearest Neighbor Classification Machine Learning Algorithms Based on Supervised Learning. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 70(7), 43-48. doi: 10.14445/22315381/IJETT-V70I7P205
- Wang, T., Deng, J., He, B. (2004). Classifying EEG-Based Motor Imagery Tasks By Means Of Time-Frequency Synthesized Spatial Patterns. *Clinical Neurophysiology*, 115 : 2744–2753. doi: 10.1016/j.clinph.2004.06.022
- Wang, Y., Jung, T. P. (2012). *Improving Brain-Computer Interfaces Using Independent Component Analysis*. In: Allison, B., Dunne, S., Leeb, R., Del R. Millán, J., Nijholt, A. (eds) Towards Practical Brain-Computer Interfaces. Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering. Berlin, Heidelberg, Springer. doi: 10.1007/978-3-642-29746-5_4
- Wong, T. T., Yeh, P. Y. (2020). Reliable Accuracy Estimates from k-Fold Cross Validation. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 32(8), 1586-1594. doi: 10.1109/TKDE.2019.2912815
- Zhou, X., Zou, R., Huang, X. (2021). Single Upper Limb Functional Movements Decoding from Motor Imagery EEG Signals Using Wavelet Neural Network. *Biomedical Signal Processing and Control*, 70(2021), 102965. doi: 10.1016/j.bspc.2021.102965

Taşınmaz Satışlarında Noterlerin Yetkilendirilmesinin Tapu Sistemi Olası Etkilerinin Kadastro 2014 Vizyonu ile Araştırılması

Yakup Emre ÇORUHLU^{1*}, Alkan ALEMDAR², Mehmet Özgür ÇELİK³

Öz

Tüm dünyada kadastro ve tapu işlemlerinin de içinde yer aldığı arazi yönetimi sistemlerine öncülük eden FIG (International Federation of Surveyors), bu alanda ortaya koyduğu çalışmalarla emlak sektörünü topyekûn etkilemektedir. Türkiye hem "Kadastro 2014" ifadeleri hem de AİTM (Arazi İdaresi Temel Modeli) çalışmalarını dikkate alarak kendi tapu ve kadastro sistemini sürekli geliştirmektedir. Ülkemizde TKGM (Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü) taşınmaz mallara ilişkin akit ve tescil işlemlerini yerine getirmek gibi birçok görev üstlenmiş bir kamu kurumudur. Yasalarla kendisine verilmiş olan görevlerini ülke genelinde 24 Bölge Müdürlüğü, 81 İl Kadastro Müdürlüğü ve her bir ilçede en az bir tane olmak üzere toplam 973 Tapu Müdürlüğü ile yürütmektedir. Taşınmaz alım-satımı ve tapu siciline tescil gerektiren tüm işlemlerde sadece Tapu Müdürlükleri sorumludur. Noterlerin tapu işlemlerinin hiçbirini yapma yetkisi bulunmamaktadır. En çok yapılan işlem olan alım-satım işlemi, tapu müdürlüklerinin yoğunluğunu artırdığından 28 Haziran 2022'de Noterlere taşınmaz satışına ilişkin, daha sonra tapu sicilinde tescil edilmek üzere, satış sözleşmesi düzenleme yetkisi verilmiştir. Bu çalışmada noterlere verilen taşınmaz satış yetkisinin tapu sicil sistemi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada veri toplama aracı olarak bir yapılandırılmış anket formu geliştirilmiş, belirlenen örneklem grubuna yönlendirilerek, görüş ve öneriler alınarak, basit deneysel istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmiştir. Çalışmadan elde edilen en önemli sonuç, noterlerin taşınmaz alım-satım işlemlerini yapmasının vatandaşlar açısından zaman ve maddi yarar sağlamada yetersiz kalacağı görüşüdür. Bununla birlikte alım-satım işlemi için alternatif bir seçenek sunması olumlu olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, bu yetkinin Kadastro 2014'ün 5. İfadesine (Kamu-özel sektör entegrasyonu) uygun olduğu da belirtilmelidir.

Anahtar Kelimeler: Kadastro 2014, Alım-Satım İşlemleri, Tapu Sicili, Tapu Müdürlüğü, Noter.

Investigating the Possible Effects of the Authorization of Notaries in Real Estate Selling Transactions on the Land Registry System, with Cadastre 2014's Vision and the Light of the Opinions of the Employees of GDLRC

Abstract

FIG, which pioneers land management systems including cadastre and title deed/land registry transactions all over the world, affects the real estate sector as a whole with its work in this field. Turkey is constantly improving its own land registry and cadastre system, taking into account both "Cadastre 2014" statements and LADM standards. In our country, GDLRC is a public institution that undertakes many duties such as fulfilling the contracting and registration procedures regarding immovable properties. GDLRC carries out its duties assigned to it by law through 24 Regional Directorates throughout the country, 81 Provincial Cadastre Directorates and a total of 973 Land Registry Directorates, at least one in each district. Only Land Registry Offices are responsible for buying and selling real estate and all transactions requiring registration in the land registry books. Notaries do not have the authority to perform any of the title deed transactions. Since buying and selling transaction, which is the most common transaction, increases the density of land registry offices, on June 28, 2022, Notaries have been given the authority to issue a sales contract, to be registered in the land registry later. In this study, the effects of the real estate selling and buying authority given to notaries on the land registry system were investigated. In the study, a structured questionnaire form was developed as a data collection tool, it was directed to the determined sample group, and opinions and suggestions were received, and evaluated using simple experimental statistical methods. The most important result obtained from the study is that having notaries carry out real estate buying and selling transactions will be insufficient to provide time and financial benefits for citizens. However, it might be viewed positively because it offers an alternative to the buying and selling procedure. Besides, it must indicate that this authority is in accordance with the 5th statement of Cadastre 2014 (public-private sector cooperation).

Keywords: Cadastre 2014, Selling-Buying Transactions, Land Registry, Land Registry Directorate, Notary

¹KTÜ, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, yecoruhlu@ktu.edu.tr

²Trabzon Tapu ve Kadastro IX. Bölge Müdürlüğü, Araklı Tapu Müdürlüğü, Trabzon, Türkiye, alkanalemdar7@gmail.com

³Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye Ülke, mozgurcelik@mersin.edu.tr

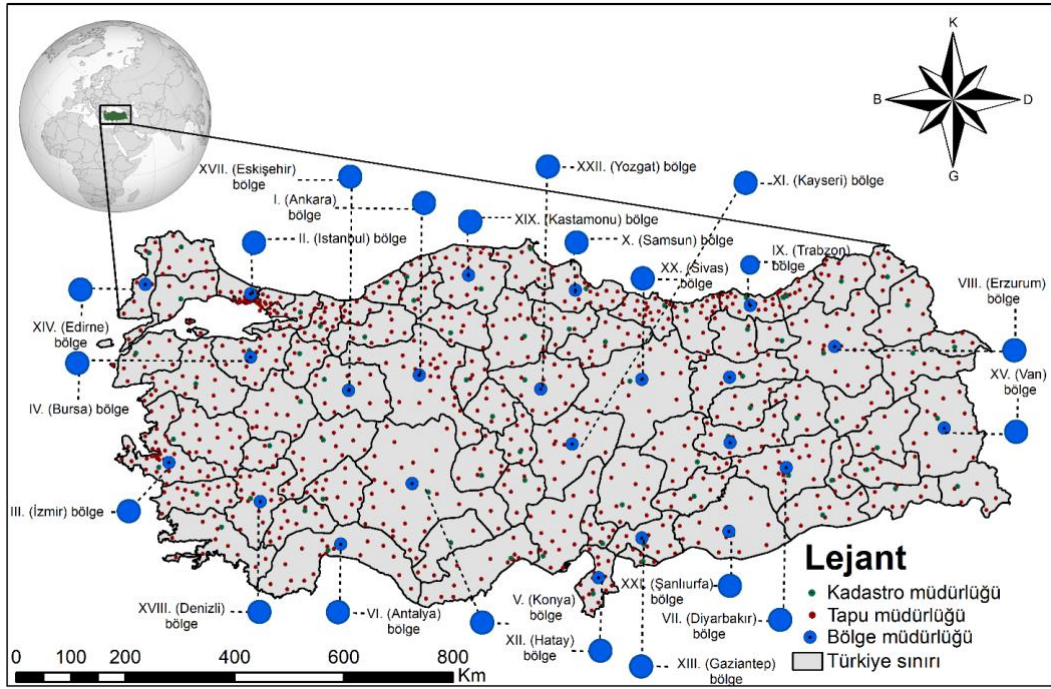
1. Giriş

Türkiye, 1960'lı yıllardan bu yana 5 yıllık kalkınma planları ile yönetilmektedir. Arazi yönetimi politikaları da 5 yıllık kalkınma planının unsurlarından olup, planlar arazi piyasasını da etkilemektedir. Türkiye, e-devletin başlangıç dönemi uygulamalarını doğru yaklaşım ve politikalarla benimseyerek başarılı biçimde hayata geçirmektedir (Özer, 2023; Başer, 2020). Günümüzde, hemen hemen tüm kamu kurum ve kuruluşları e-devlet uygulamaları sunmakta ve böylece e-Türkiye projesinin sağlıklı şekilde yürütülmesi sağlanmaktadır (Çoruhlu vd., 2015; Pak vd., 2023; Ayduvan ve Uyan, 2022). Tapu ve Kadastro Bilgi Sistemi (TAKBİS), e-devlet uygulamaları kapsamında geliştirilmiş temel uygulamalardan biri olarak dikkat çekmektedir (Atmaca, 2016). TAKBİS, Türkiye genelinde mülkiyet kayıtlarının elektronik ortama aktarılmasını ve işlemlerin elektronik olarak yürütülmesini hedefleyen bir e-devlet projesidir. Türkiye'de tapu-kadastro sistemi içerisinde yaklaşık 59 milyon kayıtlı parsel bulunmaktadır (URL-1, 2024). Verilerin yönetilmesi ve işlemlerin aksamadan yürütülebilmesi için e-devlet uygulamaları güvenli bir şekilde işletilmektedir (Yıldız vd., 2018; Yıldız ve Erden, 2021; Ercan ve Toker, 2022). Bu kapsamda TAKBİS verilerinin yaklaşık %60.3'ü (35 milyon), e-devlet projesi kapsamında oluşturulan Mekânsal Gayrimenkul Sistemi'ne (MEGSİS) aktarılmıştır (URL-1, 2024). MEGSİS, ülkenin tümüne ait parsel bilgilerinin tek bir koordinat sisteminde toplanmasını, tapu bilgileriyle entegre edilmesini ve gerektiğinde paylaşılmasını amaçlayan bir e-devlet uygulamasıdır (Pak vd., 2023; URL-2, 2024). Tapu ve Kadastro Paylaşım Sistemi (TAKPAS) uygulaması da Türkiye'nin e-dönüşüm vizyonu çerçevesinde geliştirilmiş bir diğer uygulamadır. Bu uygulama parsellere ait tapu-kadastro verilerinin farklı kamu kurumları ve kişilerce erişimine imkân tanımaktadır (URL-3, 2024). E-devlet uygulamalarından olan Web-Tapu sistemi, tapu sahibinin parseline ait bilgileri görebilmesini, bu bilgilerin diğer kişiler tarafından incelenmesini ve kişilerin kendi taşınmazlarına ait işlemlerine yetki verilebilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, hak sahibinin kuruma gitmeden de; tapu senedi, ipotek belgesi almasına ve beyan tesis etmesine/kaldırmasına olanak tanımaktadır (URL-4, 2024). Tapu Arşiv Bilgi Sistemi (TARBİS) mülkiyete bilgisi olmayan belgelerin arşiv bilgileri ve diğer belgelerle ilişkilendirilmesini sağlayan bir e-devlet uygulamasıdır (Polat ve Alkan, 2020). TKGGM arşivde yer alan bilgileri dijitalleştirilerek veriye erişimin kolay ve hızlı olmasını hedeflenmiştir (URL-5, 2024).

Türkiye Noterler Birliği Bilişim Sistemi (TNBBS) de noterlik iş ve uygulamalarının hızlıca ve güvenilir şekilde yapılmasını sağlayan bir diğer e-devlet uygulamasıdır. TNBBS, yurtiçi ve yurtdışında tüm noterlik işlemlerinin aynı standartta yapılması, tüm işlemlerin tek bir çatı altında gerçekleştirilmesi amacıyla geliştirilmiştir (Resmi Gazete, 2015). Geçmişten bu yana, taşınmaz tabanlı işlemler dâhil olmak üzere Türkiye'de e-dönüşüm çalışmaları kapsamında birçok e-devlet uygulamaları geliştirilmiş ve geliştirilmeye de devam etmektedir (Çoruhlu ve Toludan, 2019). Bu

uygulamalar kamu kurumları ve vatandaşlar arasındaki iletişimin güçlendirilmesinde katkı sağlamaktadır. Bu kapsamda, kamu yönetiminin, iyi yönetim ilkeleri çerçevesinde, geliştirilmesinin önemli araçlarından biri dijital devlet anlayışı benimsenmiştir (Polat ve Alkan, 2020). Nitekim e-devlet hizmet sunumunda ihtiyaç duyulan temel bilgi sistemleri ile ortak altyapılar büyük oranda kurulmuştur. E-devlet kapısından sunulan kamu hizmetlerinin sayısı Aralık 2023 itibarıyla 7516'ya, mobil hizmetlerin sayısı ise 4413'e ulaşmıştır. Bu hizmetlerden aynı dönem itibarıyla 64.12 milyon kayıtlı kullanıcı istifade edebilmektedir (URL-6, 2024). E-devlet hizmetlerini kullanan kişilerin oranı 2023 yılında % 73.9 seviyesine yükselmiştir (URL-7, 2024).

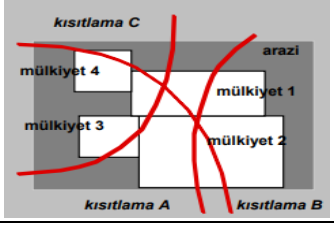
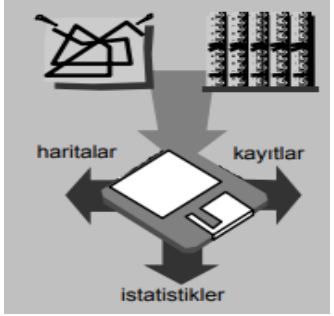
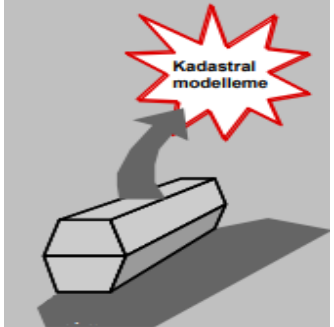

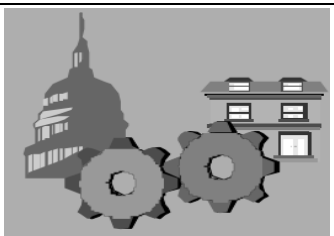

Bir kamu hizmeti olarak Devletin sorumluluğunda yürütülen taşınmaz alım-satım işlemi e-devlet kapısı altında Web-Tapu uygulamalarıyla bütünleşik bir yapıda Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) Tapu Müdürlüklerince yönetilmektedir. 1847 yılında kurulan TKGM, Türkiye'de köklü bir geleneğe ve kurumsal hafızaya sahip kadim kuruluşların başında gelmektedir. TKGM temel olarak, taşınmaz mallar ve bunlar üzerindeki haklara ait akitli ve akitsiz işlemleri yapmakla görevli ve yetkili bir kamu kurumudur. Kanunlarla tanımlanmış olan görevlerini ülke genelinde 24 Bölge Müdürlüğü, 81 İl Kadastro Müdürlüğü ve 973 Tapu Müdürlüğü (her bir ilçede en az bir tane) vasıtasıyla gerçekleştirmektedir. Temel anlamda görev ve yetkileri bu şekilde olan TKGM; Devletin hüviyetindeki tapu sicillerine ait her türlü işlemlerin (tutulma, tescil, değişiklik, arşivleme vd.) yapılmasına, ülke genelinde kadastro faaliyetlerinin gerçekleştirilmesine, mekânsal bilgi sisteminin oluşturulmasına, görev alanlarıyla ilgili her türlü iş ve uygulamaların yapılmasına doğrudan katkı sağlamaktadır. TKGM kendisine atfedilen görevleri teşkilat yapılandırması içerisinde sürdürmektedir. Bu yapı içerisinde yer alan ve ülke geneline ilçe bazlı olarak yayılmış Tapu Müdürlükleri son derece önemli bir konumdadır. 2023 yılı itibarıyla Türkiye genelinde 922 ilçede 973 Tapu Müdürlüğü bulunmaktadır (Şekil 1). Bu müdürlükler genel olarak tapu hizmetlerinin etkin, güvenli ve zamanında gerçekleştirilmesinden, taşınmazların alım-satımından, tapu siciline tescil gerektiren tüm iş ve uygulamalardan sorumludur (URL-8, 2024; Resmi Gazete, 1925; Resmi Gazete, 1936). Ülke genelindeki tüm Tapu Müdürlüklerinde 2023 yılı sonu itibarı ile 18.5 milyon işlem tamamlanmıştır. Bu işlemler TAKBİS içinde gerçekleştirilmiş ve sadece Tapu Müdürlüklerince yapılabilecek işlemler olup yaklaşık olarak 1200 işlem çeşidi olduğu bilinmektedir (URL-9, 2024). Alım-satım işlemleri ise en yoğun işlem olarak dikkat çekmekte olup, ortalama olarak tüm işlemlerini 1/4'ünü kapsamaktadır.



Şekil 1. Türkiye geneli tapu ve kadaströ müdürlükleri dağılımı

TKGM tapu ve kadaströ alanındaki tüm faaliyetlerini Kadaströ 2014 vizyonuyla eşgüdömlü şekilde yürütmeye çalışmaktadır. Kadaströ 2014, Uluslararası Haritacılar Federasyonu (International Federation of Surveyors - FIG) tarafından 1998 yılında ortaya atılmış bir vizyon belgesidir (Kaufmann ve Steudler, 1998). Bu belge tapu ve kadaströ çalışmalarının geleceğini çizmekte ve standart oluşturmaktadır (Çete, 2015; Döner, 2021; Deniz vd., 2023). Geçmişten bu zamana çok sayıda rapor yayınlanmış olsa da, dünya genelinde en büyük etkiyi Kadaströ 2014 çalışması yaratmıştır (Çete, 2015; Çelik ve Çoruhlu, 2021; Thapa, 2021; Kara vd., 2024). Çalışmada altı ifade geliştirilmiş ve her biri Tablo 1 ile tanımlanmıştır. Sahip olduğu özellikler sayesinde Kadaströ 2014, birçok ülkenin kadastral faaliyetleri için temel dayanak oluşturmuştur (Yomralıoğlu vd., 2003). İlerleyen süreç içerisinde, Kadaströ 2014'ün ortaya koymuş olduğu hedefin değerlendirilmesi ve gelecek için yeni vizyonun tanımlanması adına 2014 yılında Kadaströ 2014 ve sonrası (Cadastre 2014 and beyond) raporu sunulmuştur. Kadaströ 2014 ile Kadaströ 2014 ve sonrası hedeflerinin gerçekleştirilmesi için Türkiye'de TKGM bünyesinde birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. TKGM tarafından yapılan çalışmalarla ilgili bilimsel yayınlar bulunmaktadır. Alkan ve Polat (2015) tarafından yürütölen araştırmada Kadaströ 2014 vizyonuyla yapılmış çalışma ve projeler irdelenmiş ve de Kadaströ 2034 için mevcut durum analiz edilmiştir. Polat (2015) tarafından yürütölen diğer bir çalışmada da Kadaströ 2034 vizyonu doğrultusunda Türkiye'de kadaströ çalışmalarının mevcut durumu incelenmiştir. Bu çalışmaya da konu olan noterlerin taşınmaz alım-satım işlerini gerçekleştirilmesi, Türkiye'nin Kadaströ 2014'ün 5. ifadesiyle (Kamu-özel sektör uyumu) entegreli bir çalışma yürüttüğünü göstermektedir.

Tablo 1. Kadastro 2014'ün 6 ifadesi (Kaufmann ve Steudler, 1998)

Kadastro 2014'ün 6 ifadesi	Açıklama	Şekil
Kadastro 2014'ün 1. ifadesi	Kamusal hak ve kısıtlamalar dâhil olmak üzere arazinin tüm hukuki durumunun gösterilmesi	
Kadastro 2014'ün 2. ifadesi	Haritalar' ve 'kayıtlar' arasındaki ayrımın kaldırılması	
Kadastro 2014'ün 3. ifadesi	Kadastral haritalamanın sona ermesi ve yerini kadastral modellerin alması	
Kadastro 2014'ün 4. ifadesi	Kâğıt ve kalem kadastronun son bulması	
Kadastro 2014'ün 5. ifadesi	Kamu ve özel sektörün entegrasyonu	
Kadastro 2014'ün 6. ifadesi	Kadastro 2014 ile kadastro maliyetlerinin bir kısmının geri kazanılması	

Arazi İdaresi Temel Modeli (AİTM, Land Administration Domain Model - LADM) dünya genelinde tapu ve kadastro çalışmaları için ortak bir standardın geliştirilmesini amaçlamaktadır (Oosterom ve Lemmen, 2015; Ercan, 2020; Çoruhlu vd., 2021). Bu çerçevede 2012 yılında bir ISO standardı ISO:19152 olarak ortaya çıkmıştır (ISO, 2012). AİTM, arazi yönetiminin (dolayısıyla tapu ve kadastro faaliyetleri) sağlıklı gerçekleştirilebilmesi için; (a) taraflar (kişiler ve kuruluşlar), (b) temel idari birimler, haklar, sorumluluklar ve kısıtlamalar (mülkiyet hakları), (c) mekânsal birimler (parseller ve binaların ve hizmet ağlarının yasal alanı), (d) mekânsal kaynaklar olmak üzere dört temel paketten oluşan kavramsal bir model sunmaktadır (Alkan ve Polat, 2017; Polat vd., 2022).

TKGM' nin AİTM bazlı Türkiye Ulusal Coğrafi Bilgi Sistemi (TUCBS) ile uyumlu gerçekleştirmiş (İnan, 2021) olduğu çalışmalar, Kadastro 2014 hedeflerine ulaşılmasında son derece önem arz etmektedir. TUCBS ulusal ölçekte CBS altyapısının oluşturulmasını, coğrafi bilgilerin ortak altyapı aracılığıyla sunulmasını, standartların belirlenmesini ve mevcut problemlere çözüm üretilmesini hedefleyen bir e-devlet uygulaması olarak dikkat çekmektedir (İban, 2020; Ünaldık, 2019). TUCBS, AİTM ile uyumlu ve bütünleşik bir şekilde nesne yönelimli yaklaşım ile Birleşik Modelleme Dili (Unified Modelling Language-UML) aracılığıyla geliştirilmiştir (URL-10, 2024; Anbaroğlu vd., 2021). Başlangıçta 12 tema olmakla birlikte günümüzde toplam 32 temaya sahiptir (URL-11, 2024).

TKGM' nin sahip olduğu kurumsal yapı, benimsemiş olduğu Kadastro 2014, Kadastro 2014 ve sonrası ve AİTM gibi vizyonel yaklaşımlara birlikte hâlihazırda tüm tapu ve tapu siciline tescil işlemleri ülke sınırları içerisinde TKGM bünyesinde Tapu Müdürlüklerince, Türkiye dışında ise Türk Konsolosluklarınca yürütülmektedir (Çoruhlu ve Toludan, 2019). Gerçekleştirilen tapu sicil işlemlerinde uyulması gereken kurallar Türk Medeni Kanunu'nda ifade edilmiştir. Buna göre işlemler Tapu Sicili ilkelerine göre gerçekleştirilmektedir. Türk Medeni Kanunu'nda tanımlanan Tapu Sicili ilkeleri şu şekildedir: (1) Tescil İlkesi, (2) Açıklık İlkesi, (3) Devletin Sorumluluğu İlkesi, (4) Aynılık İlkesi, (5) Sebebe Bağlılık (İllyet) İlkesi, (6) Talep İlkesi, (7) Güven İlkesi (Resmi Gazete, 2001).

Türkiye'de tapu siciline tescil işlemlerinin büyük bölümünü alım-satım faaliyetleri oluşturmaktadır. Tapu sicili ilkelerine bağlı olarak gerçekleştirilen alım-satım işlemlerinde yetkili birim Tapu Müdürlükleridir. Tapu Müdürlüklerinin iş yükünün azaltılması, insan kaynağının daha etkin ve verimli kullanılması, vatandaşlara sunulan tapu işlemleri hizmetlerinin hızlı ve güvenli bir şekilde sağlanması, vatandaş memnuniyetinin artırılması gibi etkenlerden dolayı Noterlere de alım-satım yetkisi tanınmıştır. Literatürde bu konuyla ilgili yer alan bazı çalışmalar Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Noterlerin taşınmaz alım-satım işlemlerinde yetkilendirilmesiyle ilgili bazı çalışmalar

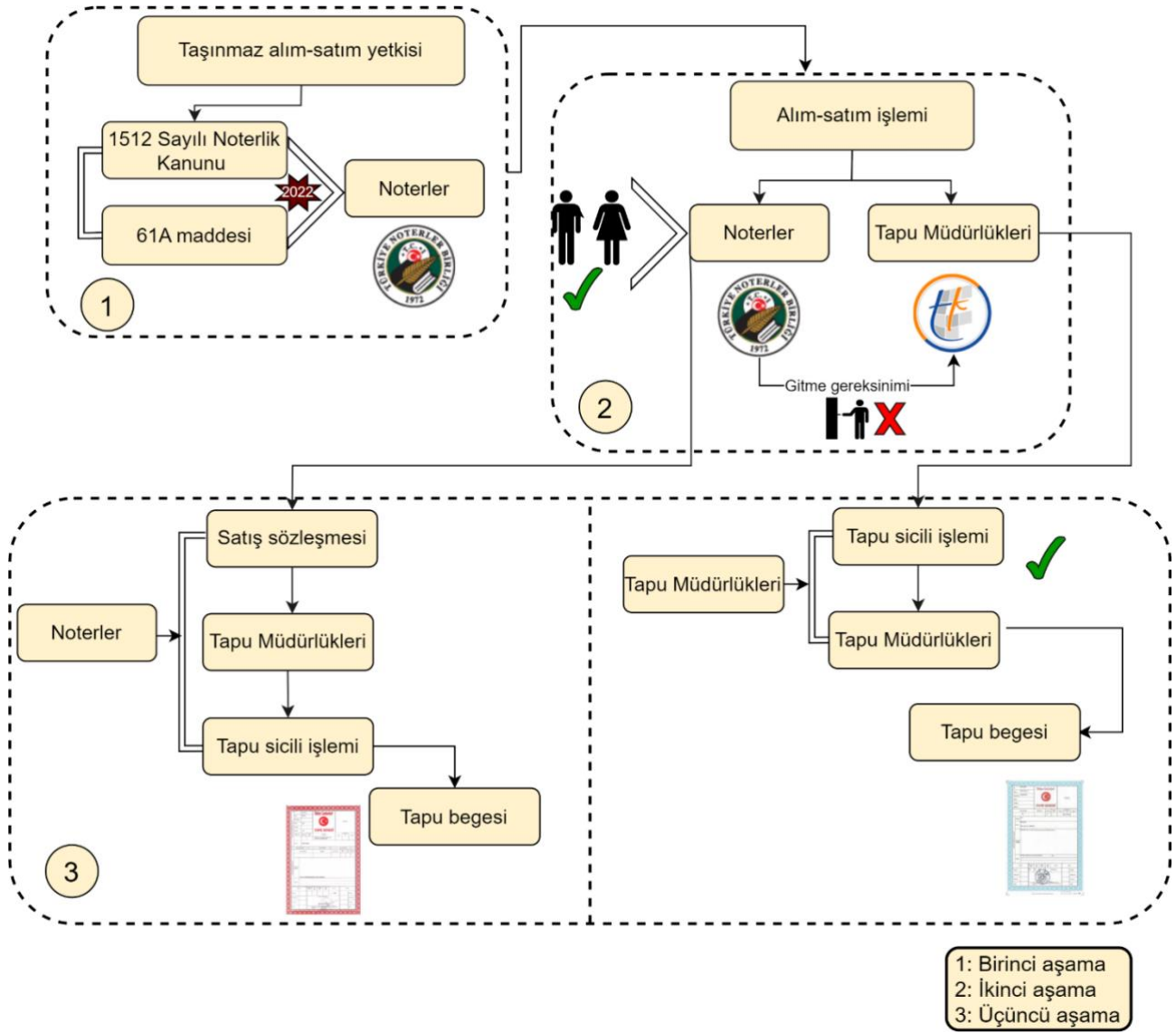
Referans	Çalışmanın Amacı
Tanrıver (2016)	Çalışmada Noterlerce elektronik ortamda yapılabilecek işlemler incelenmiştir. Bu kapsamda taşınmaz satış işlemlerinin yapımının elektronik ortamda henüz mümkün olmadığı ifade edilmiştir.
Tanrıver ve Ergüne (2023)	Noterlere tanınan taşınmaz satış sözleşmesi yetkisi ve yetkinin yerine getirilmesinde uyulması gereken usul ve esaslar çalışmada irdelenmiştir.
Özmen (2022)	Çalışmada Tapu Daireleri ve Noterler tarafından hâlihazırda yapılan uygulamalar incelenmiş, sonrasında Noterlere verilen taşınmaz satış sözleşmesi yapabilme yetkisinin teşkil edebileceği problem ve çözüm önerileri üzerinde durulmuştur.
Öcal vd. (2023)	Noterlerin taşınmaz satış sözleşmesi yapabilme yetkisi çalışmanın ana eksenini oluşturmaktadır. Bu yetkinin sınırlı olduğu ve Noterlere hukuki sorumluluk yüklediği ifade edilmiştir. Ayrıca bu işlemde aynı zamanda Tapu Müdürlüklerin de yetkili olması, problemlerin meydana gelmesine neden olabileceği çalışmada vurgulanmıştır.
Albayrak (2017)	Taşınmaz satış sözleşmesi yapma konusunda görev ve yetkiler ve de meydana gelen sıkıntılar çalışmada incelenmiştir. Bu konuda noterlerin yeri ve yetkileri irdelenmiştir. Çalışma yapıldığı dönemde henüz Noterlerce taşınmaz satış sözleşmesi hazırlanamamakta olduğu ifade edilmiştir.
Okyar (2024)	Çalışma Noterlere taşınmaz satış sözleşmesi yapma yetkisi üzerinde durmuştur ve verilen bu yetkinin iptali için Anayasa Mahkemesine açılan davanın olası sonuçları irdelenmiştir.
Kapancı (2023)	Taşınmaz satış sözleşmelerinin geçerliliği üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiş ve bu sözleşmesinin Noterlerce de yapılabileceği vurgulanmıştır.
Ünal (2024)	Çalışmada Noterlerin gerçekleştirmiş olduğu işlemler sonucunda hukuki sorumlulukları ele alınmıştır. Bu kapsamda Noterlere en son tanınan yetki olan taşınmaz satış sözleşmesi yapabilme hakkı da incelenmiş ve bu yetkiden dolayı Noterlerin doğabilecek zararlardan sorumlu olduğu ifade edilmiştir.

Noterlere tanınan alım-satım yetkisinin irdelenmesi konusu bu çalışmanın ana eksenini oluşturmaktadır. Bundan dolayı dünya çapında alım-satım süreçlerinde Noterlerin yerinin incelenmesi son derece önem arz etmektedir. Bazı ülkeler taşınmaz alım-satımını sadece Tapu Müdürlüklerinde yapmaktayken, bazı ülkeler sadece Noterlerde, bazı ülkeler ise her ikisinde de bu işlemleri yapabilmektedir. Örneğin ABD’de taşınmaz alım-satım süreci eyaletlere göre bazı farklılıklar göstermekle birlikte, işlemin yasal boyut kazanması için işlemin noter tasdikli olması yeterlidir (Brzezicka vd., 2018; Çoruhlu ve Toludan 2019; Şentürk, 2016; Taylor ve Aalbers, 2024). Alıcı ve satıcı arasında satış sözleşmesi yapılır, sonrasında bir tapu raporu hazırlanır ve tapu senedi satıcı tarafından imzalanır. Bu senet noter tarafından resmi hale getirilir ve yerel yönetime sunulur (Garcia-Teruel ve Simón-Moreno, 2021). Polonya’da da benzer şekilde taşınmaz alım-satımını noterler aracılığıyla gerçekleştirilir, sonrasında tapu kaydı oluşturulur (URL-12, 2024). Almanya’da ise noter onaylı satış sözleşmesi Tapu Müdürlüğüne sunulur ve burada tapu devri gerçekleşir (Çağdaş ve Linke, 2019). Hollanda’da noterler alım-satım işlemlerinde aktif rol oynamaktadır. Noterler tapu kayıtlarını inceler, herhangi problem olmaması durumunda işlem gerçekleştirilir. İspanya’da ise yine benzer şekilde hem noterler hem de tapu müdürlükleri bu süreçte işlemleri koordineli şekilde yürütmektedir. İşlem noterler aracılığıyla gerçekleştirilmişse Tapu Müdürlükleri bilgilendirilir ve

tapu sicil kaydı tutulur, doğrudan Tapu Müdürlüklerinde yapılmışsa tapu siciline tescil işlemi gerçekleştirilir (Garcia-Teruel, 2020; Garcia-Teruel ve Simón-Moreno, 2021).

Çalışmaya konu teşkil eden Türkiye’de Noterlerin taşınmaz alım-satım yetkisinin irdelenmesi için öncelikle noterlik mesleği irdelenmelidir. Noterlik, gerçek ve/veya tüzel kişiler arasında yapılan işlemlerin hukuksal olarak geçerli olmasını ve evrakların resmi hüviyet kazanmasını sağlayan meslek dalıdır (URL-13, 2024). Noterlik mesleğini icra edenlerin oluşturmuş olduğu Türkiye Noterler Birliği (TNB) kamu kurumu niteliği taşıyan bir meslek kuruluşudur. Önemli bir konumda bulunan noterlik büroları, toplamda 2339 adet ile Türkiye’nin 922 ilçesinde faaliyetlerini sürdürmektedir (URL-14, 2024).

Özel sektör olarak kamusal hizmet veren ve kamu denetiminde, belirli şartları sağlayan avukatların işlettiği noterler uzun zamandır, tapu işlemlerini yapabilme yetkisine sahip olmak için lobi faaliyetleri yürütmektedir (Tanrıver, 2016). Nihayet 2022’de noterler alım-satım işlemlerinin ilk aşaması olan alım-satıma ilişkin satış sözleşmesi düzenleme yetkisini edinmiştir (Özmen, 2022). Böylece, alıcı ve satıcının Tapu Müdürlüğüne gitmesine gerek kalmaksızın bu işlemi gerçekleştirilebilme imkânı ortaya çıkmıştır. Bu yetkinin noterlere verilmesi ile taşınmaz alım-satımında, alıcı ve satıcı lehine hibrit bir yetkilendirme ortaya çıkmıştır. Türkiye’de tüm tapu işlemlerinin sadece Tapu Müdürlüklerinde bulunan tapu sicili üzerine kaydedilmesi işlemi ise halen devam etmekte olan yasal bir zorunluluktur. Alıcı-satıcı kendi arasında anlaşarak, alım-satım işlemi hem Tapu Müdürlüğünde ve hem de bir noterlikte yapılabilir (Tanrıver ve Ergüne, 2023). İşlemin, Tapu Müdürlüğüne yapılması durumunda geçmişte olduğu gibi, gerekli değerlendirme yapıldıktan sonra işlem yerine getirilir. Ardından taşınmazın yeni hak sahibine satın aldığı taşınmazın tapu belgesi teslim edilir. İşlemin, Noterde yapılması durumunda ise, Noterce bir alım-satım işlemi için bir satış vaadi sözleşmesi düzenlemesi gerekir. Daha sonra, Noterce alıcı-satıcı olmak üzere temin edilen evraklarla birlikte sözleşme Tapu Müdürlüğüne iletilir. Tapu Müdürlüğü, noter üzerinden gelen bu talebi karşılayarak işlemin tapu sicili tescilini gerçekleştirir ve Noteri bilgilendirir. Bu bilgilendirme sonrası alıcı-satıcının işlemi tamamlanır (Şekil 2). Eş bir anlatımla, noterin alım-satım öncesi düzenlediği satış sözleşmesi yine Tapu Müdürlüğüne iletilerek işlemin tapu sicili ve TAKBİS üzerinde yapılması tapu müdürlüklerince sağlanır. Esasında tapu sicili yönüyle ele alındığında, geçmiş uygulamalara göre bir değişiklik olmadığı söylenebilir. Fakat kamuoyunda çok farklı yönleri ile ele alınan bu yeni uygulamanın TKGM çalışanlarının bakış açısı ile nasıl değerlendirildiği merak konusudur. Zira uygulama öncesi herhangi bir fizibilite çalışması yapılmadığı bilinmektedir. Diğer taraftan TKGM personellerinin görüş ve önerileri böylesine bir değişiklik öncesi alınmamıştır.



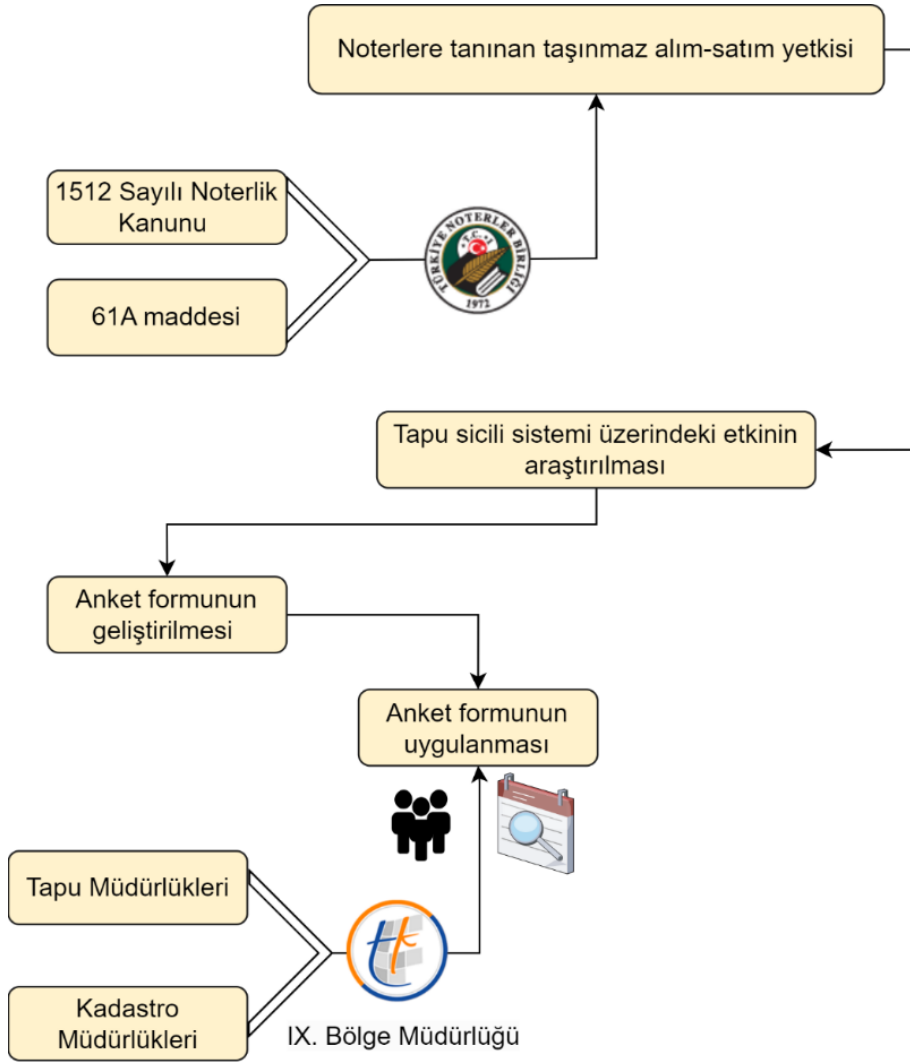
Şekil 2. Taşınmaz alım-satım sürecini gösteren akış diyagramı

TKGM' nin bu yeni uygulamasının kendi çalışanlarının bakışıyla nasıl değerlendirildiği, Kadastro 2014 ifadelerinin içselleştirilmesindeki tutumu ve yeni uygulamanın tapu sicilinin ilkelerini olası etkileme durumu bu çalışmanın problem durumunu oluşturmaktadır. Bu problem durumunu netleştirmek için, TKGM' de görev yapan örneklem grubuna hem yeni uygulama ve hem de Kadastro 2014 ifadelerinin içselleştirilmesinde TKGM' nin öz değerlendirmesinin yapılması amaçlanmaktadır.

Çalışmada, TKGM Trabzon Tapu ve Kadastro IX. Bölge Müdürlüğüne bağlı Tapu Müdürlükleri ve Kadastro Müdürlükleri personellerinin görüşlerine yapılandırılmış anket yöntemiyle başvurulmuştur. Öncelikle anket formu problem durumu ve çalışmanın amacı göz önünde alınarak geliştirilmiş, kapsam ve içerik geçerliği ile güvenilirliği bilim ve alan uzmanları ile yapılmış ve akabinde uygulaması kararlaştırılmıştır. Taşınmaz alım satım işlemlerinde Noterlerin yetkilendirilmesinin tapu sicil sistemi üzerindeki etkileri, Kadastro 2014 ifadelerinin içselleştirilmesindeki mevcut durum ve yeni uygulamanın tapu sicilinin ilkeleri üzerine olası etkileri analiz edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Çalışmanın hedefini gerçekleştirmek için uygun bir araştırma yöntemi ve veri toplama aracı belirlenir. Araştırmalar temel olarak nicel (kantitatif) ve nitel (kalitatif) olmak üzere iki şekilde gruplandırılabilir (Matović ve Ovesni, 2023). Nicel ve nitel araştırmalar; amaçları, kapsamı ve uygulama süreçleri açısından bazı farklılıklara sahiptir. Bu iki yöntem arasındaki en temel fark; nicel araştırmalar sayısal verilerden yola çıkarak bilgiye ulaşmayı hedeflerken, nitel araştırmalar ise çalışma konusunun detaylı irdelenmesini amaçlamaktadır (Kurtuluş, 2010). Araştırma yöntemi belirlendikten sonra, çalışmanın amacına ulaşabilmek için en uygun veri toplama aracı belirlenmelidir (Coşkun vd., 2020). Nicel araştırmalarda sıklıkla anketler veri toplama aracı olarak tercih edilir (Şimşek vd., 2023; Silsüpür ve Beşikçi, 2023). Anketler; uzman(lar) tarafından hazırlanmış, tek ya da gruplar halinde uygulanarak örneklem grubunun görüşlerini ortaya çıkarmayı sağlamaktadır. Anket soruları araştırmanın hedefiyle doğrudan ilişkili bilgileri örneklem grubunu aracılığı ile edinmek üzere tasarlanır. Bu sayede, anketler nicel araştırmalar için geçerli ve güvenilir veri toplama aracı olarak kabul edilmektedir (DuBenske vd., 2014; Buerhaus vd., 2012). Bu çalışmada noterlere verilen taşınmaz alım-satım yetkisinin tapu sicil sistemi üzerindeki etkilerinin araştırılması hedeflenmiştir (Şekil 3). Çalışma grubu olarak TKGM Trabzon Tapu ve Kadastro IX. Bölge Müdürlüğüne bağlı Tapu Müdürlükleri ve Kadastro Müdürlükleri çalışanları belirlenmiştir. Nicel araştırma yöntemlerinden basit deneysel araştırma yöntemi (Kaufmann ve Steudler, 1998), veri toplama aracı olarak bir yapılandırılmış anket formu geliştirilmiş (Coşkun vd, 2020) ve elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak tablolarda sunulmuştur. Anket formu dört ana bölümden meydana gelmektedir. (1) Bunlar; Demografik Veriler, (2) Kadastro 2014'ün ifadelerine göre Türk Tapu Sicil Sistemi, (3) Satış Sözleşmesi Düzenleme Yetkisinin Noterlere Verilmesinin Tapu Sicili ve Taraflar Arasındaki Üzerindeki Olası Etkileri, (4) Satış Sözleşmesi Düzenleme Yetkisinin Noterlere Verilmesinin Tapu Sicilinin Prensiplerine/İlkelerine Olası Etkileridir.



Şekil 3. Çalışma metodu akış diyagramı

Araştırma hedefi doğrultusunda uzman(lar)ca hazırlanan ve örneklem grubuna yönlendirilen anket sonucunda elde edilen bulguların anlamlı olması gerekmektedir, böylece yapılan çalışmanın tutarlılığından söz edilebilir. Öncelikle anketin geçerlik ve güvenilirlik analizlerinin yapılmalıdır. Geçerlik, anketin ölçmek veya bulmak istediği özelliğin ölçülebilmesi veya tespit edilebilmesi olarak ifade edilir (İlhan vd., 2012). Güvenirlik ise, anketin hazırlanma amacı doğrultusunda ölçmek veya test etmek istediği özelliğin istikrarlı ve tutarlı bir şekilde tespit edilmesidir (Özabacı, 2011). Başka bir ifadeyle, örneklem grubunun anket sorularına benzer ve tutarlı cevaplar vermesidir. Güvenilir bir anket sonucunun elde edilmesinde örneklem grubunun amaca uygun şekilde belirlenmesi de önemlidir. Anket sorularının ise, ölçülmesi hedeflenen işlemlere yönelik hazırlanması gerekmektedir. Güvenilir bir anket benzer koşullarda tekrar aynı veya farklı örneklem grubuna uygulandığında tutarlı sonuçlar verir. Ancak, bir anketin tek başına güvenilir olması, anketten elde edilen bulguların kullanılabilmesini ifade etmeyebilir. Aynı zamanda, anketin geçerli olması da gerekir. Geçerli bir anket, çalışma hedefi ve araştırma sorusuyla doğrudan ilişkilidir. Anketten elde edilen bulguların anlamlı olması için anketin hem geçerli hem de güvenilir olması gerekmektedir. Bu doğrultuda,

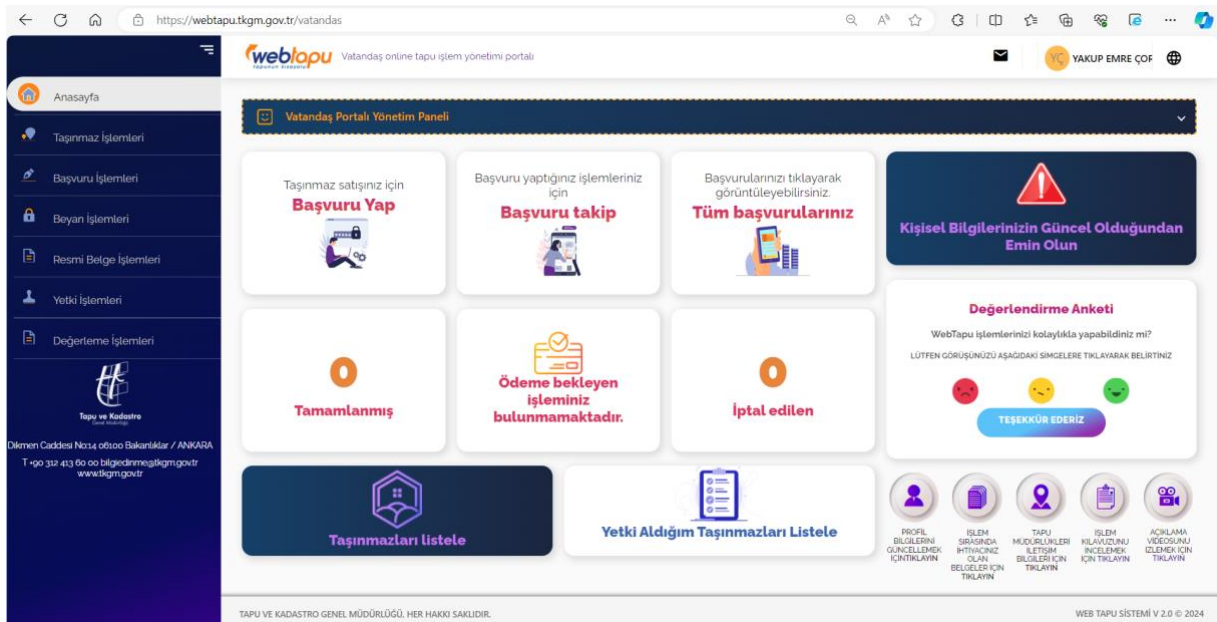
anketin geçerlik ve güvenilirlik analizi yapılmalıdır. Bu çalışmada da ortaya atılan hipotez için örneklem grubuna uygulanmak üzere oluşturulan anket için geçerlik ve güvenilirlik analizi yapılmıştır. Anket formu alanında uzmanlar TKGM çalışanları ve arazi yönetimi alanındaki akademisyenlerin görüş ve önerileri çerçevesinde hazırlanmış, dönütleri ile revize edilmiş ve son hali verilerek, geçerlik analizi gerçekleştirilmiştir. Anketin güvenilirliği ise basit deneysel istatistiksel yöntem kullanılarak sağlanmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonrasında anketin uygulanması planlanmıştır

Trabzon Tapu ve Kadastro IX. Bölge Müdürlüğüne bağlı 59 Müdürlükten çoğunluğu Tapu Müdürlüğü personelleri olmak üzere az sayıda da kadastro müdürlüğü personelleri (140 kişi) görüşlerine başvurulmuştur. Öncelikli olarak yapılandırılmış anket formu geliştirilmiştir. Daha sonra formun **Demografik Veriler** başlıklı ilk bölümünde; eğitim durumu, mezun olunan bölüm, TKGM’nde görev yapılan unvan, görevli birim, iş deneyimine ilişkin yıl bilgisi ile örneklem grubunun demografik analizinin edinimi planlanmıştır. Sonraki bölümde ise **Kadastro 2014’ün İfadelerine Göre Tapu Sicil Sisteminin Analizi** bölümünde Kadastro 2014’ün her bir ifadesinin yeterliliğinin saptanması hedeflenmiştir. İfadelerin yetersizliğinin olması durumunda, olası yetersizlik sebepleri sıralanarak, bu sebeplerin hangilerinin yetersizliğe neden olabileceği sorulmuştur. Yetersizliğe sebep olan başka nedenlerin varlığı ihtimaline karşı, her bir olası neden sorusunun altına diğer seçeneği açılarak örneklem grubunun açık uçlu görüşlerinin alınması planlanmıştır. Kadastro 2014’ün 3. ve 4. ifadesi tapu sicili ile direkt ilişkili olmaması ve Türk Kadastro Sistemi mevcut uygulamalarına yerleştiğinden dolayı anket formuna soru olarak eklenmemiştir. **Satış Sözleşmesi Düzenleme Yetkisinin Noterlere Verilmesinin Tapu Sicili ve Taraflar Arasındaki Üzerindeki Olası Etkileri** başlıklı bölümünde yeni uygulamanın tapu müdürlüklerinde yoğunluğa etkisi, mevcut sistemin Kamusal Hak ve Kısıtlamaların varlığı ile ilişkisinin doğru bir kurgu ile sürdürülebilmesi, olası hatalı/yanlış/eksik uygulama ihtimalleri, yeni talep edilecek alım-satım işlemlerinde alım-satım yapan tarafların olası tercihleri, tapu müdürlüklerindeki mevcut iş yoğunluğuna etkisi, Devletin sorumluluğu ilkesi ile yeni uygulamanın sorumluluğunun noterlerle paylaşımı konuları soru halinde forma eklenmiştir. Son bölümde ise **Satış Sözleşmesi Düzenleme Yetkisinin Noterlere Verilmesinin Tapu Sicilinin Prensiplerine/İlkelerine Olası Etkileri** başlığı altında her bir tapu sicili ilkesinin yeni uygulamadan nasıl etkilenebileceğine ilişkin bir soru yöneltilerek anket formu tamamlanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Başlangıcında taşınmazlara ilişkin tapu sicili işlemleri sadece tarafların Tapu Müdürlüklerine tapu sicilinin “talep ilkesi” gereğince bizzat başvurusu ve talep sahibinin gelmesi gerekmekteydi. Tapu işlemlerine başvuru ve ön sıra işlerinin dijitalleşmesi ile birlikte başlatılan Şekil 4 ile gösterilen

Web-Tapu uygulaması, korona virüs salgını ile birlikte daha da geliştirildi. Kamu kurum ve kuruluşları ile özel sektöre, tapu işlemlerini yürütürken işlemleri çevrimiçi olarak başlatma, bazı işlemleri belli aşamalara kadar yürütme yetkisi verildi. Böylelikle hem tapu sicilinin tutulmasındaki iş yükü azalmakta hem de özel sektör kamu iş birliği sağlanmıştır. Web-Tapu hizmeti ile yakın bir zamana kadar, taşınmazını satmak isteyen bir malik, taşınmazı hangi idari birimde olursa olsun, işlemini istediği Tapu Müdürlüğünde yapabileceği imkânını edindi. Talep edilen evrakları Web-Tapu vatandaş ara yüzüne eklemesi ile talep edilen satış işlemi hazırlanma süreci başlatılmaktadır. Resmi senedin hazırlanması ve tarafların imza aşamasına gelmesi ile satış talebinde bulunanlar SMS ile bilgilendirilmekte, harç ödeme numarası ve randevu saat bilgileri elde edilmektedir. Bu işlemleri yerine getiren satıcı-alıcı sadece Tapu müdürlüğüne, düzenlenen resmi senedi imzalamak için gelirler ve imzaları atarak satış işlemini tamamlamaktadırlar.



Şekil 4. Web tapu uygulaması ara yüzü (URL-15, 2024)

2019'da Tapu Kanunu'nda yapılan değişikliklerle, artık alıcı ve satıcının birlikte aynı Müdürlükte olma zorunluluğu da ortadan kaldırıldı. Eş bir anlatımla taraflar farklı il, ilçe ve hatta ülkede olsa bile, alım-satım işlemleri gerçekleştirilebilir hal aldı.

Son olarak 2022'de yayımlanan ve Noterlik Kanunu'nda, yapılan değişikliklerle Noterlere de taşınmaz satış sözleşmesi düzenleme yetkisi verildi. 11 Ocak 2023 tarihinde ise uygulamanın usul ve esasları da belirlendi. Yönetmelik sayesinde, Noterler 01/07/2023 tarihi itibarıyla taşınmaz satış sözleşmesi düzenleyerek taşınmaz satışı yapabilmektedir. Bu sözleşmenin tapu siciline aktarımı sisteme Noterçe yapılan talep ile işlenerek, Tapu Müdürlüğüne tapu sicilinde yapılan tescille tamamlanmaktadır.

Herhangi bir taşınmaz alıcı-satıcı arasında serbest piyasa şartlarına göre bir bedel (piyasa alım-satım değeri) ile anlaşarak işlemin gerçekleştirilmesi için Tapu Müdürlüğüne başvuruda bulunabilir. Gerekli belgelerin sunulması ve emlak vergi borcu bulunmaması halinde talep karşılanması için Tapu Harcı ve Döner Sermaye Ücreti tahsilatı sağlanır. Web-Tapu ile Belediyelerle yapılan protokoller uyarınca emlak vergi borcu sorgulaması da alıcı-satıcı talebine istinaden Tapu Müdürlüğüne kontrol edilebilmektedir. Bilindiği üzere alım-satım işlemlerinde harç taşınmazın alım-satım değerinin %4'ü olarak hesaplanarak tahsil edilir. Diğer taraftan Emlak Vergi Borcu ise ilgili Belediyece tahsil edilir. Diğer bir ücret ise TKGM Döner Sermaye İşlem Ücretidir. Tapu işlemlerinin gerçekleştirilmesi için tahsil edilen bu ücret işlem ilinin kat sayısına göre değişiklik gösterir. Katsayılar 0.5 ile 2.5 arasındadır. 2024 yılında 1 kat sayısı olan illerin döne sermaye işlem ücreti 822 TL olarak belirlenmiştir. Eğer taşınmazın satışı için Tapu Müdürlüğü değil de, Notere başvurulursa, taşınmaz değerine göre 2023 yılı için 500TL'den az ve 4000TL'den fazla olmamak üzere Noterlik Ücreti de tahsil edilmektedir.

Süreç içinde verilen bu değişikliklerin örneklem grubuna yöneltilen sorularla analizinden elde edilen bulgular aşağıda sırasıyla verilmiştir.

3.1. Anket Uygulamasından Elde Edilen Bulgular

Bu başlık altında anket çalışmasından elde edilen bulgular soru soru incelenerek sunulmuştur (Tablo 3-23). Öncelikle anket sorusu verilmiş ve sonrasında analizden elde edilen bulgulara yer verilmiştir.

(1) Demografik Veriler

Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü taşra teşkilatında yer alan Trabzon Tapu ve Kadastro IX. Bölge Müdürlüğüne bağlı 59 Müdürlükte yapılan anket çalışmasına 140 kişi katılmıştır (Tablo 3). Ancak katılımcıların bazıları ankette yer alan her soruya cevap vermek istemediğinden dolayı bazı sorularda katılımcı sayısı değişkenlik göstermiştir. Örneklem grubu olan katılımcıların Tapu Müdürlükleri (113 kişi) personellerinden oluşan ve farklı gözlem olması açısından Kadastro Müdürlükleri (27 kişi) çalışanları katılım sağlamıştır. Örneklem grubu daha çok 11 - 20 yıl arası ve 21 yıl ve üzeri tecrübeli kişilerden oluşmuştur.

Tablo 3. Demografik veriler

Katılımcı Eğitim Durumunuz	Frekans (f)	Yüzde (%)
Ön Lisans	48	34
Lisans	87	62
Yüksek Lisans	5	4
Mesleğiniz (Eğitim)?		
Harita Mühendisi	12	9
Harita ve Kadastro Teknikeri/ Tapu ve Kadastro Teknikeri	54	38

Diğer	74	53
Unvanınız (Kadro)?		
Tapu Müdürü	19	14
Tapu Müdür Yardımcısı	18	13
Bilgisayar İşletmeni/VHKİ	27	19
Arşiv Memuru/Memur	10	7
Şube Müdürü (Bölge)	2	1
Kadastro Teknisyeni / Tekniker	48	34
Uzman	16	12

Tablo 3'ün devamı

Görev yaptığınız kurum?*	Frekans (f)	Yüzde (%)
Tapu Müdürlüğü	113	80
Tapu ve Kadastro Bölge Müdürlüğü (Bölge)	1	1
(Bölge) Tapu Şube Müdürlüğü	1	1
Kadastro Müdürlüğü	25	18
Kaç yıldır görev yapıyorsunuz?		
1-5 yıl arası	14	10
6-10 yıl arası	19	14
11-20 yıl arası	72	25
21 ve üzeri	35	51

(2) Kadastro 2014'ün İfadelerine göre Tapu Sicil Sisteminin Analizi

1. Sizce mevcut tapu sicil sistemimiz, Kadastro 2014'ün 1. ifadesi olan "kamusal haklar ve kısıtlamalar dâhil olmak üzere, arazinin bütün yasal durumunu temsil etmede yeterli midir? (Bir seçenek işaretlenir)

Tablo 4. Kadastro 2014'ün 1. İfadesine İlişkin Görüşler

Durumlar	Frekans (f)	Yüzde (%)
Evet yeterlidir	14	10
Hayır, yeterli değildir	79	56
Kısmen yeterlidir	47	34

2. Sizce mevcut tapu sicil sistemimiz, Kadastro 2014'ün 1. ifadesi olan kamusal haklar ve kısıtlamalar dâhil olmak üzere, arazinin bütün yasal durumunu temsil etmede yeterli değil veya kısmen yeterli ise, bu yetersizliğin sebepleri nelerdir? (Birden çok seçenek işaretlenebilir)

Tablo 5. Kadastro 2014'ün 1. İfadesine İlişkin Görüşler

Durumlar	Frekans (f)	Yüzde (%)
Planlı alanlarda imar planından kaynaklı yapılaşma/yapılaşmama şartlarını içermemesi	127	91
Korunan alanlarla ilgili tüm hak ve kısıtları içermemesi	130	93
Vakıf şerhi başta olmak üzere vakıflar Hukukundan kaynaklı kısıtlamaları içermemesi	112	80
Plansız alanlarda yapılaşma/yapılaşmama şartlarını içermemesi	131	94
İfraz işlemi Toprak Koruma ve Arazi Kullanım Kanunu kısıtlarını içermemesi	132	94
Diğer (Lütfen belirtiniz) Kıyı Kenar Çizgisi, Askeri yasak bölgeleri	10	7

3. Sizce mevcut tapu sicil sistemimiz, Kadastro 2014'ün 2. ifadesi olan 'haritalar' ve 'kayıtlar' arasındaki ayrılık ortadan kalkacak yaklaşımına uygun şekilde harita üzerinde gösterilen her türlü detayı sunabilir mi? (Birden çok seçenek işaretlenebilir)

Tablo 6. Kadastro 2014'ün 2. İfadesine İlişkin Görüşler

Durumlar	Frekans (f)	Yüzde (%)
Evet sunabilir	10	9
Hayır sunamaz	33	31
Kısmen sunabilir	65	60

4. Sizce mevcut tapu sicil sistemimiz, Kadastro 2014'ün 2. ifadesi olan 'haritalar' ve 'kayıtlar' arasındaki ayrılık ortadan kalkacak yaklaşımına uygun şekilde harita üzerinde gösterilen her türlü detayı sunabilir noktasında yeterli değil veya kısmen yeterli ise, bu yetersizliğin sebepleri nelerdir? (Birden çok seçenek işaretlenebilir)

Tablo 7. Kadastro 2014'ün 2. İfadesine İlişkin Görüşler

Durumlar	Frekans (f)	Yüzde (%)
Kadastro kapsamının ülke yüzölçümünün %62'lik bir kısmını kapsaması	65	62
Kadastro parsellerinin ülke genelinde standart nokta-konum doğruluğunda olmaması	83	79
Bina ve yapı verilerinin tamamının kadastro altlıkları ile ilişkilendirilememesi	26	25
Kamulaştırma, kamulaştırmaz el atma, irtifak hakkı gibi mülkiyetten gayri sınırlı aynı hakların kadastro altlıkları ile anlık olarak ilişkilendirilememesi	47	45
Diğer (Lütfen belirtiniz)	-	-

5. Sizce mevcut tapu sicil sistemimiz, Kadastro 2014'ün 5. ifadesi olan Kadastro 2014 önemli ölçüde özelleşmiş olacak, kamu ve özel sektör birlikte çalışacak vizyonuna uygun bir yapıda özel sektörle ilişkili olarak çalışmakta mıdır?

Tablo 8. Kadastro 2014'ün 5. İfadesine İlişkin Görüşler

Durumlar	Frekans (f)	Yüzde (%)
Evet çalışmaktadır	34	26
Hayır çalışmamaktadır	19	15
Kısmen çalışmaktadır	76	59

6. Sizce mevcut tapu sicil sistemimiz, Kadastro 2014'ün 5. ifadesi olan Kadastro 2014 önemli ölçüde özelleşmiş olacak, kamu ve özel sektör birlikte çalışacak vizyonuna uygun bir yapıda hangi özel sektörle ilişkili içindedir? (Birden çok seçenek işaretlenebilir)

Tablo 9. Kadastro 2014'ün 5. İfadesine İlişkin Görüşler

Durumlar	Frekans (f)	Yüzde (%)
Serbest Harita ve Kadastro Mühendislik Büroları	12	11
Lisanslı Harita Kadastro Mühendislik Büroları	65	62
SPK Lisanslı Değerleme Uzmanları/Kuruluşları	93	89

Serbest Avukatlar	23	22
Özel Bankalar	93	89
Noterler	96	91

7. Sizce mevcut tapu sicil sistemimizin, Kadastro 2014'ün 5. ifadesi olan Kadastro 2014 önemli ölçüde özelleşmiş olacak, kamu ve özel sektör birlikte çalışacak vizyonu tapu müdürlükleri için uygulanabilir mi?

Tablo 10. Kadastro 2014'ün 5. İfadesine İlişkin Görüşler

Durumlar	Frekans (f)	Yüzde (%)
Evet uygulanabilir	20	14
Hayır uygulanamaz	56	40
Kısmen uygulanabilir	64	46

8. Sizce mevcut tapu sicil sistemimizin, Kadastro 2014'ün 5. ifadesi olan Kadastro 2014 önemli ölçüde özelleşmiş olacak, kamu ve özel sektör birlikte çalışacak vizyonuna uygun bir yapıya dönüşümü uygulanabilir veya kısmen uygulanabilir ise aşağıdakilerin hangilerini önerirsiniz? (En önemlisi 1 olacak şekilde, 1'den 5'e kadar numaralandırınız)

Tablo 11. Kadastro 2014'ün 5. İfadesine İlişkin Görüşler

Sıralama	Frekans (f)				
	1	2	3	4	5
Durumlar					
Tapu siciline yapılacak tescil, terkin ve tashihlerin özel sektörde yapılabilir	43	36	32	19	10
TAKBİS veri girişi özel sektörde yapılabilir	21	23	22	35	39
Tapu arşivi araştırması özel sektörde yapılabilir	17	13	15	29	66
Mahkeme, Kurum vb. belge taleplerinin karşılanması özel sektörde yapılabilir	39	36	33	24	8
Tapunun memur çalışanlarının kontrol ve denetiminde özel sektör sevk ve idare edilecek	20	32	38	33	17

9. Sizce mevcut tapu sicil sistemimizdeki özel sektör bileşenlerinin artırılması, satış işleminin noterlere devredilmesi gibi birtakım akitli işlemlerin devri gündeme gelmeli mi?

Tablo 12. Devir işlemine ilişkin görüşler

Durumlar	Frekans (f)	Yüzde (%)
Evet, gündeme gelmeli, böylece tapunun memur çalışanlarının kontrol ve denetiminde özel sektör tapudaki iş ve işlemlerini yürütmeli	57	41
Hayır, gündeme gelmemeli, işlem sayısı yetersiz olan müdürlükler ile yoğun kentlerde müdürlük sayısı ve personel artırılmalı	83	59

10. Sizce mevcut tapu sicil sistemimiz, Kadastro 2014'ün 6. ifadesi olan Kadastro 2014 maliyet geri kazanımlı olacaktır vizyonuna uygun bir yapıda Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü'nün tapulama ve tesis kadastro ile ürettiği kadastro yenileme/güncelleme, değişiklik işlemleri, imar

uygulamaları, toplulaştırma, kamulaştırma, irtifak hakkı tesisi vb. işlemlerle sürekli güncel tuttuğu mülkiyet altlığı ve tapu sicilinin tutulması için harcadığı maliyeti karşılamada etkin midir?

Tablo 13. Kadastro 2014'ün 6. İfadesine İlişkin Görüşler

Durumlar	Frekans (f)	Yüzde (%)
Evet, etkindir	56	8
Hayır, etkin değildir	11	40
Kısmen etkindir	73	52

(3) Satış Sözleşmesi Düzenleme Yetkisinin Noterlere Verilmesinin Tapu Sicili Ve Taraflar Arasındaki Üzerindeki Olası Etkileri

1. Sizce noterlere verilen taşınmaz satış sözleşmesi yapma yetkisi taşınmaz alım-satım işlemlerinin Tapu Müdürlüklerinde oluşturduğu yoğunluğu azaltabilir mi?

Tablo 14. Noterlerin Satış Sözleşmesi Yapmasına İlişkin Görüşler

Durumlar	Frekans (f)	Yüzde (%)
Evet azaltabilir	35	25
Hayır azaltmaz	21	15
Kısmen azaltabilir	84	60

2. Sizce noterler, kendilerine verilen taşınmaz satış sözleşmesi yapma yetkisi dâhilinde taşınmaz alım-satım işlemlerinde, tapu sicilinde tescilli tüm kamusal hak/kısıtlamalar ve taşınmaz satışıyla ilgili diğer kanunlarda yer alan sınırlamaları dikkate alarak/bilerek işlemleri anlık bir yapıda yapabilir mi?

Tablo 15. Noterlerin Satış Sözleşmesi Yapmasına İlişkin Görüşler

Durumlar	Frekans (f)	Yüzde (%)
Evet yapabilir	62	44
Hayır yapamaz	12	9
Kısmen yapabilir	66	47

3. Bir önceki soruya yanıtınız hayır yapamaz/kısmen yapabilir ise; Noterlerin kanunlarda yer alan sınırlamaları dikkate alarak/bilerek işlemleri anlık bir yapıda yapamama sebepleri sizce neler olabilir? (En önemlisi 1 olacak şekilde, 1'den 5'ye kadar numaralandırınız)

Tablo 16. Noterlerin Satış Sözleşmesi Yapmasına İlişkin Görüşler

Sıralama	Frekans (f)				
	1	2	3	4	5
Durumlar					
Noterlerde, tapu müdürlüğü deneyimine sahip çalışan olmaması	70	57	12	-	-
Noterlerde, tapu müdürlüğü deneyimine tapu müdür yardımcısı/Tapu müdürü olmaması	63	40	25	12	-
Mer'i arazi yönetimi yasa, yönetmelik ve genelgelerinin takip edilmemesi	3	25	80	32	-
Çözümü teknik bilgi gerektiren durumlarda danışma imkânı olmaması	4	18	22	96	-

Diğer (Lütfen belirtiniz)	-	-	-	-	140
---------------------------	---	---	---	---	-----

4. Sizce noterler, alım-satıma konu bir taşınmazın hak sahibini belirleyebilir mi?

Tablo 17. Noterlerin Satış Sözleşmesi Yapmasına İlişkin Görüşler

Durumlar	Frekans (f)	Yüzde (%)
Evet belirleyebilir	27	19
Hayır belirleyemez	23	17
Kısmen belirleyebilir	90	64

5. Sizce noterler, bir taşınmazın satışına engel hukuki bir durumun bulunup bulunmadığına anlık olarak karar verebilir mi?

Tablo 18. Noterlerin Satış Sözleşmesi Yapmasına İlişkin Görüşler

Durumlar	Frekans (f)	Yüzde (%)
Evet belirleyebilir	26	19
Hayır belirleyemez	23	17
Kısmen belirleyebilir	91	64

6. Sizce, bir taşınmazın alım-satımının gerçekleştirilmesinde taşınmaz alıcı-satıcısı hangi gerekçelerle tapu müdürlüğü yerine noter aracılığı ile işlem yapmayı tercih eder? (En önemlisi 1 olacak şekilde, 1'den 5'ye kadar numaralandırınız)

Tablo 19. Noterlerin Satış Sözleşmesi Yapmasına İlişkin Görüşler

Sıralama	Frekans (f)				
	1	2	3	4	5
Durumlar					
Daha kısa zamanda işlemi tamamlatma isteği	58	50	32	-	-
Daha az bürokrasi	43	40	38	19	-
Tapu müdürlüğüne gitmemek	21	24	29	45	21
Daha merkezi bir konumdaki Noterde işlemi yaptırmak	18	26	30	30	36
Yol masraflarından kaçınmak	11	46	83	-	-

7. Sizce, taşınmazların alım-satımının sözleşme şeklinde noterlerce gerçekleştirilmesi ve ardından tapu müdürlüklerinde tescil adına diğer işlemlerin yapılması Tapu Müdürlüğü mevcut iş ve işlemlerinde azalmaya sebep olur mu?

Tablo 20. Noterlerin Satış Sözleşmesi Yapmasına İlişkin Görüşler

Durumlar	Frekans (f)	Yüzde (%)
Evet, sebep olur	54	39
Hayır, sebep olmaz, sadece alıcı-satıcı kalabalığı azaltır	86	61

8. Sizce, taşınmaz satış işlemleri için Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü döner sermaye işletmesine gelir kaydedilmek üzere, noterlerce yapılacak satış sözleşmesinden hizmet bedeli alınması doğru bir uygulama mıdır?

Tablo 21. Noterlerin Satış Sözleşmesi Yapmasına İlişkin Görüşler

Durumlar	Frekans (f)	Yüzde (%)
Evet, doğru bir uygulamadır	48	34
Hayır, doğru bir uygulama değildir	92	66

9. Sizce, taşınmaz satış sözleşmesinin düzenlenmesinden dolayı oluşan zarardan noterlerin de sorumlu olması ve bu zararın Devlet tarafından ödenmesi hâlinde, ilgili notere rücu edebilmesi doğru bir uygulama mıdır?

Tablo 22. Noterlerin Satış Sözleşmesi Yapmasına İlişkin Görüşler

Durumlar	Frekans (f)	Yüzde (%)
Evet, doğru bir uygulamadır	132	94
Hayır, doğru bir uygulama değildir	8	6

(4) Satış Sözleşmesi Düzenleme Yetkisinin Noterlere Verilmesinin Tapu Sicilinin Prensiplerine/İlkelerine Olası Etkileri

1. Sizce, taşınmazların alım-satımının sözleşme şeklinde noterlerce gerçekleştirilmesi tapu sicilinin ilkelerini/prensiplerini nasıl etkiler?

Tablo 23. Noterlerin Satış Sözleşmesi Yapmasına İlişkin Görüşler

Prensipler	Frekans (f)	Yüzde (%)
Tescil Prensipleri: Kurulması kanunen tescile tâbi aynî hakların, tescil edilmedikçe varlık kazanmaması		
• Olumlu etkiler	12	8
• Olumsuz etkiler	33	24
• Etkilemez/Etkisini değiştirmez	95	68
Aynı Açıklık Prensipleri: Her bir taşınmaz için sicilde ayrı bir sayfa açılması ve taşınmazın bu sayfaya tescil edilmesi		
• Olumlu etkiler	27	19
• Olumsuz etkiler	3	2
• Etkilemez/Etkisini değiştirmez	110	79
Açıklık Prensipleri: Tapu sicilinin ilgisine açık olması		
• Olumlu etkiler	27	19
• Olumsuz etkiler	37	27
• Etkilemez/Etkisini değiştirmez	76	54
İllyet Prensipleri: Tescile dayanak hukuki sebebin geçerliliği		
• Olumlu etkiler	27	8
• Olumsuz etkiler	11	15
• Etkilemez/Etkisini değiştirmez	108	77
Devletin Sorumluluğu Prensipleri: Sicilin tutulmasından doğan zararlardan Devlet sorumlu olması		
• Olumlu etkiler	21	15
• Olumsuz etkiler	13	9
• Etkilemez/Etkisini değiştirmez	106	76
Tapu Siciline Güven Prensipleri: Sicildeki tescile iyi niyetle dayanarak hak kazanan üçüncü kişinin kazanımının korunması		
• Olumlu etkiler	33	24
• Olumsuz etkiler	-	-
• Etkilemez/Etkisini değiştirmez	107	76

Talep Prensipleri: İstisnalar dışında, yazılı istem olmadıkça tapu sicili üzerinde işlem yapılamaması

• Olumlu etkiler	19	14
• Olumsuz etkiler	-	-
• Etkilemez/Etkisini değiştirmez	121	86

Çalışmada uygulanan yapılandırılmış anket Formunun Demografik Veriler ile Kadastro 2014'ün İfadelerine Göre Tapu Sicil Sisteminin Bulguları bu bölümde ele alınmıştır.

Örneklem grubunun demografik verileri şu şekilde özetlenebilir. Örneklem grubu %66 gibi yüksek bir oranla lisans ve yüksek lisans derecesine sahiptir. Örneklem grubunun %47'si harita teknikeri/mühendisi olmakla birlikte, %53'ü ise İşletme/İktisat/Kamu Yönetimi gibi lisans bölümlerinden mezundur. Örneklem, ağırlıklı olarak kadastro teknisyeni ve tapu müdürü olmakla TKGM içindeki hiyerarşik yapıda birlikte çok farklı unvanları da kapsamaktadır. Örneklemin görev yaptığı birimlere bakıldığında; %80 gibi yüksek bir oranla Tapu Müdürlükleri ve %18'lik bir oranla ise Kadastro Müdürlüklerinde çalıştıkları görülmektedir. Örneklemin %76'sı 21 yılı aşkın bir zamandan beri TKGM bünyesinde görev yaparak, Tapu ve Kadastro sektöründe çalışmaktadır.

Türk tapu sicil sistemi, Kadastro 2014'ün 1. ifadesi olan kamusal haklar ve kısıtlamalar dâhil olmak üzere, arazinin bütün yasal durumunu temsil etmede, %10 gibi düşük bir oranla net bir şekilde yeterli görülmektedir. Bu yetersizliğin sebepleri olarak şunlar ağırlık sırasına göre seçilmiştir.

- Kadastro veya İmar parsellerin iki veya daha fazla parçaya bölünmesi işleminde, Toprak Koruma ve Arazi Kullanım Kanunu kısıtlamalarının tapu siciline tescil edilememesi,
- Plansız alanlarda yapılaşma kısıtlarının veya yapılaşmama kararlarının tapu siciline aktarılmaması,
- Korunan alanlarla ilgili tüm hak ve kısıtların henüz tapu siciline aktarılamaması
- Vakıf şerhi başta olmak üzere Vakıflar Kanunundan kaynaklı kısıtlamaların tapu siciline aktarılamaması,
- Kıyı kenar çizgisinin belirlenmemiş olması veya kıyı kenar çizgisi tespitinin tamamlanmamış olması,
- Askeri yasak bölgeler ve Havaalanı mânia alanlarının yarattığı kısıtlılıkların tapu sicilinde gösterilememesi, yabancı uyrukluların alım işlemlerinde hangi birimlerin işleme kapalı veya açık olduğunun önceden bilinmemesi, sebepleri sıralanmıştır.

Türk tapu sicil sistemi, Kadastro 2014'ün 2.ifadesi olan 'haritalar' ve 'kayıtlar' arasındaki ayrılık ortadan kalkacak yaklaşımına uygun şekilde harita üzerinde gösterilen her türlü detayı sunmada ne derecede yetkin sorusuna %9 gibi düşük bir oranla net bir şekilde yeterli görülmektedir. Bu yetersizliğin sebepleri olarak şunlar ağırlık sırasına göre seçilmiştir.

- Kadastro paftalarının ülke genelinde standart altlıklarla ve ölçekte olmaması,
- Kadastro parsellerinin ülke genelinde standart nokta-konum doğruluğunda üretilmemiş olması

- Kadastro kapsamının ülke yüzölçümünün yaklaşık %62'lik bir kısmının kadastrounun tamamlanması,
- Kamulaştırma, kamulaştırmaz fiili ve hukuki el atma, irtifak hakkı gibi mülkiyetten gayri sınırlı aynı hakların kadastro altlıkları ile anlık olarak ilişkilendirilememesi,
- Bina ve yapı verilerinin, ruhsatlı veya ruhsatsız olmasına bakılmaksızın tamamının kadastro altlıkları ile re' sen ilişkilendirilememesi.

Türk tapu sicil sistemi, Kadastro 2014'ün 5. ifadesi olan Kadastro 2014 önemli ölçüde özelleşmiş olacak, kamu ve özel sektör birlikte çalışacak vizyonuna uygun bir yapıda özel sektörle ilişkili olarak çalışmakta mıdır sorusu, %26 gibi düşük bir oranla net bir şekilde çalışmakta olduğu ifade edilmektedir.

Kadastro 2014'ün 5. ifadesine uygun olarak; Noterler, Özel Bankalar, SPK Lisanslı Değerleme Uzmanları/Kuruluşları, Lisanslı Harita Kadastro Mühendislik Büroları, Gayrimenkullerle ilgili davalarda Serbest Avukatlar, kadastro ve imar parsellerinin harita projelerinde Serbest Harita ve Kadastro Mühendislik Büroları, alım-satım ve taşınmaz geliştirme işlerine aracılık yapan Emlakçılarla birlikte çalışılabildiği ifade edilmektedir.

Kadastro 2014'ün 5. ifadesi olan Kadastro 2014 önemli ölçüde özelleşmiş olacak, kamu ve özel sektör birlikte çalışacak vizyonunun Tapu Müdürlükleri için uygulanabilir olup olmadığına yönelik sorulan soruda ise, %14 gibi düşük bir oranla bunun net bir şekilde uygulanabileceği ifade edilmektedir. %46 kısmen uygulanabilir görüşünderken, %40 gibi yüksek bir oran ise uygulanamaz görüşünde fikir beyan etmiştir. Bu sorunun yanıtlarının derinleştirilmesi adına birlikte çalışabilirliğin nasıl sağlanacağı ise şu şekilde önem sırası ile yanıtlanmıştır.

- Tapu siciline ve TAKBİS sistemine işlenecek tüm tescil, terkin ve tashihler özel sektör tarafından yapılabilir.
- Mahkeme, Kurum, vb. farklı taraflardan gelen tüm belge taleplerinin karşılanması özel sektörece yapılabilir.
- Tapunun kamu görevlisi olan çalışanlarının kontrol ve denetiminde de özel sektör görev alabilir.
- TAKBİS sistemine girilecek her türlü veri girişi özel sektörece yapılabilir.
- Tapu sicilinde ve arşivinde araştırma gereken işlemler özel sektörece yapılabilir.

Kadastro 2014'ün 5. ifadesi ile uyumlu bir şekilde tapu sicil sistemindeki kamu-özel sektör işbirliğinin artırılması sağlanırsa, noterlere devredilen satış işlemi gibi diğer bazı akitli işlemlerin de özel sektöre devri sağlanabilir mi sorusunda, hemen hemen yarı yarıya bir görüş ayrılığı ortaya çıkmıştır. Özel sektörün görev alması durumunda kamu görevlilerinin kontrol ve denetimde kalması gerektiği görüşü %41 gibi bir oranla desteklenmiştir. Buna karşın %59'luk kitle ise yetersiz personel

sayısı ile işlem yürütülen birimlerde kamu görevlisi istihdamı ile sadece devlet eliyle bu işlemlerin yürütülmesi gerektiği görüşünü desteklemiştir.

Kadastro 2014'ün 6. ifadesine uygun şekilde Maliyetin Geri Kazanımının etkinliğine ilişkin mevcut tapu sicil sisteminin sorgulanması için yönetilen soruda ise, %8 gibi düşük bir oranla net bir şekilde, sistemin tanımlı işlerde maliyeti geri kazanabildiği ifade edilmektedir.

Satış Sözleşmesi Düzenleme Yetkisinin Noterlere Verilmesinin Tapu Sicili ve Taraflar Arasındaki Üzerindeki Olası Etkilerine ilişkin Bulgular ise şu şekilde özetlenebilir. Noterlere verilen taşınmaz satış sözleşmesi yapma yetkisinin taşınmaz alım-satım işlemlerinin Tapu Müdürlüklerinde oluşturduğu yoğunluğu %85 gibi büyük bir çoğunlukla azaltacağı/kısmen azaltacağı ifade edilmiştir.

Noterler, kendilerine verilen taşınmaz satış sözleşmesi yapma yetkisi dâhilinde taşınmaz alım-satım işlemlerinde, tapu sicilinde tescilli tüm kamusal hak/kısıtlamalar ve taşınmaz satışıyla ilgili diğer kanunlarda yer alan sınırlamaları dikkate alarak/bilerek işlemleri %91 gibi büyük bir çoğunlukla anlık bir yapıda yapabileceği/kısmen yapabileceği ifade edilmiştir.

Noterlerin, arazi yönetimine ilişkin mevzuatta yer alan tüm sınırlamaları dikkate alarak/bilerek işlemleri anlık bir yapıda yapamama durumlarının varlığı ise yoğunluklu olarak aşağıdaki sebeplerle ilişkilendirilmiştir.

- Noterlerde, Tapu Müdürlüğü deneyimine sahip çalışan olmaması,
- Noterlerde, Tapu Müdürlüğü deneyimine tapu müdür yardımcısı/Tapu müdürü olmaması,
- Mer'i arazi yönetimi yasa, yönetmelik ve genelgelerinin takip edilmemesi,
- Çözümü teknik bilgi gerektiren durumlarda danışma imkânı olmaması.

Noterlerin alım-satım konu bir taşınmazın hak sahibini belirleyebileceği/kısmen belirleyebileceği %83 çoğunlukla ifade edilmiştir.

Noterlerin, bir taşınmazın satışına engel hukuki bir durumun bulunup bulunmadığına anlık olarak karar verebileceği/kısmen karar verebileceği %83 çoğunlukla ifade edilmiştir.

Bir taşınmazın alım-satımının gerçekleştirilmesinde taşınmaz alıcı-satıcısı hangi gerekçelerle Tapu Müdürlüğü yerine noter aracılığı ile işlem yapmayı tercih eder sorusuna ise, ağırlıklarına göre şu seçeneklerle yanıt verilmiştir.

- Daha kısa zamanda işlemi tamamlatma isteği
- Daha az bürokrasi ile karşılaşma arzusu,
- Daha uzak konumdaki Tapu Müdürlüğüne gitmeden, merkezdeki Noterde işlemi yaptırma isteği,
- Tapu Müdürlüğüne erişim için çıkacak olan yol masraflarından kaçınmak.

Taşınmazların alım-satımının sözleşme şeklinde noterlerce gerçekleştirilmesi ve ardından Tapu Müdürlüklerinde tescil adına diğer işlemlerin yapılması Tapu Müdürlüğü mevcut iş ve işlemlerinde

azaltmaya %61'lik görüş birliği ile sebep olmayacağı, sadece alıcı-satıcı kalabalığını azaltacağını ifade etmiştir.

Taşınmaz satış işlemleri için Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü döner sermaye işletmesine gelir kaydedilmek üzere, noterlerce düzenlenecek satış sözleşmesinden hizmet bedeli alınmasının %66'lık bir görüş birliği ile doğru bir uygulama olmayacağı ifade edilmiştir.

Taşınmaz satış sözleşmesinin Noterlerce düzenlenmesinden dolayı, gelecekte oluşması muhtemel zarardan noterlerin de sorumlu olması ve bu zararın Devlet tarafından ödenmesi hâlinde, ilgili notere rücu edebilmesi %94 görüş birliği ile doğru bir uygulama olarak değerlendirilmiştir.

Satış Sözleşmesi Düzenleme Yetkisinin Noterlere Verilmesinin Tapu Sicilinin Prensiplerine/İlkelerine Olası Etkilerine İlişkin Bulgularla ilgili, yeni uygulamanın prensiplere olumsuz bir etki yaratması öngörülmemektedir. Taşınmaz satış sözleşmesinin Noterlerce düzenlenmesinin, Türk Tapu Sicil Sisteminin İlkelerini nasıl etkileyeceği de merak konusu olduğundan, bu konuda 3'lü likert ölçekli her bir prensibin etkilenme durumlarını; Olumlu etkiler, Olumsuz etkiler ve Ekilemez/Etkisini değiştirmez görüşleri edinilmiştir.

Tescil Prensibini, olumsuz etkilenebileceği yönünde %24 oranında bir görüş beyan edilmiştir.

Aynı Açıklık Prensibini, olumsuz etkilenebileceği yönünde %2 oranında bir görüş beyan edilmiştir. Açıklık Prensibinin, olumsuz etkilenebileceği yönünde %27 oranında bir görüş beyan edilmiştir. İlliyet Prensibini, olumsuz etkilenebileceği yönünde %15 oranında bir görüş beyan edilmiştir. Devletin Sorumluluğu Prensibinin, olumsuz etkilenebileceği yönünde %9 oranında bir görüş beyan edilmiştir. Tapu Siciline Güven Prensibi ve Talep Prensibini, olumsuz etkilenebileceği yönünde bir görüş beyan edilmemiştir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Çalışmada örneklem grubunun niteliği ve yetkinliği göz önüne alındığında, tapu sicili uygulamalarının öncesi ve tescili sürecinde çeşitli kademelerindeki tüm iş ve işlemlere olan hâkimiyetleri olduğu anlaşılmaktadır. Böylesi bir kitlenin örneklem grubu olarak araştırılan konu ile ilgili geri dönüşleri konunun somut olarak daha da iyi anlaşılmasını sağlamıştır.

Noterler; daha kısa zamanda işlemi tamamlatma, daha az bürokrasi ile karşılaşma arzusu, daha az yol ve yol masrafı arzuları ile vatandaşlarca tercih edilebilir. Tapu Müdürlüklerine alternatif olarak Noterlerin satış sözleşmesini yapması, anket bulgularıyla da desteklenmektedir. Katılımcıların %41'i bu işlemin daha kısa sürede, %31'i ise daha az bürokrasiyle gerçekleştirilebileceğini kuvvetli şekilde vurgulamışlardır. Ancak noterde yapılacak olan satış daha fazla evrak ve bürokrasi içermekte olup, vatandaşlara da daha fazla bedele mâl olmaktadır. Yapacakları yanlış bir işlemde Devletin

Sorumluluğu İlkesi gereği oluşacak olan zararı karşılama risklerini yapacakları işlemle Noterler üstlenmektedirler.

Türk tapu sicil sistemi, Kadastro 2014'ün 1. ifadesi olan kamusal haklar ve kısıtlamalar dâhil olmak üzere, arazinin bütün yasal durumunu temsil etmede, %90'lık bir oranla yetersiz olarak değerlendirilmiştir. Toprak Koruma ve Arazi Kullanım Kanunu kısıtları, köy yerleşik alanı sınırları, planlı alanlardaki imar planı fonksiyonları, Plansız Alanlar İmar Yönetmeliği kısıtları, korunan alanlar ve vakıf şerhi kısıtlamaları, mânia sahası ve mânia planları, askeri yasak bölgelerdeki kısıtlar, yabancı uyruklu gerçek kişilerin alımına kapatılan birimler TAKBİS ve tapu sicili ile ilişkilendirilmelidir.

Türk tapu sicil sistemi, Kadastro 2014'ün 2. ifadesi olan 'haritalar' ve 'kayıtlar' arasındaki ayrılık ortadan kalkacak yaklaşımına uygun şekilde harita üzerinde gösterilen her türlü detayı sunmada yetersiz olarak değerlendirilmiştir (%91). Kadastro kapsamının ülke yüzölçümünün yaklaşık %62'lik bir kısmını içine almasına rağmen, yetersiz parsel stoku, hızlı nüfus artışı, afet riski altındaki kentlerin dönüşümleri, lojistik ve kent merkezlerinin inşası, ucuz parsel ve konut üretimi adına, kadastro kapsamının ülkenin tamamını içine alacak şekilde genişletilmesi düşünülmelidir. Kamulaştırma, kamulaştırmaz fiili ve hukuki el atma, irtifak hakkı gibi mülkiyetten gayri sınırlı aynı hakların kadastro altlıkları ve tapu sicili ile ilişkisi kamulaştırma işlemlerini yürüten kurumlarla işbirliği içinde anlık olarak sağlanmalıdır. Bina ve yapı verilerinin, ruhsatlı veya ruhsatsız olmasına bakılmaksızın tamamının kadastro altlıkları ile re'sen ilişkilendirilmesi planlanmalıdır.

Kadastro 2014'ün 5. ifadesine uygun olarak; çok sayıda özel ve kamu sektörü birlikte çalışılabilmektedir. Tapu siciline ve TAKBİS sistemine işlenecek tüm tescil, terkin ve tashihler Tapu Sicilinin prensiplerinden Güven ve Devletin Sorumluluğu ilkelerine göre kamu gözetim ve denetiminde sağlanmalıdır. Bazı işlerin özel sektör tarafından yapılması ise düşünülebilir. Örnek olarak Mahkeme, Kamu Kurum ve Kuruluşları ile vatandaşlardan gelen tüm bilgi ve belge taleplerinin karşılanması, TAKBİS sistemine yapılarak veri girişleri ve doğrulamaları özel sektöre devredilebilir.

Kadastro 2014'ün 6. ifadesine uygun şekilde Maliyetin Geri Kazanımının etkinliği mevcut uygulamalarda sorgulanamamaktadır. Zira kadastro ve tapu işlemlerinde, emlak vergi değerine göre belirli oranlarda harç alınmakta ve maktu döner sermaye ücreti tahsil edilmektedir. Maliyetlerin ise parsel bazında ve idari birim bazında hesaplanması mümkün olsa da, farklı yıllarda yapılan tapulama ve tesis kadastro çalışmaları oluşu bilinmektedir. Kimi birimlerde TKGM kendi imkânları ile kim birimlerde ise Özel Sektör ile işbirliği içinde kadastro işlemlerini yürütmüştür. Öte yandan, maliyetlerin TL olarak ilgili yıllarda yapılmış olmasına rağmen enflasyonist ortamda geçmiş dönemlerdeki maliyetler için günümüzde maliyet geri dönüşümü işlemleri ile ilişkilendirmek pek mümkün değildir. Son olarak kadastro ve tapu işlemleri, maliyetin geri dönüşümü hesabında hangi

işlemler ve hangi ağırlıkta olması durumunda ilişkilendirilecek sorusu ise henüz hukuki olarak yanıtlanmamıştır. Hal böyle olunca maliyeti geri kazanabildiği ifade edilmesine rağmen, hangi iş kalemlerinden, ne oranda, hangi zaman dilimlerinde maliyetin geri kazanıldığı net olarak belirlenemez.

Satış sözleşmesi düzenleme yetkisinin noterlere verilmesinin tapu sicili ve taraflar arasındaki üzerinde psikolojik olarak olumlu bir etki yaratabilir. Tapu Müdürlüklerinde belli dönemlerde oluşabilecek yoğunluğa Noter işlemleri alternatif bir çözüm sunabilir. İlgili kişilerle yapılan anket çalışmasının bulguları bu durumu destekler niteliktedir. Çalışmaya katılanların %41'i Noterlere yetki verilmesinin olumlu sonuç doğuracağını, %85'i ise yoğunluğu azaltabileceğini vurgulamıştır. Bununla birlikte Noterler, tapu sicilinde tescilli tüm kamusal hak/kısıtlamalar ve taşınmaz satışıyla ilgili diğer kanunlarda yer alan sınırlamaları tam olarak bilemeyebilirler. Uygulamanın başlanmasından itibaren çok az sayıda işlemin Noterlerce yapıldığı gerçeği de bilinmektedir.

Noterlerin, arazi yönetimine ilişkin mevzuatta yer alan tüm sınırlamaları dikkate alarak/bilerek işlemleri anlık bir yapıda yapması ve Tapu Müdürlüklerine alternatif olabilmesi için; Noterlerde, Tapu Müdürlüğü deneyimine sahip çalışan istihdamı zorunluluğu getirilmeli, Noterler TKGM rehberlik ve teftişine tabi tutulmalı, Noter yetkililerinin TKGM tarafından düzenlenecek eğitim programlarına zorunlu katılımı sağlanmalıdır. Yapılan anket uygulaması neticesinde bu çıkarımların yapıldığını ifade etmek mümkündür. Ankete katılanların %50'si Noterlerde mutlaka Tapu Müdürlüğü deneyimi olan kişilerin bulunması gerektiğini, %45'i ise bu kişilerin Tapu Müdürü ya da Yardımcısı niteliğinde olmasına dikkat çekmiştir.

Taşınmaz satış sözleşmesinin Noterlerce düzenlenmesi, Türk Tapu Sicil Sisteminin İlkeleri yönüyle ele alındığında, TAKBİS bilgilerine erişim sağlayan Noterler yönüyle Açıklık prensibini ve yanlış işlem yapılması yönüyle Tescil ve İlliyet prensiplerini olumsuz etkileyebileceği düşünülmekte olup, diğer prensipleri etkileme durumunun daha zayıf olacağı söylenebilir. Her halükarda prensiplerin garantisi Türk Medeni Kanunu ile Devlet tarafından sağlandığından, prensiplere uyum ile tapu sicilinin tutulması geçmişte olduğu gibi sürdürülecektir.

Sonuç olarak, taşınmaz alım-satım işleminin Tapu Müdürlüğü dışında Noterlerce de yapılıyor olması, özel sektör ve kamu sektörü işbirliği anlamında Kadastro 2014'ün 5. ifadesi ile uyumlu olarak değerlendirilmektedir. Bu sayede, alım-satım işlemi yapacak olan alıcı-satıcı için seçenek sunduğu ve hızlı erişim sağladığı yönleriyle olumlu olarak değerlendirilebilir. Uygulamanın yürürlüğe girmesinden itibaren %1 civarında alım-satım işleminin bile noterlere yönelmediği bilinmektedir. Bu yönüyle, noterlerin işlemi yapabilme adına Tapu Müdürlükleri açısından alternatif seçenek oluşturdukları yorumlansa da alıcı-satıcıya maliyetinin daha fazla olması açısından tercih edilmedikleri de söylenebilir. Öte yandan vatandaşların Tapu Müdürlüklerinin tamamen kamu kurumu olması ve geçmişten gelen alışkanlıkla alım-satım işlemlerini Tapu Müdürlüklerinde yapmak istedikleri de göz ardı edilemez. Hâlihazırda, alım-satım işlemi için noterlerin Tapu Müdürlüklerinin

fiili arşivine erişim imkânı, TAKBİS üzerinden tapunun tüm evraklarına ulaşma imkânı, tereddüt oluşturan alım-satım işlemlerinde danışma imkânı bulunmamaktadır.

Tapu Müdürlükleri ve Noterler arasında tam bir uyum ile bir tapu işlemi olan alım-satım işinin birlikte yönetilebilmesi için bazı hususların hem araştırmacılar ve hem de kurumlar için ele alınması ve araştırılması önerilmektedir. Tapunun tüm iş ve işlemlerine yönelik klasik arşivin sayısallaştırılması ve dijital arşivin TAKBİS içinde oluşturulması sağlanmalıdır. Noter ve Tapu Müdürlüklerinin alım-satım işin aynı standartlarda ve maliyetle gerçekleştirmesi bir hizmet olarak alıcı-satıcı taraflara sunulmalıdır. Tereddütlü işlemlere karşı TKGM ev sahipliğinde çevrimiçi danışma ve anlık talimat alma-verme imkânı sunan kurumsal bağlayıcı çözümler sunulması ele alınmalıdır. Noterlerin belli eğitim-öğretim geçmişi olan, TKGM birimlerinde çalışmış olarak deneyime sahip olan tapu müdürü/yardımcısı ve memuru görevlerinde bulunan kişileri istihdam etme zorunluluğu ile bu kişilerin imzası ile tapu işlemi yapabilme yetkisi getirilmesi düşünülmelidir. TKGM teftiş/egitim ve denetiminin Noterlere tapu işlemleri için zorunlu hale getirilmesi ve tapu sicilinin ilgili işlemi yapan noterlere açılması sağlanmalıdır. Tüm bunların ve ortaya çıkabilecek diğer hususların, alım-satım işlemi ve ileride yetki paylaşımı düşünülen varsa diğer işlemler için tüm taraflarının beklenti ve önerileri alınmalı, önce pilot bölgelerde yapılan uygulamalar değerlendirildikten sonra ülke geneline yaygınlaştırma faaliyetleri ele alınmalıdır.

Yazarların Katkısı

Çoruhlu Y.E.: Fikir/Kavram, Denetleme/Danışmanlık, Analiz ve/veya Yorum

Alemdar A.: Literatür Taraması, Analiz ve/veya Yorum

Çelik M.Ö.: Tasarım ve Dizayn, Kaynaklar, Eleştirel İnceleme

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.




Kaynaklar

- Albayrak, H. (2017). Taşınmaz satış vaadi sözleşmesi ve taşınmaz satış vaadi sözleşmesinde görev ve yetkiye ilişkin sorunlar. *Uyuşmazlık Mahkemesi Dergisi*, (10), 43-95.
- Alkan, M. ve Polat, Z. A. (2017). Design and development of LADM-based infrastructure for Turkey. *Survey review*, 49(356), 370-385. <https://doi.org/10.1080/00396265.2016.1180777>
- Anbaroğlu, B., Güllüoğlu, N., Bilgin, G., ve Aydınoglu, A. Ç. (2021). Ulusal coğrafi bilgi sistemi ulaşım veri temasının katılımcı coğrafi bilgi yaklaşımıyla güncellenmesi. *Geomatik*, 6(2), 115-123. <https://doi.org/10.29128/geomatik.714493>
- Atmaca, K. (2016). E-devlet'ten Olgun Devlete a da E-Devlet'in Olgunlaştırılması. *Denetim*, (2), 31-43.
- Ayduran, E., ve Uyan, M. (2022). Kadastro güncelleme çalışmalarında yaşanan sorunlar, eksiklikler ve giderilmesinde alternatif öneriler. *Türkiye Arazi Yönetimi Dergisi*, 4(1), 12-17. <https://doi.org/10.51765/tayod.994580>
- Başer, V. (2020). Tarımsal arazi değerlemesinde mevcut sorunlar ve çözüm yaklaşımları. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 10(2), 431-442. <https://doi.org/10.31466/kfbd.826836>
- Brzezicka, J., Wisniewski, R., ve Figurska, M. (2018). Disequilibrium in the real estate market: Evidence from Poland. *Land Use Policy*, 78, 515-531. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.06.013>
- Buerhaus P. I., DesRoches C., Applebaum S., Hess R., Norman L., D., ve Donelan K. (2012). Are Nurses Ready for Health Care Reform? A Decade of Survey Research. *Nursing Economics*, 30, 318-329.
- Coşkun, R., Altunışık, R., ve Yıldırım, E. (2020). *Sosyal bilimlerde araştırma teknikleri SPSS uygulamalı*. Sakarya, Türkiye: Sakarya Yayıncılık.
- Çağdaş, V., ve Linke, H. J. (2019). Almanya'da arazi düzenlemesi. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 6(2), 96-114. <https://doi.org/10.9733/JGG.2019R0009.T>
- Çelik, M. Ö., ve Çoruhlu, Y. E. (2021). Sürdürülebilir arazi yönetimi altında Türkiye'de korunan alanlar. *Türkiye Arazi Yönetimi Dergisi*, 3(1), 40-52. <https://doi.org/10.51765/tayod.904206>
- Çete, M. (2015). Kadastro 2014'ün ve Türkiye kadastrounun geleceği. *TMMOB HKMO 15. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*. Ankara, Türkiye.
- Çoruhlu Y. E., ve Toludan T. (2019). Data model development for 'buying and selling' transactions as a real estate acquisition method. *Survey Review*, 52(3749), 403-414. <https://doi.org/10.1080/00396265.2019.1626585>
- Çoruhlu, Y. E., Inan, H. I., Yılmaz, H., ve Demir, O. (2015). Geographic data model of foundation immovable. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 33(4), 539-559.
- Çoruhlu, Y. E., Toludan, T., Başer, V., Yıldız, O., ve Uzun, B. (2021). Gayrimenkul davalarının mesleki ve teknik bilgiyle etkin yönetimi için ulusal yargı ağı ile bütünleşik bir arazi yönetimi veri modeli geliştirilmesi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 11(1), 168-199. <https://doi.org/10.31466/kfbd.906318>
- Deniz, V., Kayalık, M., Kırtıloğlu, O. S., ve Polat, Z. A. (2023). The public-private partnership (PPP) in the provision of land registry and cadastre services in Türkiye. *Advanced Land Management*, 3(1), 41-53.
- Döner, F. (2021). Analysis of literature on 3D cadastre. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 6(2), 90-97. <https://doi.org/10.26833/ijeg.703244>
- DuBenske, L. L., Gustafson, D. H., Namkoong, K., Hawkins, R. P., Atwood, A. K., Brown, R. L., Chih, M.-Y., McTavish, F., Carmack, C. L., Buss, M. K., Govindan, R., ve Cleary, J. F. (2014). CHES improves cancer caregivers' burden and mood: Results of an eHealth RCT. *Health Psychology*, 33(10), 1261-1272. <https://doi.org/10.1037/a0034216>
- Ercan, O. (2020). Essentials of a sustainable land use planning approach for rural areas and a model proposal to be applied under Turkish Conditions. *Turkish Journal of Engineering*, 4(3), 154-163. <https://doi.org/10.31127/tuje.650238>
- Ercan, O., ve Toker, K. (2022). Assessment of the completion of the forest cadastre considering the legal grounds, collaboration, and the use of technology: The case of Turkey. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 7(1), 49-58. <https://doi.org/10.26833/ijeg.927502>
- Garcia-Teruel, R. M. (2020). Legal challenges and opportunities of blockchain technology in the real estate sector. *Journal of Property, Planning and Environmental Law*, 12(2), 129-145. <https://doi.org/10.1108/JPEL-07-2019-0039>
- Garcia-Teruel, R. M., ve Simón-Moreno, H. (2021). The digital tokenization of property rights. A comparative perspective. *Computer Law & Security Review*, 41, 105543. <https://doi.org/10.1016/j.clsr.2021.105543>
- ISO (2012). ISO 19152:2012. Geographic information – Land Administration Domain Model (LADM).

- İlhan, N., Yıldırım, A., ve Yılmaz, S. S. (2012). Kimya motivasyon anketi: Geçerlik ve güvenilirlik çalışması. *Mustafa Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 9(18), 297-310.
- İban, M. C. (2020). Türkiye kırsal arazi kullanımına yönelik bir konumsal veri altyapısının modellenmesi. *Geomatik*, 5(3), 209-227. <https://doi.org/10.29128/geomatik.644623>
- İnan, H. İ. (2021). Spatial data model for rural planning and land management in Turkey. *Journal of Agricultural Sciences*, 27(3), 254-266. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.983096>
- Kara, A., Lemmen, C., van Oosterom, P., Kalogianni, E., Alattas, A., ve Indrajit, A. (2024). Design of the new structure and capabilities of LADM edition II including 3D aspects. *Land Use Policy*, 137, 107003. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.107003>
- Kapancı, K. B. (2023). Teminat amaçlı taşınmaz satış vaadi sözleşmelerinin geçerliliği üzerine düşünceler. *Galatasaray Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, 1, 523-548.
- Kaufmann, J., ve Steudler, D. (1998), Cadastre 2014 – A vision for a future cadastral system. FIG Publication, 44 pp.
- Kurtuluş, K. (2010). *Araştırma yöntemleri*. İstanbul, Türkiye: Türkmen Kitabevi.
- Matović, N., ve Ovesni, K. (2023). Interaction of quantitative and qualitative methodology in mixed methods research: integration and/or combination. *International Journal of Social Research Methodology*, 26(1), 51-65. <https://doi.org/10.1080/13645579.2021.1964857>
- Okyar, D. (2024). Taşınmaz satış sözleşmesi düzenleme yetkisi verilmesi çerçevesinde noterin hukuki sorumluluğunun niteliğine yeniden bakış. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, 28(1), 153-181. <https://doi.org/10.34246/ahbvuhfd.1355505>
- Oosterom, P., V., ve Lemmen, C. (2015). The land administration domain model (LADM): Motivation, standardisation, application and further development, *Land Use Policy*, 49, 527-534. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.09.032>
- Öcal, Ş. A., Doğramacı H. Ş., ve Aygün, G. Ç. (2023). Noterlere Taşınmaz Satış Sözleşmesi Yapma Yetkisi Verilmesi Üzerine Bir Değerlendirme. *Anadolu Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, 9(2), 203-241. <https://doi.org/10.54699/andhd.1296966>
- Özabacı, N. (2011). İlişki niteliği ölçeği'nin Türkçe uyarlaması: Geçerlik ve güvenilirlik çalışması. *Eğitim ve bilim*, 36(162), 159-168.
- Özer, G. S. (2023). E-devlet alanında yapılmış tezlerin sistematik derlemesi: 2003-2022. *ASSAM Uluslararası Hakemli Dergi*, 10(22), 50-65. <https://doi.org/10.58724/assam.1264007>
- Özmen, E. S. (2022). Noterlere taşınmaz satış yetkisi verilmesine ilişkin kanun. *Ankara Barosu Dergisi*, 80(4), 501-540.
- Pak, D. N. B., Kırtıloğlu, O. S., Kayalık, M., ve Polat, Z. A. (2023). The transformation from e-government to e-land administration in Türkiye: A SWOT-based assessment analysis. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 8(3), 290-300. <https://doi.org/10.26833/ijeg.1152715>
- Polat, Z. A. (2018). Kadastro 2034 vizyonu açısından Türkiye Kadastrosunun mevcut durum analizi. *VII. Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu (Uzal-CBS 2018)*, (s. 18-21). Eskişehir: Eskişehir Teknik Üniversitesi.
- Polat, Z. A. ve Alkan, M. (2015). Cadastre 2014 performance of Turkey and expectations from Cadastre 2034. *The World Cadastre Summit, Congress and Exhibition*, İstanbul.
- Polat, Z. A., Alkan, M., Paulsson, J., Paasch, J. M., ve Kalogianni, E. (2022). Global scientific production on LADM-based research: A bibliometric analysis from 2012 to 2020. *Land Use Policy*, 112, 105847. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105847>
- Polat, Z. A., ve Alkan, M. (2020). The role of government in land registry and cadastre service in Turkey: Towards a government 3.0 perspective. *Land Use Policy*, 92, 104500. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104500>
- Resmi Gazete (1925). 658 sayılı kadastro kanunu.
- Resmi Gazete (1936). 2997 tapu ve kadastro umum müdürlüğü teşkilât ve vazifeleri hakkında kanun. Kabul Tarihi: 29/5/1936.
- Resmi Gazete (2015). Noterlik işlemlerinin elektronik ortamda yapılması hakkında yönetmelik.
- Resmi Gazete, (2001). 4721 sayılı Türk medeni kanunu.
- Silsüpür, Ö., ve Beşikçi, B. (2023). Sponsorluk faaliyetlerinin marka algısına etkisi: İletişim fakültesi öğrencileri üzerine bir araştırma. *Kastamonu İletişim Araştırmaları Dergisi*, (10), 172-188. <https://doi.org/10.56676/kiad.1188822>
- Şentürk, F. (2016). The Effects of 2008 Global Financial Crisis to The USA Real Estate Sector and Comparison of Similarity-Difference with the Situation of The Turkish Real Estate Sector in Recent Period. *Optimum Journal of Economics & Management Sciences*, 3(2), 23-39.

- Şimşek, M. C., Dumlu, B. Ö., ve Turanlı, N. (2023). Türkiye’de matematik okuryazarlığı üzerine yapılmış çalışmaların betimsel içerik analizi. *Türk Eğitim Bilimleri Dergisi*, 21(3), 1204-1225. <https://doi.org/10.37217/tebd.1195319>
- Tanrıver S. (2016). Noterler tarafından elektronik ortamda yapılabilecek olan işlemler ve bu işlemlerin gerçekleştirilmesi usulü. *Ankara Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, 65 (4), 3677-3686.
- Tanrıver S., ve Ergüne M. S. (2023). Noterlerin taşınmaz satış sözleşmesi düzenlemesine ilişkin hukuki esaslar, *Ankara Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, 72(1), 143-182. <https://doi.org/10.33629/auhfd.1245835>
- Taylor, Z. J., ve Aalbers, M. B. (2024). The restless urban landscape of housing financialization: geographies of residential real estate investment trust expansion in Germany and the United States. *Urban Geography*, 1-21. <https://doi.org/10.1080/02723638.2024.2337570>
- Thapa, P. (2021). Still a Vision Cadastre 2014 for Nepal, *Turkish Journal of Land Management*, 3(2), 53-57. <https://doi.org/10.51765/tayod.899431>
- URL-1: <https://www.tkgm.gov.tr/en/node/3979>, (Erişim Tarihi: 12 Ocak 2024).
- URL-2: <http://cbs.tkgm.gov.tr/uygulama.aspx>, (Erişim Tarihi: 12 Ocak 2024).
- URL-3: <https://www.belediye.gov.tr/tapu-ve-kadastro-paylasim-sistemi-takpas-modulu> (Erişim Tarihi: 12 Ocak 2024).
- URL-4: <https://www.tkgm.gov.tr/en/node/3355#:~:text=Web%20tapu%20sistemi%20ile%3B,ta%20dan%20incelenmesi%20i%C3%A7in%20yetki%20verebilir>, (Erişim Tarihi: 12 Ocak 2024).
- URL-5: <https://www.tkgm.gov.tr/projeler/tapu-arsiv-bilgi-sistemi-tarbis> (Erişim Tarihi: 01 Ağustos 2024).
- URL-6: <https://www.turkiye.gov.tr/edevlet-istatistikleri?kullanici=Istatistikleri>, (Erişim Tarihi: 12 Ocak 2024).
- URL-7: [https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Hanehalki-Bilisim-Teknolojileri-\(BT\)-Kullanim-Arastirmasi-2023-49407#:~:text=Cinsiyet%20ayr%C4%B1m%C4%B1nda%202023%20y%C4%B1n%C4%B1nda%20%20internet,%83%2C3%20olarak%20g%C3%B6zlemlendi.&text=Son%2012%20ay%20i%C3%A7inde%20%20C3%B6zel,oran%C4%B1%20%73%2C9%20oldu](https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Hanehalki-Bilisim-Teknolojileri-(BT)-Kullanim-Arastirmasi-2023-49407#:~:text=Cinsiyet%20ayr%C4%B1m%C4%B1nda%202023%20y%C4%B1n%C4%B1nda%20%20internet,%83%2C3%20olarak%20g%C3%B6zlemlendi.&text=Son%2012%20ay%20i%C3%A7inde%20%20C3%B6zel,oran%C4%B1%20%73%2C9%20oldu), (Erişim Tarihi: 12 Ocak 2024).
- URL-8: <https://www.tkgm.gov.tr/tarihce-ve-gorevler>, (Erişim Tarihi: 12 Ocak 2024).
- URL-9: <https://www.tkgm.gov.tr/tapu-db/2023-yili-tapu-mudurlukleri-yevmiye-sayilari>, (Erişim Tarihi: 13 Ocak 2024)
- URL-10: <https://cbs.csb.gov.tr/tucbs-birlesik-uml-modeli-i-102039>, (Erişim Tarihi: 13 Ocak 2024).
- URL-11: <https://cbs.csb.gov.tr/cografi-veri-temalari-uygulama-semalari-i-86098>, (Erişim Tarihi: 13 Ocak 2024).
- URL-12: <https://ilprimogroup.com/polonyada-gayrimenkul-alis-ve-satis/#:~:text=Gayrimenkul%20sat%C4%B1%C5%9F%20i%C5%9Flemleri%20noter%20huzurunda%20ger%C3%A7ekle%C5%9Ftirilir%20ve%20vergiye%20tabidir.,hakk%C4%B1nda%20bilgi%20sa%20hibi%20olunmas%C4%B1%20%C3%B6nemlidir>, (Erişim Tarihi: 13 Ocak 2024).
- URL-13: <https://portal.tnb.org.tr/Sayfalar/VizyonMiyon.aspx>, (Erişim Tarihi: 13 Ocak 2024).
- URL-14: <https://basin.adalet.gov.tr/adalet-bakanligi-78-ilcede-daha-noterlik-ihdas-etti#:~:text=NOTERL%C4%B0K%20SAYISI%20%20B%C4%B0N%20339,2%20bin%20339'a%20ula%C5%9F%C4%B1>, (Erişim Tarihi: 13 Ocak 2024).
- URL-15: <https://webtapu.tkgm.gov.tr/>, (Erişim Tarihi: 13 Ocak 2024).
- Ünal, A. C. (2024). Noterlerin hukuki sorumluluğu ve hukuki sorumluluğuna karşı güvence. *Başkent Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, 9(2), 233-254.
- Ünaldık, S. B. (2019). Çok kriterli karar verme yöntemi ile yer seçimi kararı üretiminde coğrafi bilgi sistemlerinin kullanımı, *Yapı Bilgi Modelleme Dergisi*, 1(2), 46-52.
- Yıldız, O., Coruhlu, Y. E., ve Biyik, C. (2018). Registration of agricultural areas towards the development of a future Turkish cadastral system. *Land Use Policy*, 78, 207-218. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.06.041>
- Yıldız, O., ve Erden, C., (2021). Cadastral updating: The case of Turkey. *Survey Review*, 53(379), 335-348. <https://doi.org/10.1080/00396265.2020.1759982>
- Yomraloğlu, T., Uzun, B., ve Demir, O. (2003). *Kadastro 2014-gelecekteki kadastral sistem için bir vizyon (çeviri)*. Ankara, Türkiye: TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası.

Gözenekliliğin Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kirişlerin Serbest Titreşimleri Üzerinde Etkisi

Muhittin TURAN^{1*}, Mahmut İlter HACIOĞLU², Erkan BALCI³

Öz

Bu çalışmada, gözenekliliğin fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşimleri üzerindeki etkisi, ANSYS APDL paket programı kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Malzeme özellikleri bir fonksiyona bağlı olarak değişen fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerle (FDM) yapılan kirişlerin üretimi sırasında yapısında oluşan gözeneklerin kirişin davranışına etkisi literatürde önemli bir konudur. Bu tip problemlerin analitik ve sayısal olarak çözümü uzun ve zahmetli olduğu için ANSYS APDL paket programının kullanılması zamandan ve harcanan emekten tasarruf etmemizi sağlayacaktır. Bir kuvvet kuralıyla kirişin malzemelerinin hacimdeki değişimi tanımlanmıştır. Çeşitli sınır koşulları, kuvvet kuralı indeksi, narinlik, gözeneklilik katsayısı ve gözeneklilik dağılımları (FDM-1, FDM-2) gibi parametrelere bağlı olarak gözenekli FDM kirişlerin boyutsuz doğal frekansları elde edilmiş ve literatürle kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: ANSYS APDL, Serbest titreşim, Fonksiyonel derecelendirilmiş kiriş, Gözeneklilik.

The Effect of Porosity on the Free Vibrations of Functionally Graded Beams

Abstract

In this study, the effect of porosity on the free vibrations of functionally graded beams has been thoroughly examined using the ANSYS APDL package program. The influence of the pores formed in the structure during the production of beams made with functionally graded materials (FGM), whose material properties vary according to a function, on the behavior of the beam is a significant topic in the literature. Due to the complexity and length of solving such problems analytically and numerically, using the ANSYS APDL package program will save us time and effort. The variation of the beam's materials within the volume has been defined by a power-law. Depending on parameters such as various boundary conditions, power-law index, slenderness, porosity coefficient, and porosity distributions (FDM-1, FDM-2), dimensionless natural frequencies of porous FGM beams were obtained and compared with the literature.

Keywords: ANSYS APDL, Free vibration, Functionally graded beam, Porosity.

¹Bayburt Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bayburt, Türkiye, mturan@bayburt.edu.tr

²Bayburt Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bayburt, Türkiye, mahmutilterhacioglu@gmail.com

³Bayburt Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bayburt, Türkiye, erkanbalci987@gmail.com

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM'ler), yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek mukavemet ve düşük ağırlık gibi çeşitli özelliklere sahip iki farklı malzemenin birleştirilmesiyle elde edilmektedir ve malzeme özellikleri bir fonksiyona bağlı olarak değişebilmektedir. Uygulamada yaygın olarak kullanılan tabakalı kompozit malzemeler, farklı özelliklere sahip malzemelerin katmanlar halinde birleştirilmesiyle meydana gelmektedir ve bu katmanların farklı malzeme veya dizilerden oluşması, malzeme içinde sıcaklık ve gerilme dağılımında süreksizliklere neden olmaktadır. Bu sebeple FDM'ler, sıcaklık ve stres dağılımındaki süreksizlikleri ortadan kaldırmak için geliştirilmiştir. Ancak fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin üretimi sırasında, üretim yöntemlerinden kaynaklanan nedenlerle FDM'de gözenekler oluşmaktadır. Bu sebeple, birçok araştırmacı, gözenekli FDM kirişlerin mekanik davranışlarını detaylı bir şekilde araştırmıştır.

Literatürde gözenekli FDM kirişlerin mekanik davranışlarını çeşitli kiriş teorilerine göre sayısal ve analitik yöntemlerle inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Analitik yöntemle yapılan çalışmalar arasında şunları sayabiliriz: Wattanasakulpong ve Chaikitratana (2015), FDM'lerden yapılmış gözenekli kirişlerin çeşitli sınır koşullarında eğilme titreşimi analizini gerçekleştirmiştir. Chen ve ark. (2015), Timoshenko kiriş teorisine dayalı olarak, kayma ile deforme olabilen fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli kirişlerin elastik burkulma ve statik eğilme analizini yapmışlardır. Ebrahimi ve ark. (2016), sıcaklığa bağlı bileşimsel derecelendirilmiş Euler gözenekli kirişlerin titreşim davranışı üzerindeki termal etkileri araştırmışlardır. Al Rjoub ve Hamad (2017), farklı sınır koşullarına sahip fonksiyonel olarak kusurlu Euler-Bernoulli ve Timoshenko derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşimini incelemek için analitik bir yöntem geliştirmişlerdir. Kitipornchai ve ark. (2017), Timoshenko kiriş teorisini ve Ritz yöntemini kullanarak grafen plakalarla güçlendirilmiş fonksiyonel olarak derecelendirilmiş gözenekli kirişlerin serbest titreşimini ve elastik burkulmasını araştırmışlardır. Turan ve Kahya (2018), FDM kirişlerin serbest titreşim analizini birinci mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisine göre Navier çözüm yöntemiyle yapmışlardır. Gao ve ark. (2019), aralıklı malzeme özelliklerine sahip fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli kirişlerin dinamik özelliklerini araştırmışlardır. Hadji ve ark. (2019), mikromekanik modellerin etkisiyle fonksiyonel olarak derecelendirilmiş gözenekli kirişlerin eğilme ve serbest titreşim tepkileri için analitik bir çözüm önermişlerdir. Taşkın ve Demirhan (2020), Navier yaklaşımını kullanarak gözenekli fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşim analizini gerçekleştirmişlerdir. Jena ve ark. (2021), Kerr temeline gömülü fonksiyonel olarak derecelendirilmiş gözenekli bir kirişin titreşim analizi için kaydırılmış Chebyshev polinom tabanlı Rayleigh-Ritz yöntemi ve Navier tekniğinin bir uygulamasını sunmuşlardır. Turan ve Kahya (2021), Navier yöntemi ile fonksiyonel derecelendirilmiş sandviç kirişlerin serbest titreşim ve burkulma analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

Noori ve ark. (2021), Laplace tanım alanında tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemini kullanarak fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli kirişlerin dinamik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Nguyen ve ark. (2022), fonksiyonel olarak derecelendirilmiş gözenekli kirişlerin eğilme, serbest titreşim ve burkulma analizi için yeni bir iki değişkenli kayma deformasyon teorisi önermişlerdir.

Araştırmacılar, ayrıca kirişlerin statik analizini, serbest titreşimini ve burkulmasını incelemek için az da olsa sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Fouda ve ark. (2017), Euler-Bernoulli kiriş teorisine dayanarak sonlu elemanlar yöntemiyle FDM gözenekli kirişin eğilme, burkulma ve titreşim analizlerini gerçekleştirmiştir. Ayrıca, Akbaş (2018), sonlu elemanlar metodu kullanarak dinamik yük altında zorlanmış FDM gözenekli derin kirişlerin titreşim davranışlarını araştırmıştır. Hamed ve ark. (2019), gözeneklilik tiplerinin, boyuta bağlı FDM kirişin statik davranışı üzerindeki etkilerini sonlu elemanlar metodu ile incelemişlerdir. Alnujaie ve ark. (2021), gözenekli tabakalı fonksiyonel derecelendirilmiş kalın kirişlerin sönümlü zorlanmış titreşim analizini sonlu eleman modeliyle ele almışlardır. Turan (2022), trigonometrik kayma deformasyonlu kiriş teorisine dayalı sonlu elemanlar yöntemiyle gözenekli FDM kirişlerin statik analizini gerçekleştirmiştir. Al-Itbi ve Noori (2022; 2023), fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli sandviç kirişlerin serbest titreşim ve statik analizlerini sonlu eleman yöntemi ile incelemişlerdir. Turan ve Adıyaman (2023; 2024) yüksek mertebeden bir sonlu eleman ile iki doğrultulu gözenekli FDM kirişlerin serbest titreşim, burkulma ve statik analizlerini yapmışlardır. Chopan ve Noori (2023), fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli malzemeden yapılmış sandviç kirişlerin elastik ve viskoelastik zorlanmış titreşim davranışlarını ANSYS programını kullanarak incelemişlerdir.

Fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemelerle oluşturulan elemanların analizleri son zamanlarda oldukça yaygındır ve bu analizler nano/mikro ölçeğe kadar inmiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli elemanlar, nanoteknoloji alanında çok çeşitli uygulamalara sahiptir. Yapısal performansın iyileştirilmesi, ısı yönetimi, enerji depolama, biyomedikal uygulamalar, akıllı malzemeler ve ileri üretim teknikleri gibi birçok alanda önemli avantajlar sunar. Bu nedenle, bu elemanların analizlerini ve uygulamalarını içeren literatür, nanoteknoloji ve malzeme mühendisliği alanında büyük bir öneme sahiptir (Civalek ve ark., 2024; Uzun ve Yaylı, 2024a; 2024b). Daha detaylı açıklayacak olursak, gözenekli yapı malzemelere hem avantajlar hem de dezavantajlar sağlar. Avantajları arasında düşük yoğunluk ve ağırlık, yüksek yüzey alanı, iyi ısı yalıtımı, enerji absorpsiyonu ve biyomedikal uygulamalarda hücre büyümesini destekleme yer alır. Bununla birlikte, gözenekler malzemenin mekanik mukavemetini ve dayanıklılığını azaltabilir, nem ve kimyasalların nüfuz etmesine neden olarak korozyon riskini artırabilir ve üretim süreçlerinde zorluklar çıkarabilir. Bu nedenle, gözenekli malzemelerin kullanımı, avantajları ve dezavantajları dikkate alınarak spesifik uygulamalara göre dikkatlice değerlendirilmelidir. Ayrıca gözenekli yapı sadece kompozitlerde değil

tek bir malzemeden meydana gelen yapılarda karşımıza çıkmaktadır. Bunlara değinen ve makro/mikro/nano ölçeklerde çalışan yayınlar da literatürde vardır (Uzun ve ark., 2023).

Yukarıda verilen literatürden görüldüğü gibi gözenekli FDM kirişleri sayısal ve analitik yöntemlerle inceleyen çok sayıda çalışma vardır. Fakat, yazarın bildiği kadarıyla, ANSYS APDL paket programı kullanılarak fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşimleri üzerindeki gözenekliliğin etkisini ayrıntılı bir şekilde inceleyen çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışma bu boşluğu doldurma eğilimindedir ve fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerle yapılan kirişlerin üretimi sırasında oluşan gözeneklerin kirişin davranışına etkisini detaylı bir şekilde incelemektedir. Bu konunun literatürde önemli olmasına rağmen analitik ve sayısal çözümlerinin uzun ve zahmetli olması, ANSYS APDL paket programının kullanımıyla zamandan ve emekten tasarruf sağlanarak çözülmesi çalışmanın özgünlüğünü oluşturmaktadır. Kirişin malzemelerinin hacimdeki değişimi, bir kuvvet kuralı kullanılarak tanımlanmıştır. Çeşitli parametrelere bağlı olarak gözenekli FDM kirişlerin boyutsuz doğal frekansları elde edilmiş ve bu sonuçlar literatürle karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Malzeme Özellikleri

Şekil 1'de gösterilen dikdörtgen kesitli fonksiyonel derecelendirilmiş kirişin uzunluğu (L) ve kesit boyutları ($b \times h$) olarak belirtilmiştir. Kirişin kesiti, FDM-1 (düzenli) ve FDM-2 (düzensiz) olmak üzere iki farklı gözeneklilik modelini içermektedir (Şekil 2). Aşağıdaki denklem (1)'de gösterildiği gibi, kirişin malzeme özellikleri, kalınlık boyunca kuvvet kuralına göre değiştiği varsayımıyla ele alınmaktadır (Turan ve ark., 2023).

$$P(z) = P_s \left(V_s(z) - \frac{e(z)}{2} \right) + P_m \left(V_m(z) - \frac{e(z)}{2} \right) \quad (1)$$

Burada, P_s ve P_m sırasıyla seramik ve metal bileşenlerine ait malzeme özelliklerini temsil eder; yani, elastisite modülünü $E(z)$, kayma modülünü $G(z)$, yoğunluğu $\rho(z)$. Gözeneklilik fonksiyonu $e(z)$ ile simgelenmektedir. Metal ve seramiğin toplam hacim içindeki oranı, aşağıdaki denklem (2)'de ifade edilmektedir (Turan ve ark., 2023).

$$V_s(z) + V_m(z) = 1 \quad (2)$$

Kirişteki seramik bileşenin hacim değişim oranı, (3) numaralı denklemde belirtildiği şekilde kuvvet kuralına göre kabul edilmiştir (Turan ve ark., 2023).

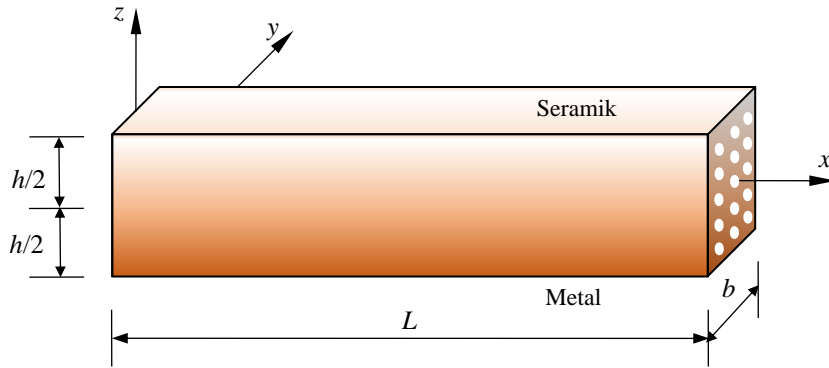
$$V_s(z) = \left(0,5 + \frac{z}{h}\right)^k \quad (3)$$

FDM-1 olarak adlandırılan gözeneklilik tipinde, (gözeneklerin düzenli dağıldığı durumda) malzeme özelliklerinin kalınlık boyunca değişimi, (4) numaralı denklemde ifade edilen şekilde elde edilmiştir (Turan ve ark., 2023).

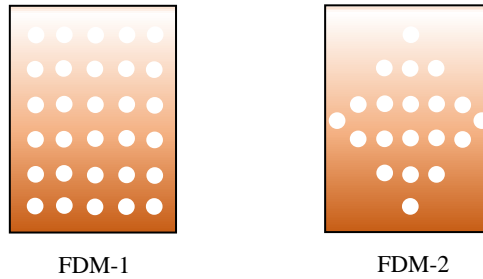
$$P(z) = P_m + (P_s - P_m) \left(0,5 + \frac{z}{h}\right)^k - (P_s + P_m) e/2 \quad (4)$$

FDM-2 olarak adlandırılan gözeneklilik tipinde ise, (gözeneklerin düzensiz dağıldığı durumda) malzeme özelliklerinin kalınlık boyunca değişimi, (5) numaralı denklemde ifade edilmiştir (Turan ve ark., 2023).

$$P(z) = P_m + (P_s - P_m) \left(0,5 + \frac{z}{h}\right)^k - (1 - 2|z|/h) (P_s + P_m) e/2 \quad (5)$$



Şekil 1. FDM gözenekli kirişin geometrisi ve koordinatları.



Şekil 2. Kiriş kesitindeki gözeneklilik tipleri.

2.2. Sonlu Eleman Yöntemiyle Çözüm (ANSY APDL)

Bu bölümde, FDM gözenekli kirişlerin serbest titreşim analizlerini gerçekleştirmek için sonlu elemanlar yöntemine dayalı ANSYS Mechanical APDL (2023) kullanılmıştır. Kirişin doğal frekanslarını hesaplamak için modal analiz yapılmıştır.

FDM kirişinin uzunluğu, kalınlığı ve genişliği sırasıyla L , h ve b ile gösterilir. FDM kiriş modeli için Young modülü (E) ve yoğunluğun (ρ), yukarıda açıklanan ifadelerle göre kiriş kalınlığı boyunca sürekli değiştiği varsayılmaktadır. Poisson oranı kiriş için sabit kabul edilmektedir ($\nu=0,3$). Kiriş geometrisi oluşturulduktan sonra, modelin meshlemesi yapılmıştır. Bu çalışmada, özellikle karmaşık geometriler üzerinde daha esnek bir mesh yapısı oluşturmak için kullanılan serbest mesh (free mesh) kullanılmıştır. Mesh oluşturmak istenilen alan seçilip programda mesh tuşuna basıldığında otomatik meshleme yapılmaktadır. *STATUS, NUMELEM ve *STATUS, NUMNODES komutları kullanılarak eleman ve düğüm sayılarına bakılabilmektedir. 40 tabakalı, $L/h=5$, $k=1$ ve $e=0.1$ özelliklerine sahip kiriş için yapılan analizde 20 eleman ve 85 düğüm noktası kullanılmıştır. Kirişin kenarlarında üç tip sınır koşulu düşünülerek analizler gerçekleştirilmiştir (Basit kiriş (B-B), iki ucu ankastre kiriş (A-A) ve konsol kiriş (A-S)). FDM kirişi modellemek için SHELL281 elemanı kullanılmıştır ve FDM tabakalı olarak modellenmiştir. Bu eleman, katmanlı kompozit yapıları modelleme yeteneğine sahiptir. Her düğümde altı serbestlik derecesine sahip sekiz düğümü vardır. x , y ve z eksenlerinde ötelemeler ve x , y ve z eksenleri etrafında dönmelere sahiptir. SHELL281 elemanları ince ve orta kalınlıkta kabuklar için uygundur, ancak çok kalın kabuklarda veya tam katı yapıların modellenmesinde kullanılmamalıdır. Bu elemanlar elastik ve elastoplastik malzeme modellerini destekler, ancak aşırı nonlineer malzeme davranışlarında dikkatli olunmalıdır. SHELL281 elemanı, birinci mertebeden kayma deformasyonu teorisini kullanarak kesme deformasyonlarını dikkate alır ve kalın kabukların analizinde kullanılabilir. Bu elemanlar izotropik (tek yönlü) ve ortotropik (çok yönlü) malzeme modellerini destekler, bu sayede kompozit malzemeler ve farklı malzeme davranışları ile uyumlu çalışır. SHELL281 elemanı, farklı kalınlıklarda ve kalınlık değişimlerinde kullanılabilir ve eleman kalınlığı her bir düğüm noktasında tanımlanabilir.

Modelde kullanılan malzeme özellikleri kuvvet kuralına göre tabakalı olarak (4). ve (5). denkleme göre türetilmiş ve ANSYS programına girilmiştir. Birinci tabaka kiriş kesitinin alt kısmından başlamakta ve tabaka numaraları üste doğru artmaktadır. Tablo 1’de $k=1$, $e=0,1$ ve 5 tabakaya ayrılmış kiriş kesitindeki malzeme özellikleri FDM-1 ve FDM-2 için örnek olarak verilmiştir. Bu malzeme kiriş modeline atandıktan sonra analizler yapılmış ve kirişin temel doğal frekansları çeşitli sınır şartlarına, kuvvet kuralı indeksine, narinliğe, gözeneklilik katsayısına ve gözeneklilik dağılımına göre elde edilmiştir.

Tablo 1. FDM-1 ve FDM-2 için örnek malzeme özellikleri

FDM-1		FDM-2	
$E(z)$ (Pa)	$\rho(z)$ (kg/m ³)	$E(z)$ (Pa)	$\rho(z)$ (kg/m ³)

1. tabaka	54,5*10 ⁹	2639,1	70*10 ⁹	2702
2. tabaka	132*10 ⁹	2953,6	139,75*10 ⁹	2985,05
3. tabaka	209,5*10 ⁹	3268,1	209,5*10 ⁹	3268,1
4. tabaka	287*10 ⁹	3582,6	294,75*10 ⁹	3614,05
5. tabaka	364,5*10 ⁹	3897,1	380*10 ⁹	3960

3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde, iki farklı gözenek dağılışıma sahip FDM kirişlerin çeşitli narinlik oranlarına (L/h), farklı gözeneklilik katsayısına (e), çeşitli kuvvet fonksiyonu üst indislerine (k) ve farklı sınır şartlarına göre serbest titreşim analizleri ANSYS Mechanical APDL programı yardımıyla yapılmıştır. Analizlerde kullanılan FDM malzemelere ait özellikler sırasıyla metal ve seramik için,

- Alüminyum (Al): $E_m=70 \text{ GPa}$, $\rho_m=2702 \text{ kg/m}^3$, $\nu=0,30$
- Alüminyum oksit (Al_2O_3): $E_s=380 \text{ GPa}$, $\rho_s=3960 \text{ kg/m}^3$, $\nu=0,30$

şeklindedir. FD kirişlere ait sınır şartları sabit mesnetli (B-B), konsol (A-S) ve ankastre-ankastre (A-A) şeklindedir. Bu çalışmada doğal frekanslar aşağıdaki denklem kullanılarak boyutsuzlaştırılmıştır.

$$\bar{\omega} = \frac{\omega L^2}{h} \sqrt{\frac{\rho_m}{E_m}} \quad (6)$$

Burada, $\bar{\omega}$ boyutsuz doğal frekansları ifade etmektedir.

ANSYS programında FDM malzemeyi tabakalı olarak modellediğimiz için yeterli tabaka sayısına ihtiyacımız vardır. Öncelikle ANSYS modelinde kullanılacak tabaka sayısını belirlemek için analitik sonuçlarla karşılaştırılarak yakınsama çalışması Tablo 2’de yapılmıştır. Programa tabaka tabaka girilen malzeme özellikleri (4). ve (5). denkleme göre türetilmiştir. Programa girilen tabaka sayısı arttıkça FDM malzeme özelliği daha doğru temsil edilmektedir. Tabaka sayısının arttırılmasıyla sonuçlar literatürden uzaklaşmış olsa da burada bizim için önemli olan tabaka sayısının artması ile sonuçların yakınsamasıdır. Tabaka sayısı arttıkça elde edilen değerlerin yakınsadığı görülmektedir. Tabloya göre ANSYS programında kullanılacak yeterli tabaka sayısı 40 olarak alınmıştır. Ayrıca bu çalışmanın sonuçları analitik çözüm yapan Turan ve ark. (2023) ile karşılaştırılmış ve sonuçların uyumlu oldukları görülmüştür.

Tablo 3’te $L/h=5$ ve 20 değerlerine göre gözeneksiz FDM kirişlerinin farklı k değerlerine göre ANSYS programında elde edilen boyutsuz doğal frekansları literatürle karşılaştırmalı olarak verilmiştir ve sonuçların oldukça uyumlu oldukları görülmüştür. Tablo verileri incelendiğinde k değeri arttıkça boyutsuz doğal frekans değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi k değerinin artmasıyla birlikte FDM kirişin metal malzeme özelliği artmaktadır. Buna bağlı olarak FDM kirişin rijitliği azalmaktadır. Sınır şartlarının boyutsuz doğal frekans değerlerine etkisini incelediğimizde en

küçük boyutsuz doğal frekansların konsol kiriş (A-S) sınır şartında en büyük boyutsuz doğal frekansların iki ucu ankastre (A-A) sınır şartında elde edilmektedir. Ayrıca narinlik oranının (L/h) artmasıyla da boyutsuz doğal frekans değerleri artmaktadır.

Tablo 2. Farklı sınır şartlarına sahip gözenekli FDM kirişlerin boyutsuz doğal frekanslarının tabaka sayısı ile değişimi ($L/h = 5, k = 1, e = 0,1$).

Sınır Şartları	Tabaka Sayısı					Turan ve ark. (2023)
	5	10	20	30	40	
FDM-1						
A-A	7,7814	7,7554	7,7483	7,7468	7,6674	7,7982
B-B	3,8946	3,8707	3,8646	3,8633	3,8057	3,9069
A-S	1,4333	1,4247	1,4225	1,4220	1,4218	1,4315
FDM-2						
A-A	7,9643	7,9438	7,9390	7,9379	7,9378	7,9548
B-B	4,0060	3,9880	3,9834	3,9825	3,9823	4,0085
A-S	1,4748	1,4684	1,4668	1,4664	1,4664	1,4705

Tablo 3. Farklı sınır şartlarına sahip gözeneksiz FDM kirişlerin boyutsuz doğal frekanslarının literatür ile karşılaştırılması.

Kiriş	Teori	$k = 0$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 5$	$k = 10$
$L/h=5$						
A-A	Bu çalışma	10,0750	8,1032	7,2228	6,5046	6,0411
	Turan ve Hacıoğlu (2023) ⁽¹⁾	10,11770	8,0035	7,2187	6,51896	6,18612
	Turan (2018) ⁽²⁾	10,08647	7,98414	7,27155	6,71481	6,37413
	Şimşek (2010) ⁽³⁾	10,0705	7,95034	7,17674	6,49349	6,16515
	Vo ve ark. (2015) ⁽⁴⁾	10,1851	8,0770	7,3039	6,5960	6,2475
B-B	Bu çalışma	5,1566	4,0527	3,6401	3,4284	3,3423
	Turan ve Hacıoğlu (2023) ⁽¹⁾	5,22230	4,0494	3,6827	3,4531	3,3292
	Turan (2018) ⁽²⁾	5,22193	4,04967	3,69360	3,48818	3,36434
	Şimşek (2010) ⁽³⁾	5,15274	3,99042	3,62643	3,40120	3,28160
	Vo ve ark. (2015) ⁽⁴⁾	5,1618	4,0079	3,6442	3,4133	3,2903
A-S	Bu çalışma	1,8911	1,4913	1,3476	1,2542	1,1532
	Turan ve Hacıoğlu (2023) ⁽¹⁾	1,9080	1,4741	1,3430	1,2692	1,2275
	Turan (2018) ⁽²⁾	1,90772	1,47394	1,34469	1,27515	1,26363
	Şimşek (2010) ⁽³⁾	1,89523	1,46328	1,33254	1,25916	1,21834
	Vo ve ark. (2015) ⁽⁴⁾	1,9055	1,4804	1,3524	1,2763	1,2308
$L/h=20$						
A-A	Bu çalışma	12,2319	9,5537	8,6446	8,1187	7,4620
	Turan ve Hacıoğlu (2023) ⁽¹⁾	12,2361	9,4420	8,6067	8,1533	7,8945
	Turan (2018) ⁽²⁾	12,2350	9,4416	8,6144	8,1798	7,9213
	Şimşek (2010) ⁽³⁾	12,2238	9,4316	8,5975	8,1446	7,8858
	Vo ve ark. (2015) ⁽⁴⁾	12,2660	9,5277	8,7142	8,2445	7,9543
B-B	Bu çalışma	5,4637	4,2412	3,8410	3,6734	3,5914
	Turan ve Hacıoğlu (2023) ⁽¹⁾	5,4659	4,2096	3,8406	3,6529	3,5431
	Turan (2018) ⁽²⁾	5,4659	4,2097	3,8414	3,6555	3,5458
	Şimşek (2010) ⁽³⁾	5,4603	4,2050	3,8361	3,6485	3,5390
	Vo ve ark. (2015) ⁽⁴⁾	5,4610	4,2347	3,8765	3,6824	3,5590
A-S	Bu çalışma	1,9459	1,5153	1,3729	1,2944	1,8888
	Turan ve Hacıoğlu (2023) ⁽¹⁾	1,9504	1,5017	1,3704	1,3041	1,2652
	Turan (2018) ⁽²⁾	1,9505	1,5018	1,3704	1,3045	1,2656
	Şimşek (2010) ⁽³⁾	1,9495	1,5011	1,3696	1,3033	1,2645
	Vo ve ark. (2015) ⁽⁴⁾	1,9527	1,5139	1,3862	1,3176	1,2736

⁽¹⁾ Sonlu elemanlar yöntemi (Yüksek mertebeden kayma deformasyonlu teori)

⁽²⁾ Sonlu elemanlar yöntemi (Birinci mertebeden kayma deformasyonlu teori)

⁽³⁾ Analitik yöntem (Parabolik kayma deformasyonlu teori)

⁽⁴⁾ Sonlu elemanlar yöntemi (Üç boyutlu kiriş teorisi)

Tablo 4'te basit mesnetli gözenekli FDM kirişlerin boyutsuz doğal frekansları $k = 2$ için literatürle karşılaştırılmıştır. ANSYS çözümlerinin sonuçları, birinci mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisi kullanan Turan ve ark. (2023), iki değişkenli kayma deformasyonlu kiriş teorisi kullanan Taşkın ve Demirhan (2020) ve yeni yüksek mertebeden kayma deformasyonlu kiriş teorisi kullanan Hadji ve ark. (2019) ile karşılaştırılmıştır. Sayısal sonuçlar birbiriyle oldukça uyumludur. FDM-1 ve FDM-2 kirişler için gözeneklilik katsayısı (e) arttıkça doğal frekanslar azalır. Bununla birlikte, FDM-1'deki azalma oranı, FDM-2'dekinden daha yüksektir. Çünkü gözenekliliğin dağılımı nedeniyle FDM-1'de rijitlik kaybı daha yüksektir. Narinlik (L/h) ve doğal frekanslar doğru orantılıdır.

Tablo 4. Basit mesnetli gözenekli FDM kirişin boyutsuz doğal frekanslarının literatür ile karşılaştırılması ($k=2$).

Referans	FDM-1			FDM-2		
	$e=0$	$e=0,1$	$e=0,2$	$e=0$	$e=0,1$	$e=0,2$
$L/h = 5$						
Bu Çalışma	3,6401	3,4173	3,1544	3,6401	3,5747	3,5030
Turan ve ark. (2023)	3,6344	3,4496	3,1554	3,6344	3,6187	3,5949
Taşkın ve Demirhan (2020)	3,6263	3,4417	3,1488	3,6263	3,6066	3,5781
Hadji ve ark. (2019)	3,6264	3,4418	3,1489	3,6264	3,6069	3,5785
$L/h = 10$						
Bu Çalışma	3,7983	3,5666	3,2938	3,7983	3,7357	3,6682
Turan ve ark. (2023)	3,7929	3,5941	3,2789	3,7929	3,7790	3,7567
Taşkın ve Demirhan (2020)	3,7904	3,5917	3,2769	3,7904	3,7754	3,7515
$L/h = 20$						
Bu Çalışma	3,8410	3,6070	3,3312	3,8410	3,7792	3,7132
Turan ve ark. (2023)	3,8368	3,6340	3,3128	3,8368	3,8235	3,8017
Taşkın ve Demirhan (2020)	3,8361	3,6334	3,3123	3,8361	3,8225	3,8002
Hadji ve ark. (2019)	3,8361	3,6335	3,3123	3,8361	3,8226	3,8004

Tablo 5. Gözenekli FDM kirişlerin boyutsuz doğal frekanslarının gözeneklilik katsayısına (e) ve kuvvet kuralı indeksine (k) göre değişimi ($L/h = 5$).

Kiriş	Gözeneklilik Katsayısı	$k = 0$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 5$
FDM-1					
A-A	$e=0,1$	9,9466	7,6674	6,8270	5,9982
	$e=0,2$	9,8123	7,5162	6,3689	5,3966
	$e=0,3$	9,6715	7,1743	5,8150	4,6119
B-B	$e=0,1$	5,0909	3,8057	3,4173	3,1433
	$e=0,2$	5,0222	3,7280	3,1544	2,8058
	$e=0,3$	4,9501	3,5337	2,8333	2,3624
A-S	$e=0,1$	1,8671	1,4218	1,2663	1,1730
	$e=0,2$	1,8418	1,3728	1,1706	1,0555
	$e=0,3$	1,8154	1,3021	1,0535	0,8931
FDM-2					
A-A	$e=0,1$	10,0268	7,9378	7,0701	6,2553
	$e=0,2$	9,9616	7,8353	6,9051	5,9850
	$e=0,3$	9,8950	7,7262	6,7223	5,6343
B-B	$e=0,1$	5,1462	3,9823	3,5747	3,3241

A-S	$e=0,2$	5,1363	3,9385	3,5030	3,2230
	$e=0,3$	5,1256	3,8920	3,4242	3,1014
	$e=0,1$	1,8792	1,4664	1,3251	1,2092
	$e=0,2$	1,8670	1,4515	1,3007	1,1727
	$e=0,3$	1,8545	1,4358	1,2742	1,1338

Tablo 5 ve 6’da sırasıyla $L/h=5$ ve 20 için gözenekli FDM kirişlerin boyutsuz doğal frekanslarının gözeneklilik katsayısına ve kuvvet kuralı üsteline göre değişimi verilmiştir. Tablolar incelendiğinde, en büyük doğal frekanslar A-A FDM kirişinde, en küçük doğal frekanslar A-S FDM kirişinde olduğu görülmektedir. FDM-1’de gözeneklilik oranı, dağılışımdan dolayı yüksek olduğu için doğal frekanslar FDM-2’den daha küçüktür. Kuvvet kuralı indeksi arttıkça, doğal frekans azalmaktadır. Artan e ve k kirişin rijitliğini azaltmaktadır. Gözeneklilik dağılımı nedeniyle, gözeneklilik katsayısının (e) değişimi, FDM-1’deki doğal frekanslar üzerinde FDM-2’dekinden daha etkilidir. e arttıkça, FDM-1’in rijitliği daha hızlı azalmaktadır. Doğal frekanslar, narinlik (L/h) arttığında artmaktadır. FDM-1 ve FDM-2’nin doğal frekans değerleri farklı olsa da narinliğin her ikisine de etkisi benzer olmaktadır.

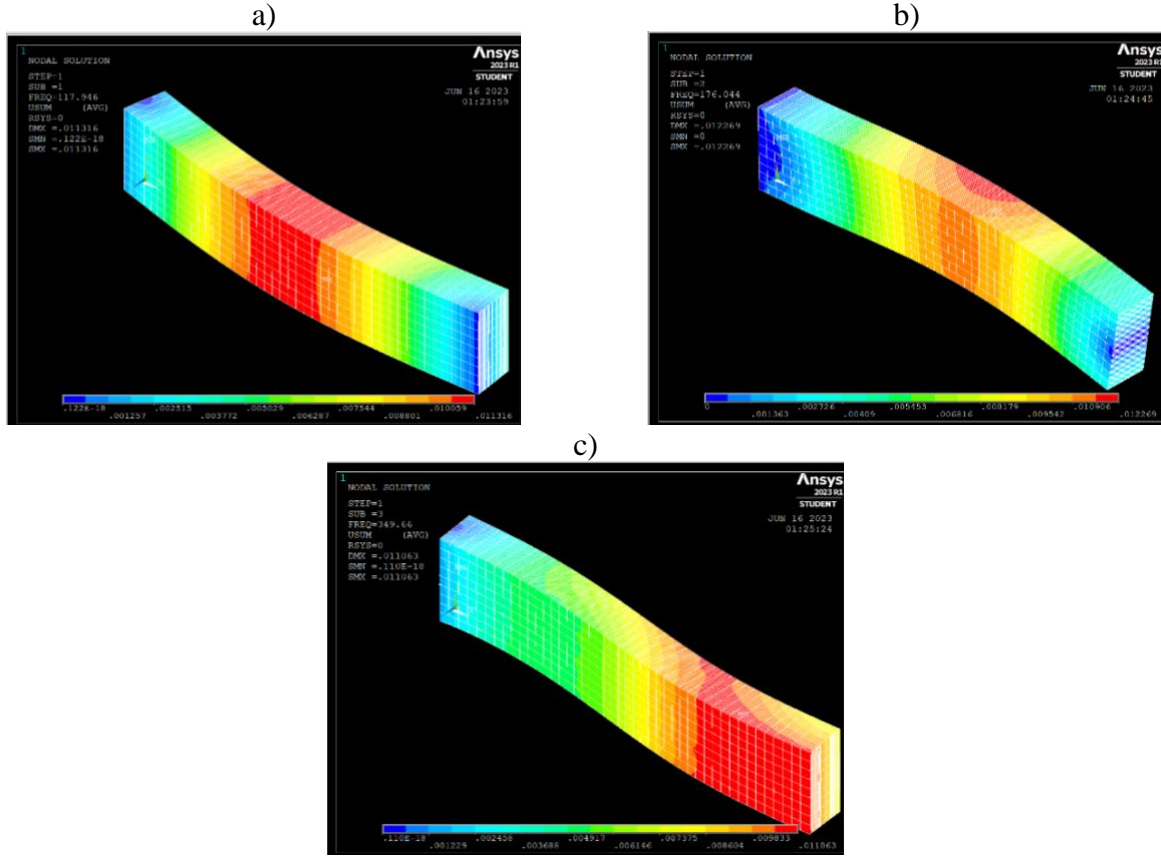
Tablo 6. Gözenekli FDM kirişlerin boyutsuz doğal frekanslarının gözeneklilik katsayısına (e) ve kuvvet kuralı indeksine (k) göre değişimi ($L/h = 20$).

Kiriş	Gözeneklilik Katsayısı	$k = 0$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 5$
FDM-1					
A-A	$e=0,1$	12,0771	9,1087	8,1227	7,5124
	$e=0,2$	11,9139	8,7940	7,5090	6,7962
	$e=0,3$	11,7431	8,3403	6,7573	5,7551
B-B	$e=0,1$	5,3943	4,0425	3,6070	3,3759
	$e=0,2$	5,3214	3,9011	3,3312	3,0310
	$e=0,3$	5,2451	3,6976	2,9935	2,5631
A-S	$e=0,1$	1,9212	1,4444	1,2893	1,2075
	$e=0,2$	1,8952	1,3939	1,1910	1,0845
	$e=0,3$	1,8680	1,3212	1,0704	0,9176
FDM-2					
A-A	$e=0,1$	12,1555	9,3960	8,5027	7,8272
	$e=0,2$	12,0765	9,3030	8,3508	7,5920
	$e=0,3$	11,9955	5,0917	8,1847	7,3417
B-B	$e=0,1$	5,4573	4,1724	3,7792	3,5779
	$e=0,2$	5,4503	4,1320	3,7132	3,4956
	$e=0,3$	5,4436	3,4885	3,6409	3,4019
A-S	$e=0,1$	1,9336	1,4908	1,3510	1,2483
	$e=0,2$	1,9211	1,4764	1,3275	1,2114
	$e=0,3$	1,9082	0,8018	1,3019	1,1724

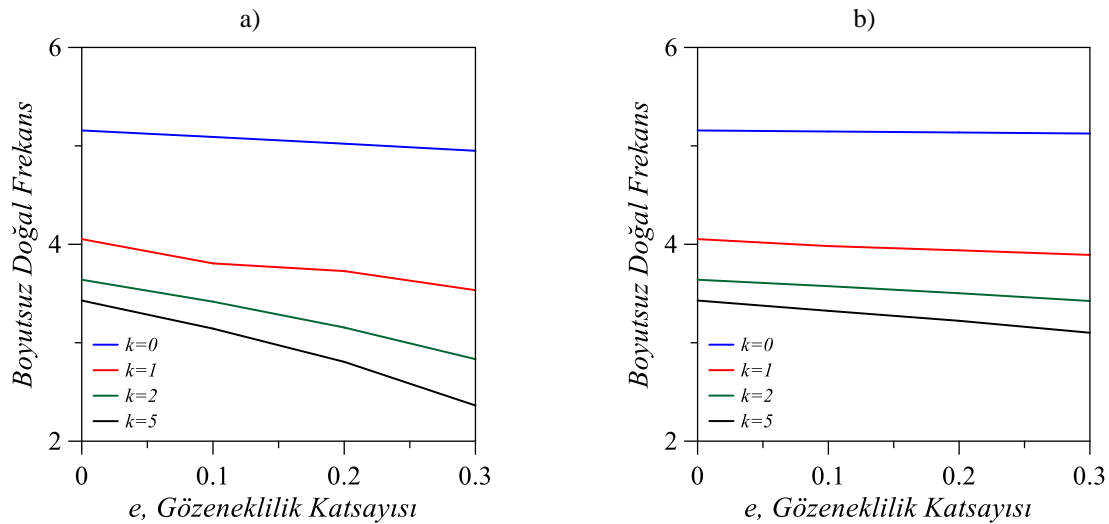
Şekil 3’de gözenekli FDM kirişin $L/h=5$, $k=2$ ve $e=0,1$ için basit mesnet sınır şartına göre ANSYS ile elde edilen sırasıyla 1.mod, 2. mod ve 3. mod şekillerinin değişimi verilmiştir.

Şekil 4’ de basit mesnetli FDM-1 ve FDM-2 kirişlerinin boyutsuz doğal frekanslarının gözeneklilik katsayısı ile değişimi $L/h=5$ için verilmiştir. Şekiller incelendiğinde her iki gözeneklilik durumu için de gözeneklilik katsayısının artması ile boyutsuz doğal frekanslar azalmaktadır. Şekillerden, FDM-1 dağılışına sahip kirişte gözeneklilik katsayısının artışı sonucunda oluşan doğal

frekanslardaki azalış değerine göre daha fazla olduğu daha açık görülmektedir. k değerinin artışıyla doğal frekanslarda ki azalışta net bir şekilde görülmektedir.



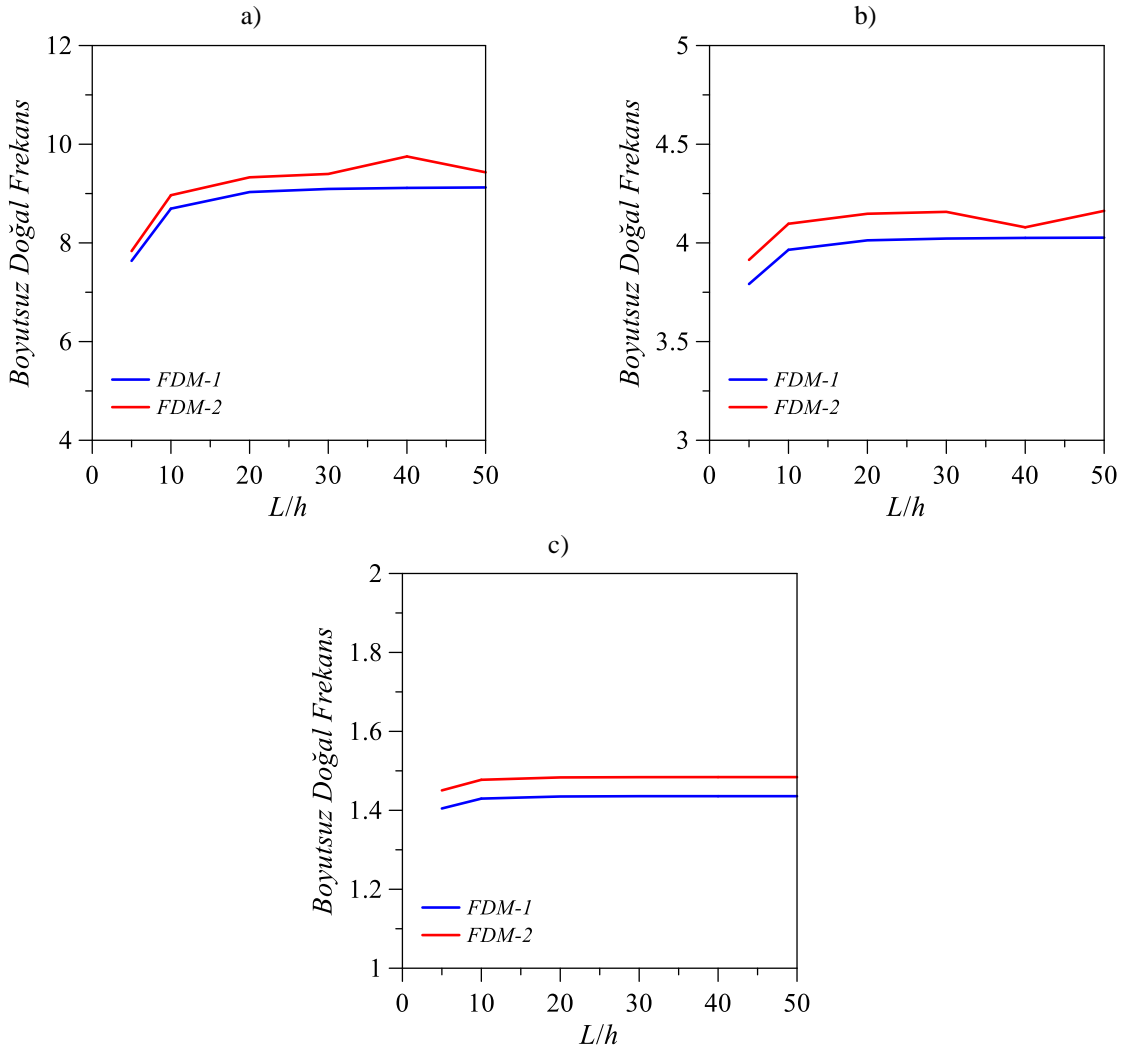
Şekil 3. Gözenekli FDM Kiriş için serbest titreşim mod şekilleri a) 1. mod, b) 2. mod ve c) 3. mod ($L/h=5$ ve $p=2$, $e=0,1$).



Şekil 4. Basit mesnetli a) FDM-1, b) FDM-2 kirişlerinin boyutsuz doğal frekanslarının gözeneklilik katsayısı ile değişimi ($L/h=5$).

Şekil 5'te FDM-1 ve FDM-2 kirişlerine ait $k=1$ ve $e=0,1$ durumlarına göre farklı sınır şartları dikkate alınarak boyutsuz temel doğal frekanslarının narinlik oranlarına bağlı değişimleri verilmiştir.

Grafikler incelendiğinde narinlik oranlarının artmasına bağlı boyutsuz doğal frekansların belli bir değere kadar arttığı ve devamında yakınsadığı görülmektedir. İki tip FDM kiriş kendi aralarında karşılaştırıldığında FDM-2 kirişinin boyutsuz doğal frekanslarının FDM-1 kirişine göre yüksek çıkmaktadır. Bu durum iki tip kirişin gözeneklilik tiplerinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca mesnet şartlarının boyutsuz doğal frekanslara etkisi incelendiğinde en büyük boyutsuz temel doğal frekanslar iki ucu ankastre (A-A) sınır şartında elde edildiği görülmektedir.



Şekil 5. a) İki ucu ankastre kiriş (A-A), b) Basit kiriş (B-B), c) Konsol kiriş (A-S) mesnet şartlarına göre FDM-1 ve FDM-2 kirişlerine ait boyutsuz doğal frekanslarının L/h ' a göre değişimi ($k=1$ ve $e=0,1$).

4. Sonuçlar

Bu projede, ANSYS APDL paket programı kullanılarak çeşitli sınır şartlarına tabi tutulan fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşimi üzerinde gözenekliliklerin etkisi incelenmiştir. Çeşitli sınır koşulları, kuvvet kuralı indeksi (k), narinlik (L/h), gözeneklilik katsayısı (e) ve gözeneklilik dağılımı (FDM-1, FDM-2) için boyutsuz temel doğal frekanslar elde edilmiştir. Araştırmaya göre, aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- ANSYS APDL paket programı bu tip problemlerin çözümünde oldukça iyi sonuçlar vermektedir.
- FDM-1'de gözeneklilik yüksek olduğu için doğal frekanslar FDM-2'den daha küçüktür.
- Kuvvet kuralı indeksi (k) ve gözeneklilik katsayısı (e) arttıkça doğal frekans değerleri azalır.
- Narinlik (L/h) arttığında doğal frekanslar artar.

Teşekkür

Bu çalışma, 1919B012217533 başvuru numaralı 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Akbaş Ş.D. (2018). Forced vibration analysis of functionally graded porous deep beams. *Compos Struct.*, 186, 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.013>
- Al Rjoub Y.S, and Hamad A.G. (2017). Free vibration of functionally Euler-Bernoulli and Timoshenko graded porous beams using the transfer matrix method. *KSCE J Civ Eng.*, 21, 792–806. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0149-6>.
- Al-Itbi, S.K.A., and Noori, A.R. (2022). Influence of porosity on the free vibration response of sandwich functionally graded porous beams. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 7(4), 291-301. doi:10.47481/jscmt.1165940
- Al-Itbi, S.K.A., and Noori, A.R. (2023). Finite element analysis for the static response of functionally graded porous sandwich beams. *International Journal of Engineering Technologies-IJET*, 8(1), 13-20. doi:10.19072/ijet.1161612
- Alnujaie A, Akbas S.D, Eltaher M.A, and Assie A.E. (2021). Damped forced vibration analysis of layered functionally graded thick beams with porosity. *Smart Structures and Systems*, 27(4), 679–689. <https://doi.org/10.12989/sss.2021.27.4.669>
- ANSYS. Swanson Analysis Systems Inc., Houston, PA, USA, 2023.

- Chen D, Yang J, and Kitipornchai S. (2015). Elastic buckling and static bending of shear deformable functionally graded porous beam. *Compos Struct.*, 133, 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.07.052>.
- Chopan, A. ve Noori, A.R. (2023). Fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli sandviç kirişlerin zorlanmış titreşim analizi. *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 26(4), 909-921.
- Civalek, Ö., Uzun, B., and Yaylı, M.Ö. (2024). On the stability analysis of a restrained FG nanobeam in an elastic matrix with neutral axis effects. *Zeitschrift für Naturforschung A*, Published online. <https://doi.org/10.1515/zna-2023-0361>
- Ebrahimi F, Ghasemi F, and Salari E. (2016). Investigating thermal effects on vibration behavior of temperature-dependent compositionally graded Euler beams with porosities. *Meccanica*, 51, 223–49. <https://doi.org/10.1007/s11012-015-0208-y>.
- Fouda N, El-midany T, and Sadoun A.M. (2017). Bending, buckling and vibration of a functionally graded porous beam using finite elements. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 3(4), 274–282. <https://doi.org/10.22055/jacm.2017.21924.1121>
- Gao K, Li R, and Yang J. (2019). Dynamic characteristics of functionally graded porous beams with interval material properties. *Eng Struct.*, 197, 109441. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109441>.
- Hadji L, Zouatnia N, and Bernard F. (2019). An analytical solution for bending and free vibration responses of functionally graded beams with porosities: Effect of the micromechanical models. *Struct Eng Mech.*, 69, 231–41. <https://doi.org/10.12989/sem.2019.69.2.231>.
- Hamed M.A, Sadoun A.M, and Eltaher M.A. (2019). Effects of porosity models on static behavior of size dependent functionally graded beam. *Structural Engineering and Mechanics*, 71(1);89–98. <https://doi.org/10.12989/sem.2019.71.1.089>
- Jena S.K, Chakraverty S, and Malikan M. (2021). Application of shifted Chebyshev polynomial-based Rayleigh–Ritz method and Navier’s technique for vibration analysis of a functionally graded porous beam embedded in Kerr foundation. *Eng Comput.*, 37, 3569–89. <https://doi.org/10.1007/s00366-020-01018-7>.
- Kitipornchai S, Chen D, and Yang J. (2017). Free vibration and elastic buckling of functionally graded porous beams reinforced by graphene platelets. *Mater Des.*, 116, 656–65. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.12.061>.
- Nguyen N.D, Nguyen T.N, Nguyen T.K, and Vo T.P. (2022). A new two-variable shear deformation theory for bending, free vibration and buckling analysis of functionally graded porous beams. *Compos Struct.*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115095>
- Noori, A.R., Aslan, T.A., and Temel, B. (2021). Dynamic analysis of functionally graded porous beams using complementary functions method in the Laplace domain. *Composite Structures*, 256, 113094. doi:10.1016/j.compstruct.2020.113094
- Şimşek, M. (2010). Fundamental frequency analysis of functionally graded beams by using different higher-order beam theories. *Nuclear Engineering and Design*, 240(4), 697–705. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.12.013>
- Taşkın V, ve Demirhan P.A. (2020). Fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli kirişlerin serbest titreşim analizi. *Eskişehir Tek Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B - Teorik Bilim*, 8, 49–61. <https://doi.org/10.20290/estubtdb.538586>.
- Turan M, and Kahya V. (2021). Free vibration and buckling analysis of functionally graded sandwich beams by Navier’s method. *J Fac Eng Archit Gazi Univ.*, 36, 743–57. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.599928>
- Turan, M. (2022). Fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli kirişlerin sonlu elemanlar yöntemiyle statik analizi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10 (4), 1362-1374. <https://doi.org/10.21923/jesd.1134356>
- Turan, M. ve Hacıoğlu, M.I. (2023). Yüksek mertebeli sonlu eleman modeliyle fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşim ve statik analizi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(2), 414-431. doi: 10.17714/gumusfenbil.1185301
- Turan, M. ve Kahya, V. (2018). Fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşim analizi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 8 (2), 119-130. <https://doi.org/10.31466/kfbd.453833>
- Turan, M., (2018). *Tabakalı kirişlerin statik, serbest titreşim ve burkulma analizleri için bir sonlu eleman modeli*. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Turan, M., and Adıyaman, G. (2023). A New Higher-Order Finite Element for Static Analysis of Two-Directional Functionally Graded Porous Beams. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48, 13303-13321. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-07742-8>
- Turan, M., and Adıyaman, G. (2024). Free vibration and buckling analysis of porous two-directional functionally graded beams using a higher-order finite element model. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 12, 1133-1152. <https://doi.org/10.1007/s42417-023-00898-5>
- Turan, M., Yaylacı E.U., and Yaylacı M. (2023). Free vibration and buckling of functionally graded porous beams using analytical, finite element, and artificial neural network methods. *Archive of Applied Mechanics*, 93, 1351-1372. <https://doi.org/10.1007/s00419-022-02332-w>
- Uzun, B., and Yaylı, M.Ö. (2024a). Porosity effects on the dynamic response of arbitrary restrained FG nanobeam based on the MCST. *Zeitschrift für Naturforschung A*, 79(2), 183-197. <https://doi.org/10.1515/zna-2023-0261>
- Uzun, B., and Yaylı, M.Ö. (2024b). Rotary inertia effect on dynamic analysis of embedded FG porous nanobeams under deformable boundary conditions with the effect of neutral axis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 46, 111. <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04605-z>
- Uzun, B., Kafkas, U., Deliktaş, B., and Yaylı, M.Ö. (2023). Size-dependent vibration of porous bishop nanorod with arbitrary boundary conditions and nonlocal elasticity effects. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 11(3), 809-826. doi:10.1007/s42417-022-00610-z
- Vo, T. P., Thai, H. T., Nguyen, T. K., Inam, F., and Lee, J. (2015). A quasi-3D theory for vibration and buckling of functionally graded sandwich beams. *Composite Structures*, 119, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.08.006>
- Wattanasakulpong N, and Chaikittiratana A. (2015). Flexural vibration of imperfect functionally graded beams based on Timoshenko beam theory: Chebyshev collocation method. *Meccanica*, 50, 1331–42. <https://doi.org/10.1007/s11012-014-0094-8>.

Turuncu Havuç (*Daucus Carota L.*) Karotenoidleri ile Zenginleştirilmiş Kefir Üretimi

Hüseyin Can AYÇİÇEK¹, Zeynep Naz ESEN², Serap BERKTAŞ^{3*}, Mustafa ÇAM⁴

Öz

Kefir birçok probiyotik bakteri ve maya türlerini bünyesinde bulunduran doğal bir fermente süt ürünüdür. Son yıllarda tüketicilerin probiyotik ürünlere olan artan talepleri nedeniyle bu ürünlerden birisi olan kefirin fonksiyonelliğinin ve aromasının geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Bu amaçla farklı bitkisel kaynak ve aroma maddeleri ile zenginleştirilen alternatif kefir çeşitleri üretilmektedir. Bu çalışmada turuncu renkteki havuçtan ekstrakte edilen karotenoidlerin kefir formülasyonuna ilave edilmesi ile kefirin bazı özellikleri üzerindeki değişimler incelenmiştir. Turuncu havuçtan karotenoidler aseton ile ekstrakte edildikten sonra ayçiçek yağı fazına geçirilerek karotenoid ekstraktı elde edilmiştir. Ardından inek sütü ve kefir mayası ile birlikte farklı oranlarda (%0.1, 0.3, 0.5, v/v) karotenoid ekstraktı kefir üretimine dahil edilmiş ve 30 °C'de 24 saat süre ile fermantasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Karotenoid maddelerce zenginleştirilmiş kefirlerin kurumadde, kül, protein, renk, titre edilebilir asitlik, β -karoten ve duyu analizleri gerçekleştirilmiştir. Zenginleştirilmiş kefirlerin asitlik ve pH değerlerinde anlamlı değişme görülmezken ($P > 0,05$), β -karoten içeriği 1,41-4,07 mg/100 mL değerlerine anlamlı olarak ($P < 0,05$) artmıştır. Kefirlere karotenoid ekstraktı ilavesinin ürünlerin kontrol grubuna göre β -karoten içeriklerini artırdığı ve kefirlerin duyu özelliklerini geliştirdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kefir, β -karoten, Turuncu Havuç, Duyusal Analiz.

Kefir Production Enriched with Orange Carrot (*Daucus Carota L.*) Carotenoids

Abstract

In this study, the changes on some properties of kefir by adding carotenoids extracted from orange carrots to kefir formulation were investigated. After extracting the carotenoids from orange carrots with acetone, it was transferred to the sunflower oil phase, and the carotenoid extract was obtained. Then, different ratios (0.1, 0.3, 0.5%, v/v) carotenoid extract together with cow's milk and kefir yeast were included in kefir production, and fermentation was carried out at 30 °C for 24 hours. Dry matter, ash, protein, color, titratable acidity, β -carotene and sensory analyses of kefir enriched with carotenoid substances were performed. While there was no significant change ($P > 0.05$) in the acidity and pH values of enriched kefir, the β -carotene content increased significantly ($p < 0.05$) as 1.41-4.07 mg/100 mL. It was determined that the addition of carotenoid extract to kefirs increased the β -carotene content of the products compared to the control group and improved the sensory properties of kefirs.

Keywords: Kefir, β -carotene, Orange Carrot, Sensory Analysis.

¹Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye, huseyincanaycicek@hotmail.com

²Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye, znesen05@gmail.com

³Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye, brkts.serap@gmail.com

⁴Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye, mcam@erciyes.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Kefir kökenini Kafkaslardan alan ve *Lactobacillus*, *Leuconstoc*, *Lactococcus* gibi birçok cinsten bakteri ve maya türleri ile birlikte asetik asit bakterilerini de içeren fermente bir süt ürünüdür. Sütten gelen protein, yağ ve laktozun yanı sıra fermantasyon sırasında oluşan laktik asit, etanol, asetik asit, karbondioksit ve asetaldehit gibi bileşenleri de içermektedir (Goncu ve ark., 2017; Say ve ark., 2019). Kefir inek, koyun, keçi ve deve gibi farklı çeşitten sütlerin kefir mayası ile karıştırılıp bir fermantasyon sürecinden geçirilmesi ile hazırlanmaktadır. Fermantasyon prosesinden sonra gelişen kefir taneleri genellikle geri kazanılarak bir sonraki mayalandırma işleminde kullanılmaktadır. Fermantasyon zamanı, sıcaklık, kullanılan sütün çeşidi ve kefir mayası gibi etkenler üretilen kefirin kimyasal kompozisyonunu etkilemektedir (Aiello, 2020). Bununla birlikte fermantasyon boyunca oluşan peptitler ve heteropolisakkaritler gibi farklı biyoaktif bileşikler kefirin antioksidan, antimikrobiyal, antiinflamatuar, antihipertansif gibi özellikler göstermesine katkı sağlamaktadır (Kim ve ark., 2019; Guzel-Seydim ve ark., 2011). Fermente süt ürünlerinin insan sağlığı üzerine pek çok faydalı etkilere sahip olduğu bilinmekle birlikte kefirin diğer fermente süt ürünleri arasında düşük bir tüketim oranına sahiptir (Ürkek ve Taş, 2021).

Havuç turuncu, sarı, kırmızı, beyaz ve mor renkte türleri olan ve dünyanın farklı bölgelerinde yetiştirilebilen bir sebzedir. Bu türler arasında yer alan turuncu havuç karotenoid maddelerce özellikle α - ve β -karoten açısından zengindir. A vitamini hayvansal ve takviye edici gıdalardan A vitamini olarak veya bitki kökenli karotenoidlerden provitamin A olarak sağlanmaktadır (Arscott ve Tanumihardjo, 2010). Turuncu havuç içerdiği karotenoidler nedeniyle iyi bir A vitamini kaynağı olup hem sağlık açısından hem de formülasyonuna katılan ürünün özelliklerini geliştirmesi açısından önemli bir besin kaynağıdır (Kasim ve Kasim, 2019).

Tüketicilerin gıdaların daha sağlıklı olan alternatiflerine yönelmeleri nedeniyle gıdaların biyoaktif bileşenlerce güçlendirilmesi ve gıdanın besleyici değerinin artırılmasına yönelik çalışmalar artmaktadır (Arscott ve Tanumihardjo, 2010). Bu amaçla canlı mikroorganizmalar içeren probiyotik gıda formülasyonuna biyoaktif özellikli bileşenlerin eklenmesi hem ürünün aromasının geliştirilmesine hem de sağlığın desteklenmesine katkı sağlayacaktır. Bununla birlikte zenginleştirme işlemi ürünün kabul edilebilirliğini ve katma değerini artırarak fermente gıdaların geliştirilmesine olanak sağlayacaktır (Mestry ve ark., 2011). Bu ürünlerden biri olan kefirlerin duyu özelliklerinin geliştirilmesi ve tüketiminin artması sebebiyle son zamanlarda farklı bileşenler ile aromalandırılmış ve zenginleştirilmiş bazı fonksiyonel özellikli kefirler üretilmektedir (Harmankaya ve ark., 2019; Say ve ark., 2019; Belyaev ve ark., 2021). Bu çalışmada kefir kültürü ve havuç karotenoidleri kullanılarak üretilen kefirlerin bazı kalite ve duyu özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Turuncu havuç, yağsız süt (<%0,1 yağlı, İim), kefir mayası (Vivo) ve ayçiçek yağı (Yudum) yerel bir marketten tedarik edilmiştir.

Analizlerde kullanılan tüm kimyasallar analitik saflıkta olup Sigma-Merck marka kullanılmıştır.

2.1. Kurutma

Taze havuç (3 kg) bir rende yardımıyla rendelenerek 50 °C'de 24 saat boyunca fanlı etüvde (Mikrotest, DT104, Türkiye) kurutulmuştur (nem <%5). Kurutulan havuçlar bir öğütücü yardımı ile (Waring, Staufen, Almanya) 5 dakika süre ile ğtlmştir. Ardından <500µm elekten geçirilerek elenmiş, analiz ve üretimlere kadar 4 °C'de muhafaza edilmiştir.

2.2. Havuçtan Karotenoid Maddelerin Ekstraksiyonu

Kurutulmuş havuçtan 100 g tartılarak ışık görmeyecek şekilde etrafı alüminyum folyo ile kapatılmış bir rotary evaporatör balonuna aktarılarak üzerine 400 mL aseton (%100) eklenmiştir. Ardından evaporatörde (Heidolph, Value G1, Almanya) 25 °C sıcaklık ve 100 rpm dönme hızında 1 saat süre ile ekstraksiyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Ekstraksiyon sonrasında karışım filtre edilerek, kalıntı bir kez daha aynı işlemler ile ekstrakte edilmiştir. Elde edilen filtratlar bir araya getirilerek aseton belli bir hacme kadar (20 mL) evaporatörde (25 °C, 100 rpm) uzaklaştırılmıştır. Ardından aynı hacimde ayçiçek yağı eklenerek karotenoidler yağ fazına aktarılmıştır. Yağ fazında bulunan aseton evaporatörde tamamen uzaklaştırdıktan sonra elde edilen karotenoid ekstraktı analizler ve üretimlere kadar koyu renkli bir cam vialde 4 °C'de muhafaza edilmiştir.

2.3. Kefir retimi

Kefir retiminde kullanılacak olan önceden sterilize edilmiş cam kavanozlara 100 mL süt ve farklı oranlarda karotenoid ekstraktı (%0.1, 0.3 ve 0.5, v/v) eklenmiş ve karotenoid ekstraktının kefirde homojen dağılmasını sağlamak amacıyla 24000 rpm'de homojenizatörde (IKA, T18, Almanya) 10 dakika (2 dakika aralar ile) homojenize edilmiştir. Homojenize hale getirilen karışımın sıcaklığı ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda 30 °C'ye getirilerek %0.05 (m/v) oranında kefir mayası eklenmiştir. Birkaç dakika karıştırıldıktan sonra iklimlendirme kabinine (Nüve, TK 252, Türkiye)

alınarak 30 °C’de 24 saat boyunca fermantasyona bırakılmıştır. Fermantasyon sonrasında elde edilen kefir örnekleri 4 °C’de 24 saat süre ile dinlendirmeye alınmıştır.

2.4. Fizikokimyasal Analizler

Kurutulmuş havuç örneklerinin ve kefirlerin kurumadde miktarı etüvde 70 °C’de 24 saat bekletilerek yüzde (%) olarak belirlenmiştir (Cemeroğlu, 2013). Kül miktarı 550 °C’de 8 saat süre ile kül fırınında yakma işlemi gerçekleştirilerek tespit edilmiştir. Su aktivitesi değerleri su aktivitesi tayin cihazı (Aqua Lab, 3 TE, Almanya) ile ölçülmüştür. Örneklerin renk parametreleri (L^* , a^* , b^*) bir kolorimetre cihazı (CR-5, Konica Minolta, Japonya) kullanılarak tespit edilmiştir (Cemeroğlu, 2013). Protein tayini için Kjeldahl yöntemi (distilasyon ünitesi, BÜCHİ, K-350, İsviçre) kullanılmıştır. pH değerleri bir pH metre (HANNA, Amerika) yardımı ile ölçülmüştür. Toplam asitlik değeri örneğe eklenen fenolftaleyn çözeltisi (%1, m/v) eşliğinde 0,1 N NaOH ile örnek titre edilmiş ve aşağıdaki formül ile hesaplanarak laktik asit cinsinden yüzde (%) olarak ifade edilmiştir (Cemeroğlu, 2013).

$$\text{Asitlik (\%)} = \frac{V \times N \times E}{m} \times 100 \quad (1)$$

V: Titrasyonda harcanan 0,1 N NaOH’ın miktarı (mL), N: Titrasyonda kullanılan NaOH’ın normalitesi, E: Örnekte belirlenmek istenen asit cinsinin miliekivalan ağırlığı, m: Alınan örnek miktarı (mL)

2.5. β -karoten Tayini

2 g havuç tozu üzerine 150 mL n-hekzan, etanol, aseton karışımı (2:1:1, v/v/v) eklenmiştir. Ardından 40 °C ve 100 rpm’de çalkalamalı su banyosunda (Nüve, ST 30, Türkiye) 1 saat ekstraksiyon işlemi gerçekleştirilmiştir (Elik ve ark., 2020). Elde edilen ekstrakt filtre edildikten sonra solvent evaporatörde 40 °C’de uzaklaştırıldıktan sonra kalıntı asetonda çözündürülerek analizde kullanılmıştır.

Yağ fazına geçirilmiş karotenoid ekstraktından 0,5 g alınarak üzerine 1 mL n-hekzan eklenmiştir. Karışım 1 dakika vorteks ile karıştırıldıktan sonra 3000 rpm’de 5 dakika santrifüj (VWR Micro Star 17, A.B.D.) edilmiş ve süpernetant analizde kullanılmıştır.

Kefir örneklerinden 5 g tartılarak üzerine 100 mL aseton: n-hekzan karışımı (1:1, v/v) ve 10 mL saf su eklenmiştir. Çalkalamalı su banyosunda 40 °C’de 100 rpm’de 1 saat süre ile ekstraksiyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Filtrasyonun ardından karışım ayırma hunisine alınarak faz ayrımı

gerçekleştirilmiştir. Hekzan fazı alınarak evaporatörde 40 °C’de uzaklaştırılarak kalıntı metanolde çözüldürülmüştür. Elde edilen ekstrakt analizde kullanılmıştır.

Elde edilen tüm ekstraktlar spektrofotometrede (UV-1800, Shimadzu, Japonya) 470 nm dalga boyunda okunmuştur. Sonuçlar 10-400 mg/L konsantrasyon aralığında çizilen β -karoten standart eğrisinden yararlanılarak belirlenmiştir.

2.6. Duyusal Analiz

Kefir örnekleri rastgele 3 haneli rakamlar kullanılarak kodlanmıştır. Saydam plastik bardaklara 4 °C’de soğutulmuş olan yaklaşık 50 mL örnek konularak, Gıda Mühendisliği Bölümü öğrenci ve öğretim elemanlarından oluşan 10 kişilik panelist grubuna sunulmuştur. Zenginleştirilen kefirler homojen görünüm, serum ayrılması, renk, kıvam, havucumsu lezzet, havucumsu aroma, tatlılık, ekşilik ve genel beğeni duyusal parametreleri açısından 5 puanlı hedonik skala testi (1: hiç beğenmedim, 3: beğendim, 5: çok beğendim) kullanılarak değerlendirilmiştir.

2.7. İstatistiksel Analiz

Tüm çalışmada analizler 2 tekerrür, 2 paralel olacak şekilde gerçekleştirilerek elde edilen veriler varyans analizi ile SPSS 10.0.1 paket programı (SPSS Inc., Chicago, USA) kullanılarak değerlendirilmiştir. Örnek karşılaştırmaları çoklu karşılaştırma testi Tukey testi ile karşılaştırılmış, sonuçlar ortalama ve standart sapma olarak ifade edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Kefir üretiminde kullanılan turuncu havucun bazı karakteristik özellikleri Çizelge 1’de gösterilmiştir. Turuncu havucun nem içeriği kurutma ile %88,75’den %4,14’e düşürülerek su aktivitesi 0,16 değerine ulaşmıştır. Bununla birlikte kurumaddenin %7,56 ve %6,3’lük kısmını kül ve proteinin oluşturduğu belirlenmiştir. Turuncu havuç diğer havuç türlerine göre turuncu pigment ve provitamin A olan α - ve β -karotene oldukça zengin bir kaynaktır. A vitamininin cilt ve göz sağlıklarının korunmasının yanı sıra bağışıklık sistemi üzerinde de olumlu etkileri olduğu, aynı zamanda antiinflammatuvar aktivite sergilediği bildirilmektedir (Kasim ve Kasim, 2019). Heinonen ve ark. (1990) turuncu havuç çeşitlerinin β -karoten içeriklerini 4,6-10,3 mg/100 g olarak tespit ederken, Nicolle ve ark. (2014) ise 3,2-6,6 mg/100 g olarak belirlemişlerdir.

Tablo 1. Kurutulmuş havucun bazı fizikokimyasal özellikleri

	Kurumadde (%)	Kül (%)	Protein (%)	Su aktivitesi	β -karoten (mg/100 g)	L^*	a^*	b^*
Havuç	95,86±0,12	7,56±0,09	6,30±0,00	0,16±0,01	8,50±0,70	65,40±	27,94±	29,69±
			0			0,01	0,01	0,02

*Çizelge üzerinde bulunan değerler iki tekerrür ve iki paralelli analiz sonuçlarının ortalama \pm standart sapma değerlerini ifade etmektedir.

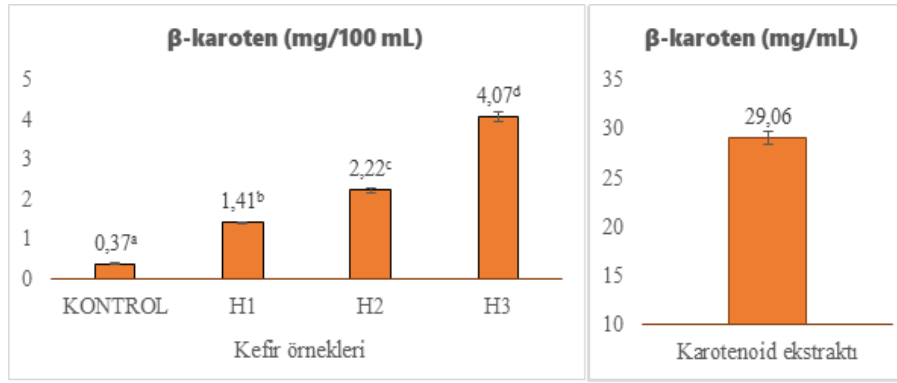
Karotenoid ekstraktının kefirlerle ilave edilmesinin kurumadde, pH, protein, asitlik ve renk değerleri üzerindeki etkisi Tablo 2’de gösterilmiştir. Renk değerleri dışındaki diğer tüm özellikler üzerinde % 0,1-0,5 oranında karotenoid ekstraktı eklenmesinin anlamlı ($P < 0,05$) bir etkisi olmadığı belirlenmiştir. Goncu ve ark. (2017) elma ve limon lifleri ile zenginleştirdikleri kefir örneklerinin kurumadde miktarlarını %12,34-13,14 olarak, pH ve titre edilebilir asitlik değerlerini ise sırasıyla 4,26-4,65 ve %0,68-1,29 olarak belirlemişlerdir. Gursoy ve ark. (2020) bazı ticari kefirler üzerinde yaptıkları çalışmalarında 6 farklı kefir türünde kurumadde ve protein değerlerini sırasıyla %9,49-11,97 ve %2,30-3,44 olarak belirlerken, pH ve asitlik değerlerini 3,86-4,06 ve %0,71-0,93 olarak belirlemişlerdir. Setiyoningrum ve ark. (2019) zencefil ve tarçın ekstraktları ile zenginleştirilen kefirlerin protein değerlerini 4,21-4,29 olarak tespit etmişlerdir. Kabakçı ve ark. (2020) antosiyanince zengin farklı meyve suları ile ürettikleri kefirlerin pH ve asitlik değerlerini sırasıyla 3,88-4,58 ve %0,64-1,12 olarak rapor etmişlerdir. Znamirowska ve ark. (2017) sarımsak kabuğu ve keçi sütü ile ürettikleri kefirlerin pH değerini sırası ile 8,85 olarak tespit etmişlerdir. Aynı çalışmada kontrol grubunun L^* değerini 91,44, a^* değerini -4,17 ve b^* değerini 5,82 olarak belirlerken, zenginleştirilmiş kefirlerde bu değerleri sırasıyla 57,48, -16,45 ve 12,08 olarak belirlemişlerdir. Bu değerler çalışmamızdaki kefirlerin değerleri ile karşılaştırıldığında ve kefirlerin içerikleri göz önüne alındığında uyumlu görünmektedir. Ayrıca kefir üretiminde yağsız süt kullanılmış olmasından dolayı literatürdeki kefirlerle kıyasla daha düşük değerli kurumadde içeriklerine ulaşılmıştır. Kefirleri zenginleştirme amaçlı kullanılan karotenoid ekstraktının miktarının artışına bağlı olarak L^* değerlerinin azaldığı, a^* ve b^* değerlerinin arttığı belirlenmiştir ($P < 0,05$). Karotenoid ekstraksiyonunda kullanılan havuçların b^* değeri (29,69±0,02) düşünüldüğünde en yüksek karotenoid ekstraktı içeren H3 kodlu örneğin havucun sarılık değerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak havuç renk pigmenti olan karoteoidlerin renginin kefirlerle de yansıdığı görülmektedir.

Tablo 2. Kefir örneklerinin bazı fizikokimyasal özellikleri

Özellikler	Kefir örnekleri*			
	Kontrol	H1	H2	H3
Kurumadde (%)	8,64±0,02 ^a	8,33±0,42 ^a	8,61±0,18 ^a	8,91±0,03 ^a
Protein (%)	2,89±0,53 ^a	3,96±0,23 ^a	3,69±0,23 ^a	3,85±0,75 ^a
Asitlik (%)	0,79±0,03 ^a	0,78±0,01 ^a	0,78±0,01 ^a	0,84±0,03 ^a
pH	4,59±0,07 ^a	4,60±0,07 ^a	4,57±0,09 ^a	4,51±0,07 ^a
<i>L</i> *	87,96±0,01 ^a	86,29±0,01 ^b	83,53±0,01 ^c	83,88±0,01 ^d
<i>a</i> *	-2,20±0,00 ^d	0,34±0,01 ^c	1,26±0,01 ^b	3,00±0,01 ^a
<i>b</i> *	6,19±0,00 ^d	12,91±0,01 ^c	20,43±0,01 ^b	26,09±0,00 ^a

*Tablo üzerinde bulunan değerler iki tekerrür ve iki paralelli analiz sonuçlarının ortalama ± standart sapma değerlerini ifade etmektedir. Çizelgede aynı sütun içerisindeki farklı harfler Tukey testi sonuçlarına göre gruplar arasındaki anlamlı farklılığı ($P < 0.05$) belirtmektedir.

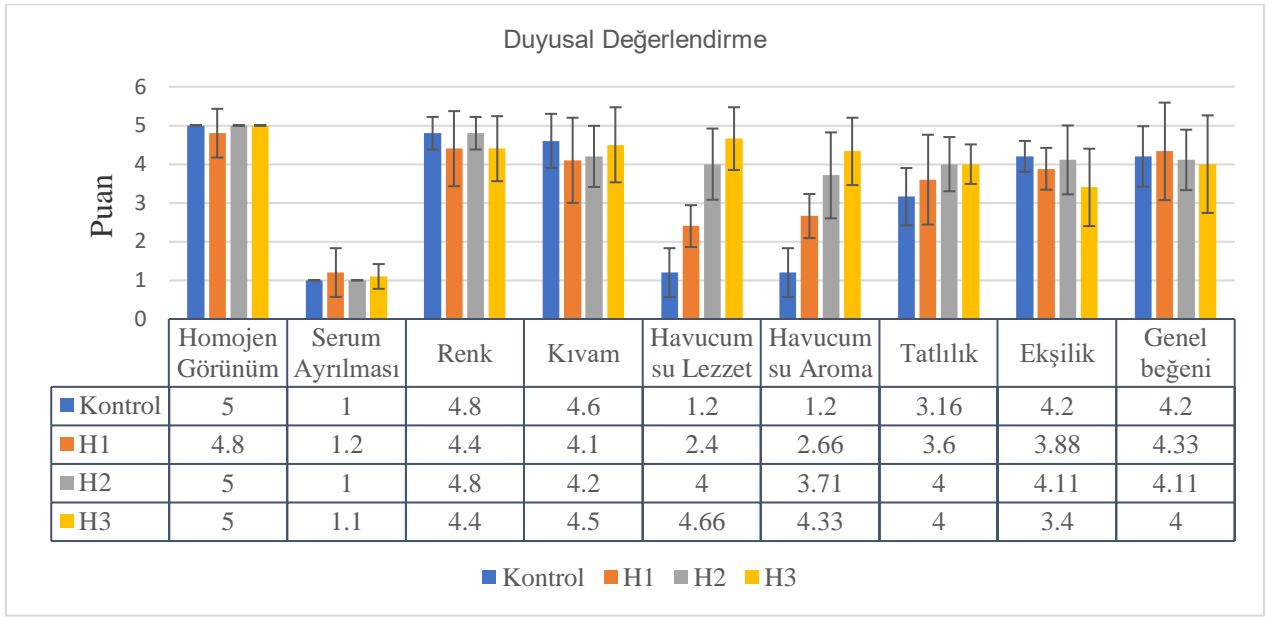
Kefir örneklerinin ve karotenoid ekstraktının β -karoten içerikleri Şekil 1’de gösterilmiştir. Buna göre en yüksek β -karoten içeriğine %0,5 karotenoid ekstraktı içeren H3 kodlu kefir örneğinde ulaşılmıştır. Diğer örneklerde ise eklenen karotenoid ekstraktı ile doğru orantılı olarak β -karoten miktarı değişmektedir. Karotenoid ekstraktında bulunan β -karoten miktarı 29,06 mg/mL iken, zenginleştirilmiş kefirlerde β -karoten miktarı 1,41-4,07 mg/100 mL olarak belirlenmiştir. Ekstraktın β -karoten içeriği göz önüne alındığında kefirlerde olması beklenen teorik değer 2,9-14,5 mg/100 mL olduğu, ancak kefirlerin üretimi sırasında maruz kaldıkları fermantasyon işlemi sırasında oluşan ürünlerin özellikle asit özellikli olanların veya bir başka yorum olarak fermantasyon sürecine katılan bakteri veya mantarların karotenoid maddeler üzerinde etkili olarak zenginleştirilmiş kefirlerin β -karoten miktarlarının beklenen değerden daha düşük çıkmasına neden olmuş olabileceği üzerinde durulmaktadır. Asitlerin karotenoid degradasyonu üzerine etkileri üzerine çok az çalışma bulunmakla birlikte, Brahm ve ark. (2020) alkol veya laktik asit fermantasyonunun karotenoid üzerindeki etkisinin matris ve fermantasyon koşullarına bağlı olarak değişebileceğini belirtmektedirler. Wang ve ark. (2012) karotenoidlerdeki çift bağların kimyasal ve enzimatik etkilere hassas olduklarını ve bazı mantar ve mayaların β -karoten’i aroma bileşiklerine bozundurma yeteneklerine sahip olduklarını işaret etmektedirler. Oloo ve ark. (2014) ise laktik asit fermantasyonu ile birlikte turuncu tatlı patateslerde β -karoten içeriğinin fermantasyon süresinin artması ile birlikte bir miktar azalma gösterdiğini belirlemişlerdir. Sonuç olarak, karotenoid ekstraktı β -karoten içeriği göz önüne alındığında kefir örneklerinde görülen β -karoten kaybının fermantasyonun etkisiyle gerçekleşebileceği düşünülmektedir.



Şekil 1. Kefir ve karotenoid ekstraktının β -karoten içerikleri

*Çizelge üzerinde bulunan değerler iki tekerrür ve iki paralelli analiz sonuçlarının ortalama \pm standart sapma değerlerini ifade etmektedir. Çizelgede aynı sütun içerisindeki farklı harfler Tukey testi sonuçlarına göre gruplar arasındaki anlamlı farklılığı ($P < 0.05$) belirtmektedir.

Turuncu havuç karotenoidlerinin kefirin duyuşal özellikleri üzerindeki etkileri Şekil 2’de gösterilmiştir. Kefirler homojen görünüm, serum ayrılması, renk, kıvam, havucumsu lezzet, havucumsu aroma, tatlılık, ekşilik ve genel beğeni açısından 5 puan üzerinden panelistlerce değerlendirilmiştir. Havucumsu lezzet ve havucumsu aroma dışındaki diğer tüm duyuşal parametreler açısından kefir örnekleri arasında anlamlı bir fark görülmemiştir ($P > 0.05$). Turuncu havuçtan ileri gelen havucumsu lezzet ve aromanın kefir örneklerine de yansıdığı ve kontrol örneğine göre daha çok tercih edildiği belirlenmiştir. Karagözlü, (2017) siyah ve yeşil çay infüzyonları ile zenginleştirdikleri kefirlerden %2 siyah çay infüzyonu içeren örneğin kontrol örneğine göre en yüksek beğeni puanını aldığını belirlemişlerdir. Setiyoningrum ve ark. (2019) zencefil ve tarçın ekstraktlarının kefirle eklenmesinin kontrol örneğine göre beğeniye azalttığını, Znamirowska ve ark. (2017) ise sarımsak kabuğu ekstraktının koyun sütü ile üretilen kefirlerin aromasını geliştirdiğini ifade etmişlerdir. Bengi ve ark. (2023) kefirle %0,150 ve %0,225 oranlarında propolis ekstraktı eklenmesinin kontrol içeceklerine benzer genel beğeni puanı aldığını bildirmişlerdir. Aktaş ve ark. (2023) inek ve manda sütleri ile ürettikleri konsantre kefirlerin duyuşal açıdan genel kabul edilebilirliğinin keçi ve koyun sütleri ile üretilenlere göre yüksek olduğunu belirlemişlerdir.



Şekil 2. Kefir örneklerinin duysal değerlendirme sonuçları*

*Şekil üzerinde bulunan değerler iki tekerrür ve iki paralelli analiz sonuçlarının ortalama \pm standart sapma değerlerini ifade etmektedir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Son zamanlarda kefir içeceğini zenginleştirmek için bitkisel kaynaklardan ve bunların ikincil metabolitlerinden faydalanılan çalışmalar artmaktadır. Bu kaynaklar içerdikleri renk maddeleri ve biyoaktif bileşikler sayesinde formülasyonuna eklenen ürünlerin hem daha sağlıklı bir hale gelmesini sağlamakta hem de duysal olarak kabul edilebilirliğini artırmaktadır. Bu çalışmada %0,1-0,5 oranlarında turuncu havuçtan elde edilen karotenoid ekstraktının kefire katılmasının ürünlerin kurumadde, protein, asitlik ve pH özellikleri üzerinde bir değişime neden olmazken, kefirlerin β -karoten içeriklerini artırdığı belirlenmiştir. Bununla birlikte turuncu havuçtan ileri gelen turuncu renk ve havuç tadının kefirlerle yansımalarının duysal değerlendirmeler sonucunda kontrol grubuna göre panelistlerce daha çok beğenildiği tespit edilmiştir. Turuncu havuç karotenoidleri ile zenginleştirilerek üretilen kefirlerin fonksiyonel süt ürünlerine iyi bir alternatif olabilecek nitelikte bir içecek olabileceği ve özellikle bu doğal renklendirilmiş kefirlerin çocukların daha fazla ilgisini çekebileceği düşünülmektedir. Bundan sonraki çalışmalarda bu durum göz önüne alınarak planlama yapılabilir.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Aiello, F., Restuccia, D., Spizzirri, U. G., Carullo, G., Leporini, M., ve Loizzo, M. R., (2020). Improving kefir bioactive properties by functional enrichment with plant and agro-food waste extracts. *Fermentation*, 6, 83. doi:10.3390/fermentation6030083.
- Aktaş, H., Aktaş, H. M., Ürkek, B., Şengül, M., ve Çetin, B., (2023). Evaluation of Spreadable Kefir Produced from Different Milks in Terms of Some Quality Criteria. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. doi:10.1007/s12602-023-10129-8.
- Arcott, S. A. ve Tanumihardjo, S. A., (2010). Carrots of many colors provide basic nutrition and bioavailable phytochemicals acting as a functional food. *Comprehensive Reviews In Food Science and Food Safety*, 9.
- Belyaev, A., Mosyagin, V., Ryzhkova, G., ve Shvets, O., (2021). Development of kefir from non-traditional raw materials enriched with blackberry products. *BIO Web of Conferences*, 32, 03001. doi: 10.1051/bioconf/20213203001.
- Bengi, S., Gursoy, O., Dal, H. Ö. G., ve Yılmaz, Y., (2023). Effect of propolis extract addition on some physicochemical, microbiological, and sensory properties of kefir drinks. *Food Science and Nutrition*, (11), 7407–7417. doi.org/10.1002/fsn3.3671.
- Brahm, P. M., Barba, F. J., Remize, F., Garcia, C., Fessard, A., Khaneghah, A. M., Santana, A. S., Lorenzo, J. M., Montesano, D., ve Martinez, A. J. M., (2020). The impact of fermentation processes on the production, retention and bioavailability of carotenoids: An overview. *Trends in Food Science & Technology*, (99), 389–401
- Cemeroğlu, B. S., (2013). *Gıda Analizleri*. Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bizim Büro Basımevi, 3. Baskı, Ankara.
- Elik, A., D. Yanık, D. K., ve Göğüş, F., (2020). Microwave-assisted extraction of carotenoids from carrot juice processing waste using flaxseed oil as a solvent. *LWT - Food Science and Technology*, 123, 109100. doi: 10.1016/j.lwt.2020.109100.
- Goncu, B., Celikel, A., Guler-akin, M. B., ve Akin, M. S., (2017). Some properties of kefir enriched with apple and lemon fiber. *Mljekarstvo*, 67(3), 208-216. doi: 10.15567/mljekarstvo.2017.0305.
- Gursoy, O., Kocatürk, K., Dal, H. Ö. G., Yakalı, H. N., ve Yılmaz, Y., (2020). Physicochemical and rheological properties of commercial kefir drinks. *Akademik Gıda*, 18(4), 375–381. doi: 10.24323/akademik-gida.850881.
- Guzel-Seydim, Z. B., Kok-Tas, T., Greene, A. K., ve Seydim, A. C., (2011). Review : Functional properties of kefir. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1(3), 261-268. doi: 10.1080/10408390903579029.
- Harmankaya, S., Gülbaz, G., ve Kamber, U., (2019). Microbiological, chemical and sensory characteristics of kefir prepared with various fruit additives. *Van Veterinary Journal*, 30(1), 13–18.
- Heinonen, M. I., (1990). Carotenoids and provitamin A activity of carrot (*Daucus carota* L.) cultivars. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 38, 609–612.
- Kabakçı, S. A., Türkyılmaz, M., ve Özkan, M., (2020). Changes in the quality of kefir fortified with anthocyanin-rich juices during storage. *Food Chemistry*, 326, 126977. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.126977.
- Karagözlü, C., Ünal, G., Akalın, A. S., Akan, E., ve Kınık, Ö., (2017). The effects of black and green tea on antioxidant activity and sensory characteristics of kefir. *Agro Food Industry and Hi Tech*, 28(2).

- Kasim, R., ve Kasim, M. U., (2019). Farklı renklerin gücü " havuç". *International Marmara Sciences Congress*.
- Kim, D., Jeong, D., Kim, H., ve Seo, K., (2019). Modern perspectives on the health benefits of kefir in next generation sequencing era : Improvement of the host gut microbiota. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(11), 1782-1793. doi: 10.1080/10408398.2018.1428168.
- Mestry, A. P., Mujumdar, A. S., ve Thorat, B. N., (2011). Optimization of spray drying of an innovative functional food : fermented mixed juice of carrot and watermelon. *Drying Technology*, 29(10), 1121-1131. doi: 10.1080/07373937.2011.566968.
- Nicolle, C., Simon, G., Rock, E., Amouroux, P., ve Remesy, C., (2004). Genetic variability influences carotenoid, vitamin, phenolic, and mineral content in white, yellow, purple, orange, and dark-orange carrot cultivars. *Journal of American Society Horticulture and Science*, 129(4), 523–529.
- Say, D., Tangüler, H., ve Güzeler, N., (2019). Çilek ve kayısı aromalı kefirlerin depolanması sırasında mikrobiyolojik özelliklerindeki değişim. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7(2), 306–311. doi: 10.21541/apjes.474916.
- Setiyoningrum, F., Priadi, G., ve Afiati, F., (2019). Supplementation of ginger and cinnamon extract into goat milk kefir. *AIP Conference Proceedings*, 2175, 020069. <https://doi.org/10.1063/1.5134633>.
- Ürkek, B., ve Taş, A., (2021). Üniversite Öğrencilerinin Fermente Süt Ürünleri Tüketim Alışkanlıklarının İstatistiksel Analizi. *Aydın Gastronomy*, 5(2), 91-103.
- Znamirowska, A., Szajnar, K., Rozek, P., Kalicka, D., Kuzniar, P., Hanus, P., Kotula, K., Obirek, M., ve Kluz, M., (2017). Effect of addition of wild garlic (*Allium Ursinum*) on the quality of kefir from sheep's milk. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 16(2), 209–215.
- Wang, S. L., Jiao, L. X., Li, Y. H., ve Fan, M. T., (2012). Degradation of β -Carotene To Volatile Compounds In an Aqueous Model System To Simulate The Production of Sea Buckthorn Wine. *International Journal of Food Properties*, (15), 1381–1393.

Radyal Baz Fonksiyonu (RBF) kullanan Ağsız (Meshless) Çözüm Yöntemlerinde Şekil Parametresi ve Merkez Nokta Sayısının Çözümüne Etkisi

Hüseyin YILDIZ¹, Hasan Ömür ÖZER^{2*}, Birkan DURAK³, Erol UZAL⁴

Öz

Mühendislik ve Fizik problemlerinin incelenmesinde adi diferansiyel denklem (ADD) ve kısmi diferansiyel denklem (KDD)'ler önemli bir yere sahiptir. Fiziksel olaylar, belirli sınır şartları sağlayan diferansiyel denklem sistemleri ile matematiksel olarak modellenenir. Genellikle denklem sisteminin analitik çözümünü bulmak mümkün olmaz. Bu nedenle çeşitli sayısal yöntemler geliştirilmiştir. Günümüzde en çok kullanılan sayısal çözüm yöntemlerinden ikisi Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ve Sonlu Farklar Yöntemi (SFY)'dir. Bu yöntemlerde çözüm alanı ağ adı verilen küçük parçalara (bölgelere) ayrılarak hesaplamalar yapılır. Ağ örme işlemi oldukça karmaşık ve uzun zaman alan bir işlemdir. Kırılma mekaniği ve hareketli sistemlerin modellenmesinde her hesaplama sonrası ağın yenilenmesi gereklidir. Araştırmacılar, özellikle 20. yüzyılın sonlarında bu zorlukların üstesinden gelmek için ağsız çözüm yöntemleri geliştirdiler. Çözüm alanına düzenli veya düzensiz örnekleme noktaları yerleştiren ağsız çözüm teknikleri için uygun bir temel fonksiyon ailesi de gereklidir. Önerilen baz fonksiyon ailesi, diferansiyel denklem sistemini ve sınır şartlarını sağlayacak şekil katsayıları ile temsil edilir. Bu çalışmada radyal baz fonksiyon (RBF) kullanan ağsız çözüm yöntemi bir boyutlu ve iki boyutlu ısı geçiş problemlerine uygulanmıştır. İncelenen problemlerde merkez noktaların ve şekil katsayısının benzetim sonuçlarına etkisi incelenmiştir. Bulgular, kontrol (kollokasyon) noktalarının sayısının doğrudan çözümün kararlılığıyla ilişkili olduğunu ve kontrol nokta sayısının merkez nokta sayısından fazla olduğunda kararlılığa katkıda bulunduğunu göstermektedir. Şekil yapısının uygun çözümü için merkez nokta değişikliklerinin büyüklüğünde bir artışın gerekli olduğu gözlemlenmiştir. Şekil katsayısı arttıkça doğru bir çözüme ulaşmak için merkez nokta sayısının ve yineleme sayısının da artırılması gerektiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kollokasyon yöntemi, Radyal baz fonksiyon, Sayısal çözüm, Şekil fonksiyonu.

Effect of the Shape Parameter and the Number of Center Points on the Solution in Meshless Solution Methods Using Radial Basis Function (RBF)

Abstract

Ordinary differential equations (ODE) and partial differential equations (PDE) have an important role in solving engineering and physics problems. Physical phenomena may be represented mathematically using differential equation systems under certain boundary conditions. However, it is usually not possible to find an analytical solution to the resulting system of equations. Therefore, various numerical methods have been developed. Currently, the Finite Element Method (FEM) and the Finite Difference Method (FED) are the most widely used numerical solution techniques. In these methodologies, computations are carried out by dividing the solution space into small pieces called mesh. This procedure is a highly complex and time-consuming process. Due to coupled calculation points within the mesh, it is necessary to update the mesh after each calculation when modelling fracture mechanics and dynamic systems. Researchers developed meshless solution methods to address these challenges, especially in the late 20th century. For meshless solution techniques that place regular or irregular sampling points in the solution domain, a suitable family of basis functions is also required. This family is expressed by the shape coefficients to satisfy the system of differential equations and boundary conditions. By considering one and two dimensional heat transfer problems, this study investigated the effect of center points and shape coefficients on the simulation results in the meshless solution method using Radial Basis Functions (RBF). The results show that the number of control (collocation) points is directly related to the stability of the solution and contributes to stability when the number of control points is greater than the number of center points. It has been observed that an increase in the magnitude of the center point changes is necessary for the optimal solution of the shape structure. The results of this study demonstrate that as the shape coefficient increases, the number of centre points and the number of iterations must also be increased to achieve an accurate solution.

Keywords: Collocation method, Radial basis function, Numerical solution, Shape function.

¹İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, İstanbul, Türkiye, huseyin.yildiz@iuc.edu.tr ezul@iuc.edu.tr

²İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, İstanbul, Türkiye, hasanomur.ozer@iuc.edu.tr

³İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Teknik Bilimler MYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, İstanbul, Türkiye, birkand@iuc.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 18.03.2024

Kabul/Accepted: 14.08.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Giriş

Mühendislik alanındaki tasarım ve optimizasyon uygulamalarında genellikle kısmi diferansiyel denklem (KDD) sistemlerinin çözümüne ihtiyaç duyulur. Problemlerin analitik çözümlerinin yapılması hızlı ve kesin sonuca ulaşmayı sağlar. Her ne kadar basit problemler için analitik çözümler mümkün olsa da mühendislikte karşılaşılan pek çok problemin karmaşık geometrisi veya sınır şartları nedeni ile analitik çözümünün yapılması mümkün olmaz (Gingold ve Monaghan, 1977). Bu durumda belirli sınır şartlarını ve problemi yöneten kısmi diferansiyel denklem sistemini sağlayan sayısal çözüm bulunmaya çalışılır.

Sayısal metotlarda ilk olarak problemin geometrik modeli oluşturulur, ardından bilgisayar ortamında hesaplamalar yapılır (Ghahfarokhi ve ark., 2022). Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) (Mugglestone ve ark., 1999; Chong ve ark., 2019; Staton ve ark., 2001), Sonlu hacimler yöntemi (SHY) (Fallah ve ark., 2000) ve sonlu farklar yöntemi (SFY) mühendislikte en çok kullanılan sayısal analiz yöntemleridir (Pickering ve ark., 2001; Pandey ve ark., 2022; Papini ve Gerada, 2014). Bu yöntemlerin ısı ve kütle transferi, akışkanlar mekaniği, hidrodinamik ve yapı mekaniği gibi alanlardaki iki ve üç boyutlu hesaplamaların yapılmasında, sınır değer ve başlangıç değer problemlerinin tümünde pek çok uygulama ile karşılaşılır. Belirtilen yöntemlerin ortak yönlerinin başında, sistemin çözümünü yapmak üzere bir ağ yapısına (mesh) ihtiyaç duymaları gelmektedir. SEY ve SHY yöntemlerinde, her bir eleman çoğunlukla doğrusal bazen de yüksek dereceli fonksiyonlar ile temsil edilir. Problemi yöneten diferansiyel denklem sistemi ve probleme ait sınır şartları, ağ üzerinde yer alan noktalar (nod) üzerinde uygulanarak, problemin çözümü cebirsel bir denklem sistemine indirgenir. Elde edilen cebirsel denklem sistemi çoğunlukla matris formuna getirilerek çözülebilir. Denklemlerin çözümünde genellikle Rayleigh–Ritz veya Galerkin yöntemleri tercih edilir (Zienkiewicz ve ark., 2005; Jin, 1993). Ancak karmaşık yapıya sahip sistemlerde doğrusal olmayan (non-linear) denklemlerle karşılaşılabilir. Bu durumda her bir elemanı ifade eden katsayılar, iteratif yöntemler kullanılarak bulunur. SFY’nde de benzer şekilde bir ağ yapısı oluşturulur. SEY’nden farklı olarak çözümün elde edilmesi için doğrudan fonksiyonlar kullanmak yerine, her bir eleman için özel fonksiyonlar önerilir. Sonlu elemanlar teorisinden yararlanılarak sınır şartları ve diferansiyel denklem sistemi eleman fonksiyonları kullanılarak nodlar üzerinde uygulanır. Sonlu farklar teorisinde fonksiyonun türevleri, önceki veya sonraki noktaların değerlerinin kombinasyonu olarak ifade edilir. Her bir nokta için sayısal hata (kalan veya hatanın integrali) sıfır olacak şekilde diferansiyel denklemler çözülür (Çengel ve Ghajar, 2020). Bu yöntemlerin en büyük avantajı karmaşık geometriye sahip sistemlerde dahi çözüm ağı oluşturarak çözüm elde edilmesini sağlamalarıdır. Ancak, tasarım sürecine ihtiyaç duymaları, hesaplama yükü ve hesaplama süresi açısından oldukça maliyetli olmaları en büyük dezavantajlarıdır (Boglietti ve ark., 2009). Bunun

yanında ağ elemanlarının sürekli olması nedeni ile çatlak analizi ve kırılma analizi gibi süreksizlikler içeren problemlerde büyük zorluklar ile karşılaşılır (Chen ve ark., 2004).

Özgün yazılımların oluşturulması ileri düzey programlama bilgisi gerektirdiğinden, genellikle pahalı paket programlar olarak ticari kuruluşlar tarafından kullanıcılara sunulurlar. Bu nedenle yüksek maliyetlidirler. Araştırmacılar SEY ve SFY metotlarının zorluklarından kurtulmak için yeni metotlar üzerine çalışmaktadır. Son yıllarda ön plana çıkan ağsız (meshless) çözüm yöntemleri en dikkat çekici araştırma konusu haline gelmiştir. Ağsız yöntemler, problemin çözümü için karmaşık bir ağ oluşturmaya ihtiyaç duymaz. Çözüm bölgesinde periyodik veya keyfi seçilen çözüm noktaları üzerinden hesaplama yapılmasına imkan sağlar. Böylece çözüm belirli sınır veya başlangıç şartları altında kısmi diferansiyel denklem sisteminin ara noktalarda ve sınır bölgelerinde sağlatılmasına indirgenir. Sonlu elemanlar ve sonlu farklar gibi yöntemlerin aksine ağsız yöntemlerde, çözüm ağının getirdiği kısıtlar ortadan kaldırılabilir. Ağsız yöntemler, SEY ve SHY’inde olduğu gibi birbirine bağlı nodlardan oluşan bir ağa gereksinim duymaksızın, keyfi olarak dağılmış noktalar üzerinden hesaplamaların yapılmasına izin verirler (Wang ve Qin, 2020). Bu durum SEY’inde eleman şekillerinin bozulmasından kaynaklanan hataların ağsız yöntemlerde ortada kalkmasını sağlar.

Ağsız yöntemler, ilk olarak 1970’li yıllarda parçacık hidrodinamiği ve astrofizik (Gingold ve Monaghan, 1977) problemlerinin çözümlerinde kullanılmaya başlanılmıştır. Daha sonra akışkanlar dinamiği problemlerinde kullanılmıştır (Nayroles ve ark., 1992). (Libersky ve ark., 1993) yöntemi katı mekaniğine uygulamışlardır. Ancak katı mekaniği problemlerinde sınır bölgelerinde hassasiyet eksikliği, gerilme değerlerinin ise kararlı olmadığını tespit etmişlerdir. 1990’larda Galerkin yöntemine dayalı yeni bir ağsız yöntemler sınıfı ortaya çıkmıştır. Elemansız Galerkin yöntemleri (EFG), hareketli en küçük kareler yaklaşımıyla kısmi diferansiyel denklemleri çözmeye yönelik geliştirilen en gelişmiş yöntemlerdir. EFG yöntemlerinde düğüm verilerine gereksinim vardır, bu verilerin dışında hiçbir eleman bağlantısına ihtiyaç duyulmaz (Belytschko ve ark., 1994).

(Nayroles ve ark., 1992) dağınık eleman yöntemi (DEM) olarak adlandırdıkları yöntemi, kısmi diferansiyel denklemlerin Galerkin çözümünde kullandılar. Geliştirilmekte olan farklı yöntemler ile birlikte ağsız yöntemler çeşitli alanlarda kullanılmaya devam edildi.

(Cao ve ark., 2008) iki boyutlu bir matematiksel model üzerinde Stokes sürüklenme kuvvetini içeren elektrotermal akışta, birbirine geçmiş elektrotlara sahip mikro kanallarda parçacıklara uygulanan kuvvetleri analiz etmede ağsız yöntemlerden faydalanmıştır. (Stach, 2014) malzemelerin moleküler düzeydeki kırılma problemlerinin incelenmesinde ağsız yöntemleri konusunda araştırmalar yapmıştır. Bu konudaki uygulamasını ortopedik implantların kırılma süreçlerinin modellenmesinde yapmıştır. (Falzon ve Muthu, 2018) heterojen malzemelerdeki çatlakların yayılmasının modellenmesinin sonlu elemanlar metoduyla çözülmesinde karşılaşılan zorluklar nedeniyle bu konuda avantaj sağlayan ağsız yöntemlerden biri olan EFG’yi uygulamıştır. (Wang ve

Qin, 2019) tabanı elastik olan veya olmayan ince plaka bükme problemlerinin homojen ve özel çözümlerini bulmak için ağsız yöntemleri kullanmıştır. Söz konusu problemlerinde sayısal çözümlerinin analitik çözümlere yakınsaması yöntemin faydasını göstermektedir. (He ve ark., 2020) düzlem problemlerinin çözümünde kullanılmak üzere sinir ağlarından yardım alan ağsız bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemin, nesnelerin interneti, giyilebilir teknolojileri içeren problemlerin çözümünde kullanılacağı öngörülmektedir. (Li ve ark., 2021) tasarım ve imalat süreçlerinde çok önemli olan plakada ısı transferi modellenmesi probleminde ağsız yöntemleri kullanmışlardır. Çalışmada iki boyutlu ısı iletimi problemi düzleştirilmiş ağsız parçacık hidrodinamiği yöntemi ile çözülmüştür. (Narimani ve Dehghan, 2022) kanser immünoterapisinde önemli bir role sahip olabilecek bir matematiksel modelin simülasyonunda ağsız yöntemleri kullanmışlardır. Geliştirmiş oldukları sayısal yöntemin, klasik sonlu elemanlar yöntemlerinden üstünlüğü alınan sonuçlar ile doğrulanmıştır. (Zarin, 2022) kısmi diferansiyel denklemler kullanarak hareketli bireylerde hastalıkların yayılmasını yakalamak için yeni bir matematiksel model sunmaktadır. Söz konusu modelde ağsız yöntemler kullanılarak, koronavirüsün (COVID-19) bulaşması konusunda matematiksel bir epidemiyolojik model elde edilmiştir. (Zhong ve ark., 2023) termal yükleri ve aerodinamik etkileri dikkate alınarak süpersonik hava akışındaki plakaların titreşim tepkisini analiz etmek için etkili bir yöntemi ağsız yöntemlerden faydalanarak ortaya koymuştur.

Ağsız yöntemler, SEY ve SHY gibi sayısal çözüm metodlarına nazaran günümüzde yeni geliştirilmekte olan bir yöntem sınıfıdır. Son yıllarda radyal baz fonksiyon (RBF) kullanımı ile birlikte mühendislik problemlerinin çözümünün yanı sıra yapay sinir ağı modellerin geliştirilmesinde de önemli bir role sahiptir. Literatürde farklı fizik problemleri için çeşitli ağsız yöntem çözümleri ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar ağsız yöntemlerde şekil fonksiyonunun önemini açıkça vurgulamıştır (Pekediş ve Yıldız, 2010).

Çalışmamızda, RBF kullanan kollokasyon temelli ağsız çözüm yönteminin, bir boyutlu ve iki boyutlu ısı transferi probleminin çözümü, şekil parametresi ve merkez nokta sayılarının çözüme etkisi ele alınmıştır. Makalenin birinci bölümünde mevcut çalışmalar ve sayısal yöntemlerin tarihçesine değinilmiştir. İkinci bölümünde, kollokasyon yöntemi, radyal baz fonksiyonlar ve ısı problemlerinin temel denklemleri açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, bir ve iki boyutlu ısı geçiş problemleri için RBF kullanan kollokasyon yöntemi çözümleri yapılarak farklı şekil parametresi ve merkez nokta sayıları için sonuçlar elde edilmiştir. Dördüncü ve son bölümde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Çalışmada Gauss RBF, Multi-kuadrik RBF ve Ters kuadrik RBF için şekil ve merkez nokta parametreleri farklı değerlerde hesaplanarak kabul edilebilir çözüm aralığını oluşturan parametre değerleri elde edilmiştir. Çalışmada, iki boyutlu ısı geçiş problemi için Gauss RBF'nin diğer metodlara göre daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir. Radyal baz fonksiyonu şekil parametresi, merkez nokta sayısı ve kollokasyon nokta sayılarının farklı değerlerde çözümleri yapılmış ve merkez

nokta sayısı ile kollokasyon nokta sayısı eşit alındığında çözümün kararsız olduğu, kollokasyon nokta sayısının merkez nokta sayısından fazla olması durumunda çözüm bölgesinin kararlı olduğu gösterilerek literatüre katkı sağlanmıştır.

2. Yöntem

2.1. Kollokasyon yöntemi

Kollokasyon metodu sayısal yöntem formülasyonlarından güçlü-form yöntemleri sınıfındadır. Yöntem ağırlıklı kalanlar yöntemlerinden biri olup çeşitli mühendislik problemlerinin çözümü için kullanılan bir metottur. Kısmi ve adi diferansiyel denklemler, integro diferansiyel denklemlerin çözümünde ve sayısal verilerin yorumlanmasında kullanılmaktadır (Durak, 2020; Karakoç, 2018; Aydın, 2022). Yöntem, çözümün bazı katsayılarla çarpılmış olan sonlu sayıdaki polinom veya fonksiyonun toplamı olarak ifade edilmesi esasına dayanır.

Denklem (1), Ω çözüm bölgesinde tanımlı bir adi diferansiyel denklem (ADD) sistemi L ; diferansiyel operatör, $f(x)$; kaynak terim ve u ; diferansiyel denklemin çözüm fonksiyonu olmak üzere

$$L(u) = f(x) \quad (1)$$

şeklinde gösterilebilir. Bu denklem sisteminin \hat{u} ; yaklaşık çözümü

$$u(x) \approx \hat{u}(x) = u_0(x) + \sum_{i=1}^n C_i \Phi_i(x) \quad (2)$$

olarak yazılabilir. Burada, u_0 ; problemin sınır şartlarını sağlayan keyfi bir fonksiyon iken ϕ_i ; diferansiyel denklemi sağlamak üzere önerilen baz fonksiyon ailesidir (Chakraverty ve ark., 2019). Baz fonksiyonun türü konusunda herhangi bir sınırlama bulunmaz. Genellikle yüksek kararlılığı nedeni ile Radyal baz fonksiyon (RBF) olarak seçilir.

Çoğunlukla sınır şartları ve çözüm ailesi birbirinden ayrılmaz ve u_0 sıfır olarak kabul edilir. Bazı durumlarda u_0 nin sıfırdan farklı alınması çözümü kolaylaştırır. Çalışmada $u_0(x) = 0$ alınmıştır. \hat{u} ifadesi Denklem (1)' de yerine yazılarak

$$R(x) = f(x) - L[\hat{u}(x)] = 0 \quad (3)$$

elde edilir. Denklemdeki $R(x)$ kalan (residual) olarak tanımlanır. Denklem (2)'deki polinom ailesi keyfi olarak seçilebilir. Örneğin üstel, trigonometrik, polinom veya bağımsız değişkeni içeren herhangi bir formda olabilir. Kalandan yararlanarak kurulan denklem sistemi çözülerek yaklaşık çözüme ulaşılır. Baz fonksiyon sayısı n olan bir boyutlu bir sistem için, en az iki adet sınır şartı ve çözüm bölgesi üzerinde $n - 2$ adet kollokasyon noktası gerekir. Eşitlik 3, her bir kontrol noktası için uygulandığında Eşitlik 4 ile verilen denklem sistemi elde edilir.

$$[A]_{n \times n} [C]_{n \times 1} = [B]_{n \times 1} \quad (4)$$

Burada $[A]$ katsayılar matrisini, $[B]$ sonuç vektörü ve $[C]$ bilinmeyen katsayıları ifade etmektedir. Homojen bir denklem sisteminde $[B]$ matrisinde sınır değerler dışında kalan terimler 0'dır. Ancak homojen olmayan sistemlerde homojenliği bozan kaynak terimlerden kaynaklı ek terimler gelir.

2.2. Radyal baz fonksiyon (RBF)

Kollokasyon yöntemi teorik olarak problemin çözümü için herhangi bir sınır koymaz. Baz fonksiyonlar keyfi olarak seçilebilir. Ancak, uygulamada problemin geometrisine ve sınır şartlarına uygun baz fonksiyonlar seçilmez ise, hesaplama hataları nedeni ile çözüme ulaşamayabilir. Örnek olarak üstel bir baz fonksiyon seçilir ise yüksek dereceli fonksiyonların çözümde ağırlığı düşük dereceden polinomlara göre büyük olur ve en küçük değişimlerde sistem ıraksar. Yöntemde karşılaşılan başka bir zorluk, seçilen baz fonksiyonların çözüm bölgesinin bazı noktaları için süreksizliğe sahip olmaları durumudur. Bu duruma çözüm olarak araştırmacılar konum bazlı fonksiyonların önerilebileceğini ortaya koymuştur. Örneğin kullanılan Radyal baz fonksiyonları (RBF) belirli merkez noktasında tanımlı olan ve merkezden belli bir mesafede olan tüm noktalar için aynı değeri alan, merkezden uzaklaştıkça küçülen kararlı fonksiyonlardır. Çözüm bölgesi içerisinde süreklidir ve her dereceden türevi alınabilir fonksiyonlar olmaları nedeni ile son yıllarda öne çıkmıştır (Altınkaynak, 2020; Fasshauer ve McCourt, 2015). Literatürde RBF fonksiyonlarının diferansiyel denklem sistemlerinin çözümünde kullanımı Kansa'nın çalışmaları ile başlamıştır (Kansa, 1986; Kansa, 1990). İlk çalışmada hidrodinamik problemlerini çözmek için Multiküadratik baz fonksiyon kullanılmıştır (Kansa, 1986). Daha sonra ısı transferi, yapısal analiz, mekanik problemler ve optik olmak üzere mühendisliğin birçok alanına uygulanmıştır (Tanbay, 2019).

Günümüzde kullanılan bazı RBF fonksiyonları Tablo 1 ile verilmiştir (Fornberg ve Flyer, 2015).

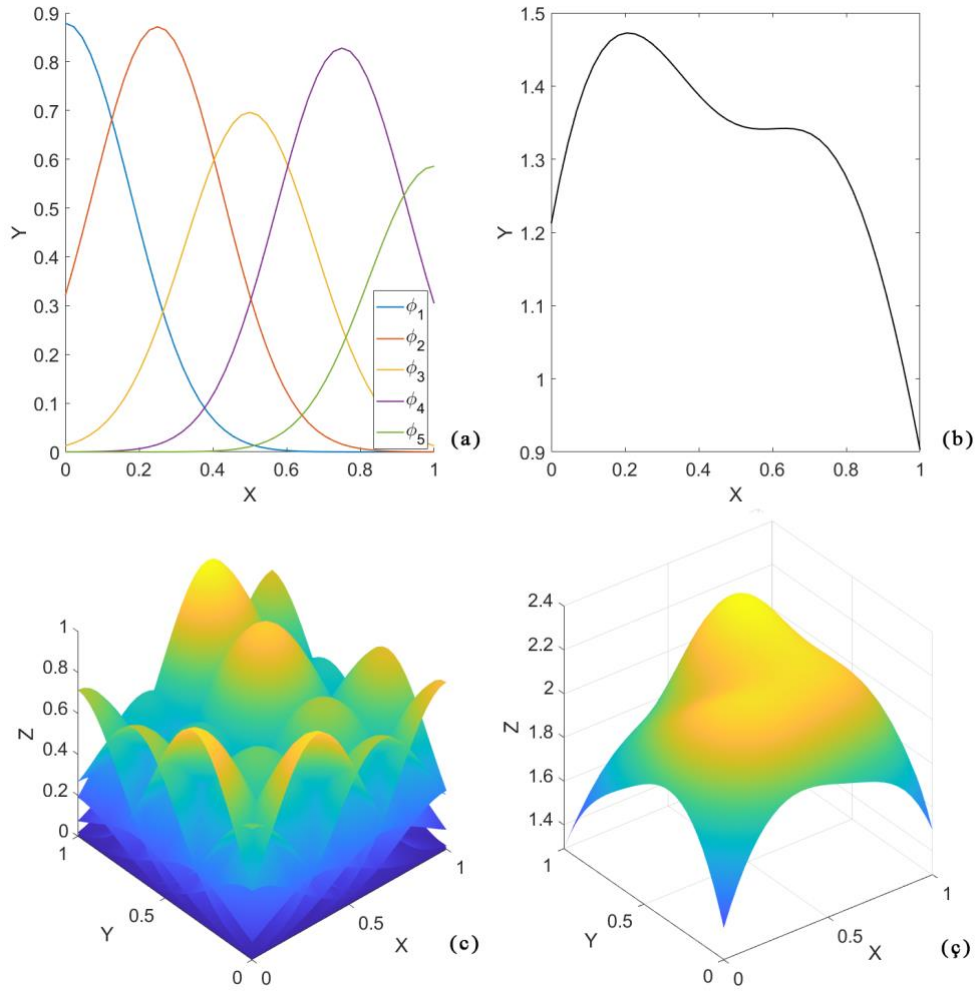
Tablo 1. Bazı RBF fonksiyonu örnekleri.

İsim	Formül	Kısıt
Gauss	$\phi_i(r_i) = e^{-(\varepsilon r_i)^2}$	$\varepsilon > 0$
Genel Multi-kuadrik	$\phi_i(r_i) = (1 + (\varepsilon r_i)^2)^\beta$	$\varepsilon > 0, \beta \in \mathbb{R}$
Multikuadrik (Multiquadric)	$\phi_i(r_i) = \sqrt{1 + (\varepsilon r_i)^2}$	$\varepsilon > 0$
Ters kuadrik (Inverse quadric)	$\phi_i(r_i) = \frac{1}{1 + (\varepsilon r_i)^2}$	$\varepsilon > 0$
Ters multikuadrik (Inverse multiquadric)	$\phi_i(r_i) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\varepsilon r_i)^2}}$	$\varepsilon > 0$
Sinüs-RBF	$\phi_i(r_i) = \begin{cases} \frac{\sin(\varepsilon r_i)}{\varepsilon r_i}, & r_i > 0 \\ 1, & r_i = 0 \end{cases}$	$\varepsilon > 0$

RBF fonksiyonları merkez noktasından uzaklaştıkça etkisi hızla azalacak fonksiyonlar olarak seçilir. Burada ε şekil katsayısı olarak bilinir ve fonksiyonun etki alanının bir göstergesidir. r_i fonksiyonun merkez noktasından uzaklığı ifade eder ve üç boyutlu daimi rejimde bulunan bir sistem için Eşitlik (5) ile gösterilir.

$$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (5)$$

Burada x_i, y_i, z_i merkez nokta olarak seçilen $P(x_i, y_i, z_i)$ noktasının koordinatlarını ifade etmektedir. ε , RBF fonksiyonları için ortak bir parametredir. Şekil 1 ile bir boyutlu ve iki boyutlu RBF fonksiyon yapıları örnek olarak verilmiştir. Yaklaşık çözüm, farklı noktalarda seçilen baz fonksiyonların toplamı olarak temsil edilir. Genellikle ε büyüdükçe fonksiyonun etki alanı küçülür. ε 'nun farklı değerleri için diferansiyel denklem sistemlerinde çözüm bulmak mümkündür. Ancak her ε değeri için çözüm elde etmek mümkün olmaz. Bu durum ε parametresinin seçiminin RBF baz fonksiyonu kullanan sistemlerde ne kadar önemli olduğunun bir göstergesidir. Dolayısı ile ε 'un optimize edilmesi önemli bir araştırma konusudur (Altınkaynak, 2020; Fornberg ve Flyer, 2005; Fasshauer, 2007).



Şekil 1. Bir boyutlu homojen dağılmış keyfi RBF formları
 (a). Bir boyutlu RBF'lerin çözüm alanı (b). Bir boyutlu RBF toplamı
 (c). İki boyutlu homojen dağılmış keyfi RBF formları (d). İki boyutlu RBF toplamı

2.3. Kartezyen koordinat sisteminde ısı transferinin temel denklemleri

Isı transferi konusu mühendislerin en sık karşılaştığı temel problemlerdendir. Homojen, izotropik (özellikleri her yönde eşit) ve zamana bağlı üç boyutlu bir sistemde ısı transferi olaylarını yöneten denklem sistemi Denklem (6) ile verilmiştir (Hahn ve Özışık, 2012).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{k} q = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

Denklemden, T ; sıcaklık, k ; ısı iletim katsayısı (W/(mK)), α ; ısı yayılım katsayısı (m²/s), q ; ısı üretimi (W/m³) olarak tanımlanmaktadır. Kalıcı hal rejimi problemlerinde, zamana bağlılık olmamasından dolayı, denklemin sağ tarafı hesaplamalara dahil edilmez ve Denklem (7) ile ifade edilir.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{k} q = 0 \quad (7)$$

Sınır şartları genellikle sabit sıcaklık ve sınırdaki akışkan etkileşimi (taşınım) olarak karşımıza çıkar. Işınım miktarı genellikle ihmal edilebilecek kadar azdır. Ancak bazı özel durumlarda ışınım sınır şartı da kullanılır. Genellikle sistem içerisinde belirli noktadan veya bölgeden ısı üretimi olur.

Isı problemlerinde en sık karşılaşılan sınır şartları şöyledir;

Sabit sıcaklık sınır şartı;

$$T(x, y, z) = T_0, \quad (8a)$$

\vec{n} birim normal olmak üzere, ısı taşınım sınır şartı;

$$-k \frac{\partial T(x, y, z)}{\partial \vec{n}} = h(T(x, y, z) - T_\infty), \quad (8b)$$

burada, T_0 ; sınırın sabit sıcaklığı, h ; yüzey ile akışkan arasında tanımlı ısı taşınım katsayısı $W/(m^2K)$, ve T_∞ ; dış ortam sıcaklığıdır.

Bir boyutlu bir sistem için Denklem (7) sadeleşerek Denklem (10)'a indirgenir.

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{1}{k} q = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{1}{k} q = 0 \quad (10)$$

Eşitlik 9 ve Eşitlik 10, bir ve iki boyutlu, zamandan bağımsız sistemlerin ısı geçişini yöneten diferansiyel denklemlerdir. Sıcaklık dağılımını veren fonksiyonu elde etmek için Eşitlik 9 ve Eşitlik 10 uygun sınır şartları altında analitik olarak çözülür (Çengel ve Ghajar, 2020).

Her iki ucunda sabit sıcaklık ($T(0) = T_0$ ve $T(L) = T_L$) olan sistem için analitik çözüm;

$$T(x) = \frac{T_L - T_0}{L} x + T_0 \quad (11)$$

Bir ucu sabit sıcaklık ($T(0) = T_0$) ve diğer ucu taşınım ($-\frac{dT}{dx} = h(T_L - T_\infty)$) olan bir sistem için analitik çözüm

$$T(x) = -\frac{h(T_L - T_0)}{(k + Lh)}x + T_0 \quad (12)$$

şeklindedir.

İçerisinde $q(x) = q_0 \sin(x\pi)$ formunda ısı dağılımı olan, bir ucu sabit sıcaklık ($T(0) = T_0$) ve diğer ucu taşınım ($-\frac{dT}{dx} = h(T_L - T_\infty)$) sınır şartı ile ısı denkleminin analitik çözümü;

$$T(x) = \frac{q_0 \sin(L\pi x)}{k\pi^2} - \frac{hq_0 \sin(L\pi) + k\pi q_0 \cos(L\pi) + hk\pi^2(T_0 - T_\infty)}{k\pi^2(k + Lh)}x + T_0 \quad (13)$$

eşitliği ile verilmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Bir Boyutlu Isı Geçişi

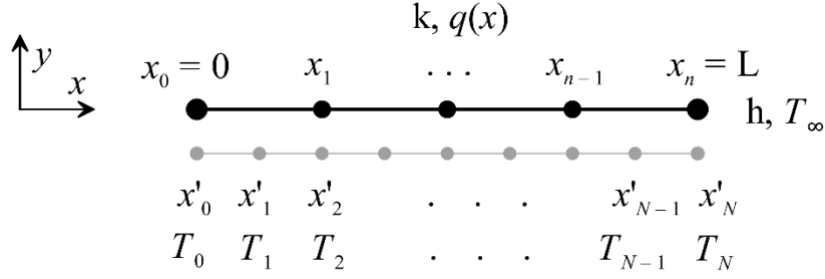
Mühendislik problemlerinde çeşitli simetriler gösteren (düzlemsel, silindirik, küresel vb.) geometriler bir boyutlu ısı geçişi problemi olarak ele alınabilir. Şekil 2’de bir boyutlu homojen ve izotropik bir sistemin n elemanlı nokta ayrıştırması görülmektedir. Malzeme ısı iletim katsayısı $k = 273 (W/mK)$, $x_0 = 0$ ’da sabit sıcaklık ($T_0 = 20^\circ C$) sınır şartı, $x_n = L = 1$ ’de akışkan etkileşimi sınır şartı bulunmaktadır.

($h = 17 (W/m^2K)$, $T_\infty = 100^\circ C$). Isı üretimi konumun bir fonksiyonu olarak alınmıştır (Eşitlik 14).

$$q = q_0 \sin(x\pi) \quad , \quad q_0 = 10000 W/m^3 \quad (14)$$

Kollokasyon metodunun uygulandığı birçok araştırmada, kollokasyon nokta sayısı ile katsayıların optimize edilmesi için gerekli kontrol nokta sayıları (hesaplama nokta sayıları) eşit alınır. Böylece çözüm esnasında kare matris elde edilir ve işlem kolaylığı sağlanır. Ancak bu durum zorunlu değildir. Ağsız yöntemlerde genellikle düşük sayıda tepe noktası alınırken, daha iyi optimizasyon için merkez nokta etrafında birkaç hesaplama noktası olması tercih edilir. Şekil 2’de hesaplamalarda kullanılacak RBF ailesinin merkez noktaları x ile gösterilmekte olup n adet noktadan oluşmaktadır.

Katsayıların optimizasyonu için hesaplamalarda kullanılacak noktalar ise x' ile gösterilmektedir ve N adet noktadan oluşmaktadır ($N \geq n$).



Şekil 2. Bir boyutlu sınır değer problemi için çözüm alanı.

Anlamalı bir kıyaslama için merkez nokta sayısı ile hesaplama (kollokasyon) nokta sayısı arasında Eşitlik (15) ile verilen bağıntı kullanılmıştır. Burada m ; bir merkez üzerinden hesaplamalara dahil edilen nokta sayısıdır. Şekil 3'te $m = 1, 2, 3$ değerleri için merkez nokta sayısı ile ortalama karesel hata (RMSE) arasındaki bağıntı gösterilmiştir. Hata değeri; $x = 0$ 'da sıcaklık farkı, $x = L$ 'de ısı taşınım miktarı, ara bölgede ise diferansiyel denklemin kalanı olarak alınmıştır (Eşitlik 16). D veri sayısı olmak üzere RMSE değeri Eşitlik (17) ile hesaplanır (Yıldız ve ark., 2020).

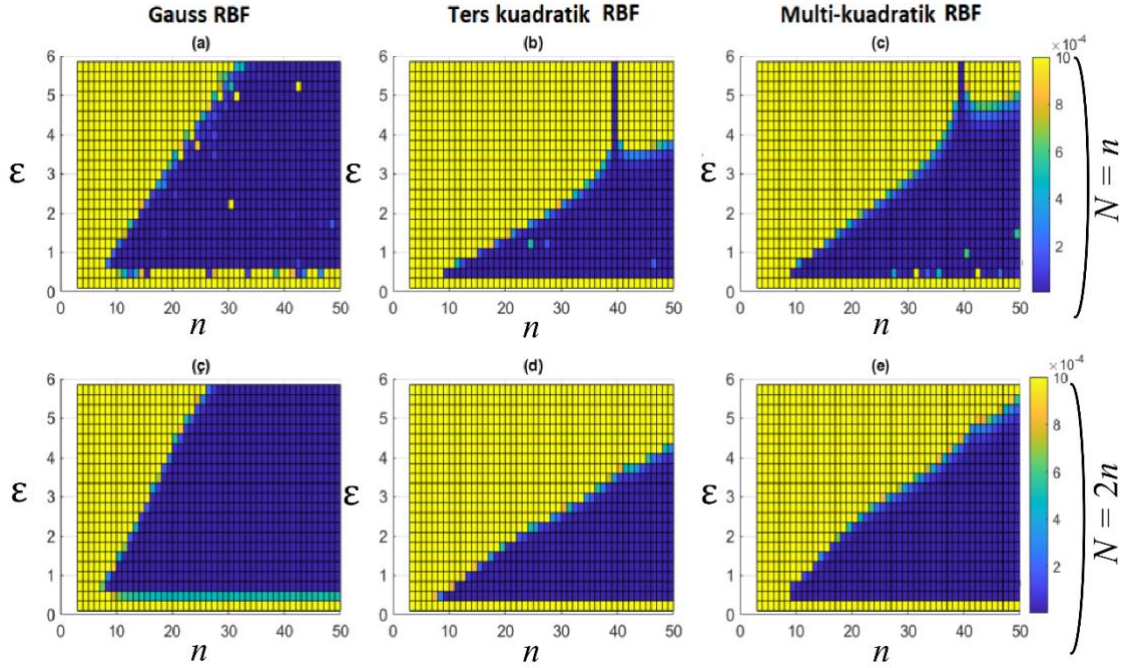
$$N = (n - 1)m + 1 \quad (15)$$

$$e = \begin{cases} T(x) - T_0, & x = 0 \\ \frac{d^2T(x)}{dx^2} + \frac{1}{k}q, & 0 < x < L \\ -k \frac{dT(x)}{dx} - h(T(x) - T_\infty), & x = L \end{cases} \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{D} \sum_{n=1}^D e_i^2} \quad (17)$$

Sonuçlar Gauss, Ters kuadrik ve Multi-kuadrik RBF'lar için elde edilmiştir. Sistemin bazı merkez nokta ve şekil fonksiyon değerlerinde kararsız olması nedeni ile sonuçlar filtrelenmiştir. Grafik üzerinde mavi bölgeler $RMSE < 0.001$ değerlerini, sarı bölgeler ise $RMSE > 0.001$ değerlerini göstermektedir. $N \geq 2n$ olması durumunda sistemin daha kararlı olduğunu görülür. $N = n$ durumu için her üç RBF için çözüm bölgesinde kararsızlıklar olduğunu gösterilmektedir (Şekil 3 a,b,c). $N \geq 2n$ durumlarında ise çözüm bölgesi oldukça kararludur (Şekil 3 ç,d,e). Her üç RBF içinde ε değeri yükseldikçe yakınsama için gerekli en küçük merkez nokta sayısının arttığı

açıkça görülmektedir. En geniş kabul edilebilir yakınsama alanı Gauss fonksiyonunda sağlanmaktadır. Gauss RBF sonuçlarının büyük değerleri için düşük merkez noktası sayılarında çözüme ulaşabilirken diğer RBF'larda çok daha yüksek sayıda merkez noktaya ihtiyaç duyulduğu açıktır (Şekil 3). Bu durum Gauss RBF için daha düşük işlem gücü ile hesaplama yapılabileceğini gösterir. Ayrıca Gauss RBF diğer yöntemlere göre daha kararlı olduğu da görülmektedir.

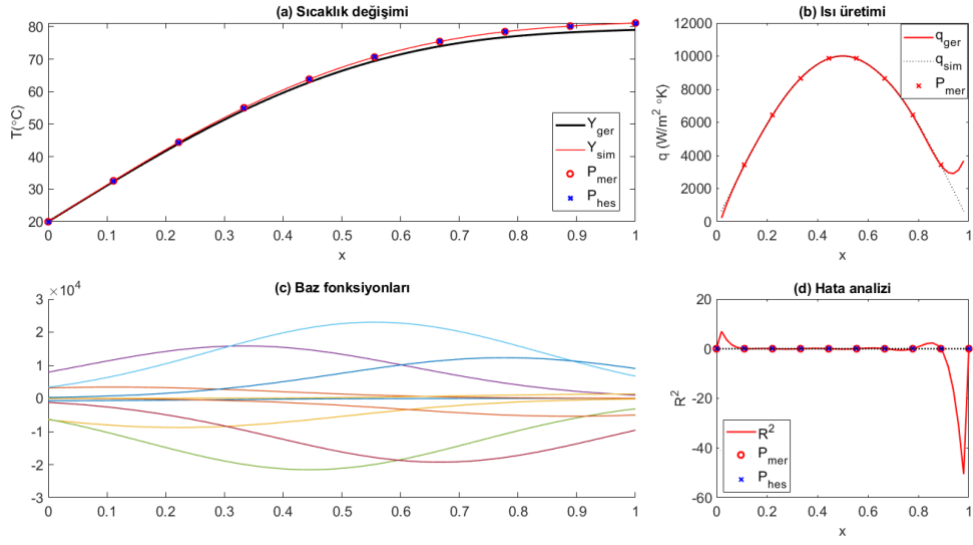


Şekil 3. Merkez nokta ile şekil katsayısının hesaplama çözünürlüğüne etkisi.

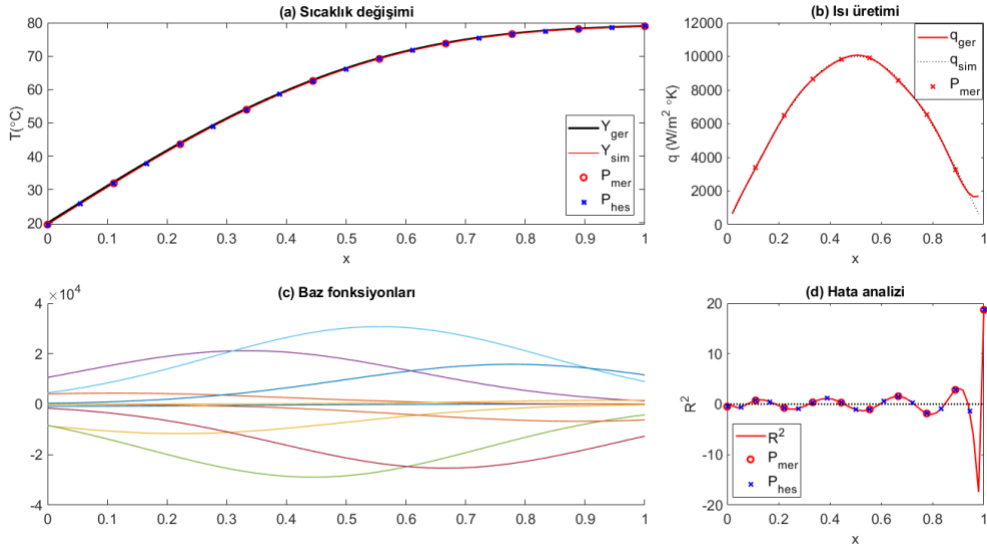
Hesaplama noktalarının önemini görmek üzere keyfi olarak $\varepsilon = 2.5$ Gauss RBF sonuçları incelendiğinde merkez nokta ile aynı noktalarda optimize edilen sistemde sıcaklık hatasının analitik çözümden açıkça ayrıştığı gözlenebilir (Şekil 4a ve Şekil 5a). Burada Şekil 4'te merkez nokta sayısı ile hesaplama nokta sayısı eşit ($n = 10, N = 10$), Şekil 5'te ise hesaplama nokta sayısı merkez nokta sayısının iki katıdır ($n = 10, N = 20$). Şekil 4d ve Şekil 5d çözüm bölgesinde ve sınırlarda yapılan hataların karesel ölçeğini vermektedir.

Şekillerden de anlaşılacağı üzere çözüm bölgesinde nokta sayıları eşitken diferansiyel denklem çok iyi sağlanır ($RMSE < 0.0001$), sınır bölgelerde ise hatalar yüksektir. Hesaplama noktalarının artışı sınırlarda hataları ve hatanın değişimini azaltırken çözüm bölgesinde diferansiyel denklemde bir miktar kalanın artmasına sebep olur. Tablo 2'de her iki durumda ara noktalarda ($5n$), hesaplama noktaları ($2n$), ve merkez noktaları (n), üzerinden ayrı ayrı hesaplanan RMSE değerleri görülmektedir. $N = n$ olması durumunda, merkez noktalar üzerinden hesaplanan RMSE değerleri çok düşük görünürken; yakınsama sonrasında ara noktalar dahil edilerek hesaplanan RMSE değeri 5.2 kat daha büyüktür. Hesaplama nokta sayısı arttığında, ara noktaların hataları ile merkez noktaların RMSE değerleri birbirine yakındır. Bu durum nokta sayıları eşit alınır ise parametrelerin

optimizasyonu esnasında noktalar üzerinden hesaplanan RMSE değerlerinin yanıltıcı olabileceğinin bir göstergesidir.



Şekil 4. $\varepsilon = 2.5$, $n = 10$ ve $N = 10$ parametreleri ile Gauss RBF sonuçları.

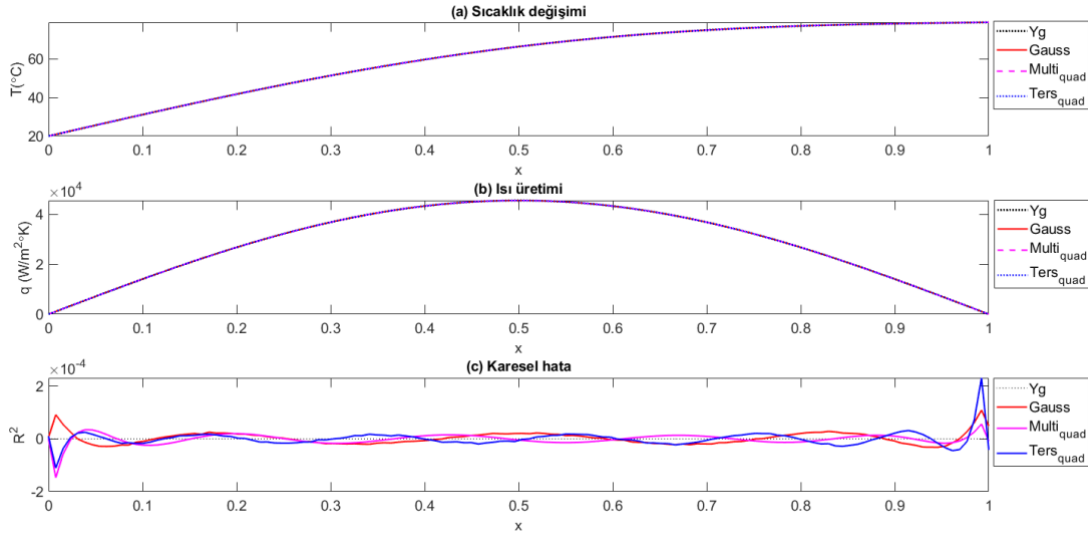


Şekil 5. $\varepsilon = 2.5$, $n = 10$ ve $N = 20$ parametreleri ile Gauss RBF sonuçları.

Tablo 2. Gauss RBF için $\varepsilon=2.5$ durumunda nokta sayılarının ortalama hataya etkisi.

Açıklama	$N = n$	$N = 2n$
RMSE ara noktalar	3902.6032	749.96346
RMSE hesaplama noktaları	2.2479E-20	365.38440
RMSE Merkez noktaları	2.2479E-20	371.93446

Şekil 6’da Gauss, Multi-kuadrik ve Ters kuadrik baz fonksiyonlarının en iyi sonuçlar verdiği parametreler ($\varepsilon = 0.6$ ve $n = 26$) ile kıyaslanarak verilmiştir. Tüm baz fonksiyonlarının sonuçları birbirine yakın olup sınır bölgelerindeki davranışlarında çok küçük farklılıklar görülmektedir. Gauss RBF için RMSE değeri $6.5004648E-08$ iken Multi-kuadrik için $4.8567896E-08$ ve Ters kuadrik için ise $1.0202297E-07$ olarak bulunmuştur.

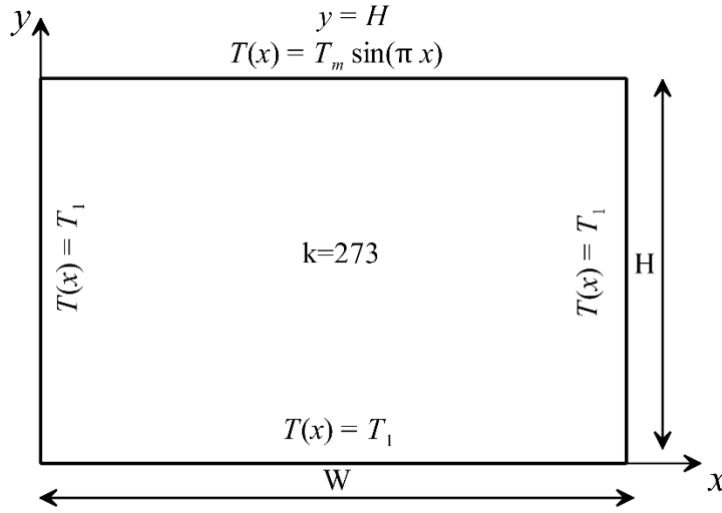


Şekil 6. $\varepsilon = 0.6$, $n = 26$ ve $m = 2$ parametreleri ile Gauss, Multi-kuadrik ve Ters kuadrik RBF sonuçları.

3.2. İki Boyutlu Isı Geçişi

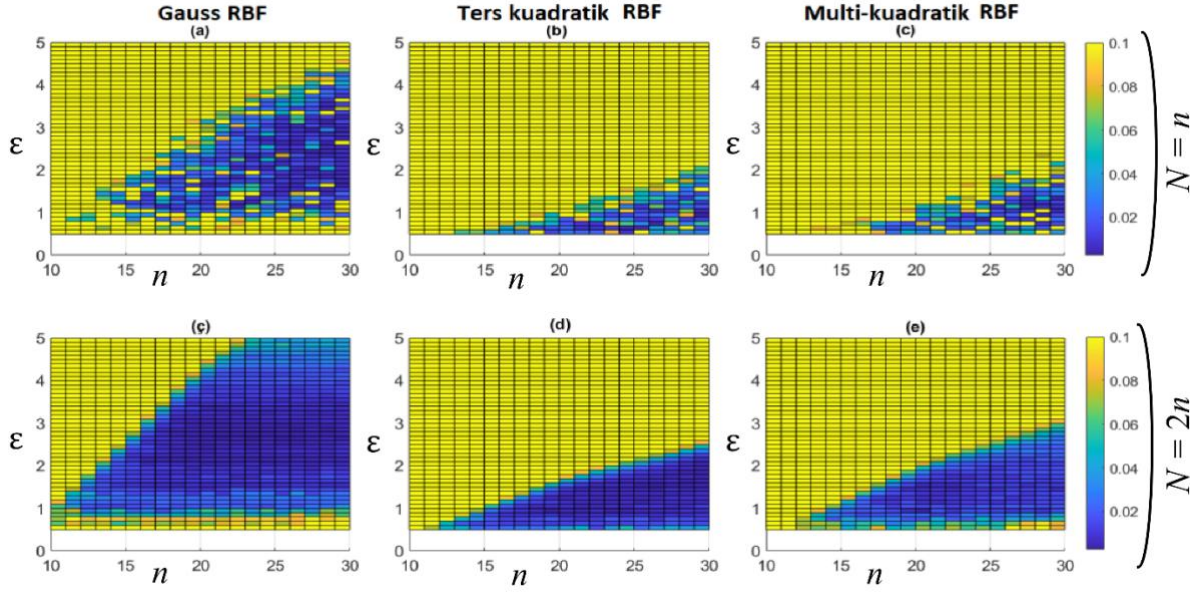
İki boyutlu ısı geçişi problemlerinde analitik çözüme ulaşmak genellikle mümkün olmamaktadır. Ancak bazı özel durumlar için değişkenlerine ayrıştırma yöntemi kullanılarak analitik çözüm bulunabilir. Literatürde bir kenarı ($y = H$) x doğrultusunda değişen sıcaklık ($T(x) = T_m \sin(\pi x)$) plaka problemleri için çözüm mevcuttur. Şekil 7’de iki boyutlu homojen ve izotropik bir plaka ve sınır şartları görülmektedir. Plaka üzerinde ısı üretimi olmayıp dış ortamdan yalıtılmış haldedir. $x = 0$, $y = 0$ ve $x = W$ kenarları T_1 sıcaklığına sahip plaka için sıcaklık dağılımı Eşitlik (18) ile verilmiştir (Herman, 2015). Burada T_m kenar sıcaklığının genliğidir. Isı iletim katsayısı $k = 273$ (W/mK), $T_1 = 20^\circ C$ ve $H = W = 1$ ’dir.

$$T(x, y) = -T_m \frac{\sinh(\pi y/W)}{\sinh(\pi H/W)} \sin\left(\frac{\pi x}{W}\right) + T_1 \quad (18)$$



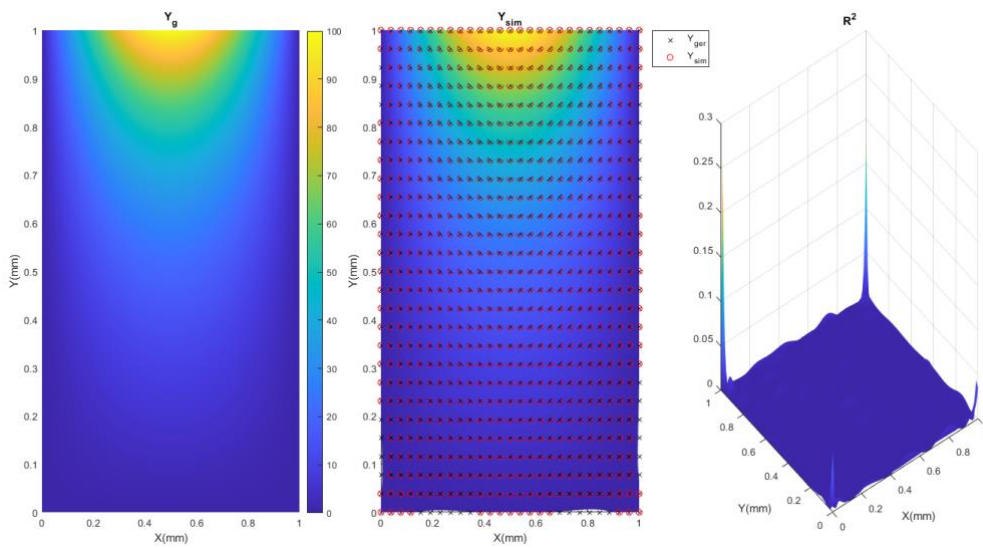
Şekil 7.. İki boyutlu ısı geçiş problemi için geometri ve parametreler.

Şekil 8’de farklı şekil katsayı değerleri $\varepsilon = 0.5 - 5$ ile farklı merkez noktası sayılarında ($n = 10 - 30$) sistemin kararlılığını göstermektedir. Şekil 8 a, b, c ile verilen grafikler merkez noktası (n) ile kollokasyon noktası (N) nin eşit olduğu durumda hataları gösterirken, Şekil 8ç-e kollokasyon noktasının merkez noktasından büyük olduğu ($N=2n$) durum için benzetim sonuçlarını göstermektedir. Grafikte sonuçlar $RMSE > 0.1$ değerleri filtrelenerek sarı renk ile gösterilmiştir. Çözüm aralığında kalan bölgelerin değişimi ise çok renkli olarak gösterilmiştir. Yapılan benzetimler şekil katsayısı ve hesaplama çözünürlüğünün iki boyutlu ısı geçişi problemlerinde önemli olduğunu göstermektedir (Şekil 8). Merkez noktası ile kollokasyon noktası eşit olduğunda çözüm alanının büyük bir kısmı kararsız olmaktadır. Şekil 8 a, b, c’de bu durum açıkça görülmektedir. Çözüm bölgesinde (mavi renk) yer alan noktalar arasında çok sayıda yerel tekil bölgeler (sarı noktalar) görülür. Bir boyutlu ısı geçişinde olduğu gibi, kollokasyon noktası arttırıldığında kararsızlık büyük ölçekte ortadan kalkmaktadır (Şekil 8 ç, d, e). Gauss, Ters kuadrik ve Multi-kuadrik baz fonksiyonlarının her üçü içinde merkez noktası ile kollokasyon noktası eşit alındığında, çözüm bölgesinde tekil noktaların ve kararsız çözümlerin oluştuğu gözlemlenmektedir. Kollokasyon noktalarındaki artış çözüm sisteminin kararlılığını arttırmaktadır. Benzetimler sonucunda Gauss RBF için en iyi sonuçlar $\varepsilon = 2.0$ ve $n = 27$ durumunda, Ters kuadrik RBF için $\varepsilon = 1.8$ ve $n = 30$ olduğunda ve Multi-kuadrik RBF için ise $\varepsilon = 0.9$ ve $n = 20$ alınması halinde bulunmuştur. Benzetimler sonucunda elde edilen RMSE değerleri ise sırası ile 0.0012, 0.0088, 0.0174 olarak hesaplanmıştır.

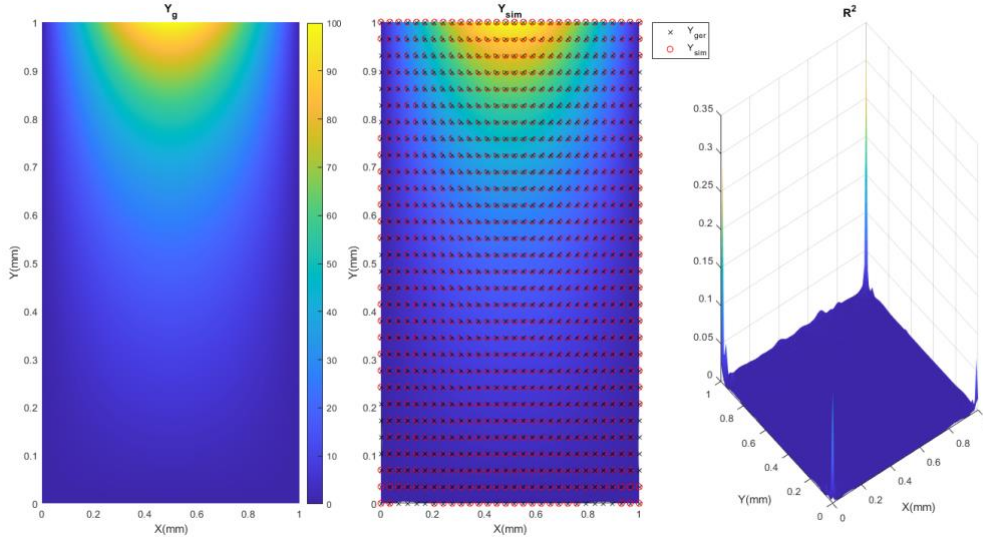


Şekil 8. İki boyutlu analiz için merkez nokta ile şekil katsayısının hesaplama çözünürlüğüne etkisi.

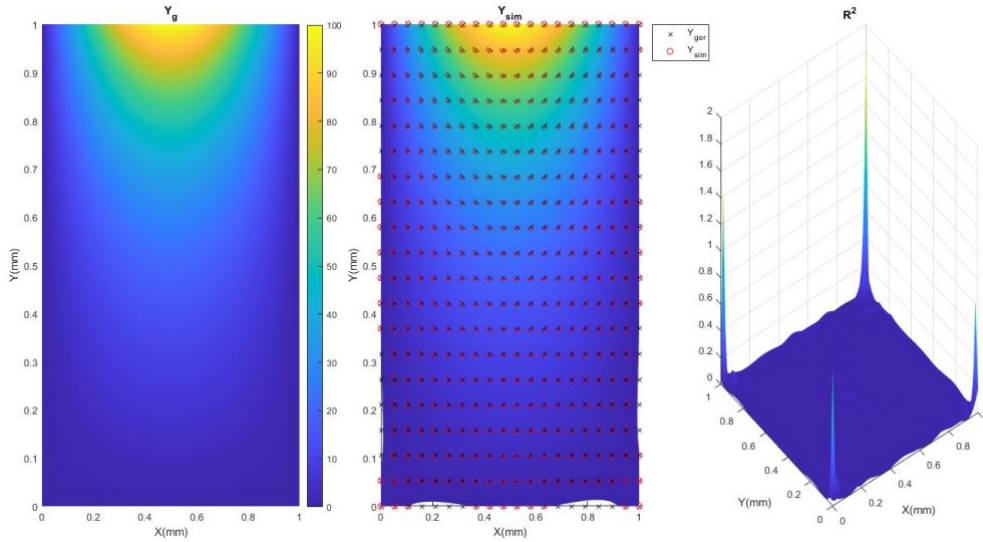
Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de üç baz fonksiyon için analitik çözüm ve sayısal çözümün sonuçları gösterilmektedir. Analitik sonuçlar ve sayısal sonuçlar uyumlu olmakla birlikte, kullanılan yöntemlerin tümünde en büyük hata değerleri noktasal olarak köşelerde oluşmaktadır. Köşe noktalar iki sınırın birleşimi olduğundan algoritma içerisinde hangi sınır şartının verileceği karmaşık bir konu olduğundan bu durum doğaldır. Literatürde bu durum Runge olayı (Runge phenomenon) olarak bilinir. Çözüm bölgesinin iç bölgelerinde hata oldukça düşüktür. Bir boyutlu ısı probleminde olduğu gibi Gauss RBF'nin diğer iki metoda göre üstün olduğu açıktır. En yüksek mutlak hata değerleri, Gauss RBF için 0.3, Multi-kuadratik RBF için 2 ve Ters kuadratik RBF için ise 0.35'tir.



Şekil 9. Gauss RBF analitik ve sayısal çözüm ($\varepsilon = 2.0$, $n = 27$). Analitik çözüm sonuçları (a). Sayısal çözüm sonuçları (b). RMSE hata grafiği (c).



Şekil 10. Ters-kuadrik RBF analitik ve sayısal çözüm ($\varepsilon = 1.8$, $n = 30$). Analitik çözüm sonuçları (a). Sayısal çözüm sonuçları (b). RMSE hata grafiği (c).



Şekil 11. Multi-kuadrik RBF analitik ve sayısal çözüm ($\varepsilon = 0.9$, $n = 20$). Analitik çözüm sonuçları (a). Sayısal çözüm sonuçları (b). RMSE hata grafiği (c).

4. Sonuçlar ve Öneriler

Çalışmada, bir ve iki boyutlu ısı transferi problemleri ağsız (meshless) sayısal analiz yöntemi ile çözülerek şekil parametresi ve merkez nokta sayısının çözüme olan etkisi incelenmiştir. Benzetim çalışmalarında elde edilen sayısal sonuçlar, analitik çözüm sonuçları ile karşılaştırılarak geçerliliği test edilmiştir. Bir boyutlu benzetim çalışmalarında Gauss RBF fonksiyonu çözüm bölgesinin, diğer iki baz fonksiyon ailesine göre daha geniş ve kararlı olduğu görülmüştür (Şekil 3). Merkez nokta sayısı $10 < n < 30$ olarak alındığında, Gauss RBF için çözüm bölgesi $0.5 < \varepsilon < 5$, Multi-kuadrik

RBF için $0.5 < \varepsilon < 2.9$ ve Ters kuadrik RBF için ise $0.5 < \varepsilon < 2.5$ olduğu görülmüştür. Şekil parametresi, eğrinin civar noktalar ile etkileşimini vermektedir. Her üç RBF içinde şekil daraldıkça çözüm bölgesinde daha çok merkez noktaya ihtiyaç duyulduğu (ε arttıkça merkez nokta sayısının arttığı) gösterilmiştir. Bir boyutlu hesaplamalarda; Gauss RBF için RMSE değeri 6.5004648E-08, Multi-kuadrik için 4.8567896E-08 ve Ters kuadrik için ise 1.0202297E-07 olarak bulunmuştur.

İki boyutlu ısı geçişi problemi olarak, bir kenarında konuma bağlı sıcaklık değişimi olan ve diğer üç kenarı sabit sıcaklıkta tutulan bir plakadaki sıcaklık değişimi incelenmiştir. Benzetim çalışmaları, iki boyutlu problemlerde sonuçların bir boyuta göre daha kararsız olduğunu, şekil parametresi ve merkez nokta sayısının uygun seçilmesinin önemli olduğunu göstermektedir. Şekil 8 ile Gauss, Multi-kuadrik ve Ters kuadrik radyal baz fonksiyonlarının $\varepsilon < 5$ için farklı sayıda merkez ve kollokasyon nokta sayılarında elde edilen hataları göstermektedir. Grafikte, merkez ile kollokasyon nokta sayısı eşit olduğunda, çözüm bölgesi içerisinde ırsak bölgeler kaldığı açıkça görülmektedir. Bu durum, aynı kollokasyon ve merkez nokta sayılarında şekil parametresinde küçük değişimlerin sonuçları çok etkilediğinin bir göstergesidir. Kollokasyon nokta sayısı, merkez nokta sayısının iki katı olacak şekilde alınır ise sonuçlar kararlı ve çözüm bölgesi sürekli hale gelmektedir. Aynı merkez ve kollokasyon sayılarında şekil parametresindeki küçük değişimler sonuçlarda da küçük değişimlere yol açar. Bu nedenle problemin çözümünün şekil parametresine olan hassasiyetini azalarak daha kararlı bir model oluşur.

Sonuç olarak, ağsız çözüm yöntemlerinde sonucun doğruluğu şekil parametresi, merkez ve kollokasyon nokta sayısı ile doğrudan ilişkilidir. Sistemin kararlı olması için, kollokasyon noktalarının sayısı, baz fonksiyonlar için seçilen merkez noktaların sayısından fazla olmalıdır. Bu nedenle şekil parametresi ve merkez nokta sayısının problemin yapısına ve geometrik özelliklerine göre uygun değerlerinin belirlenmesi önemlidir. Kararlı bir çözüm için, bölgesel şekil fonksiyonları belirlenebileceği gibi, analiz algoritmaları kullanılarak şekil katsayısı ve nokta sayılarını optimize eden sistemler algoritmalara dahil edilmelidir.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Altinkaynak, A., (2020). Ağsız Yöntem Uygulamaları için Trigonometri Tabanlı Radyal Özelliğe Sahip Yeni Bir Temel Fonksiyon. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 32(1), 96-110.
<https://doi.org/10.7240/jeps.581959>
- Aydın, E.S., (2022). Kayısı meyvesinin dondurarak kurutulmasının sayısal olarak incelenmesi için matematiksel bir model. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37 (1), 347-360.
<https://doi.org/10.17341/gazimmfd.791792>
- Belytschko, T., Lu, Y.Y., ve Gu, L., (1994). Element-free Galerkin methods. *The International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 37(2), 229-256.
<https://doi.org/10.1002/nme.1620370205>
- Boglietti, A., Cavagnino, A., Staton, D., Shanel, M., Mueller, M., ve Mejuto, C., (2009). Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 56(3), 871-882.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2011622>
- Cao, J., Cheng, P., ve Hong, F., (2008). A numerical analysis of forces imposed on particles in conventional dielectrophoresis in microchannels with interdigitated electrodes. *Journal of Electrostatics*, 66(11-12), 620-626.
<https://doi.org/10.1016/j.elstat.2008.09.003>
- Chakraverty, S., Mahato, N.R., Karunakar, P., ve Rao, T.D., (2019). *Advanced numerical and semi-analytical methods for differential equations*. John Wiley & Sons.
- Chen, Y., Eskandarian, A., Oskard, M., ve Lee, J.D., (2004). Meshless analysis of plasticity with application to crack growth problems. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 41(1-3), 83-94.
<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2003.11.024>
- Chong, Y.C., Goss, J., Popescu, M., Staton, D., Hawkin, D., ve Boglietti, A., (2019). Electromagnetic performance with and without considering the impact of rotation on convective cooling. *The Journal of Engineering*, 17, 3537-3541.
<https://doi.org/10.1049/joe.2018.8024>
- Çengel, Y.A., ve Ghajar, A.J., (2020). *Isı ve Kütle Transferi*. Palme Yayınevi. ISBN: 9786053552871
- Durak, B., (2020). Adi ve Kısmi Diferansiyel Denklemlerin Çözümlerinin Kollokasyon Yöntemiyle Bulunması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(4), 1136-1143.
<https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.681276>
- Fallah, N.A., Bailey, C., Cross, M., Taylor, G.A., (2000). Comparison of finite element and finite volume methods application in geometrically nonlinear stress analysis. *Applied Mathematical Modelling*, 24(7), 439-455.
[https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(99\)00047-5](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(99)00047-5)
- Falzon, B.G., ve Muthu, N., (2018). 1.13-Micromechanical Modelling of Composite Materials Using the Element-Free Galerkin Approach. Editor(s): Beaumont PWR, *Comprehensive Composite Materials II* (s. 327-352). Zweben CH., Elsevier, ISBN 9780081005347.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09888-X>
- Fasshauer, G.E., (2007). *Meshfree approximation methods with MATLAB* (Interdisciplinary Mathematical Sciences: Volume 6). World Scientific.
- Fasshauer, G.E., ve McCourt, M.J., (2015). *Kernel-based approximation methods using Matlab* (Interdisciplinary Mathematical Sciences Vol 19). World Scientific Publishing Company.
- Fornberg, B., ve Flyer, N., (2015). Solving PDEs with radial basis functions. *Acta Numerica*, 24, 215-258.
<https://doi.org/10.1017/S0962492914000130>
- Fornberg, B., ve Flyer, N., (2005). Accuracy of radial basis function interpolation and derivative approximations on 1-D infinite grids. *Advances in Computational Mathematics*, 23, 5-20.

<https://doi.org/10.1007/s10444-004-1812-x>

- Ghahfarokhi, P.S., Podgornovs, A., Kallaste, A., Marques Cardoso, A.J., Belahcen, A., Vaimann, T., Kudrjavev, O., Asad, B., ve Iqbal, M.N., (2022). Steady-State Thermal Modeling of Salient Pole Synchronous Generator. *Energies*, 15(24), 9460.
<https://doi.org/10.3390/en15249460>
- Gingold, R.A., ve Monaghan, J.J., (1977). Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181(3), 375–389.
<https://doi.org/10.1093/mnras/181.3.375>
- Hahn, D.W., ve Özişik, M.N., (2012). *Heat conduction*. John Wiley & Sons.
- He, Y., Meng, Z., Xu, H., ve Zou, Y., (2020). A dynamic model of evaluating differential automatic method for solving plane problems based on BP neural network algorithm. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 556(124845).
<https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124845>.
- Herman, R. L., (2015). 6 Problems in Higher Dimensions. *Introduction to partial differential equations*. R. L. Herman.
https://people.uncw.edu/hermanr/pde1/PDEbook/PDE_Main.pdf
- Jin, J-M., (1993). *The Finite Element Method in Electromagnetics*. Wiley. ISBN: 9780471586272
- Kansa, E.J., (1986). Application of Hardy’s multiquadric interpolation to hydrodynamics. *Continuous System Simulation Languages*, 1986, 111-117.
- Kansa, E.J., (1990). Multiquadrics—A scattered data approximation scheme with applications to computational fluid-dynamics—I surface approximations and partial derivative estimates. *Computers & Mathematics with applications*, 19(8-9), 127-145.
[https://doi.org/10.1016/0898-1221\(90\)90270-T](https://doi.org/10.1016/0898-1221(90)90270-T)
- Karakoc, S.B.G., (2018). Kollokasyon Sonlu Eleman Yöntemi ile MKdV Denkleminin Sayısal Çözümleri. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B - Teorik Bilimler*, 6(2), 206-218.
<https://doi:10.20290/aubtdb.420247>
- Li, J., Wang, G., Zhan, J., Liu, S., Guan, Y., Naceur, H., Coutellier, D., ve Lin, J., (2021). Meshless SPH analysis for transient heat conduction in the functionally graded structures. *Composites Communications*, 24(100664).
<https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100664>.
- Libersky, L.D., Petschek, A.G., Carney, T.C., Hipp, J.R., ve Allahdadi, F.A., (1993). High Strain Lagrangian Hydrodynamics: A Three-Dimensional SPH Code for Dynamic Material Response. *Journal of Computational Physics*, 109(1), 67-75.
<https://doi.org/10.1006/jcph.1993.1199>.
- Muggleston, J., Pickering, S.J., ve Lampard, D., (1999). Effect of geometric changes on the flow and heat transfer in the end region of a TEFC induction motor. *Ninth International Conference on Electrical Machines and Drives* (s. 40-44). Canterbury, UK.
<https://doi.org/10.1049/cp:19990987>
- Narimani, N., ve Dehghan, M., (2022). A direct RBF-PU method for simulating the infiltration of cytotoxic T-lymphocytes into the tumor microenvironment. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 114(106616).
<https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2022.106616>.
- Nayroles, B., Touzot, G., ve Villon, P., (1992). Generalizing the finite element method: Diffuse approximation and diffuse elements. *Computational Mechanics*, 10, 307-318.
- Pandey, A., Madduri, B., Perng, C.Y., Srinivasan, C., ve Dhar, S., (2022). Multiphase Flow and Heat Transfer in an Electric Motor. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (s. 1-17). Columbus, Ohio, USA.
<https://doi.org/10.1115/IMECE2022-96801>
- Papini, L., ve Gerada, C., (2014). Thermal-electromagnetic analysis of solid rotor induction machine. *7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014)* (s. 1-6). Manchester, UK.
<https://doi.org/10.1049/cp.2014.0462>
- Pekedis, M., ve Yıldız, H., (2010). Ağsız Yöntemler ve Sınıflandırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(1), 1-9.
<https://dergipark.org.tr/pub/pajes/issue/20507/218301>

- Pickering, S.J., Lampard, D., ve Shanel, M., (2001). Modelling ventilation and cooling of the rotors of salient pole machines. (*IEMDC*) *IEEE International Electric Machines and Drives Conference* (s. 806-808). Cambridge, MA, USA.
- Stach, S., (2014). 11- Modelling fracture processes in orthopaedic implants,. Editor(s): Zhongmin, J., *Computational Modelling of Biomechanics and Biotribology in the Musculoskeletal System Biomaterials and Tissues* (s. 331-368). Woodhead Publishing, ISBN 978-0-85709-661-6.
- Staton, D., Pickering, S.J., ve Lampard, D., (2001). Recent advancement in the thermal design of electric motors. *SMMA 2001 Fall Technology Conference* (s. 1-11). Durham, North Carolina, USA.
- Tanbay, T. (2019). Meshless solution of the neutron diffusion equation by the RBF collocation method using optimum shape parameters. *Journal of Innovative Science and Engineering*, 3(1), 23-31.
<https://doi.org/10.38088/jise.570328>
- Wang, H., ve Qin, Q.H., (2019). Chapter 1 - Overview of meshless methods. Editor(s): Wang, H., Qin, Q.H., *Methods of Fundamental Solutions in Solid Mechanics* (s. 3-51). Elsevier. ISBN 9780128182833, <https://doi.org/10.1016/C2018-0-03684-1>
- Wang, H., ve Qin, Q.H., (2019). Chapter 5 - Meshless analysis for thin plate bending problems. Editor(s): Wang, H., Qin, Q.H., *Methods of Fundamental Solutions in Solid Mechanics* (s. 127-142). Elsevier, ISBN 9780128182833, <https://doi.org/10.1016/C2018-0-03684-1>
- Yıldız, H., Korkmaz Can, N., Ozguney, O.C., ve Yagiz, N., (2020). Sliding mode control of a line following robot, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(561), 1-13.
<https://doi.org/10.1007/s40430-020-02645-3>
- Zarin, R., (2022). Numerical study of a nonlinear COVID-19 pandemic model by finite difference and meshless methods. *Partial Differential Equations in Applied Mathematics*, 6(100460).
<https://doi.org/10.1016/j.padiff.2022.100460>.
- Zhong, R., Wang, Q., Hu, S., Qin, B., ve Shuai, C., (2023). Meshless analysis for modal properties and stochastic responses of heated laminated rectangular/sectorial plates in supersonic airflow. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 98(104872).
<https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2022.104872>.
- Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., ve Zhu, J.Z., (2005). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 6th Edition. Butterworth-Heinemann.

Analysis of Transfer Learning-Based Algorithms for Tumor Detection in Medical Imaging Data

Cem DEMİREL¹ , Emel SOYLU^{2*} 

Abstract

Magnetic Resonance Imaging (MRI) has become a vital tool in the diagnosis of brain tumors due to its non-invasive nature and high-resolution imaging capabilities. In this study, we compared the performances of deep learning algorithms. A comprehensive dataset of MRI scans was utilized to train and validate our model, ensuring robust performance across various tumor types and imaging conditions. The results demonstrate the effectiveness of our approach, achieving a high level of accuracy and sensitivity in tumor detection. Our work contributes to the development of efficient and reliable tools for early diagnosis and monitoring of brain tumors, ultimately enhancing patient care and outcomes in the field of neuroimaging. Our findings highlight the significance of selecting an appropriate deep neural network architecture when dealing with brain MRI image classification tasks. DenseNet-121 emerges as a robust choice for accurate and reliable classification, offering potential applications in clinical diagnostics and medical imaging. In conclusion, our study underscores the importance of MRI in brain tumor diagnosis and the potential of deep learning algorithms to enhance accuracy and sensitivity. Our approach, based on DenseNet-121, holds promise for clinical diagnostics and medical imaging applications, contributing to improved patient care and outcomes in neuroimaging.

Keywords: Brain tumor, MRI scans, Artificial intelligence, Computer-assisted image analyses.

MRI Verilerinde Tümör Tespiti için Transfer Tabanlı Derin Öğrenme Algoritması Karşılaştırması

Öz

Bu çalışmada, Manyetik Rezonans Görüntüleme (MRG), invazif olmayan doğası ve yüksek çözünürlüklü görüntüleme yetenekleri nedeniyle beyin tümörlerinin teşhisinde hayati bir araç haline gelmiştir. Bu çalışmada, derin öğrenme algoritmalarının performanslarını karşılaştırdık. Kapsamlı bir MRG taramaları veri kümesi, modelimizi eğitmek ve doğrulamak için kullanıldı, bu da çeşitli tümör tipleri ve görüntüleme koşulları için sağlam bir performans sağladı. Sonuçlar, yakalama konusunda yüksek bir doğruluk ve hassasiyet elde ederek yaklaşımımızın etkinliğini göstermektedir. Çalışmamız, nöro görüntüleme alanında erken teşhis ve takip için etkili ve güvenilir araçların geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Bulgularımız, beyin MRG görüntü sınıflandırma görevleriyle uğraşırken uygun bir derin sinir ağı mimarisi seçmenin önemini vurgular. DenseNet-121, doğru ve güvenilir sınıflandırma için sağlam bir seçenek olarak ortaya çıkıyor ve klinik teşhis ve tıbbi görüntüleme alanlarında potansiyel uygulamalar sunuyor. Sonuç olarak, çalışmamız, MRG'nin beyin tümörü teşhisi açısından önemini ve derin öğrenme algoritmalarının doğruluğu ve hassasiyeti artırmadaki potansiyelini vurgular. DenseNet-121'e dayalı yaklaşımımız, nöro görüntüleme alanında hastaların bakımını ve sonuçlarını iyileştirmeye katkıda bulunarak klinik teşhis ve tıbbi görüntüleme uygulamaları için umut vaat etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Beyin tümörü, MRI taramaları, Yapay zeka, Bilgisayar destekli görüntü analizleri

¹Samsun University Department of Neurosurgery Surgical Sciences, Faculty of Medicine, Samsun, Turkey, cem.demirel@samsun.edu.tr

^{2*}Samsun University, Department of Software Engineering, Faculty of Engineering, Samsun, Turkey, emel.soylu@samsun.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 19.03.2024

Kabul/Accepted: 11.09.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Introduction

A brain tumor is an abnormal growth or mass of cells in the brain. It can be benign (non-cancerous) or malignant (cancerous). Brain tumors can originate from brain tissue itself (primary brain tumors) or can be the result of cancer that has spread from other parts of the body (secondary or metastatic brain tumors) (DeAngelis, 2001). Primary brain tumors are further classified based on the type of cells involved and their location within the brain. Some common types of primary brain tumors include gliomas, meningiomas, pituitary adenomas, and medulloblastomas, among others (Ayadi et al., 2021; Chandana et al., 2008; Raza et al., 2022).

According to the latest data from the World Health Organization, brain tumors are one of the most common types of cancer deaths worldwide and can occur at any age (Abd El Kader et al., 2021). Central nervous system (CNS) tumors consist of a wide series of neoplasms that include primary and metastatic tumors. While these tumors constitute approximately 1-2% of all malignancies in cancer patients, primary CNS tumors constitute 85-90% of all brain tumors (Komori, 2017; Nibhoria et al., 2015; Ostrom et al., 2015). Although they are quite rare, they have high morbidity and mortality rates. Especially in high-grade tumors such as anaplastic astrocytoma and glioblastoma, the five-year survival rate varies between 5.5–29.7% (Hernández-Hernández et al., 2018). Histopathological classification and grading of CNS tumors are very important in determining the clinical follow-up and treatment protocols of the cases and obtaining prognostic and predictive data (Cano-Valdez & Sevilla-Lizcano, 2021).

Brain tumors can cause a wide range of symptoms, depending on their size, location, and whether they are benign or malignant. Common symptoms can include headaches, seizures, changes in vision, balance problems, cognitive changes, and more (Alentorn et al., 2016).

The prognosis and treatment options for a brain tumor depend on its type, location, size, and the overall health of the patient. Treatment plans are typically developed by a multidisciplinary medical team, which may include neurosurgeons, oncologists, radiation therapists, and other specialists, to remove or control the tumor while preserving brain function and quality of life (Herholz et al., 2012). There are many more types of brain tumors, each with its unique characteristics, treatment approaches, and prognosis. The specific type of brain tumor a person has is determined through diagnostic tests such as imaging scans and biopsies, and treatment options depend on the tumor's type, location, and other factors (Sheline, 1977).

Gliomas tumors originate in the glial cells, which provide support and protection for nerve cells in the brain. Gliomas can be further categorized into astrocytomas, oligodendrogliomas, and ependymomas. Meningiomas develop in the meninges, which are the membranes covering the brain and spinal cord. They are typically benign but can cause symptoms depending on their location

(Black, 1991). Pituitary adenoma tumors form in the pituitary gland, which is a small gland at the base of the brain that regulates various hormones in the body (Theodros et al., 2015). Medulloblastomas are primarily found in the cerebellum, medulloblastomas are more common in children and are considered malignant (Baliga et al., 2021). Schwannomas tumors develop from Schwann cells, which produce the protective covering (myelin) for nerve fibers. Schwannomas can occur on nerves in the brain and spinal cord (Hilton & Hanemann, 2014). Craniopharyngiomas tumors are typically benign and develop near the pituitary gland and the hypothalamus (Momin et al., 2021). Primary Central Nervous System (CNS) Lymphomas are non-Hodgkin lymphomas that start in the brain, spinal cord, or the membranes covering the brain (Bühning et al., 2001). Metastatic Brain Tumors originate in other parts of the body and spread to the brain (Hayashida et al., 2006). Hemangioblastomas are rare tumors that usually occur in the cerebellum and are associated with a genetic condition called von Hippel-Lindau disease (Neumann et al., 1989).

Brain tumor diagnosis involves several methods and techniques to determine the presence, type, location, and characteristics of the tumor. A thorough neurological examination is often the first step. It assesses the patient's mental status, coordination, reflexes, sensory perception, and muscle strength (Pawelczyk et al., 2012). Gathering the patient's medical history, including symptoms, their duration, and any risk factors or family history of brain tumors, is crucial. MRI scans provide detailed images of the brain and can help identify the location, size, and characteristics of a brain tumor (Siddiqui et al., 2015). CT (Computed Tomography) scans use X-rays to create cross-sectional images of the brain and are useful for detecting tumors and assessing their density (Bilal, 2023). A biopsy involves the removal of a small sample of tumor tissue for examination under a microscope. This helps determine whether the tumor is benign or malignant and its specific type. If a tumor is suspected to affect the brain's ventricles or meninges, a sample of cerebrospinal fluid may be collected through a lumbar puncture (spinal tap) and analyzed for tumor markers or abnormal cells (Shankar et al., 2017). Angiography test uses a contrast dye and X-rays to visualize the blood vessels in the brain. It can help identify abnormal blood vessels or blood flow patterns associated with certain brain tumors (Taylor et al., 2014). In cases where surgery is considered, functional MRI (fMRI) or other mapping techniques can help identify critical brain regions responsible for functions such as speech or motor control to minimize damage during surgery (Gore & others, 2003). Positron Emission Tomography (PET) scans can be used to determine the metabolic activity of brain tissue, which can help differentiate between tumor tissue and healthy brain tissue (Phelps & Mazziotta, 1985). Genetic analysis may be performed to identify specific genetic mutations or markers associated with certain types of brain tumors, which can inform treatment decisions (Dulac & Wagner, 2006). Electroencephalogram (EEG) records the brain's electrical activity and may be used to evaluate seizures or abnormal brain patterns caused by tumors (Thakor & Tong, 2004). The study by Joshi and

Aziz presents a novel approach to brain tumor classification by combining Particle Swarm Optimization and Cuckoo Search with deep learning, demonstrating improved accuracy and offering valuable contributions to AI-driven tumor diagnosis and patient care (Joshi & Aziz, 2024). Kaplan et al. introduced an innovative approach for brain tumor classification using nLBP and α LBP feature extraction methods, achieving a notable classification accuracy of 95.56% with the nLBPd=1 method and K-Nearest Neighbor, contributing significantly to the automation of tumor diagnosis (Kaplan et al., 2020).

The combination of these diagnostic methods allows healthcare professionals to accurately diagnose brain tumors, determine their characteristics, and develop a tailored treatment plan for patients. The choice of diagnostic tests depends on the patient's clinical presentation and the suspected type of brain tumor.

MRI is a valuable medical imaging technique that provides detailed images of the internal structures of the body, including the brain, muscles, and organs (Katti et al., 2011). Machine learning plays a crucial role in MRI image processing for various reasons. Machine learning algorithms can enhance the quality of MRI images by reducing noise, improving contrast, and sharpening details. This results in clearer and more diagnostically valuable images. ML techniques can accelerate MRI image reconstruction, reducing the time patients spend in the scanner. Faster reconstruction is particularly important for pediatric and critically ill patients. ML models can segment MRI images into different regions or structures, such as tumors, organs, or blood vessels. This automated process saves time for radiologists and ensures accuracy in identifying specific areas of interest. Machine learning can aid in the detection of abnormalities or diseases in MRI images, such as tumors, lesions, or vascular issues. ML models can learn to recognize subtle patterns that might be missed by human observers. ML algorithms can provide quantitative measurements of various parameters in MRI images, such as tumor size, tissue density, or blood flow. This quantitative data is crucial for treatment planning and monitoring disease progression. ML can analyze historical MRI data and patient records to predict disease outcomes, treatment responses, or the likelihood of disease recurrence. This information can guide treatment decisions and improve patient care. Machine learning is essential in MRI image processing because it enhances image quality, automates time-consuming tasks, assists in disease detection, and contributes to research and innovation in medical imaging. These applications ultimately lead to more accurate diagnoses, better patient care, and advancements in the field of radiology (Ayadi et al., 2021; Deepak & Ameer, 2019).

Brain tumor detection relies on various computer algorithms and image processing techniques to analyze and interpret medical images, particularly MRI and CT scans. Deep learning techniques have ushered in a remarkable era of progress in the realm of brain tumor diagnosis. These sophisticated algorithms, particularly Convolutional Neural Networks (CNNs), have exhibited an

extraordinary capacity to decipher intricate patterns within medical images, especially MRI and CT scans. Their ability to automatically extract and learn hierarchical features from vast datasets has led to unparalleled accuracy in identifying and characterizing brain tumors. Deep learning's prowess extends beyond mere detection; it enables precise segmentation, tumor volume estimation, and even prediction of treatment response. The amalgamation of deep learning's prowess with medical imaging has revolutionized the field, offering not only enhanced diagnostic capabilities but also the potential to improve patient outcomes by facilitating early detection and personalized treatment strategies. As these algorithms continue to evolve, the future of brain tumor diagnosis holds immense promise, with deep learning at its forefront, exemplifying the synergy between artificial intelligence and healthcare (Ayadi et al., 2021; Chattopadhyay & Maitra, 2022; Deepak & Ameer, 2019; Senan et al., 2022). Mahalty et al. present a novel deep learning model for MRI-based brain tumor classification that integrates a soft attention mechanism and multi-layer feature aggregation, demonstrating superior performance compared to state-of-the-art models in enhancing classification accuracy.

In this study, we present a comprehensive comparative analysis of various deep neural network architectures for the classification of brain MRI images. The primary objective of this research is twofold: first, to classify images into two categories, "Tumor" and "No Tumor," and second, to further classify tumor images into four specific subcategories: "Glioma," "Meningioma," "No Tumor," and "Pituitary." Our evaluation focuses on the following deep learning architectures: DenseNet-121, DenseNet-201, Xception, EfficientNetV2B3, EfficientNetV2S, EfficientNetB0, InceptionV3, MobileNet, and ResNet-50. Through an extensive experimentation process, we have assessed the performance of these architectures using various evaluation metrics, including accuracy, precision, recall, F1 score, and overall accuracy. Remarkably, DenseNet-121 consistently outperforms the other architectures in both binary tumor classification and multi-class tumor subtype classification tasks. Its ability to capture intricate features within the MRI images results in superior classification accuracy.

2. Relevant Work

Over the last two decades, medical image analysis has gained significant attention due to its broad healthcare applications, particularly in patient investigation and diagnosis. Various studies have explored machine learning-based approaches for brain image classification and analysis, including the comparison of traditional machine learning and deep learning methods. Additionally, some studies have introduced innovative techniques for brain tumor segmentation and localization, achieving high precision in cancer detection from MRI scans.

Table 1. Relevant work

Ref.	Dataset	Tumor Type	Method	Result
(Abiwinanda et al., 2019)	Cheng (Brain Tumor Dataset (Cheng, 2017)	Glioma, Meningioma, and Pituitary	CNN	training accuracy of 98.51% and validation accuracy of 84.19% at best
(Seetha & Raja, 2018)	tumor and nontumor MRI images collected from different online resources	Tumor, Non-tumor	SVM, DNN, CNN	training accuracy of 97.5%
(Deepak & Ameer, 2019)	Cheng (Brain Tumor Dataset (Cheng, 2017)	Glioma, Meningioma, and Pituitary	Transfer learning based on CNN	a mean classification accuracy of 98%
(Ayadi et al., 2021)	Figshare (Cheng, 2017), Radiopaedia	Glioma, Meningioma, and Pituitary	CNN	Overall accuracy between 90.35% and 99.61%
(Raza et al., 2022)	Figshare (Cheng, 2017)	Glioma, Meningioma, and Pituitary	Hybrid deep learning	99.67% accuracy
(Abdusalomov et al., 2023)	MRI scan images (<i>Brain Tumor Classification (MRI)</i> , n.d.; <i>Brain Tumor MRI Dataset</i> , n.d.)	Tumor, Non-tumor	YOLOv7	99.5% accuracy
(Afshar et al., 2019)	MRI scan images (Cheng et al., 2016)	Glioma, Meningioma, and Pituitary	Capsule Network	90.8% accuracy

Despite substantial progress in this field, there is still a need for novel methodologies to enhance feature extraction, tumor classification, and localization efficacy. These studies collectively emphasize the significant potential of deep learning in improving brain tumor diagnosis and analysis from medical images. Table 1 This table provides information about various references, datasets, tumor types, methods used, and the corresponding results in different studies related to brain tumor detection and classification.

3. Dataset

We utilized a publicly accessible MRI dataset acquired from Kaggle.com (*Brain Tumor Classification (MRI)*, n.d.; Cheng et al., 2016). There are 926 instances of the 'Glioma' class, 937 instances of the 'Meningioma' class, 901 instances of the 'Pituitary' class, and 500 instances categorized as 'Non-tumor.'

The initial dataset preparation step involves cropping the brain from the images. We used Adrian Rosebrock's source code for this progress (*Finding Extreme Points in Contours with OpenCV*, n.d.). Class-wise sample images from the dataset are given in Figure 1.

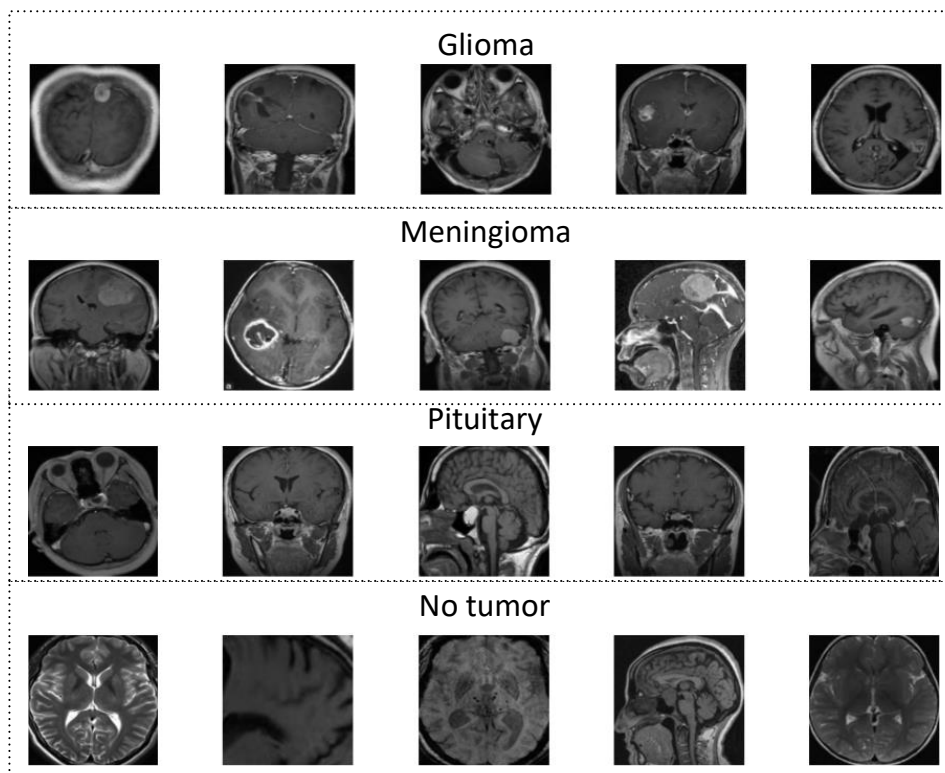


Figure 1. Class-wise sample images from the dataset

We utilized this dataset in two ways. In the first approach, we classified the brain images into two categories: tumor and no tumor. In the second approach, we classified them into four categories: Glioma, Meningioma, Pituitary, and No tumor. We split the data into training, validation, and test sets.

In the first approach, the training set comprises 1,990 Tumor samples and 360 No-tumor samples, while the validation set consists of 496 Tumor samples and 90 No-tumor samples. Finally, the test set is composed of 278 Tumor samples and 50 No-tumor samples.

In the second approach, the training set contains 667 Glioma samples, 675 Meningioma samples, 648 Pituitary samples, and 360 No tumor samples. In the validation set, there are 166 Glioma samples, 168 Meningioma samples, 162 Pituitary samples, and 90 No tumor samples. Lastly, the test set includes 93 Glioma samples, 94 Meningioma samples, 91 Pituitary samples, and 50 No-tumor samples.

4. Method

We used transfer learning-based deep learning models in our study. Transfer Learning in the context of deep learning refers to the practice of leveraging a pre-trained neural network model for a new, related task. It's a technique where a model developed for a particular task is adapted for a second related task. Transfer learning can significantly speed up the training process and often leads

to better performance compared to training a model from scratch. Transfer learning typically involves starting with a pre-trained model that has been trained on a large dataset for a similar or related problem. These models are often trained on massive datasets and have learned useful features from them. After obtaining a pre-trained model, you fine-tune it for your specific task. Training deep neural networks from scratch can be computationally expensive and time-consuming, especially when dealing with large datasets and complex architectures. Transfer learning allows you to start with a pre-trained model, saving a significant amount of training time.

We have leveraged a selection of pre-trained CNN architectures, including DenseNet121, DenseNet201, Xception, EfficientNetV2B3, EfficientNetV2S, EfficientNetB0, InceptionV3, MobileNet, and ResNet-50, for brain tumor classification. These models can be readily accessed in Keras, an open-source neural network library written in Python (*Keras Applications*, n.d.).

DenseNet, short for "Densely Connected Convolutional Network," is a deep learning architecture for image classification and computer vision tasks. It was introduced by Gao Huang, Zhuang Liu, and Laurens van der Maaten in their 2017 paper titled "Densely Connected Convolutional Networks." DenseNet builds on the concept of skip connections, also known as residual connections, used in ResNet architectures. In a DenseNet, each layer is connected not only to the layers immediately before and after it but also to all the previous layers in a dense and highly interconnected manner. This dense connectivity pattern enables feature reuse, reduces the number of parameters, and mitigates the vanishing gradient problem during training (Huang et al., 2017). DenseNet architectures come in various versions, including DenseNet-121, DenseNet-169, DenseNet-201, and others, each with a different number of layers. DenseNet has achieved state-of-the-art results on various image classification tasks and is widely used in computer vision applications due to its efficiency and effectiveness in training deep neural networks.

Inception, also known as GoogleNet, is a deep learning architecture for convolutional neural networks (CNNs) that was designed to address the challenges of training very deep networks while managing computational efficiency. Introduced by Google researchers, Inception employs a unique and innovative "Inception module" that incorporates multiple convolutional filter sizes and pooling operations within a single layer. This enables the network to capture features at various scales, facilitating more robust and accurate feature extraction. Inception has been influential in the field of computer vision, particularly in image classification and object detection tasks, and its ability to balance model depth with computational efficiency has made it a widely used architecture in deep learning (Szegedy et al., 2016).

EfficientNet is a family of deep learning models specifically designed to achieve state-of-the-art performance with high efficiency in terms of computational resources. These models use a novel scaling method that uniformly scales the network's depth, width, and resolution. This approach

ensures that the model adapts to different computational constraints while maintaining excellent performance on a wide range of computer vision tasks, such as image classification and object detection. EfficientNet's architecture efficiently balances model size and accuracy, making it a popular choice for various real-world applications where computational efficiency is a priority, such as edge devices and resource-constrained environments (Tan & Le, 2019).

Xception, short for "Extreme Inception," is a deep learning model designed for computer vision tasks, particularly image classification and object detection. Developed by Google researchers, Xception is based on the Inception architecture and focuses on enhancing feature extraction through depthwise separable convolutions, which separate the convolution process into two stages: depthwise and pointwise convolutions. This separation of operations aims to capture complex patterns more effectively and efficiently, making the model more robust while reducing the number of parameters. Xception has proven to be highly effective in various visual recognition tasks, offering excellent accuracy and performance in deep learning applications (Chollet, 2017).

ResNet, or Residual Neural Network, is a deep learning architecture that revolutionized the field of computer vision. It was introduced by Kaiming He et al. in 2016. What sets ResNet apart from previous architectures is its use of residual blocks, which allow for the training of very deep neural networks without the vanishing gradient problem. In a residual block, the input to a layer is combined with the output of the layer, allowing the network to learn residual functions. This approach enables the training of extremely deep networks, with hundreds or even thousands of layers, leading to improved accuracy in tasks like image classification and object detection. ResNet's architecture has become a fundamental building block for many state-of-the-art neural network architectures in various domains beyond computer vision (He et al., 2016).

The general block diagram of the system is given in Figure 2. In the preprocessing stage, the dataset has been divided into training, validation, and test data sets after the data splitting process. Parameters have been configured for the preferred models for transfer learning. For all architectures, a batch size of 32 and an epoch count of 40 have been determined. This choice was made through trial and error, and it was deemed sufficient to achieve the best results after 40 epochs. In the second stage, pre-trained architectures were retrained using the training data. Prediction accuracy rates were obtained using both the training data and the validation data. In the third stage, completed training architectures were evaluated using the test data as input, and evaluation results were obtained based on performance metrics. Performance metrics utilized the True Positive, True Negative, False Negative (FN), and False Positive (FP) values obtained from the classification results on the test data.

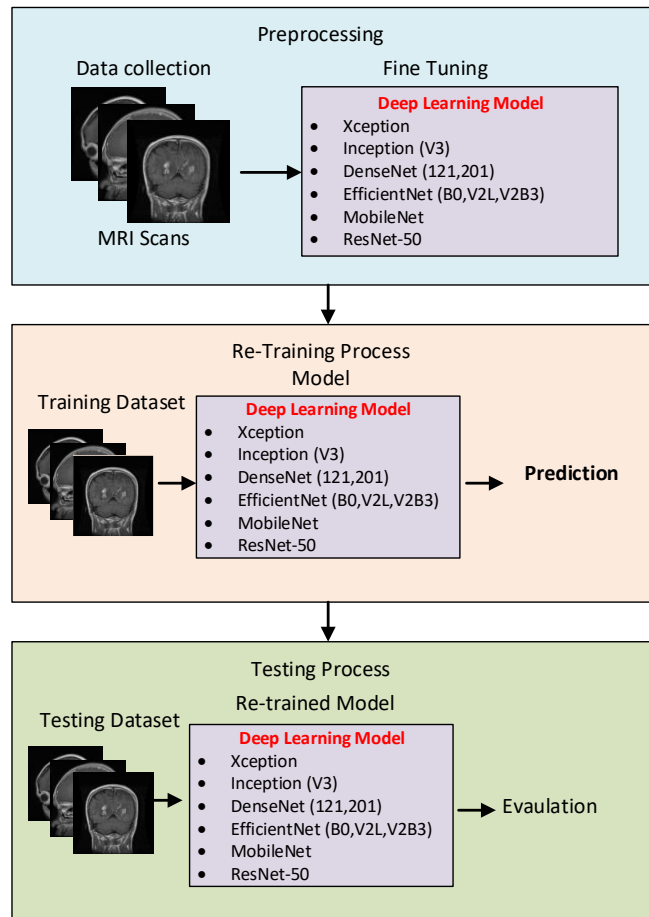


Figure 2. Block diagram of the system

In the context of classification True Positive (TP) refers to the number of cases correctly predicted as positive when they are actually positive. True Negative (TN) refers to the number of cases correctly predicted as negative when they are actually negative. False Negative (FN), also known as a type two error, represents the number of cases incorrectly predicted as negative when they are actually positive. False Positive (FP), also known as a type one error, denotes the number of cases incorrectly predicted as positive when they are actually negative.

Precision, recall, F1 score, and accuracy are performance metrics that help evaluate the performance of a classification model. Eq.1-4 are the formulas for these metrics. Precision (P) measures the accuracy of positive predictions made by the model (Raschka, 2014) as given in Eq. 1.

$$P = \frac{TP}{TP+FP} \quad (1)$$

Recall, also known as True Positive Rate or Sensitivity, measures the ability of the model to identify all positive instances correctly. The equation of recall is given in Eq. 2.

$$R = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

The F1 Score is the harmonic mean of precision and recall. It provides a balance between precision and recall and is particularly useful when dealing with imbalanced datasets. The equation of F1 is given in Eq.3.

$$F1 \text{ Score} = 2 \cdot \frac{P \cdot R}{P+R} \quad (3)$$

Accuracy measures the overall correctness of predictions made by the model. The equation of accuracy is given in Eq. 4.

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (4)$$

5. Results

For the first approach, DenseNet-121 provided the highest accuracy rate on the validation data. In Table 2, we present the training performance metrics for nine different base models used in the first approach. The table provides an overview of the training and validation performance of these base models, including their training accuracy, accuracy loss, validation accuracy, and validation loss. The models with the highest training accuracy are MobileNet, DenseNet-121, and DenseNet-201 achieving a perfect training accuracy of 100%. This indicates that MobileNet, DenseNet-121, and DenseNet-201 have successfully learned and adapted to the training data, fitting it very closely. On the other hand, the model with the highest validation accuracy is DenseNet-121, with a validation accuracy of 98.81%. This suggests that DenseNet-121 performed exceptionally well on data it hasn't seen during training, demonstrating its robustness and effectiveness in generalizing to new, unseen examples. These results indicate that MobileNet excels in fitting the training data closely, while DenseNet-121 is particularly adept at achieving high accuracy on new, previously unseen data during validation.

Table 2. Training performance table for first approach

Base Model	Training Accuracy	Acc-loss	Validation accuracy	Val-loss
DenseNet-121	100%	6.62E-01	98.81%	0.1437
Densenet-201	100%	1.37E+00	98.64%	0.0605
Xception	99.96%	0.0017	97.31%	0.0653
EfficientNetV2B3	99.49%	0.0142	97.27%	0.0701
EfficientNetV2S	99.62%	0.0095	97.27%	0.1571
EfficientNetB0	99.96%	0.002	98.13%	0.0794
InceptionV3	99.74%	0.005	96.76%	0.1517
MobileNet	100%	7.60E-02	97.61%	0.0918
Resnet-50	99.11%	0.0275	96.76%	0.1393

Figure 3 displays the confusion matrices obtained from the test data inputs for the nine re-trained architectures. The performance metrics for re-trained models in the first approach can be found in Table 3. In this context, "n truth" represents the number of actual cases within a class, while "n classified" indicates the count of cases classified as belonging to that class. These performance metrics are derived from the confusion matrices presented in Figure 3.

Table 3. Performance metrics of re-trained models for the first approach

Method	Class	n truth	n classified	Precision	Recall	F1 Score	Overall Accuracy
MobileNet	No Tumor	67	50	0.96	0.72	0.82	93.56%
	Tumor	259	276	0.93	0.99	0.99	
DenseNet-121	No Tumor	64	50	0.98	0.77	0.86	95.09%
	Tumor	262	276	0.95	1.0	0.97	
DenseNet-201	No Tumor	66	50	0.96	0.73	0.73	93.87%
	Tumor	260	276	0.93	0.99	0.99	
Xception	No Tumor	59	50	0.92	0.78	0.84	94.79%
	Tumor	267	276	0.95	0.99	0.97	
Inception-V3	No Tumor	61	50	0.92	0.75	0.83	94.17%
	Tumor	265	276	0.95	0.98	0.96	
EfficientNet-B0	No Tumor	70	50	0.98	0.70	0.82	93.25%
	Tumor	256	276	0.92	1.0	0.96	
EfficientNet-V2B3	No Tumor	68	50	0.98	0.72	0.83	93.87%
	Tumor	258	276	0.93	1.0	0.96	
EfficientNet-V2S	No Tumor	64	50	0.92	0.72	0.81	93.25%
	Tumor	262	276	0.93	0.98	0.96	
ResNet-50	No Tumor	60	50	0.82	0.68	0.75	91.41%
	Tumor	256	276	0.93	0.97	0.95	

Among the models, both MobileNet and DenseNet-201 achieved the highest F1 score for the "Tumor" class, while ResNet-50 recorded the lowest F1 score for this class. For the "No Tumor" class, DenseNet-121 secured the highest F1 score, while ResNet-50 again had the lowest F1 score. Notably, DenseNet-121 emerged as the model with the highest overall accuracy, showcasing its exceptional proficiency in correctly classifying "Tumor" cases with precision, recall, and overall

accuracy. Conversely, ResNet-50 exhibited the lowest overall accuracy among all models, particularly when classifying both "No Tumor" and "Tumor" cases, indicating a relatively higher rate of misclassifications in comparison to the other models.

Model	MobileNet			Model	DenseNet-121			Model	DenseNet-201		
P/T	Predicted			P/T	Predicted			P/T	Predicted		
True	Class	No Tumor	Tumor	True	Class	No Tumor	Tumor	True	Class	No Tumor	Tumor
	No Tumor	48	2		No Tumor	49	1		No Tumor	48	2
	Tumor	19	257		Tumor	15	261		Tumor	18	258
Model	Xception			Model	Inception-V3			Model	EfficientNet-B0		
P/T	Predicted			P/T	Predicted			P/T	Predicted		
True	Class	No Tumor	Tumor	True	Class	No Tumor	Tumor	True	Class	No Tumor	Tumor
	No Tumor	46	4		No Tumor	46	4		No Tumor	49	1
	Tumor	13	263		Tumor	15	261		Tumor	21	255
Model	EfficientNet-V2B3			Model	EfficientNet-V2S			Model	ResNet-50		
P/T	Predicted			P/T	Predicted			P/T	Predicted		
True	Class	No Tumor	Tumor	True	Class	No Tumor	Tumor	True	Class	No Tumor	Tumor
	No Tumor	49	1		No Tumor	46	4		No Tumor	41	9
	Tumor	19	257		Tumor	18	258		Tumor	19	257

Figure 3. Confusion matrixes for the first approach

DenseNet-121 architecture provided the highest accuracy rate on the validation data for the second approach. Table 4 provides an overview of the training and validation performance of nine base models for the second approach. It includes their training accuracy, accuracy loss, validation accuracy, and validation loss. These metrics help assess how well each model has been trained and how it generalizes to new data. The table provides an overview of the training and validation performance of these base models. It includes their training accuracy, accuracy loss, validation accuracy, and validation loss. These metrics help assess how well each model has been trained and how it generalizes to new data.

Table 4. Training performance table for first approach

Base Model	Training Accuracy	Acc-loss	Validation accuracy	Val-loss
DenseNet121	99.49	0.0162	84.48	0.7303
Densenet201	99.06	0.0231	69.45	23.455
Xception	99.78	0.0081	89.93	0.5774
EfficientNetV2B3	99.15	0.0309	90.61	0.3279
EfficientNetV2S	99.49	0.0181	91.98	0.2974
EfficientNetB0	98.89	0.0362	73.04	12.469
InceptionV3	98.98	0.0272	78.67	14.649
MobileNet	99.66	0.0119	88.4	0.6248
Resnet-50	99.4	0.0248	85.15	0.7683

Figure 4 displays the confusion matrices obtained from the test data inputs for the nine re-trained architectures.

Model	MobileNet					Model	DenseNet-121					Model	DenseNet-201				
P/T	Predicted					P/T	Predicted					P/T	Predicted				
True	Class	Glioma	Meningioma	No Tumor	Pituitary	True	Class	Glioma	Meningioma	No Tumor	Pituitary	True	Class	Glioma	Meningioma	No Tumor	Pituitary
	Glioma	49	33	11	0		Glioma	59	17	17	0		Glioma	10	65	12	6
	Meningioma	2	92	0	0		Meningioma	0	93	1	0		Meningioma	0	90	0	4
	No Tumor	0	0	50	0		No Tumor	0	0	50	0		No Tumor	0	0	50	0
	Pituitary	0	3	6	82		Pituitary	0	3	15	73		Pituitary	0	23	0	68
Model	Xception					Model	Inception-V3					Model	EfficientNet-B0				
P/T	Predicted					P/T	Predicted					P/T	Predicted				
True	Class	Glioma	Meningioma	No Tumor	Pituitary	True	Class	Glioma	Meningioma	No Tumor	Pituitary	True	Class	Glioma	Meningioma	No Tumor	Pituitary
	Glioma	37	25	26	5		Glioma	33	33	27	0		Glioma	18	11	64	0
	Meningioma	1	92	1	0		Meningioma	0	92	2	0		Meningioma	0	44	50	0
	No Tumor	0	0	50	0		No Tumor	1	0	49	0		No Tumor	0	0	50	0
	Pituitary	0	2	0	89		Pituitary	0	9	22	60		Pituitary	0	0	22	69
Model	EfficientNet-V2B3					Model	EfficientNet-V2S					Model	ResNet-50				
P/T	Predicted					P/T	Predicted					P/T	Predicted				
True	Class	Glioma	Meningioma	No Tumor	Pituitary	True	Class	Glioma	Meningioma	No Tumor	Pituitary	True	Class	Glioma	Meningioma	No Tumor	Pituitary
	Glioma	37	47	7	2		Glioma	30	24	34	5		Glioma	32	25	32	4
	Meningioma	1	93	0	0		Meningioma	0	84	10	0		Meningioma	0	89	5	0
	No Tumor	0	0	50	0		No Tumor	0	0	50	0		No Tumor	0	1	49	0
	Pituitary	0	10	0	81		Pituitary	0	3	1	87		Pituitary	1	4	5	81

Figure 4. Confusion matrixes for the second approach

The performance metrics for re-trained models in the second approach are provided in Table 5. These metrics were computed based on the confusion matrices presented in Figure 4. In the Glioma class, DenseNet-121 achieved the highest F1 Score and Overall Accuracy, while DenseNet-201 recorded the lowest F1 score. For the Meningioma class, DenseNet-201 attained the highest F1 Score, while EfficientNet-V2B3 had the lowest F1 score. In the No Tumor class, EfficientNet-V2B3 secured the highest F1 Score, while EfficientNet-B0 had the lowest F1 score. Regarding the Pituitary class, Xception demonstrated the highest F1 Score, while Inception-V3 exhibited the lowest F1 score. Notably, the DenseNet-121 model achieved the best overall accuracy, whereas the EfficientNet-B0 model recorded the lowest overall accuracy among all models.

Table 5. Performance metrics of re-trained models for the second approach

Method	Class	n truth	n classified	Acc.	Precision	Recall	F1 Score	Overall Acc.
MobileNet	Glioma	51	93	85.98%	0.53	0.96	0.68	83.23%
	Meningioma	128	94	88.41%	0.98	0.72	0.83	
	No Tumor	67	50	94.82%	1.0	0.75	0.85	
	Pituitary	82	91	97.26%	0.9	1.0	0.95	
DenseNet-121	Glioma	59	93	89.63%	0.63	1.0	0.78	83.84%
	Meningioma	113	94	93.6%	0.99	0.82	0.9	
	No Tumor	83	50	89.94%	1.0	0.6	0.75	
DenseNet-201	Pituitary	73	91	94.51%	0.8	1.0	0.89	64.46%
	Glioma	10	93	74.7%	0.11	1.0	0.19	
	Meningioma	178	94	71.95%	0.96	0.51	1.0	

	No Tumor	62	50	96.54%	1.0	0.81	0.89	
	Pituitary	78	91	89.94%	0.75	0.87	0.8	
	Glioma	38	93	82.62%	0.4	0.97	0.56	
Xception	Meningioma	119	94	91.16%	0.98	0.77	0.86	81.71%
	No Tumor	77	50	91.77%	1.0	0.65	0.79	
	Pituitary	94	91	97.87%	0.98	0.95	0.96	
	Glioma	34	93	81.4%	0.35	0.97	0.52	
Inception-V3	Meningioma	134	94	86.59%	0.98	0.69	0.81	71.34%
	No Tumor	100	50	84.15%	0.98	0.49	0.65	
	Pituitary	60	91	90.55%	0.66	1.0	0.79	
	Glioma	18	93	77.13%	0.19	1.0	0.32	
EfficientNet-B0	Meningioma	55	94	81.4%	0.47	0.8	0.59	55.18%
	No Tumor	186	50	58.54%	1.0	0.27	0.42	
	Pituitary	69	91	93.29%	0.76	1.0	0.86	
	Glioma	38	93	82.62%	0.4	0.97	0.56	
EfficientNet-V2B3	Meningioma	150	94	82.32%	0.99	0.62	0.76	79.57%
	No Tumor	57	50	97.87%	1.0	0.88	0.93	
	Pituitary	83	91	96.34%	0.89	0.98	0.93	
	Glioma	30	93	80.79%	0.32	1.0	0.49	
EfficientNet-V2S	Meningioma	111	94	88.72%	0.89	0.76	0.82	76.52%
	No Tumor	95	50	86.28%	1.0	0.53	0.69	
	Pituitary	92	91	97.26%	0.96	0.99	0.95	
	Glioma	33	93	81.1%	0.34	0.97	0.51	
ResNet-50	Meningioma	119	94	89.33%	0.95	0.75	0.84	76.52%
	No Tumor	91	50	86.89%	0.98	0.54	0.7	
	Pituitary	85	91	95.73%	0.89	0.95	0.92	

6. Conclusions

In conclusion, this study harnessed the capabilities of deep learning algorithms to advance the detection and diagnosis of brain tumors through MRI scans. By utilizing a comprehensive dataset that captured a wide range of tumor types and imaging conditions, our model demonstrated robustness and adaptability. The results highlighted the efficacy of the proposed approach, achieving high accuracy and sensitivity in tumor detection. This contribution is instrumental in developing reliable tools for the early diagnosis and monitoring of brain tumors, offering significant potential for improving patient care in neuroimaging.

A key aspect of the study was the careful selection of deep neural network architectures for the brain MRI image classification task. DenseNet-121 emerged as a particularly effective model, consistently providing accurate and reliable classifications. In our binary classification approach, which categorized images as tumor and no tumor, MobileNet, DenseNet-121, and DenseNet-201 all achieved perfect training accuracy. However, DenseNet-121 excelled in generalization, with a validation accuracy of 98.81%. In the multi-class classification, which differentiated between four tumor categories, DenseNet-121 again outperformed the other models, recording the highest F1 Scores and overall accuracy, especially in the Glioma and No Tumor classes. DenseNet-201 and EfficientNet-B0, in contrast, demonstrated lower F1 Scores, underscoring the critical importance of model architecture in deep learning applications.

This study underscores the transformative potential of deep learning in medical imaging, particularly in enhancing the precision of brain tumor detection and classification. Our findings highlight the importance of model selection for achieving optimal performance in clinical diagnostics, marking a step forward in the application of AI in healthcare.

In the future, several avenues can be explored to extend the findings of this study and further enhance deep learning-based brain tumor diagnosis methods. Firstly, testing the model's performance on larger and more diverse datasets could improve its generalization ability, particularly in diagnosing rare tumor types. Additionally, the use of more complex deep learning architectures, especially hybrid models and Transformer-based approaches, can be investigated. Integrating explainable artificial intelligence (XAI) methods could support the clinical use of the model by allowing doctors to trust these tools more confidently in decision-making processes. Finally, training the model with multimodal data sources, such as combining different medical imaging modalities (CT, PET, etc.), could provide a more comprehensive perspective in brain tumor diagnosis and monitoring. Such improvements could broaden the application of deep learning in the medical field and offer more effective solutions in clinical practice.

Authors' Contributions

All authors contributed equally to the study.

Statement of Conflicts of Interest

There is no conflict of interest between the authors.

Statement of Research and Publication Ethics

The author declares that this study complies with Research and Publication Ethics.

References

- Abd El Kader, I., Xu, G., Shuai, Z., Saminu, S., Javaid, I., & Salim Ahmad, I. (2021). Differential deep convolutional neural network model for brain tumor classification. *Brain Sciences*, *11*(3), 352.
- Abdusalomov, A. B., Mukhiddinov, M., & Whangbo, T. K. (2023). Brain Tumor Detection Based on Deep Learning Approaches and Magnetic Resonance Imaging. *Cancers*, *15*(16), 4172.
- Abiwinanda, N., Hanif, M., Hesaputra, S. T., Handayani, A., & Mengko, T. R. (2019). Brain tumor classification using convolutional neural network. *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2018: June 3-8, 2018, Prague, Czech Republic (Vol. 1)*, 183–189.
- Afshar, P., Plataniotis, K. N., & Mohammadi, A. (2019). Capsule networks for brain tumor classification based

- on MRI images and coarse tumor boundaries. *ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 1368–1372.
- Alentorn, A., Hoang-Xuan, K., & Mikkelsen, T. (2016). Presenting signs and symptoms in brain tumors. *Handbook of Clinical Neurology*, 134, 19–26.
- Ayadi, W., Elhamzi, W., Charfi, I., & Atri, M. (2021). Deep CNN for brain tumor classification. *Neural Processing Letters*, 53, 671–700.
- Baliga, S., Gandola, L., Timmermann, B., Gail, H., Padovani, L., Janssens, G. O., & Yock, T. I. (2021). Brain tumors: Medulloblastoma, ATRT, ependymoma. *Pediatric Blood & Cancer*, 68, e28395.
- Bilal, H. (2023). *Computed Tomography (CT) Scanning: Principles and Applications*.
- Black, P. M. (1991). Brain tumors. *New England Journal of Medicine*, 324(22), 1555–1564.
- Brain Tumor Classification (MRI)*. (n.d.). <https://www.kaggle.com/datasets/sartajbhuvaji/brain-tumor-classification-mri>
- Brain Tumor MRI Dataset*. (n.d.). <https://www.kaggle.com/datasets/masoudnickparvar/brain-tumor-mri-dataset>
- Bühring, U., Herrlinger, U., Krings, T., Thiex, R., Weller, M., & Küker, W. (2001). MRI features of primary central nervous system lymphomas at presentation. *Neurology*, 57(3), 393–396.
- Cano-Valdez, A. M., & Sevilla-Lizcano, D. B. (2021). Pathological classification of brain tumors. *Principles of Neuro-Oncology: Brain & Skull Base*, 75–105.
- Chandana, S. R., Movva, S., Arora, M., & Singh, T. (2008). Primary brain tumors in adults. *American Family Physician*, 77(10), 1423–1430.
- Chattopadhyay, A., & Maitra, M. (2022). MRI-based brain tumour image detection using CNN based deep learning method. *Neuroscience Informatics*, 2(4), 100060.
- Cheng. (2017). *brain tumor dataset*. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.1512427.v5>
- Cheng, J., Yang, W., Huang, M., Huang, W., Jiang, J., Zhou, Y., Yang, R., Zhao, J., Feng, Y., Feng, Q., & others. (2016). Retrieval of brain tumors by adaptive spatial pooling and fisher vector representation. *PloS One*, 11(6), e0157112.
- Chollet, F. (2017). Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1251–1258.
- DeAngelis, L. M. (2001). Brain tumors. *New England Journal of Medicine*, 344(2), 114–123.
- Deepak, S., & Ameer, P. M. (2019). Brain tumor classification using deep CNN features via transfer learning. *Computers in Biology and Medicine*, 111, 103345.
- Dulac, C., & Wagner, S. (2006). Genetic analysis of brain circuits underlying pheromone signaling. *Annu. Rev. Genet.*, 40, 449–467.
- Finding extreme points in contours with OpenCV*. (n.d.). <https://pyimagesearch.com/2016/04/11/finding-extreme-points-in-contours-with-opencv/>
- Gore, J. C., & others. (2003). Principles and practice of functional MRI of the human brain. *The Journal of Clinical Investigation*, 112(1), 4–9.
- Hayashida, Y., Hirai, T., Morishita, S., Kitajima, M., Murakami, R., Korogi, Y., Makino, K., Nakamura, H., Ikushima, I., Yamura, M., & others. (2006). Diffusion-weighted imaging of metastatic brain tumors: comparison with histologic type and tumor cellularity. *American Journal of Neuroradiology*, 27(7), 1419–1425.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 770–778.
- Herholz, K., Langen, K.-J., Schiepers, C., & Mountz, J. M. (2012). Brain tumors. *Seminars in Nuclear Medicine*, 42(6), 356–370.
- Hernández-Hernández, A., Reyes-Moreno, I., Gutiérrez-Aceves, A., Guerrero-Juárez, V., Santos-Zambrano, J., López-Martínez, M., Castro-Martínez, E., Cacho-Díaz, B., Méndez-Padilla, J. A., & González-Aguilar, A. (2018). Primary tumors of the central nervous system. Clinical experience at a third level center. *Revista de Investigación Clínica*, 70(4), 177–183.
- Hilton, D. A., & Hanemann, C. O. (2014). Schwannomas and their pathogenesis. *Brain Pathology*, 24(3), 205–220.
- Huang, G., Liu, Z., Van Der Maaten, L., & Weinberger, K. Q. (2017). Densely connected convolutional networks. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 4700–4708.
- Joshi, A. A., & Aziz, R. M. (2024). Deep learning approach for brain tumor classification using metaheuristic optimization with gene expression data. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 34(2), 1–16. <https://doi.org/10.1002/ima.23007>

- Kaplan, K., Kaya, Y., Kuncan, M., & Ertunç, H. M. (2020). Brain tumor classification using modified local binary patterns (LBP) feature extraction methods. *Medical Hypotheses*, 139(March). <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2020.109696>
- Katti, G., Ara, S. A., & Shireen, A. (2011). Magnetic resonance imaging (MRI)--A review. *International Journal of Dental Clinics*, 3(1), 65–70.
- Keras Applications*. (n.d.). <https://keras.io/api/applications>
- Komori, T. (2017). The 2016 WHO classification of tumours of the central nervous system: the major points of revision. *Neurologia Medico-Chirurgica*, 57(7), 301–311.
- Momin, A. A., Recinos, M. A., Cioffi, G., Patil, N., Soni, P., Almeida, J. P., Kruchko, C., Barnholtz-Sloan, J. S., Recinos, P. F., & Kshetry, V. R. (2021). Descriptive epidemiology of craniopharyngiomas in the United States. *Pituitary*, 24, 517–522.
- Neumann, H. P. H., Eggert, H. R., Weigel, K., Friedburg, H., Wiestler, O. D., & Schollmeyer, P. (1989). Hemangioblastomas of the central nervous system: a 10-year study with special reference to von Hippel-Lindau syndrome. *Journal of Neurosurgery*, 70(1), 24–30.
- Nibhoria, S., Tiwana, K. K., Phutela, R., Bajaj, A., & Chhabra, S. (2015). Histopathological spectrum of central nervous system tumors: A single centre study of 100 cases. *International Journal of Scientific Study*, 3(6), 130–134.
- Ostrom, Q. T., Gittleman, H., Fulop, J., Liu, M., Blanda, R., Kromer, C., Wolinsky, Y., Kruchko, C., & Barnholtz-Sloan, J. S. (2015). CBTRUS statistical report: primary brain and central nervous system tumors diagnosed in the United States in 2008-2012. *Neuro-Oncology*, 17(suppl_4), iv1--iv62.
- Pawelczyk, T., Pawelczyk, A., & Rabe-Jabłońska, J. (2012). Before you diagnose a patient with a conversion disorder, perform a thorough general medical and neurological examination. Case study. *Psychiatria Polska*, 46(3), 483–492.
- Phelps, M. E., & Mazziotta, J. C. (1985). Positron emission tomography: human brain function and biochemistry. *Science*, 228(4701), 799–809.
- Raschka, S. (2014). An overview of general performance metrics of binary classifier systems. *ArXiv Preprint ArXiv:1410.5330*.
- Raza, A., Ayub, H., Khan, J. A., Ahmad, I., S. Salama, A., Daradkeh, Y. I., Javeed, D., Ur Rehman, A., & Hamam, H. (2022). A hybrid deep learning-based approach for brain tumor classification. *Electronics*, 11(7), 1146.
- Seetha, J., & Raja, S. S. (2018). Brain tumor classification using convolutional neural networks. *Biomedical & Pharmacology Journal*, 11(3), 1457.
- Senan, E. M., Jadhav, M. E., Rassem, T. H., Aljaloud, A. S., Mohammed, B. A., Al-Mekhlafi, Z. G., & others. (2022). Early diagnosis of brain tumour mri images using hybrid techniques between deep and machine learning. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2022.
- Shankar, G. M., Balaj, L., Stott, S. L., Nahed, B., & Carter, B. S. (2017). Liquid biopsy for brain tumors. *Expert Review of Molecular Diagnostics*, 17(10), 943–947.
- Sheline, G. E. (1977). Radiation therapy of brain tumors. *Cancer*, 39(S2), 873–881.
- Siddiqui, M. F., Reza, A. W., & Kanesan, J. (2015). An automated and intelligent medical decision support system for brain MRI scans classification. *PloS One*, 10(8), e0135875.
- Szegedy, C., Vanhoucke, V., Ioffe, S., Shlens, J., & Wojna, Z. (2016). Rethinking the inception architecture for computer vision. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2818–2826.
- Tan, M., & Le, Q. (2019). Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. *International Conference on Machine Learning*, 6105–6114.
- Taylor, T., Dineen, R. A., Gardiner, D. C., Buss, C. H., Howatson, A., & Pace, N. L. (2014). Computed tomography (CT) angiography for confirmation of the clinical diagnosis of brain death. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 3.
- Thakor, N. V., & Tong, S. (2004). Advances in quantitative electroencephalogram analysis methods. *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, 6, 453–495.
- Theodros, D., Patel, M., Ruzevick, J., Lim, M., & Bettegowda, C. (2015). Pituitary adenomas: historical perspective, surgical management and future directions. *CNS Oncology*, 4(6), 411–429.

Türkiye'de Cinsiyete göre Obezite Öncesi Yüzdeler Dağılımının Yapay Sinir Ağı ve Zaman Serileri ile Tahmini

Halil ÇOLAK¹, Emre ÇOLAK^{2*}

Öz

Obezite, artan aşırı kilolu birey oranları nedeniyle Türkiye'de önemli bir halk sağlığı sorunu teşkil etmektedir. Ancak bu sorun, sağlıklı beslenme alışkanlıklarının teşvik edilmesi, düzenli fiziksel aktivitenin desteklenmesi ve toplumsal farkındalığın artırılması gibi önlemlerle etkili bir şekilde ele alınabilir. Bu hedefe ulaşmak kolektif bir çaba ve ortak bir vizyon gerektirecektir. Obezite için alınacak tedbirlerin etkin olabilmesi açısından, obezite öncesi dönemin bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Makine öğrenmesinin avantajlarından bir tanesi de geleceği tahmin etmesidir. Yapılan bu çalışmada Türkiye'de cinsiyete göre obezite öncesi yüzdeler dağılım tahminleri yapılmış ve 2023 ile 2030 yılları arasındaki veriler tahmin edilmiştir. Bunun için Levenberg-Marquardt (LM) algoritması, Bayesian Regularization (BR) algoritması, ARIMA model ve Holt-Winters (HW) yöntemi kullanılmıştır. Çıkan sonuçlara göre Türkiye'de cinsiyete göre obezite öncesi yüzdeler dağılımının 2030 yılında kadınlarda LM'e göre %32,79 değerinde erkeklerde ise ARIMA modelin %42,73 değerinde olacağı tahminlendi.

Anahtar Kelimeler: Obezite öncesi, Levenberg-Marquardt, Bayesian Regularization, ARIMA, Holt-Winters

Estimation of Prevalence Distribution of Pre-obesity by Gender in Türkiye Using Artificial Neural Networks and Time Series Analysis

Abstract

Obesity is an important public health problem in Türkiye due to the increasing proportion of overweight individuals. However, this problem can be effectively addressed through measures such as promoting healthy eating habits, supporting regular physical activity, and raising public awareness. Achieving this goal will require a collective effort and a common vision. For the measures to be taken for obesity to be effective, it is of great importance to know the pre-obesity period. One of the advantages of machine learning is that it predicts the future. In this study, the pre-obesity percentage distribution of obesity in Türkiye by gender was estimated and the data between 2023 and 2030 were estimated. For this purpose, the Levenberg-Marquardt (LM) algorithm, Bayesian Regularisation (BR) algorithm, ARIMA model, and Holt-Winters (HW) method were used. According to the results, the pre-obesity percentage distribution by gender in Türkiye in 2030 was estimated to be 32.79% for women according to LM, and 42.73% for men according to the ARIMA model.

Keywords: Pre-obesity, Levenberg-Marquardt, Bayesian Regularization, ARIMA, Holt-Winters

¹Giresun Üniversitesi, Spor Bilimleri Fakültesi, Beden Eğitimi ve Spor Bölümü, Giresun, Türkiye, halil.colak@giresun.edu.tr

²Giresun Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği A.B.D., Giresun, Türkiye, emre.colak@giresun.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 21.03.2024

Kabul/Accepted: 26.07.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Giriş

Obezite kronik ve çok faktörlü bir hastalıktır. Ciddi sağlık ve ekonomik sonuçları olan küresel bir salgın haline gelmiştir (Busebee, Ghusn, Cifuentes, & Acosta, 2023). Obezite aşırı toplam yağ birikimi ve anormal dağılımlı lokalize yağ artışından kaynaklanan kronik metabolik bozukluklar olarak tanımlanır (Wei et al., 2022). Obezite temel olarak tüketilen kalori miktarı ile harcanan enerji miktarı arasındaki dengesizlikten kaynaklanmaktadır (Baer, Dalton, Blundell, Finlayson, & Hu, 2023). Dünya genelinde bir milyardan fazla insan aşırı kilolu olup, 650 milyondan fazla yetişkin, 340 milyondan fazla çocuk ve ergen obez olarak sınıflandırılmaktadır ("World Health Organization Obesity and Overweight.," 2011). Türkiye'de 2019 yılında 15 yaş ve üzeri kadınların %24,8'i obez olarak sınıflandırılırken, bu oran erkeklerde ise %17,3'tür (Pekkurnaz, 2023). Obezitenin neden olduğu insülin direnci, yağlı karaciğer hastalığı, kalp krizi ve hiperlipidemi gibi metabolik hastalıklarla bağlantılıdır ve halk sağlığı için önemli bir tehdit oluşturmaktadır (Jiang, Tian, Yang, Jia, & Shu, 2024).

Teknolojinin gelişmesi insanlığa bazı kolaylıklar getirirken, fiziksel hareketliliği etkileyen birtakım olumsuzlukları da beraberinde getirmiştir. Sık araba ve asansör kullanımı gibi kolaylıklar fiziksel hareketsizliğe yol açmış ve obezite gibi birçok hastalığa neden olmuştur (Çolak, Kale, & Cihan, 2003). Düzenli fiziksel aktivite, obezitenin önlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Janssen et al., 2005). Obezite hastalarında fiziksel aktivite düzeylerinin ve beslenme davranışlarının iyileştirilmesinin sağlık açısından faydalarını destekleyen önemli kanıtlar da bulunmaktadır (Ross & Bradshaw, 2009). Artan fiziksel aktivite düzeylerinin, kilo kaybı olmasa bile obezite sorunu olan bireylerde kardiyometabolik sağlıkta iyileşmelere yol açabileceğini göstermiştir (Elagizi, Kachur, Carbone, Lavie, & Blair, 2020). Türkiye'de obezite, koroner kalp ve damar hastalıkları günümüzün en başta gelen sağlık sorunları biridir [7]. Son 10 yılda Türkiye'de obezite öncesi ve obezite oranları önemli ölçüde artarak %17,9'a yükselmiştir. Bu artış, 2008'de %47,6 olan oranın 2019'da %56,1'e ulaşmasıyla belirginleşmiştir (Benli, Acar, & Bas, 2024). Obezite, genel sağlığı etkileyen karmaşık, kronik bir hastalıktır (Pauchet-Traversat et al., 2023). Bu sebeple ileri yıllar obezite ile ilgili çalışma, fizibilite yapmak için obezite öncesi dönemin tahminlenmesi önemlidir ve makine öğrenimi bu açıdan araştırma süreçlerini tamamlamak için umut verici fırsatlar sağlayabilmektedir (Eisbach, Mai, & Hertel, 2024).

Makine öğrenimi, karmaşık veriler için kullanışlıdır (Henriques & Sadorsky, 2023). Bir tahmin yöntemi olan yapay sinir ağları (YSA), insan zihninin nörolojik işlevlerini ve beynin mantıksal sistemlerini taklit etmek için tasarlanmıştır. Birbirine bağlı nöronlardan oluşurlar ve makine öğrenimi için kullanılırlar (Sarwar, Aziz, & Tiwari, 2023). Otoresif hareketli ortalamalar (ARIMA) modeli tüm zaman serisi yöntemleri arasında doğrusal modellerin uyarlanabilirliği nedeniyle zaman serisi

yöntemlerinin en yaygın olanıdır (Tarmanini, Sarma, Gezeğin, & Ozgonenel, 2023). Diğer zaman serisi yöntemi olan Holt-Winters yöntemi ise kübik üstel düzeltme, mevsimsel özellikleri kullanarak doğrusal eğilimlere, periyodik dalgalanmalara sahip ve durağan olmayan tek sütunlu serileri tahmin etmek için kullanılan bir yöntemdir (Wang, He, Chen, & Jia, 2024).

Literatür taramalarında ise Türkiye’de obezite veya obezitenin tetiklediği hastalıklara yapılan tahmin yöntemleri çalışmaları mevcuttur. Sözmen vd., (2015) Türkiye’nin 2025 yılındaki diyabet prevalansı tahmin etmek için yaptıkları çalışmada obezite veri parametreleri ile Microsoft Excel programında model oluşturup tahminde bulundular. Danacı vd., (2023) makine öğrenimi metotları ile obezite düzeylerini tahmin ettiler ve bu düzeye göre belirli bir sınıflandırma yaptılar. Bunun için karar ağacı algoritmasını ve aşırı gradyan artırma algoritmasını tercih ettiler. Çelik vd., (2021) 2021 yılında obezite düzey tahminleri için YSA ve makine öğrenme yöntemlerini kullandılar. YSA için R^2 değerini 0,9652, destek vektör makinelerinde R^2 değerini 0,978 ve karar ağacı algoritması (torbalı ağaç) R^2 değerini 0,9540 olarak elde ettiler. Özcan vd., (2019) obezitenin neden olduğu hastalıklardan biri olan kalp ve damar hastalıklarının tahmini için destek vektör makineleri ile YSA’yı tercih ettiler. YSA ile R^2 değerini 0,8333, destek vektör makinelerinin R^2 değerini ise 0,9167 olarak buldular.

Obezite ve obezitenin neden oldukları hastalıkların belirlenmesi için obezite öncesi dönemin mutlak bilinmesi gerekmektedir. Bunun için yapılan tahminler oldukça önemlidir. Obezite öncesi dönemin tahmini ile bu hastalıklar önlenmektedir. Bu çalışmanın amacı Türkiye’de cinsiyete göre obezite öncesi yüzdeler dağılımlarının gelecek yıllara yönelik tahmin edilmesidir. Bu çalışmadaki tahminler ile Türkiye’de bilim adamlarının ve politika yapıcılarının (siyasetçilerin) ileri yıllar için yapılacak olan sağlık alanındaki çalışmalara yardımcı olacağı yazarlar tarafından düşünülmektedir.

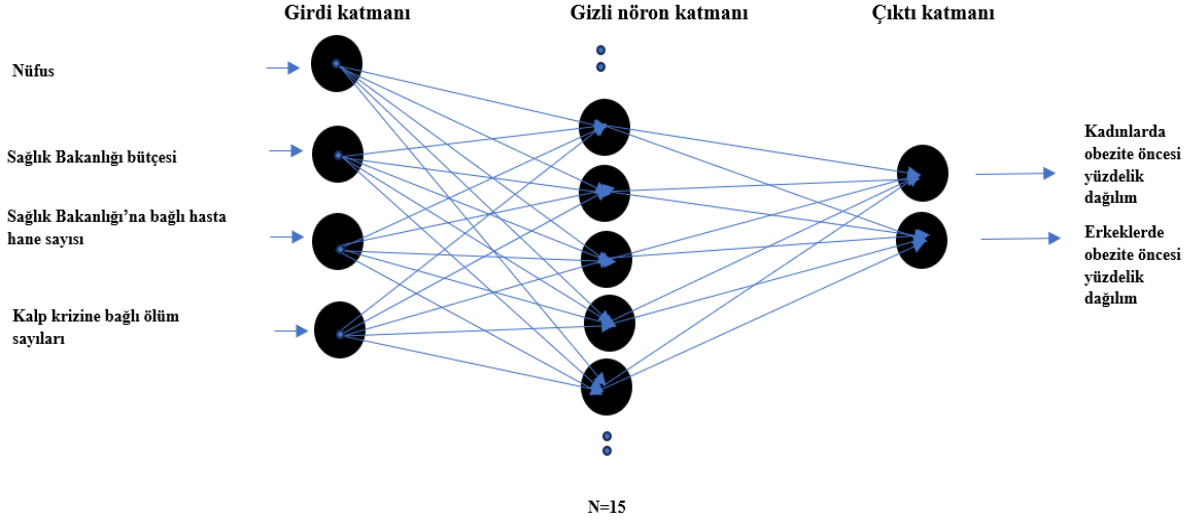
2. Teorik Metot

2.1. Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları (YSA), insan beyni gibi öğrenerek yeni bilgiler üretmek, oluşturmak ve keşfetmek üzere tasarlanmış bilgisayar sistemleridir. YSA'nın yapısını oluşturan üç bileşen vardır: nöron, bağlantılar ve öğrenme algoritması. Nöron, YSA'nın ana işlem elemanıdır (Şenol, Dereli, & Özbilgin, 2021). Yapay sinir ağları (YSA) veriler tarafından yönlendirilir ve belirli bir dağılım gerektirmez. Sonuç olarak, doğrusal olmayan fonksiyonlara yaklaşabilir ve girdi-çıkış ilişkisinin hesaplanmasının zor olduğu problemleri çözebilirler (Salih et al., 2022). YSA daha fazla tahmin ve tahmin doğruluğuna sahiptir bu yönden diğer makine öğrenme yöntemlerine göre avantajlıdır (Jani, Mishra, & Sahoo, 2017). Yapay sinir ağları, biyolojik sinir sistemine benzer bir yapıya sahip, paralel olarak bağlanmış basit elemanlardan oluşur. Ağın işlevi, bu unsurlar arasındaki büyük ölçekli

bağlantılar tarafından oluşturulur. Belirli bir işlevi yerine getirmek için ağ, belirli bir girdiye yanıt olarak elemanlar arasındaki bağlantıların ağırlık değerleri ayarlanarak eğitilir (Şenol, 2021). YSA'lar, belirli bir girdiye yanıt olarak parametreler arasındaki bağlantıların ağırlık değerlerine göre eğitilir ve buna göre bir çıktı üretir (Çolak & Şenol). Levenberg-Marquardt (LM) yöntemi genellikle büyük boyutlu en küçük kareler problemlerini çözmek için kullanılır. LM algoritması, Gauss-Newton yöntemini iyileştirmek için bir düzenleme stratejisine dayanmaktadır. Gauss-Newton yönteminin her iterasyonunda doğrusal en küçük kareler problemi çözülmelidir. LM algoritması ayrıca yön hesaplamasını kolaylaştıran bir düzenleme parametresi ekler. Bu nedenle, LM algoritmasının her iterasyonunda, adım veya adımın yönünü hesaplamak için bir doğrusal denklem sistemi çözülmelidir (Krejić, Malaspina, & Swaenen, 2023). Bayesian Regularization algoritmasının (BR) genellikle bir problemin çözümünü sabit bir nokta olarak tahmin edilen frekans yaklaşımının aksine, parametreler üzerinde tam bir dağılım kullanarak belirsizliği tahmin etmektir (Pomponi, Scardapane, & Uncini, 2021). Türkiye'de cinsiyete göre obezite öncesi yüzdeleri dağılımlarının 2023-2030 yılları arasında tahmin edilmesi amacıyla kullanılan modeller, 4-15-2 mimari ağlar üzerinde eğitilmiştir (Şekil1). Bu çalışmada, girdi değişkenleri olarak nüfus, Sağlık Bakanlığı Bütçesi, Sağlık Bakanlığı'na bağlı hasta hane sayıları ve kalp krizine bağlı ölüm sayılarının verileri tercih edilmiştir. Bu amaçla, 2014-2022 yılları arasındaki veriler kullanılmıştır. Farklı denemeler sonucunda, en iyi sonuçları verdiği belirlenen gizli nöron sayısı 15 olarak belirlenmiştir. Çıktı değişkenleri olarak ise kadın ve erkek obezite öncesi veri yüzdeleri kullanılmıştır ve bu veriler için 2014, 2016, 2019 ve 2022 yıllarındaki veriler kullanılmıştır. 2015, 2017, 2018, 2020 ve 2021 yıllarındaki veriler Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) ("Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) ", 2024) 'te yayınlanmadığı için bu yıllara ait veriler bir önceki yılın verileriyle eşit kabul edilmiştir. Yapay sinir ağı modelleri için LM algoritması ile BR algoritmaları tercih edilmiş ve kümelenme oranları %60 eğitim, %20 doğrulama ve %20 test olarak belirlenmiştir. Bu sayılar deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. Ancak deneme yanılma, her katmandaki gizli katmanların ve nöronların sayısını seçmek için yaygın bir yaklaşım olmasına rağmen, mutlaka en etkili veya verimli yöntem değildir (Zhang, Patuwo, & Hu, 1998). Yapılan model ve tahminler için MATLAB (R2019a) programı tercih edilmiştir.

Çalışma da kullanılan girdi parametrelerine ait veriler ve hedef parametrelerine ait veriler Tablo 1 ve Tablo 2' de sunulmuştur.



Şekil 1. Yapay sinir ağı mimarisi.

Tablo 1. YSA modellerine ait girdi parametreleri verileri.

Nüfus (10^6)	Sağlık Bakanlığı bütçesi (10^9)	Sağlık Bakanlığı'na bağlı hasta hane sayısı	Kalp krizine bağlı ölüm sayısı (10^3)
77,6959	18,43	866	43,077
78,74105	20,12	865	45,131
79,81487	25,28	876	47,527
80,81053	31,97	879	47,066
82,00388	37,57	889	45,442
83,1550	48,44	895	44,248
83,61436	58,88	900	51,909
84,68027	77,62	908	55,845
85,27955	116,04	915	53,347

Tablo 2. YSA modellerine ait hedef parametreleri verileri.

Kadınlarda obezite öncesi yüzdelik dağılım	Erkeklerde obezite öncesi yüzdelik dağılım
29,3	38,2
29,3	38,2
30,1	38,6
30,1	38,6
30,1	38,6
30,4	39,7
30,4	39,7
30,4	39,7
30,9	40,4

2.1.1. Duyarlılık Analizleri

Türkiye’de cinsiyete göre obezite öncesi yüzdeler dağılımlarının tahminleri için yapılan YSA modellerinde girdi parametrelerinin çıktı parametrelerini ne kadar etkilediğini bulmak için girdi parametrelerine duyarlılık analizi uygulandı. Duyarlılık analizi olarak Garson algoritması ile Yoon algoritması tercih edildi. Garson algoritması, YSA modelinin giriş ve çıkış katmanları arasındaki ağırlıkları çıkararak giriş değişkenlerinin etkisini veya göreceli katkısını hesaplar ve Denklem 1’de formülü verilmiştir (al-Swaidani & al-Hajeh, 2023). Denklem 2’de ise yer alan Yoon algoritması ise bir girdi değişkenindeki değişimin diğerlerine oranıdır (da Costa, de Lima, & Barbosa, 2021).

$$DA(GARSON)(\%)_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^m (|W_{ij}| / \sum_{i=1}^n |W_{ij}|) x |W_{jk}|}{\sum_{i=1}^n \{ \sum_{j=1}^m (|W_{ij}| / \sum_{i=1}^n |W_{ij}|) x |W_{jk}| \}} x 100 \quad (1)$$

$$DA(YOON)(\%)_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^h W_{ij} v_{jk}}{\sum_{i=1}^m | \sum_{i=1}^h W_{ij} v_{jk} |} x 100 \quad (2)$$

2.2. Zaman Serileri

2.2.1. Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (ARIMA) Modeli

Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (ARIMA) Modeli, kendi gecikme terimini ve Y_t değişkeninin rastgele hata terimini dahil ederek bir zaman serisi verisinin davranışını tanımlamak için kullanılır. Bu, değişkenlerin açıklanmasına ve belirli bir matematiksel model kullanılarak gelecekteki sonuçların tahmin edilmesine yardımcı olur (Şenol, Çakır, Bianco, & Görgün, 2024). ARIMA modeli, ARIMA (p, d, q) modelini elde etmek için otomatik regresyon, fark ve farklı derecelerde hareketli ortalamaların bir kombinasyonunu kullanma avantajına sahiptir. Bu model, zaman serisini uydururken zaman serisinin çeşitli bilgi türlerini ifade eder ve uygun parametrelerin seçilmesiyle doğru tahminler yapılmasına olanak tanır (Li & Li, 2017). ARIMA (p, d, q) olarak ifade edilebilmektedir. Burada, 'p' otoregresif süreçlerin sırasını, 'd' farkın sırasını ve 'q' hareketli ortalama sürecinin sırasını temsil eder. Otoregresif süreç, korelasyon katsayısı ile temsil edilen AR fonksiyonunu hesaplamak için mevcut ve önceki verilerin kullanılmasını içerir. Benzer şekilde, hareketli ortalama (MA) süreci de MA fonksiyonunu hesaplamak için mevcut ve önceki hataları kullanmayı içerir. Bu, mevcut veriler ile hatalar arasındaki ilişki incelenerek yapılır (Conejo, Plazas, Espinola, & Molina, 2005). Denklem 3’te ARIMA’nın genel formülü yer almaktadır.

$$Y_t = C + \Phi_1 * Y_{t-1} + \dots + \Phi_p * Y_{t-p} + \theta_1 * e_{t-1} + \dots + \theta_q * e_{t-q} \quad (3)$$

2.2.2. Holt-Winters Yöntemi

Zaman serisi verileri hem trend hem de mevsimsel faktörleri bir araya getiren Holt-Winters (HW) yöntemi kullanılarak tahmin edilebilir. Parametrelerin değerleri hakkında bilinçli bir tahminde bulunmak için geçmiş veriler ve optimizasyon yöntemlerinin bir karışımını kullanılır (Pleños, 2022). Denklem 4'te yer alan HW formülünde L_t verinin seviyesini ifade ederken, T_t trendi, S_t ise mevsimsel bileşeni, F_{t+k} ise önümüzdeki k dönem için tahminleri ifade eder (Rashidi, Keshavarz, Pazarı, Safahieh, & Samimi, 2022).

$$F_{t+k} = (L_t + kT_t)S_{t-m+k} \quad (4)$$

2.3. Model Hata Performans Ölçütleri

Türkiye'nin cinsiyete göre obezite öncesi yüzdeler dağılımlarını tahmin etmek için kullanılan yöntem modellerinin hata performans ölçütleri için MSE, RMSE, SSE, MAPE ve R^2 kullanılmıştır

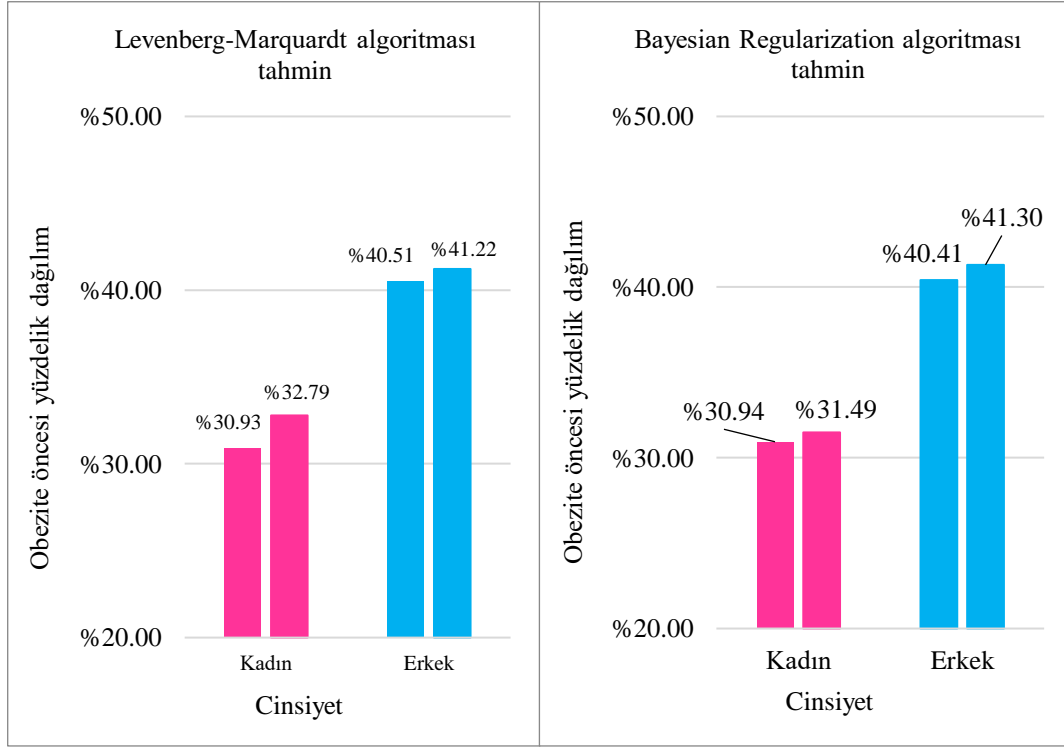
3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Türkiye'de obezite öncesi yüzdeler dağılımının YSA ile tahmin edilmesi

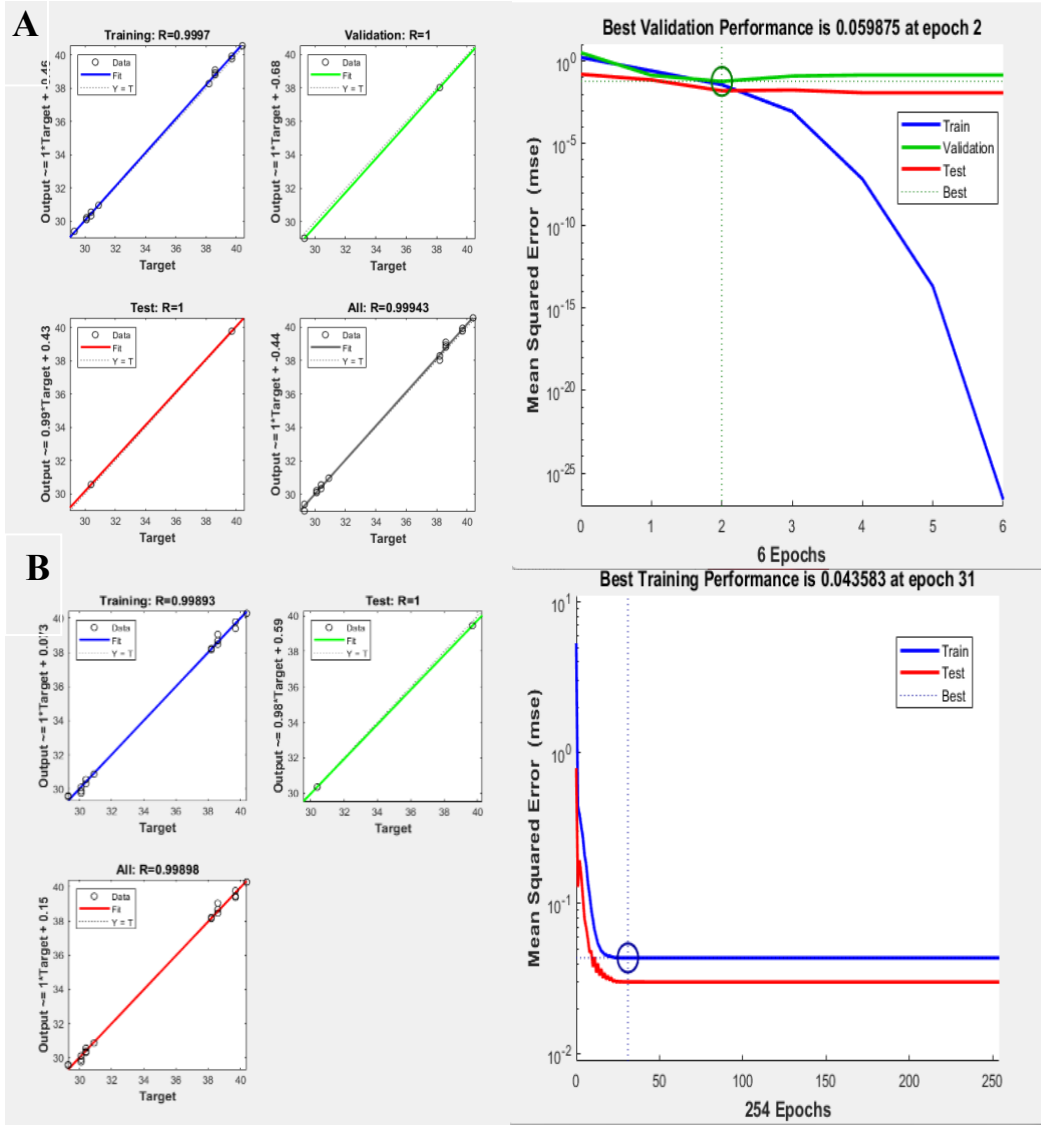
Doğrusal olmayan kareler sorunlarını çözmek ve makine öğreniminde aşırı uyum sorununu çözmek için LM algoritması ve BR algoritması kullanılmaktadır (Marcos & Planklang, 2024). LM algoritması, doğrusal olmayan en küçük kareler problemlerine yönelik önde gelen yöntemlerden biridir (Martínez, 2024). BR algoritması, standart geri yayılım ağlarından daha sağlamdır ve uzun çapraz doğrulama ihtiyacını azaltır veya ortadan kaldırmaktadır (Burden & Winkler, 2009). Türkiye'de obezite öncesi yüzdeler dağılımının LM algoritmasıyla tahmini, 2030 yılında kadınlar yaklaşık olarak %32,79, erkekler ise %41,22 olarak belirlenmiştir ($R^2 = 0,9994$). Benzer şekilde, BR algoritmasıyla yapılan tahminlere göre, 2030 yılında kadınlarda obezite öncesi yüzdeler dağılımı %31,48 iken erkeklerde bu oran %41,30 olarak öngörülmüştür ($R^2 = 0,9989$).

Değerler arasında kıyaslama yapıldığında, 2022 yılına göre kadınlarda LM algoritmasına göre %1,89 artış olduğu görülmüşken, BR algoritmasına göre bu artış yaklaşık %0,59 olarak gerçekleşecektir. Erkeklerin obezite öncesi yüzdeler dağılımı ise LM algoritmasıyla 2030 yılında %0,8202 artarken, BR algoritmasına göre bu artışın %0,9039 olacağı tespit edilmiştir (Şekil 2).

Algoritmalara ait regresyon ve MSE grafikleri Şekil 3'te sunulmuştur. Bu sonuçlara göre, genel regresyon performansının en etkili algoritmanın LM algoritması olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, LM algoritmasının 6 iterasyon boyunca en düşük MSE değerine 2. iterasyonda sahip olduğu ve tahmin değerlerinin bu iterasyonlara dayandığı gözlemlenmiştir. BR algoritmasında ise, 254 iterasyon boyunca en düşük MSE değerinin 31. iterasyonda elde edildiği ve tahmin sonuçlarının bu değerlere göre belirlendiği görülmüştür.



Şekil 2. Algoritmaların cinsiyete göre tahmin grafikleri.

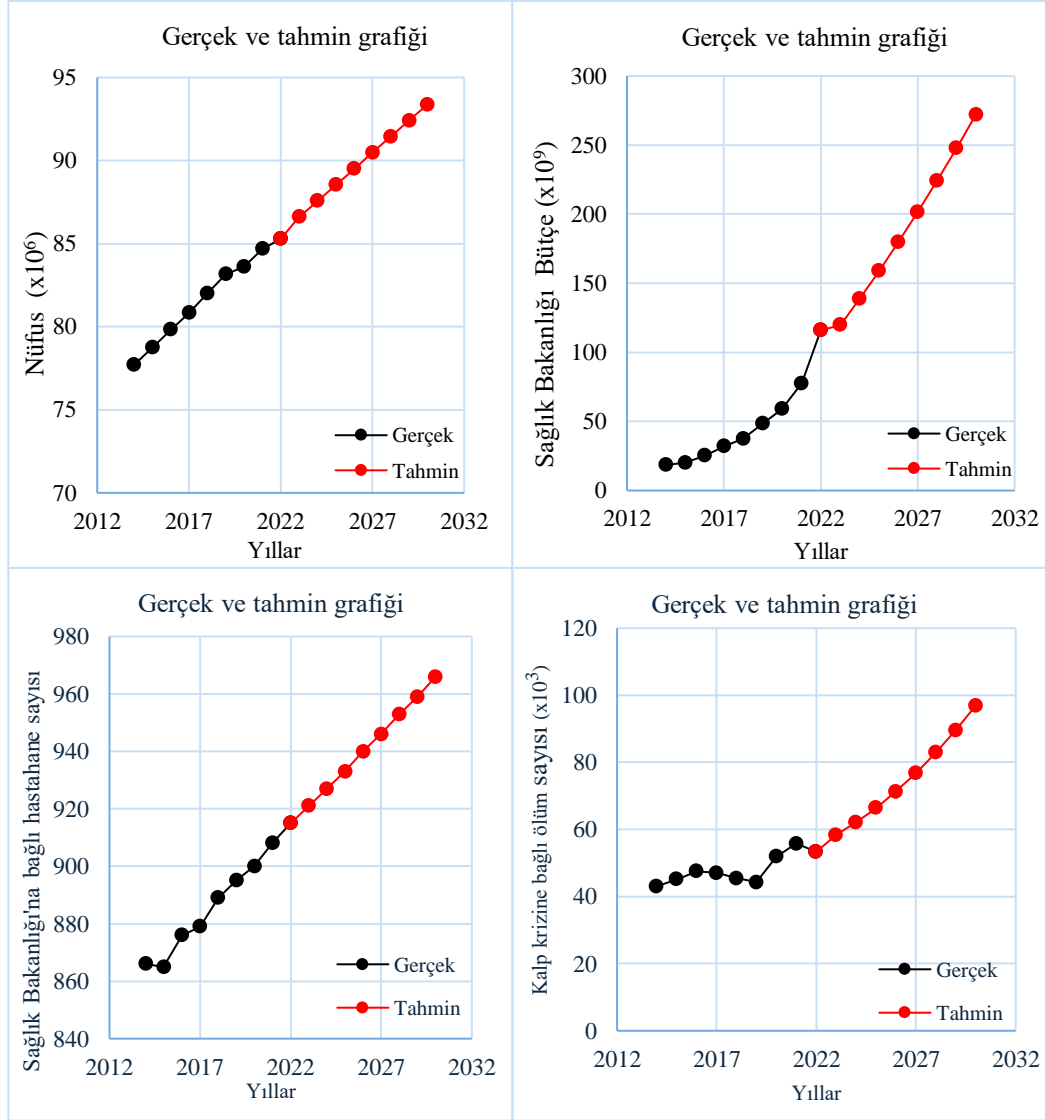


Şekil 3. Levenberg Marquardt algoritması (A) ve Bayesian Regularization algoritmasının (B) regresyon ve MSE grafikleri.

Algoritma çıktı parametrelerinin (kadın ve erkek obezite öncesi yüzdelik dağılımının) 2023 yılı ile 2030 yılları arasındaki tahminlerinin belirlenmesi için 4 adet girdi parametrelerine eğri uydurma yöntemi uygulanmıştır. Bu işlem için R^2 değeri yüksek olan fonksiyonlar tercih edilmiştir ve Tablo 3'te değerler sunulmuştur. Eğri uydurma yöntemi ile girdi parametrelerinin 2023 ve 2030 yılları arasındaki değerleri Şekil 4'te verilmiştir. Bu değerlere göre çıktı parametrelerinin tahminlerine ulaşılmıştır.

Tablo 3. Girdi parametrelerine uygulanan eğri uydurma yönteminin değer tablosu.

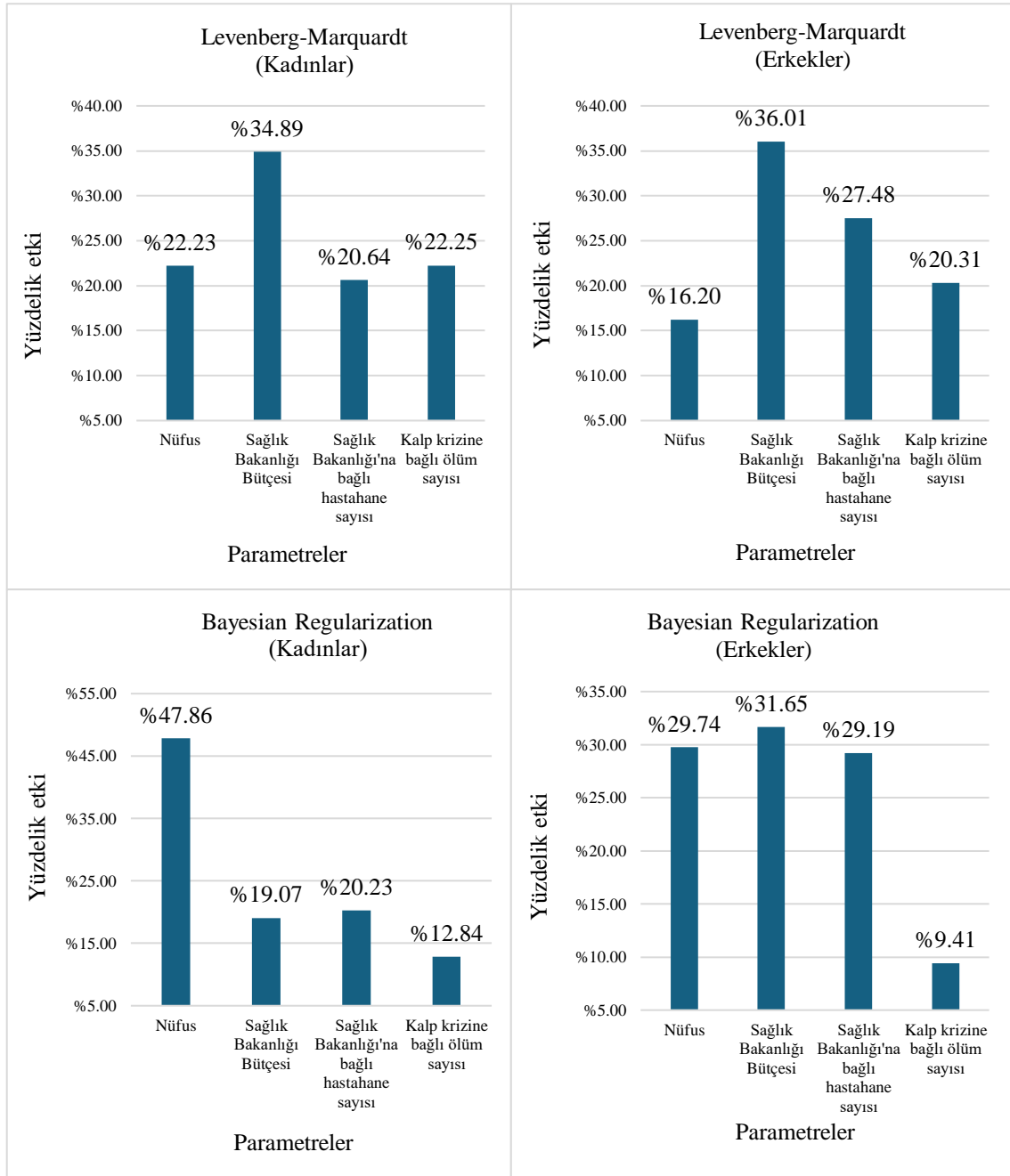
Parametre	Fonksiyon	Derece	R ²
Nüfus	Polynomial	1	0,9081
Sağlık Bakanlığı bütçe	Power	1	0,9035
Sağlık Bakanlığı'na bağlı hastahane sayısı	Polynomial	1	0,9848
Kalp krizine bağlı ölüm sayısı	Power	2	0,7098

**Şekil 4.** Girdi parametrelerinin eğri uydurma yöntemi ile tahmin grafikleri.

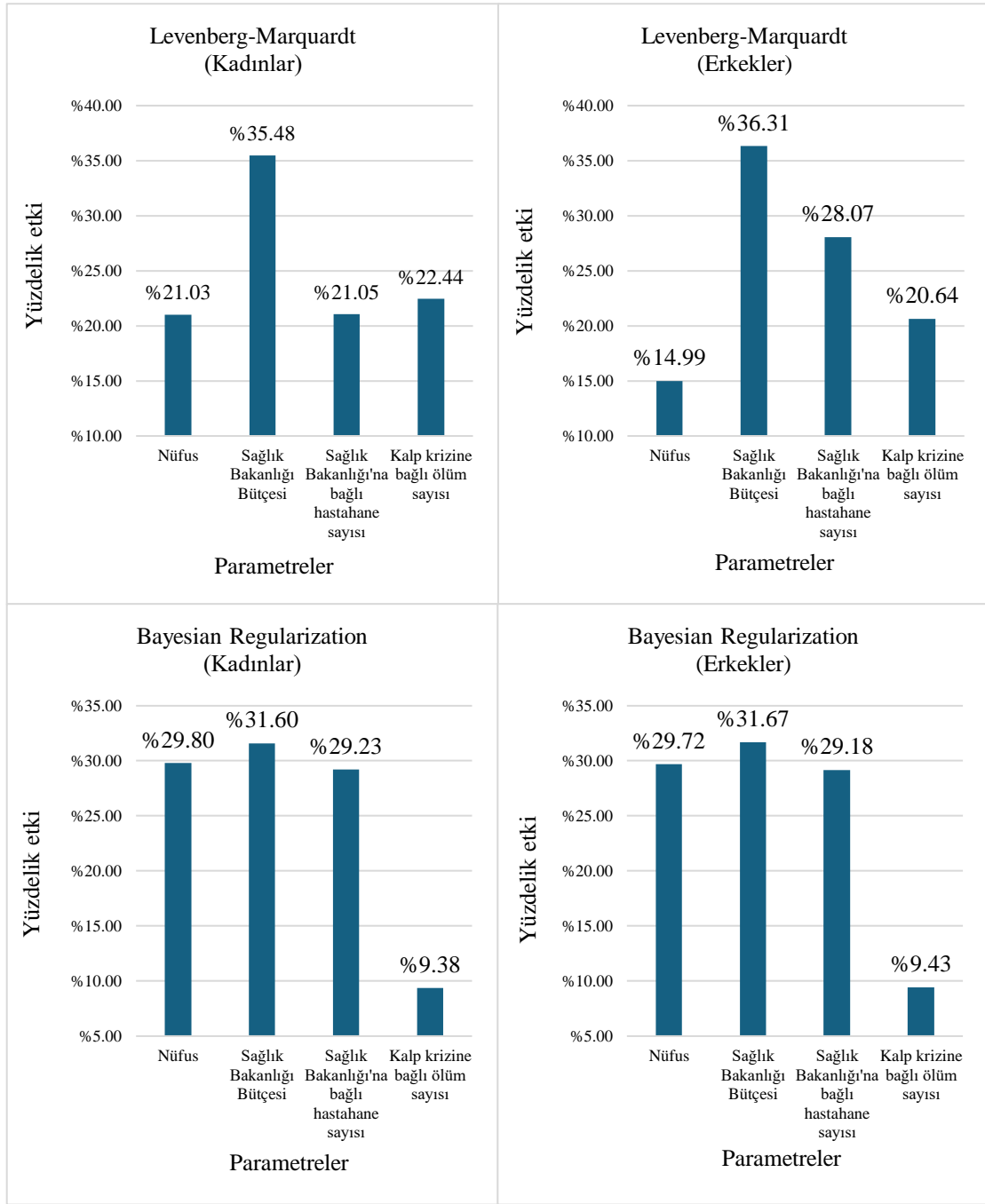
3.1.1. Duyarlılık Analizleri

Türkiye'nin cinsiyete göre obezite öncesi yüzdeler dağılımlarının tahmini için YSA ile oluşturulan modellerde kullanılan çıktı parametrelerinin üzerindeki etkiyi belirlemek için girdi parametrelerine duyarlılık analizi yapılmıştır. Duyarlılık analizlerini belirlemek için Garson algoritması ile Yoon algoritması tercih edildi. LM için Garson algoritmasına göre kadınların obezite öncesi yüzdeler dağılımını en çok etkileyen parametre Sağlık Bakanlığı Bütçesi olurken erkeklerin

obezite öncesi yüzdeler dağılımında da aynı benzer sonuç elde edildi. Kadınların obezite öncesi yüzdeler dağılımını en az etkileyen parametre ise Sağlık Bakanlığı'na bağlı hasta hane sayısı iken, erkeklerin obezite öncesi yüzdeler dağılımını etkileyen en az parametre ise nüfus olarak bulundu. LM için Yoon algoritmasında ise hem kadınların hem de erkeklerin obezite öncesi yüzdeler dağılımını etkileyen parametreler Garson algoritması ile benzerlik göstermiştir. BR için Garson algoritmasında ise kadınların obezite öncesi yüzdeler dağılımını en çok etkileyen parametre nüfustur. En az etkileyen parametre ise kalp krizine bağlı ölüm sayısı olmuştur. Erkeklerin obezite öncesi yüzdeler dağılımını en çok etkileyen parametre Sağlık Bakanlığı Bütçesi iken çıktı parametresini en az etkileyen girdi parametresi kalp krizine bağlı ölüm sayısı olmuştur. BR için Yoon algoritmasıyla yapılan duyarlılık analizinde kadınların obezite öncesi yüzdeler dağılımını en fazla etki eden parametre Sağlık Bakanlığı Bütçesi, en az etki eden parametre ise kalp krizine bağlı ölüm sayısı oldu. Erkeklerde ise bu analiz kadınların obezite öncesi yüzdeler dağılımı ile benzer sonuçlara ulaşıldı (Şekil 5 ve Şekil 6).



Şekil 5. YSA algoritmalarının Garson ile duyarlılık analizi.

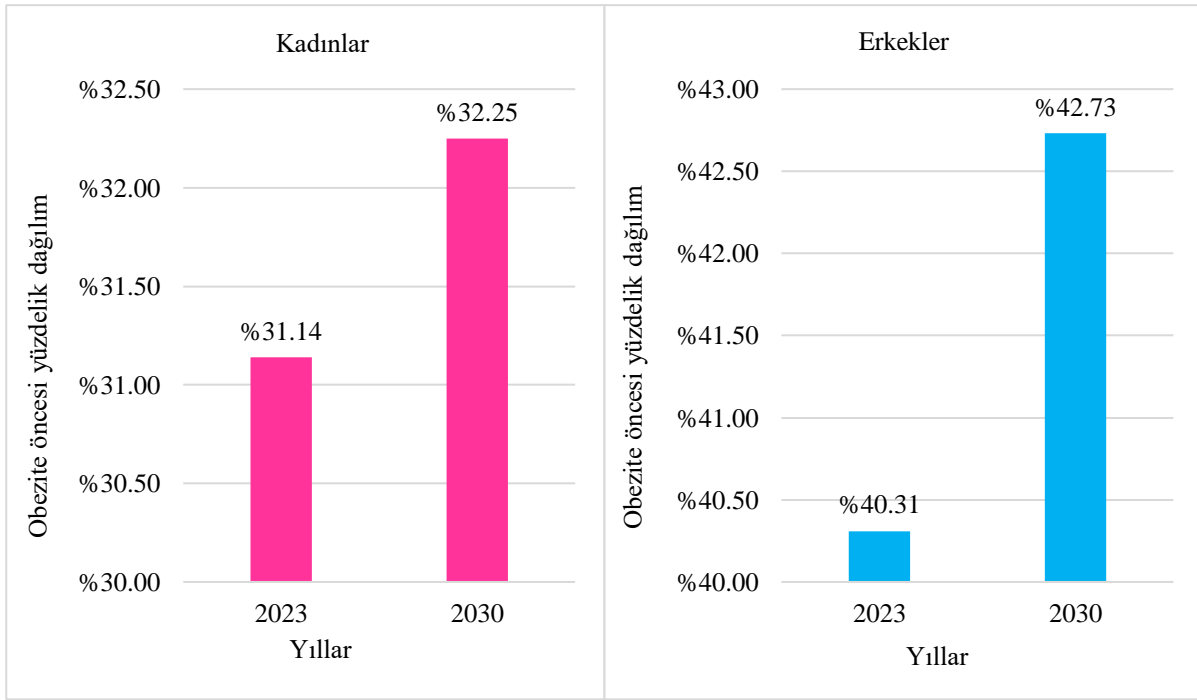


Şekil 6. YSA algoritmalarının Yoon ile duyarlılık analizi.

3.2. Türkiye’de obezite öncesi yüzdellik dağılımının ARIMA ile tahmin edilmesi

Türkiye’de cinsiyete göre obezite öncesi yüzdellik dağılımının 2030 yılına kadar tahmini için bir başka tahmin yöntemi olan zaman serisi ARIMA modeli kullanıldı. ARIMA modeli, zaman serisi analizleri içinde en güvenilir yöntemlerden biridir. ARIMA, otopregresif ve hareketli ortalama modellerinin faydalarını birleştiren, doğrusallaştırma nedeniyle doğrusal olmayan ve karmaşık olan verileri tahmin eden doğrusal bir regresyon modelidir [32]. SPSS 23 programı sayesinde 2014-2022 yılları arasındaki cinsiyete göre obezite öncesi yüzdellik dağılım verileri ile yıl-obezite öncesi

yüzelik dağılım grafiği çizdirildi. ACF ve PACF grafiklerine bakılarak hem kadınlar hem de erkeklerin obezite öncesi yüzelik dağılımının tahmini için ARIMA modelin p, d ve q sayıları belirlendi ve en uygun modelin (5, 1, 1) olduğu saptandı. Buna göre yapılan tahminlerde 2030 yılında kadınlarda obezite öncesi yüzelik dağılımının 2022 yılına göre %1,35 artacağı, erkeklerde bu değerin %2,33 artacağı gözlenmiştir. 2023-2030 yılları arası yapılan tahminlerde veri setlerinin obezite öncesi yüzelik dağılım ortalaması kadınlarda %31,71 iken erkeklerde bu değer %41,50 olarak hesaplandı. Kadınlarda ve erkeklerde obezite öncesi yüzelik dağılım tahmin verileri Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. ARIMA modelin cinsiyete göre tahmin grafikleri.

3.3. Türkiye’de obezite öncesi yüzelik dağılımının Holt- Winters ile tahmin edilmesi

Türkiye’de cinsiyete göre obezite öncesi dağılımının 2030 yılına kadar tahmini için bir başka yöntem olan Holt-Winters (HW) yöntemi kullanılmıştır. HW yöntemi en popüler, basit, koruyucu, kısa vadeli zaman serisinin tahmin yöntemlerindedir (Rumbe, Hamasha, & Al Mashaqbeh, 2024). HW yöntemine göre yapılan tahminlerde 2030 yılında kadınlarda obezite öncesi yüzelik dağılımının 2022 yılına göre %1,32 artacağı, erkeklerde bu değerin %1,94 artacağı bulundu. 2023-2030 yılları arası yapılan tahminlerde veri setlerinin obezite öncesi yüzelik dağılım ortalaması kadınlarda %31,60 erkeklerde ise bu değer %41,36 olduğu saptandı. Şekil 8’de kadınlarda ve erkeklerde obezite öncesi yüzelik dağılım tahmin verileri sunulmuştur.



Şekil 8. Holt-Winters yönteminin cinsiyete göre tahmin grafikleri.

3.4. Model performanslarının hata ölçümleri

Türkiye'nin cinsiyete göre obezite öncesi yüzdeleri dağılımının 2023 ile 2030 yılları arasındaki tahminlerini bulmak için YSA'nın LM ve BR algoritmaları, ARIMA model ve HW yöntemi ile oluşturulan modellerin hataları bulundu. Hata ölçümleri için MSE, RMSE, SSE, MAPE ve R^2 'ye göre saptandı ve Tablo 4 ile Tablo 5'te sunuldu.

Tablo 4. Kadınlar için tahmin yöntemlerinin model performans hata ölçümleri.

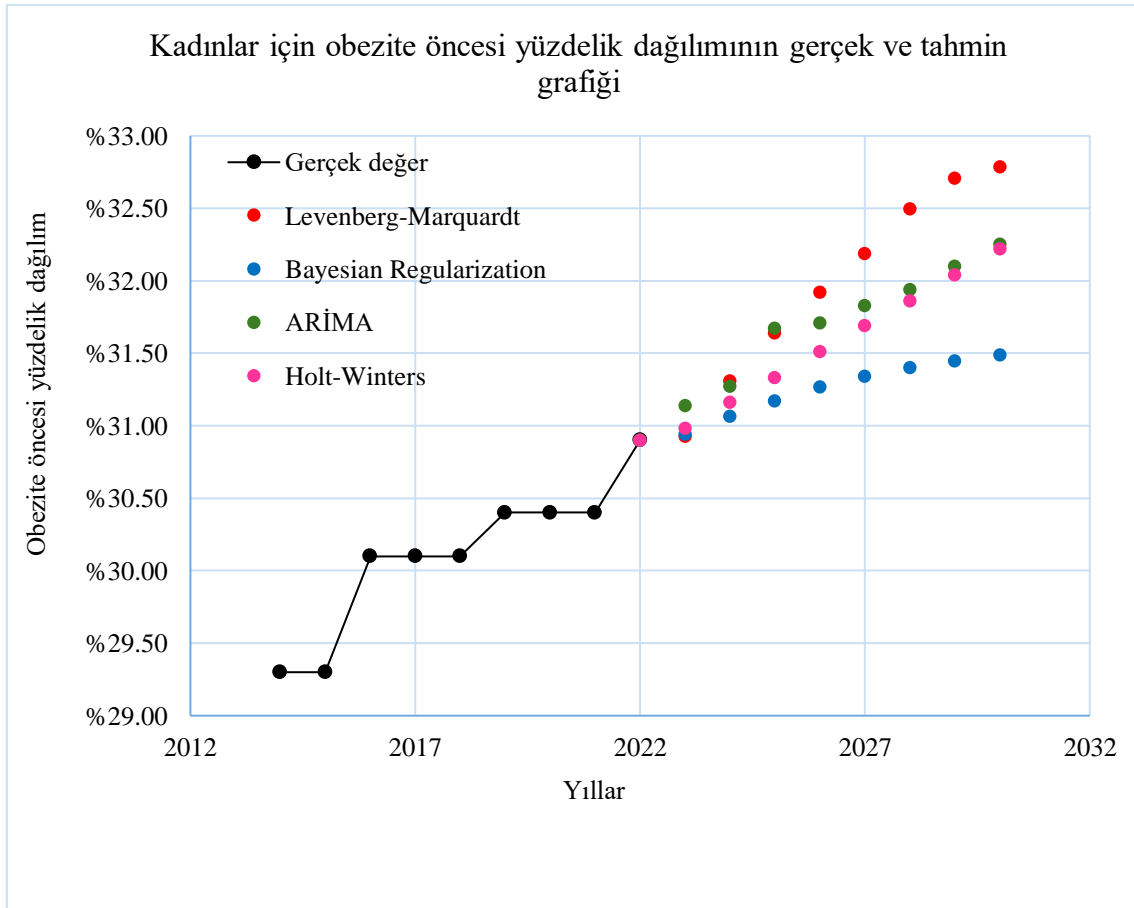
Modeller/Ölçütler	MSE	RMSE	SSE	MAPE	R^2
LM	0,019	0,138	0,170	0,362	0,9223
BR	0,040	0,200	0,359	0,540	0,8360
ARIMA	0,390	0,624	3,504	0,460	0,7310
HW	0,051	0,225	0,456	0,534	0,8480

Tablo 5. Erkekler için tahmin yöntemlerinin model performans hata ölçümleri.

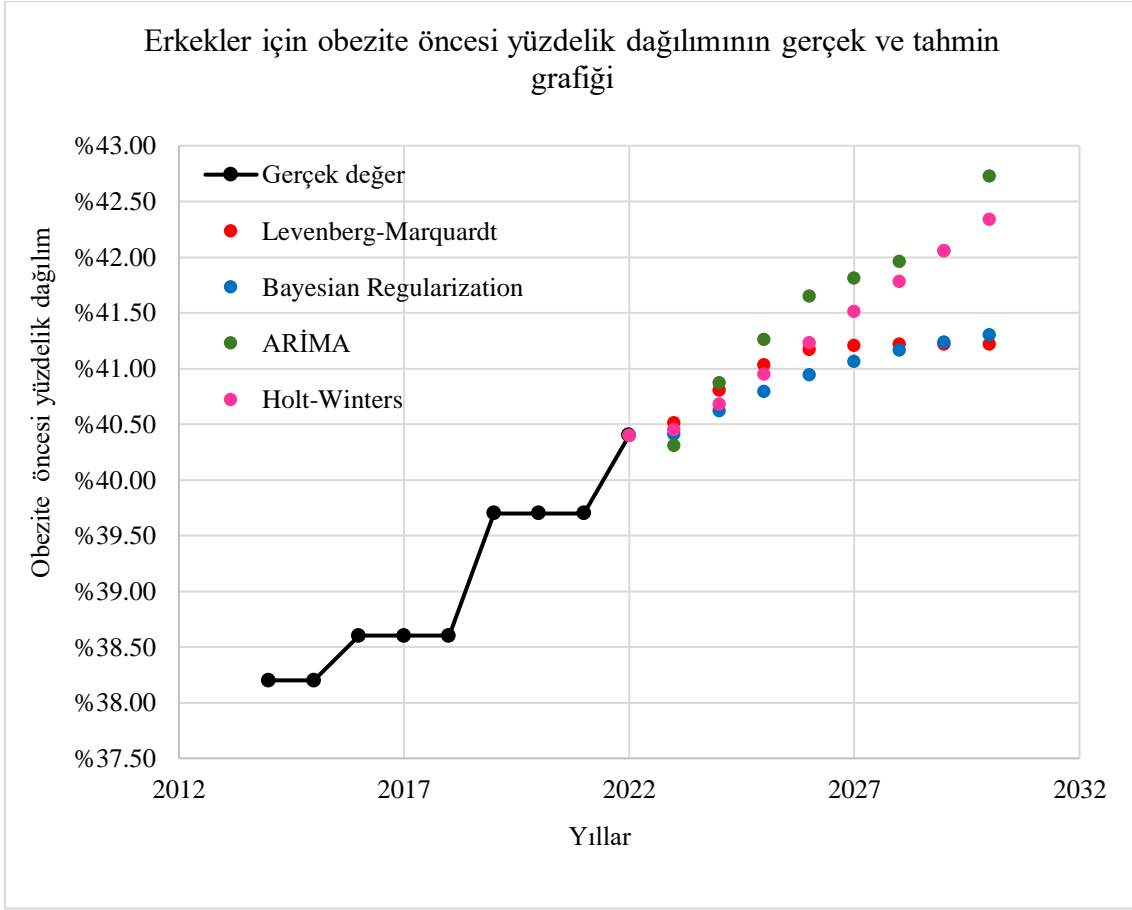
Modeller/Ölçütler	MSE	RMSE	SSE	MAPE	R^2
LM	0,057	0,239	0,516	0,518	0,8994
BR	0,044	0,210	0,399	0,414	0,9223
ARIMA	0,449	0,670	4,040	0,460	0,9000
HW	0,082	0,287	0,741	0,554	0,8880

3.5. Türkiye’de obezite öncesi yüzdeler için yapılan tahminlerin kıyaslamalı analizi

Türkiye’nin cinsiyete göre obezite öncesi yüzdeler dağılımının 2023 ile 2030 yılları arasındaki tahminleri için LM, BR, ARIMA ve HW yöntemleri tercih edildi. Kadınlara göre 2022 yılından 2030 yılına kadar ki en fazla obezite öncesi yüzdeler tahmin veren yöntem LM algoritması iken erkeklerde en fazla obezite öncesi yüzdeler tahmini veren yöntem ARIMA oldu. 2022 yılından 2030 yılına kadar ki en az obezite öncesi yüzdeler tahmin veren yöntem kadınlarda BR algoritması olarak saptandı. Erkeklerde ise en az tahmin yapan yöntem LM olarak elde edildi. Şekil 9 ve Şekil 10’da kadınlar ile erkeklerin gerçek obezite öncesi yüzdeler dağılımları ile 2023-2030 yılları arasındaki tahminleri verilmiştir.



Şekil 9. Kadınlar için obezite öncesi yüzdeler dağılımının gerçek ve tahmin değer grafiği.



Şekil 10. Erkekler için obezite öncesi yüzdeler dağılımının gerçek ve tahmin değer grafiği.

4. Sonuçlar

Obezite, son yıllarda aşırı kilo oranlarındaki önemli artış nedeniyle Türkiye'de halk sağlığı açısından giderek artan bir endişe kaynağı haline gelmiştir. Bu sorunun eğitim, farkındalık ve politika değişikliklerini içeren dengeli bir yaklaşımla ele alınması önemlidir. Bu eğilimle mücadele etmek için bireysel, toplumsal ve politik düzeylerde önlemler alınmalıdır. Sağlık kurumları, hükümet, eğitim kurumları ve sivil toplum kuruluşları arasında iş birliği ve koordinasyon yoluyla obeziteyle mücadele için etkili stratejiler geliştirilmelidir.

Çalışmada kullanılan YSA ve ARIMA, yüksek doğruluk ve esneklikleri ile dikkat çekmektedir. YSA'nın veri örüntülerini tanıma ve karmaşık ilişkileri modelleme kapasitesi, tahmin doğruluğunu artırmıştır. Zaman serisi modelleri ise trend analizi ve öngöründe güvenilir sonuçlar sunmuştur. Tahminlere göre, Türkiye'de cinsiyete göre obezite öncesi yüzdeler dağılımının 2030 yılında kadınlarda LM modeline göre %32,79, erkeklerde ise ARIMA modeline göre %42,73 olacağı bulunmuştur.

Ancak, çalışmanın bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Veri eksiklikleri, modellerin varsayımlarındaki kısıtlamalar ve kullanılan veri setlerinin sınırlı kapsamı, sonuçların

genellenebilirliğini etkileyebilir. Veri eksiklikleri, tahminlerin doğruluğunu sınırlayan önemli bir faktördür. Ayrıca, model varsayımları, gerçek dünyadaki karmaşık etkileşimleri tam olarak yansıtamayabilir.

Bu sonuçlara göre obeziteyle mücadele için alınacak önlemler arasında sağlıklı beslenme alışkanlıklarının teşvik edilmesi, düzenli fiziksel aktivitenin desteklenmesi, beslenme ve yaşam tarzı konusunda farkındalığın artırılması, okul kantinlerinde sağlıklı seçeneklerin sunulması ve reklamlar yoluyla besin değeri düşük ürünlerin tüketiminin azaltılması yer almalıdır.

Sonuç olarak, obezitenin önlenmesi ve kontrol altına alınması için toplumsal bir çaba gerekmektedir. Sağlık hizmetlerinin yanı sıra eğitim, çevresel değişiklikler ve politika düzenlemeleri gibi alanlarda etkili müdahaleler yapılmalıdır. Ancak bu zorluğun üstesinden gelmek için toplumun tüm kesimlerinin katılımı ve desteği önemlidir. Obezite ile mücadelede ortak bir vizyon ve kararlılıkla Türkiye'de obez birey sayısı azaltılabilir ve toplum sağlığında olumlu bir değişim yaşanabilir.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- al-Swaidani, A. M., & al-Hajeh, T. (2023). Estimation of GPA at Undergraduate Level using MLR and ANN at Arab International University During the Syrian Crisis: A Case Study. *Open Education Studies*, 5(1), 20220197.
- Baer, D. J., Dalton, M., Blundell, J., Finlayson, G., & Hu, F. B. (2023). Nuts, energy balance and body weight. *Nutrients*, 15(5), 1162.
- Benli, M., Acar, Y., & Bas, S. (2024). Testing obesity Kuznets curve for Türkiye. *Obesity Medicine*, 100537.
- Burden, F., & Winkler, D. (2009). Bayesian regularization of neural networks. *Artificial neural networks: methods and applications*, 23-42.
- Busebee, B., Ghush, W., Cifuentes, L., & Acosta, A. (2023). *Obesity: A review of pathophysiology and classification*. Paper presented at the Mayo Clinic Proceedings.

- Celik, Y., Guney, S., & Dengiz, B. (2021). *Obesity level estimation based on machine learning methods and artificial neural networks*. Paper presented at the 2021 44th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP).
- Conejo, A. J., Plazas, M. A., Espinola, R., & Molina, A. B. (2005). Day-ahead electricity price forecasting using the wavelet transform and ARIMA models. *IEEE transactions on power systems*, 20(2), 1035-1042.
- Çolak, H., Kale, R., & Cihan, H. (2003). Yoğunlaştırılmış Yürüyüş ve Jogging Programının Yüksek Dansiteli Lipoproteinler (HDL) ve Düşük Dansiteli Lipoproteinler (LDL) Üzerine Olan Etkisi. *Spormetre Beden Eğitimi ve Spor Bilimleri Dergisi*, 1(1), 69-76.
- Çolak, H., & Şenol, H. *Türkiye'nin Lisanslı Sporcu Sayısının Yapay Sinir Ağları ile 2030 Yılına Kadar Tahmini: Spor Bilimleri Alanında Akademik Değerlendirmeler-7* (2023).
- da Costa, N. L., de Lima, M. D., & Barbosa, R. (2021). Evaluation of feature selection methods based on artificial neural network weights. *Expert Systems with Applications*, 168, 114312.
- Danacı, Ç., Derya, A., & Tuncer, S. A. (2023). Komşuluk Bileşen Analizi Tabanlı Makine Öğrenimi Yöntemleri ile Obezite Seviyelerinin Tahmini. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 35(2), 433-442.
- Eisbach, S., Mai, O., & Hertel, G. (2024). Combining theoretical modelling and machine learning approaches: The case of teamwork effects on individual effort expenditure. *New Ideas in Psychology*, 73, 101077.
- Elagizi, A., Kachur, S., Carbone, S., Lavie, C. J., & Blair, S. N. (2020). A review of obesity, physical activity, and cardiovascular disease. *Current obesity reports*, 9, 571-581.
- Henriques, I., & Sadorsky, P. (2023). Forecasting rare earth stock prices with machine learning. *Resources Policy*, 86, 104248.
- Jani, D., Mishra, M., & Sahoo, P. K. (2017). Application of artificial neural network for predicting performance of solid desiccant cooling systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 352-366.
- Janssen, I., Katzmarzyk, P. T., Srinivasan, S. R., Chen, W., Malina, R. M., Bouchard, C., & Berenson, G. S. (2005). Combined influence of body mass index and waist circumference on coronary artery disease risk factors among children and adolescents. *Pediatrics*, 115(6), 1623-1630.
- Jiang, L.-y., Tian, J., Yang, Y.-n., Jia, S.-h., & Shu, Q. (2024). Acupuncture for obesity and related diseases: insight for regulating neural circuit. *Journal of Integrative Medicine*.
- Krejić, N., Malaspina, G., & Swaenen, L. (2023). A split Levenberg-Marquardt method for large-scale sparse problems. *Computational Optimization and Applications*, 85(1), 147-179.
- Li, S., & Li, R. (2017). Comparison of forecasting energy consumption in Shandong, China Using the ARIMA model, GM model, and ARIMA-GM model. *Sustainability*, 9(7), 1181.
- Marcos, F. L., & Plangklang, B. (2024). A high accurate user-friendly energy audit platform of a university building using ANN Bayesian regularization and Levenberg-Marquardt algorithm. *Energy Reports*, 11, 2220-2235.
- Martínez, J. (2024). Levenberg-marquardt revisited and parameter tuning of river regression models. *Computational and Applied Mathematics*, 43(1), 14.
- Ozcan, İ., Tasar, B., Tatar, A. B., & Yakut, O. (2019). Destek vektör makinasi algoritması ile kalp hastalıklarının tahmini. *Computer Science*, 4(2), 74-79.
- Pauchet-Traversat, A.-F., Berrebi, S., Brugère, S., Cancel, A., Communal, D., Constantin, A., . . . Gauthier, C. (2023). Surpoids et obésité de l'adulte: 14 messages clés pour améliorer les pratiques: Overweight and obesity in adults: 14 key messages to improve practices. *Nutrition Clinique et Métabolisme*, 37(2), 2S58-52S61.
- Pekkurnaz, D. (2023). Causal effect of obesity on the probability of employment in women in Turkey. *Economics & Human Biology*, 51, 101301.
- Pleños, M. (2022). Time series forecasting using holt-winters exponential smoothing: Application to abaca fiber data. *Zeszyty Naukowe SGGW w Warszawie-Problemy Rolnictwa Światowego*, 22(2), 17-29.
- Pomponi, J., Scardapane, S., & Uncini, A. (2021). Bayesian neural networks with maximum mean discrepancy regularization. *Neurocomputing*, 453, 428-437.
- Rashidi, M. H., Keshavarz, S., Pazari, P., Safahieh, N., & Samimi, A. (2022). Modeling the accuracy of traffic crash prediction models. *IATSS research*, 46(3), 345-352.
- Ross, R., & Bradshaw, A. J. (2009). The future of obesity reduction: beyond weight loss. *Nature Reviews Endocrinology*, 5(6), 319-325.
- Rumbe, G., Hamasha, M., & Al Mashaqbeh, S. (2024). A comparison of Holts-Winter and Artificial Neural Network approach in forecasting: A case study for tent manufacturing industry. *Results in Engineering*, 21, 101899.

- Salih, S. O., Bezenchek, A., Moramarco, S., De Iuliis, M., Stanev, D., Fanti, I., . . . Gialloreti, L. E. (2022). Forecasting causes of death in Northern Iraq using neural network. *Journal of Statistical Theory and Applications*, 21(2), 58-77.
- Sarwar, S., Aziz, G., & Tiwari, A. K. (2023). Implication of machine learning techniques to forecast the electricity price and carbon emission: Evidence from a hot region. *Geoscience Frontiers*, 101647.
- Sözmen, K., Unal, B., Capewell, S., Critchley, J., & O'Flaherty, M. (2015). Estimating diabetes prevalence in Turkey in 2025 with and without possible interventions to reduce obesity and smoking prevalence, using a modelling approach. *International journal of public health*, 60, 13-21.
- Şenol, H. (2021). Methane yield prediction of ultrasonic pretreated sewage sludge by means of an artificial neural network. *Energy*, 215, 119173.
- Şenol, H., Çakır, İ. T., Bianco, F., & Görgün, E. (2024). Improved methane production from ultrasonically-pretreated secondary sedimentation tank sludge and new model proposal: Time series (ARIMA). *Bioresource technology*, 391, 129866.
- Şenol, H., Dereli, M. A., & Özbilgin, F. (2021). Investigation of the distribution of bovine manure-based biomethane potential using an artificial neural network in Turkey to 2030. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111338.
- Tarmanini, C., Sarma, N., Gezeğin, C., & Ozgonenel, O. (2023). Short term load forecasting based on ARIMA and ANN approaches. *Energy Reports*, 9, 550-557.
- Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) (2024). Retrieved from www.tuik.gov.tr
- Wang, W., He, N., Chen, M., & Jia, P. (2024). Freight Rate Index Forecasting with Prophet Model based on Multi-dimensional Significant Events. *Expert Systems with Applications*, 123451.
- Wei, C., Liu, L., Liu, R., Dai, W., Cui, W., & Li, D. (2022). Association between the phytochemical index and overweight/obesity: a meta-analysis. *Nutrients*, 14(7), 1429.
- World Health Organization Obesity and Overweight. (2011). Retrieved from <https://www.who.int/>
- Zhang, G., Patuwo, B. E., & Hu, M. Y. (1998). Forecasting with artificial neural networks:: The state of the art. *International journal of forecasting*, 14(1), 35-62.

Some New Bis-(1,2,4-Triazole) Compounds: Synthesis, Characterization and Urease Enzyme Inhibition

Nesrin ÜNAL KARAALI^{1*}, Havva Nur CİHANGİR²

Abstract

In this study, thiosemicarbazide derivatives (**2a-c**) were obtained from the reaction of acetohydrazide derivative 1,2,4-triazole compound (**1**) with methyl isothiocyanate, phenyl isothiocyanate, and 4-methylphenyl isothiocyanate compounds, respectively. Then, by intramolecular cyclization of **2a-c** compounds, bis-(1,2,4-triazole) compounds (**3a-c**) were synthesized. The synthesized compounds' chemical structures were verified using FT-IR, ¹H-NMR, and ¹³C-NMR spectroscopic methods. In addition, the urease enzyme inhibition of the synthesized compounds was evaluated using the Weatherburn method *in vitro*. All newly synthesized compounds showed urease enzyme inhibition in the range of 15.00 ± 0.10 to 16.00 ± 0.25 IC₅₀ (µg/mL) compared to standard thiourea (IC₅₀ = 15.75 ± 0.15 µg/mL).

Keywords: Bis-(1,2,4-triazole), Isothiocyanate, Thiosemicarbazide, Urease.

Bazı Yeni Bis-(1,2,4-Triazol) Bileşikleri: Sentez, Karakterizasyon ve Üreaz Enzim İnhibisyonu

Öz

Bu çalışmada, asetohidrazid türevi 1,2,4-triazol bileşiğinin (**1**) sırasıyla metil izotiyosiyanat, fenil izotiyosiyanat ve 4-metilfenil izotiyosiyanat bileşikleriyle reaksiyonundan tiyosemikarbazid türevleri (**2a-c**) elde edilmiştir. Daha sonra, **2a-c** bileşiklerinin intramoleküler siklizasyonu ile bis-(1,2,4-triazol) bileşikleri (**3a-c**) sentezlenmiştir. Sentezlenen bileşiklerin kimyasal yapıları FT-IR, ¹H-NMR ve ¹³C-NMR spektroskopik yöntemleri kullanılarak doğrulandı. Ayrıca, sentezlenen bileşiklerin üreaz enzimi inhibisyonu *in vitro* Weatherburn yöntemi kullanılarak değerlendirildi. Yeni sentezlenen tüm bileşikler, standart tiyüre (IC₅₀ = 15.75 ± 0.15 µg/mL) ile karşılaştırıldığında 15.00 ± 0.10 ila 16.00 ± 0.25 IC₅₀ (µg/mL) aralığında üreaz enzim inhibisyonu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Bis-(1,2,4-triazol), İzotiyosiyanat, Tiyosemikarbazid, Üreaz.

¹Recep Tayyip Erdogan University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Chemistry, Rize, TÜRKİYE, nesrin.karaali@erdogan.edu.tr

²Recep Tayyip Erdogan University, Faculty of Arts and Sciences, Department of Chemistry, Rize, TÜRKİYE, havanur_cihangir18@erdogan.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 26.03.2024

Kabul/Accepted: 14.08.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Introduction

The synthesis of new compounds that can effectively treat infections and have as few side effects as possible is one of the important areas of organic synthesis chemistry today. Triazole moieties occupy an important place in this field. 1,2,4-Triazole and its heterocyclic derivatives are pharmacologically important compounds with a broad spectrum of activities, such as neuroprotective, antioxidant, antimalarial, antifreeze, anticancer, antimicrobial, anti-inflammatory, antifungal, anxiolytic, anticonvulsant, antimigraine, antiviral, antitumour, antituberculosis, antidepressant, analgesic and enzyme inhibitor. (Bekhit et al., 2004; Farghaly et al., 2000; Karaali and Mentese, 2016; Karaali et al., 2019). Triazole moieties are active ingredients of some commercially available drugs, such as Cefatrizine as an antibiotic, Tazobactam as an antibacterial agent, and Suvorexant for treating insomnia. In addition, the conazoles (itraconazole, fluconazole, posaconazole, triazolam, and alprazolam) are an important group of drugs in the azole class. (Gupta et al., 2007; Schiller and Fung, 2007). Ribavirin, which contains a 1,2,4-triazole ring, is a broad-spectrum antiviral agent. A combination of ribavirin and interferon is currently used to treat hepatitis C. The drugs anastrozole and letrozole, which are used to treat breast cancer by inhibiting aromatase, contain the 1,2,4-triazole nucleus (Figure 1).

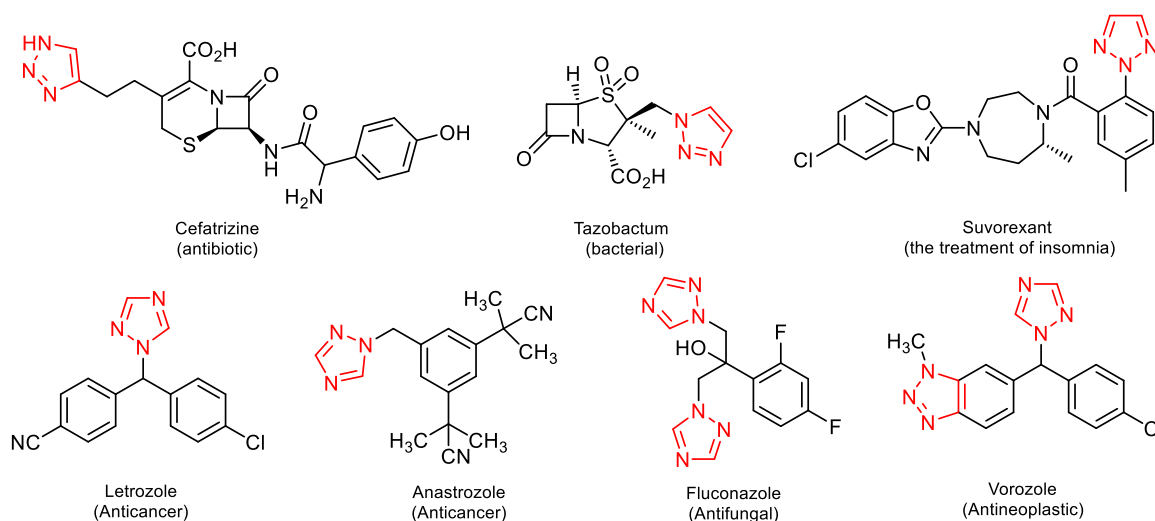


Figure 1. Biologically active drugs containing triazole units.

Triazoles are the most stable compounds of the azole class. Triazoles have characteristic properties such as amide esters and carboxylic acid isosteres. These heterocyclic derivatives with a five-membered ring have two isomeric forms, 1,2,4-triazole and 1,2,3-triazole (Bentley et al., 2002).

One of the most valuable methods for the formation of 1,2,4-triazoles is the interaction of carbothioamide derivatives with a base (El-Khawass et al., 1989; Ram et al., 1988; Amir and Shikha, 2004). In this study, some new bis-(1,2,4-triazole) compounds have been synthesized and their

structures elucidated, starting from the starting compound **1** (2-[4-amino-3-(4-bromobenzyl)-5-oxo-4,5-dihydro-1*H*-1,2,4-triazol-1-yl] acetohydrazide). The synthesis of molecule **1** was carried out according to the method previously reported in the literature (Kahveci et al., 2015). Thiosemicarbazide derivatives (**2a-c**), which constitute the initial first part of the study, were obtained by boiling methyl isothiocyanate, phenyl isothiocyanate and 4-methylphenyl isothiocyanate compounds, respectively, with the compound **1** in ethanol under reflux. In the last step of the study, bis-(1,2,4-triazole) compounds (**3a-c**) were synthesized by intramolecular cyclization by boiling thiosemicarbazide derivatives (**2a-c**) in 2N NaOH solution under reflux.

2. Materials and Methods

2.1. Chemical

In this study, the chemicals used were obtained from Sigma-Aldrich, and the solvents were obtained from various local and foreign companies. The reaction times of the synthesized substances were determined using thin layer chromatography plate. The melting points of the synthesized compounds were determined using a Stuart mode SMP30 melting point determination apparatus. ¹H-NMR and ¹³C-NMR (APT) spectra were obtained in DMSO-*d*₆ on a Varian Mercury 400 MHz, Bruker Avance III 400 MHz NMR instrument. IR spectra were obtained using the ATR technique on a Perkin Elmer 100 FT-IR spectrometer.

The general process for synthesizing compounds 2a–c

Compound **1** (1 mmol) and the corresponding isothiocyanate (1 mmol) were refluxed in 15 mL ethanol for 4 hours. The reaction time was determined by TLC. The mixture obtained was poured into water, the precipitate was filtered, and then washed with plenty of water. It was purified by crystallization in ethyl alcohol and dried over CaCl₂ in a desiccator.

2-[4-Amino-3-(4-bromobenzyl)-5-oxo-4,5-dihydro-1*H*-1,2,4-triazol-1-yl]-*N'*-ethanthionylacetohydrazide (2a). IR spectrum (ATR, ν , cm⁻¹): 1125 (C=S), 1696 (C=O), 3315, 3215 (NH₂, NH); ¹H-NMR spectrum (DMSO-*d*₆) δ (ppm): 2.85 (CH₃, 3H, s), 3.85 (CH₂, 2H, s), 4.99 (NCH₂, 2H, s), 5.31 (NH₂, 2H, s), 7.19 (ArH, 2H, d, J = 8.0 Hz), 7.47 (ArH, 2H, d, J = 8.0 Hz), 7.96 (NH, 1H, s), 9.29 (NH, 1H, s), 9.99 (NH, 1H, s).

2-[4-Amino-3-(4-bromobenzyl)-5-oxo-4,5-dihydro-1H-1,2,4-triazol-1-yl]-N'-(phenylcarbonothionyl)acetohydrazide (2b).

IR spectrum (ATR, ν , cm^{-1}): 1188 (C=S), 1679, 1704 (C=O), 3353, 3200, 3195 (NH_2 , NH); ^1H -NMR spectrum ($\text{DMSO-}d_6$) δ (ppm): 3.85 (CH_2 , 2H, s), 4.46 (NCH_2 , 2H, s), 5.31 (NH_2 , 2H, s), 7.14- 7.18 (ArH, 1H, m), 7.22 (ArH, 2H, d, $J = 8.0$ Hz), 7.32 (ArH, 2H, t, $J = 8.0$ Hz), 7.41 (ArH, 2H, d, $J = 8.0$ Hz), 7.48 (ArH, 2H, d, $J = 8.0$ Hz), 9.61 (NH, 1H, s), 9.70 (NH, 1H, s), 10.25 (NH, 1H, s); ^{13}C NMR spectrum ($\text{DMSO-}d_6$) δ (ppm): 30.27 (CH_2), 47.15 (NCH_2), 120.28, 125.72, 128.55, 131.56, 131.69, 135.61, 139.41 (ArC), 147.17 (C=N), 153.92 (C=O, triazole), 166.96 (C=O), 181.16 (C=S).

2-(4-Amino-3-(4-bromobenzyl)-5-oxo-4,5-dihydro-1H-1,2,4-triazol-1-yl)-N'-(4-methylphenylcarbonothionyl)acetohydrazide (2c).

IR spectrum (ATR, ν , cm^{-1}): 1197 (C=S), 1678, 1694 (C=O), 3359, 3205 (NH_2), 3199 (NH); ^1H NMR spectrum ($\text{DMSO-}d_6$) δ (ppm): 2.27 (CH_3 , 3H, s), 3.85 (CH_2 , 2H, s), 4.45 (NCH_2 , 2H, s), 5.30 (NH_2 , 2H, s), 7.12 (ArH, 2H, d, $J = 8.0$ Hz), 7.21 (ArH, 2H, d, $J = 8.0$ Hz), 7.26 (ArH, 2H, d, $J = 8.0$ Hz), 7.47 (ArH, 2H, d, $J = 8.0$ Hz), 9.53 (NH, 1H, s), 9.62 (NH, 1H, s), 10.22 ve 10.94 (NH, 1H, s); ^{13}C NMR spectrum ($\text{DMSO-}d_6$) δ (ppm): 20.01 (CH_3), 30.26 (CH_2), 47.12 (NCH_2), 120.27, 122.17, 123.55, 129.01, 129.57, 131.55, 131.68, 134.91, 135.61, 136.83 (ArC), 147.14 (C=N), 153.91 (C=O, triazole), 166.72 (C=O), 181.07 (C=S).

The general process for synthesizing compounds 3a-c

A solution of 0.01 mol compound **2c** and 2N (15 mL) NaOH was refluxed for 7 hours. After cooling the reaction mixture to room temperature, the pH of the mixture was adjusted to 5-6 with 37% HCl. The precipitate was filtered, washed with plenty of water, purified by crystallization with ethanol, dried over CaCl_2 in a desiccator.

4-Amino-5-(4-bromobenzyl)-2-((5-mercapto-4-methyl-4H-1,2,4-triazol-3-yl)methyl)-2,4-dihydro-3H-1,2,4-triazol-3-one (3a). IR spectrum (ATR, ν , cm^{-1}): 1332 (C=S), 1580, 1572 (C=N), 1690 (C=O), 3114, 3434 (NH_2), 3217 (NH); ^1H NMR spectrum ($\text{DMSO-}d_6$) δ (ppm): 3.37 (CH_3 , 3H, s), 3.85 (CH_2 , 2H, s), 4.99 (NCH_2 , 2H, s), 5.31 (NH_2 , 2H, s), 7.19 (ArH, 2H, d, $J = 8.0$ Hz), 7.47 (ArH, 2H, d, $J = 8.0$ Hz), 13.66 (SH, 1H, s); ^{13}C NMR spectrum ($\text{DMSO-}d_6$) δ (ppm): 30.19 (CH_2), 30.52 (CH_3), 40.49 (NCH_2), 120.29, 131.37, 131.46, 131.70, 131.84, 135.54 (ArC), 148.02 (C=N, triazolone), 148.50 (C=N, triazolthiol), 153.39 (C=O, triazolone), 167.90 (C=N, triazolthiol).

4-Amino-5-{4-bromobenzyl}-2-[(5-mercapto-4-phenyl-4H-1,2,4-triazol-3-yl)methyl]-2,4-dihydro-3H-1,2,4-triazol-3-one (3b). IR spectrum (ATR, ν , cm^{-1}): 1356 (C=S), 1569 (C=N), 1694

(C=O), 3136 (NH), 3275, 3435 (NH₂); ¹H NMR spectrum (DMSO-*d*₆) δ (ppm): 3.75 (CH₂, 2H, s), 4.63 (NCH₂, 2H, s), 5.04 (NH₂, 2H, s), 7.08 (ArH, 1H, s), 7.16 (ArH, 2H, d, J = 8.0 Hz), 7.28 (ArH, 3H, s), 7.48 (ArH, 2H, d, J = 8.0 Hz); ¹³C NMR spectrum (DMSO-*d*₆) δ (ppm): 30.14 (CH₂), 41.16 (NCH₂), 120.22, 127.82, 128.33, 128.65, 131.51, 131.64, 135.70, 136.62 (ArC), 146.26 (C=N, triazolone), 146.63 (C=N, triazolthiol), 152.81 (C=O, triazolone), 168.51 (C=N, triazolthiol).

4-Amino-5-(4-bromobenzyl)-2-[[5-mercapto-4-(*p*-tolyl)-4*H*-1,2,4-triazol-3-yl]methyl]-2,4-dihydro-3*H*-1,2,4-triazol-3-one (3c). IR spectrum (ATR, v, cm⁻¹): 1358 (C=S), 1572 (C=N), 1682 (C=O), 3275 (NH), 3314, 3440 (NH₂); ¹H NMR spectrum (DMSO-*d*₆) δ (ppm): 2.30 (CH₃, 3H, s), 3.76 (CH₂, 2H, s), 4.63 (NCH₂, 2H, s), 5.09 (NH₂, 2H, s), 6.99 (ArH, 2H, d, J = 8.0 Hz), 7.10 (ArH, 2H, d, J = 8.0 Hz), 7.17 (ArH, 2H, d, J = 8.0 Hz), 7.48 (ArH, 2H, d, J = 8.0 Hz); ¹³C NMR spectrum (DMSO-*d*₆) δ (ppm): 21.20 (CH₃), 30.15 (CH₂), 41.10 (NCH₂), 120.26, 128.12, 129.38, 131.54, 131.66, 133.37, 135.66, 137.58 (ArC), 146.67 (C=N, triazolone), 146.80 (C=N, triazolthiol), 152.88 (C=O, triazolone), 168.67 (C=N, triazolthiol).

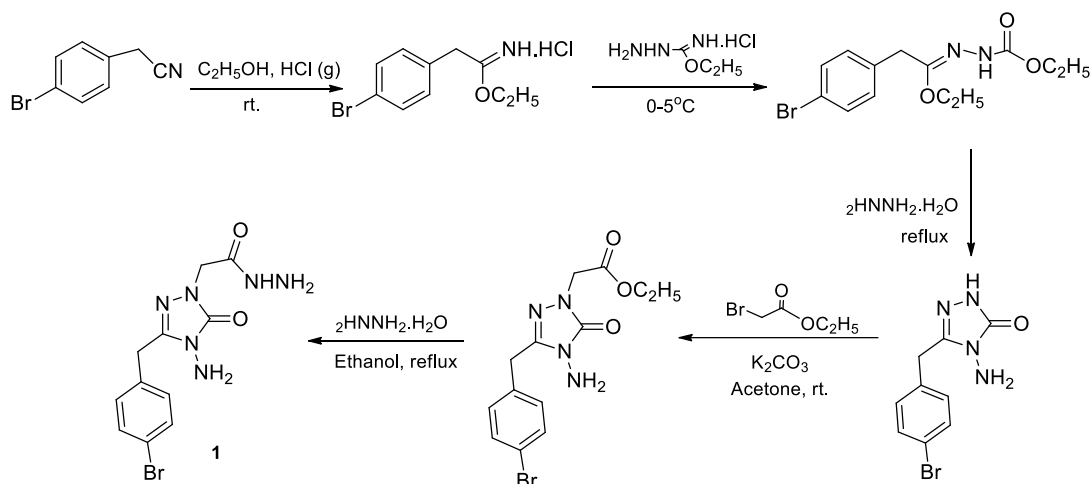
2.2. Urease inhibition assay

Urease inhibitory activities of the synthesized compounds were assayed according to the previously reported procedure (Akyüz and Mentşe, 2023).

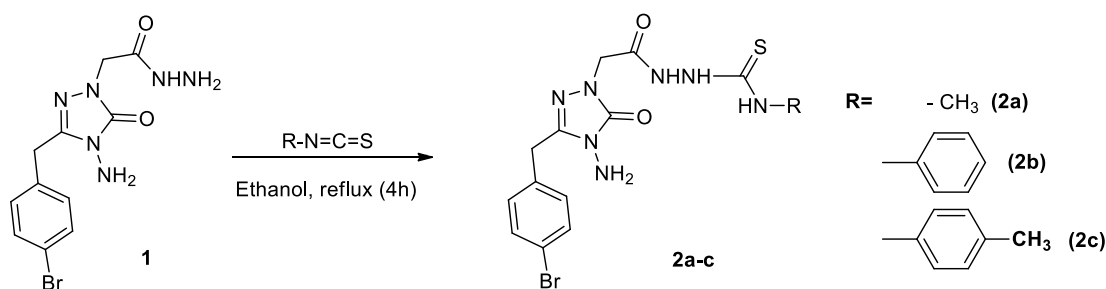
3. Findings and Discussion

In this study, thiosemicarbazide and bis-triazole derivatives of triazoles were synthesised, which have various biological properties reported in the literature and are in clinical use. Compound **1** was synthesized according to the previously reported method in the literature (Scheme 1) (Kahveci et al., 2015). The general reaction equation for the synthesis studies is shown in (Schemes 2, 3). The reaction of compound **1** with methyl isothiocyanate, phenyl isothiocyanate and 4-methylphenyl isocyanate separately afforded the compounds 2-[4-amino-3-(4-bromobenzyl)-5-oxo-4,5-dihydro-1*H*-1,2,4-triazol-1-yl]-*N'*-ethanthionylacetohydrazide (**2a**), 2-[4-amino-3-(4-bromobenzyl)-5-oxo-4,5-dihydro-1*H*-1,2,4-triazol-1-yl]-*N'*-(phenylcarbonothionyl)acetohydrazide (**2b**) and 2-(4-amino-3-(4-bromobenzyl)-5-oxo-4,5-dihydro-1-*H*-1,2,4-triazol-1-yl)-*N'*-(4-methylphenylcarbonothionyl)acetohydrazide (**2c**) were obtained. When the IR spectra of type **2a-c** thiosemicarbazide derivatives were studied, it was observed that the NH₂ group in the triazole-3-one ring gave signals at 3359-3200 cm⁻¹ and the C=O group at 1704-1667 cm⁻¹. NH signals from the thiosemicarbazide structure were observed at 3205-3195 cm⁻¹ and the C=S signals at 1197-1188 cm⁻¹.

¹. When the ¹H-NMR spectra of such compounds were examined, the NH signals originating from the thiosemicarbazide part added to the structure were observed in the range of 7.96, 9.29 and 9.99 ppm in the **2a** compound containing aliphatic side group and in the range of 9.53-9.61, 9.62-9.70 and 10.22-10.25 ppm in the **2b-c** compounds containing the aromatic side group. In the ¹³C-NMR spectra of the **2a-c** compounds, the C=S peaks are in the range of 181.07-181.16 ppm.



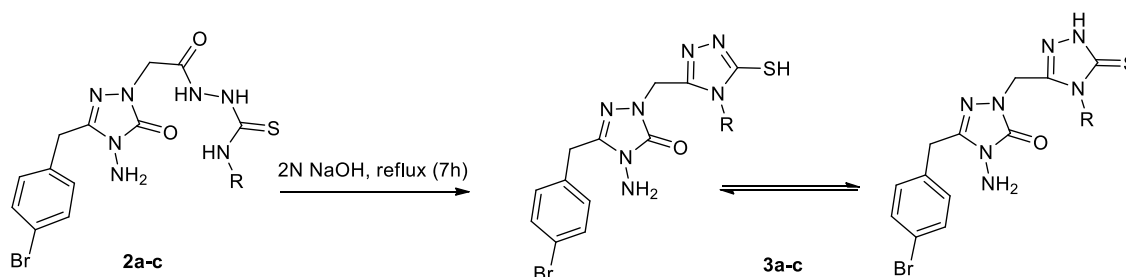
Scheme 1. The synthetic route for compound **1**



Scheme 2. The synthetic route for **2a-c** compounds.

In the second part of the study, bis-(1,2,4-triazole) derivatives (**3a-c**) were synthesized as a result of intramolecular cyclization reactions of **2a-c** compounds in basic medium. The signals belonging to the C=S group in the triazol-3-thion structure of these compounds were recorded in the range of 1330-1356 cm^{-1} in the IR spectrum. When the ¹H-NMR spectrum data of compounds **3a-c** were examined, it was found that the NH signals observed around 9-10 ppm in the thiosemicarbazide structure disappeared. Instead, the SH group in compound **3a** gave a signal at 13.66 ppm. When the ¹³C-NMR spectrum data of the compounds were examined, it was observed that the C=N group in the triazole rings was at 146-148 ppm, and the C=O group in the triazol-3-one ring was at 152-153 ppm. In addition, the presence of C-3 carbons in the triazole-3-thiol ring in these molecules in the range of 167-168 ppm indicates that the structure is in the thiol form in DMSO-*d*₆. IR and NMR data

of the synthesized compounds confirm their molecular structures. The FT-IR(ATR), $^1\text{H-NMR}$ and $^{13}\text{C-NMR}$ (APT) spectras of compound **3a** is given as an example in Figure 2, 3, 4. Physical data of the synthesized compounds are given in Table 1.



Scheme 3. The synthetic route for **3a-c** compounds.

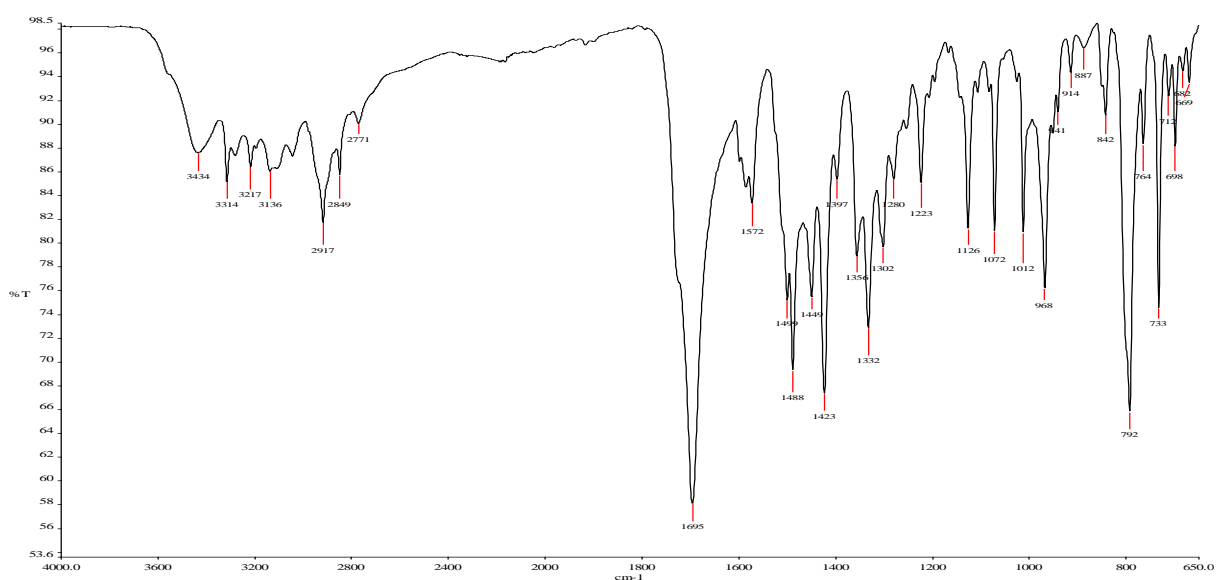


Figure 2. FT-IR(ATR) spectra of compound **3a**.

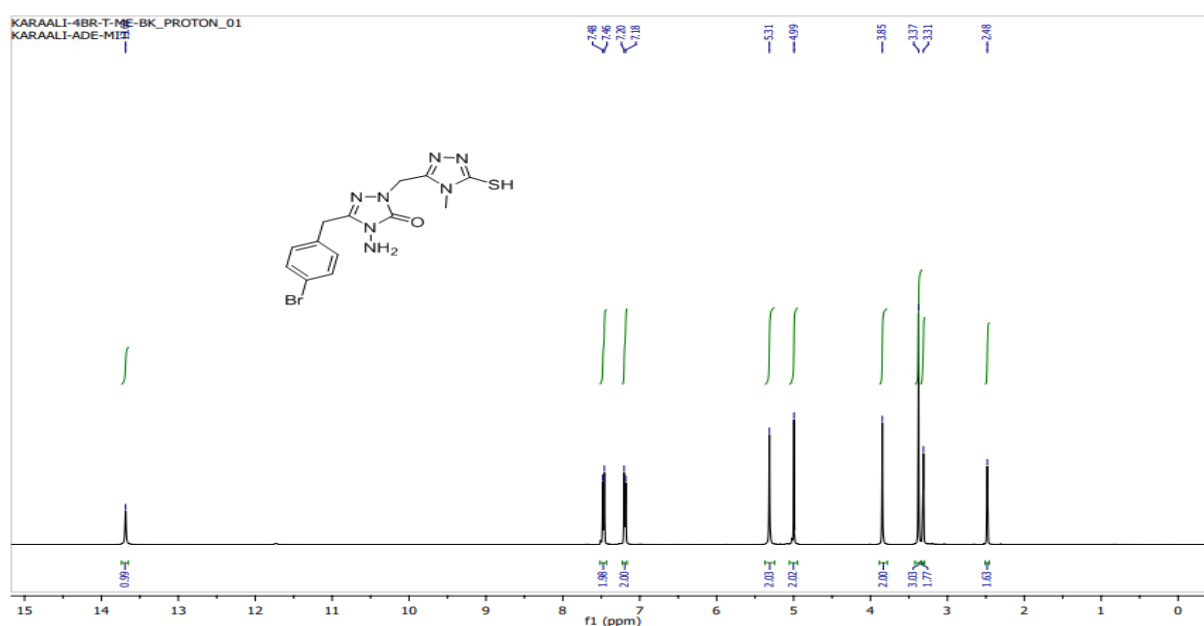


Figure 3. $^1\text{H-NMR}$ spectra of compound **3a** (400 MHz, DMSO-d_6).

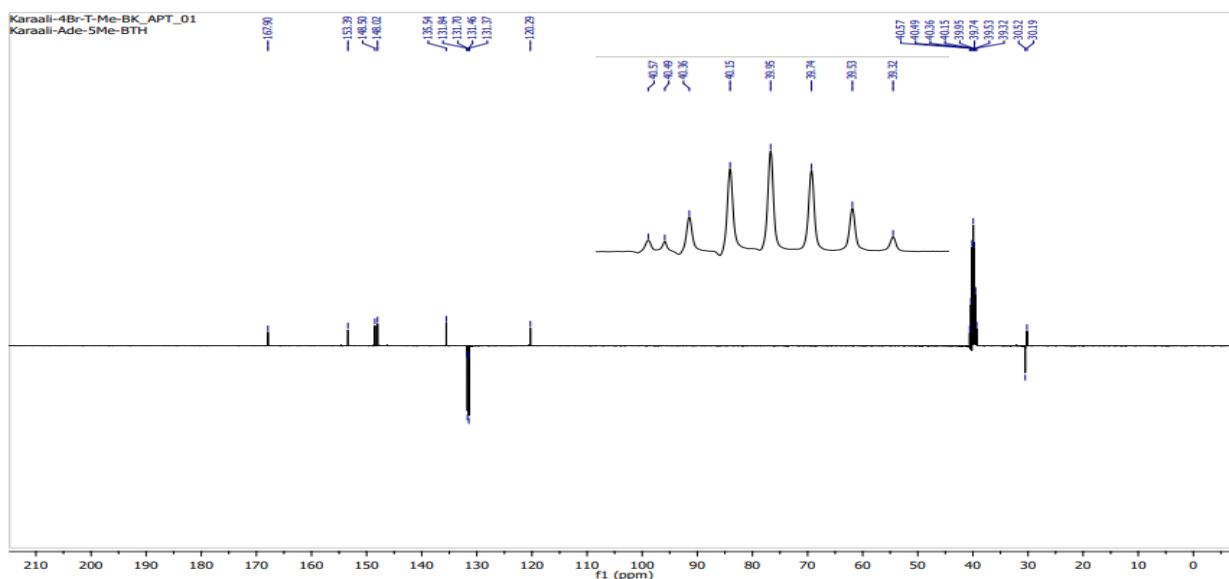


Figure 4. ^{13}C -NMR (APT) spectra of compound **3a** (100 MHz, $\text{DMSO-}d_6$).

Table 1. Physical data for **2a–c** and **3a–c**.

Compound	R	Chemical Formula	InChI	M.p. (°C)	Yield (%)
2a	CH_3	$\text{C}_{13}\text{H}_{16}\text{BrN}_7\text{O}_2\text{S}$	1S/C13H16BrN7O2S/c1-16-2(24)18-17-11(22)7-20-13(23)21(15)10(19-20)6-8-2-4-9(14)5-3-8/h2-5H,6-7,15H2,1H3,(H,17,22)(H2,16,18,24)	162-3	93
2b	C_6H_5	$\text{C}_{18}\text{H}_{18}\text{BrN}_7\text{O}_2\text{S}$	1S/C18H18BrN7O2S/c19-13-8-6-12(7-9-13)10-15-24-25(18(28)26(15)20)11-16(27)22-23-17(29)21-14-4-2-1-3-5-14/h1-9H,10-11,20H2,(H,22,27)(H2,21,23,29)	109-10	92
2c	$\text{C}_6\text{H}_4\text{CH}_3(4)$	$\text{C}_{19}\text{H}_{20}\text{BrN}_7\text{O}_2\text{S}$	1S/C19H20BrN7O2S/c1-12-2-8-15(9-3-12)22-18(30)24-23-17(28)11-26-19(29)27(21)16(25-26)10-13-4-6-14(20)7-5-13/h2-9H,10-11,21H2,1H3,(H,23,28)(H2,22,24,30)	190-1	90
3a	CH_3	$\text{C}_{13}\text{H}_{14}\text{BrN}_7\text{OS}$	1S/C13H14BrN7OS/c1-19-11(16-17-12(19)23)7-20-13(22)21(15)10(18-20)6-8-2-4-9(14)5-3-8/h2-5H,6-7,15H2,1H3,(H,17,23)	240-1	95
3b	C_6H_5	$\text{C}_{18}\text{H}_{16}\text{BrN}_7\text{OS}$	1S/C18H16BrN7OS/c19-13-8-6-12(7-9-13)10-15-23-24(18(27)26(15)20)11-16-21-22-17(28)25(16)14-4-2-1-3-5-14/h1-9H,10-11,20H2,(H,22,28)	202-3	93
3c	$\text{C}_6\text{H}_4\text{CH}_3(4)$	$\text{C}_{19}\text{H}_{18}\text{BrN}_7\text{OS}$	1S/C19H18BrN7OS/c1-12-2-8-15(9-3-12)26-17(22-23-18(26)29)11-25-19(28)27(21)16(24-25)10-13-4-6-14(20)7-5-13/h2-9H,10-11,21H2,1H3,(H,23,29)	200-1	90

In this study, the urease inhibition potentials of the synthesized compounds were investigated. IC₅₀ values for the urease inhibitory activity of the synthesized compounds and thiourea were determined (Table 2). Lower IC₅₀ values indicate greater inhibition. All synthesized compounds showed urease enzyme inhibition in the range of 15.00 ± 0.10 to 16.00 ± 0.25 IC₅₀ (µg/mL) compared to standard thiourea (IC₅₀ (µg/mL): 15.75 ± 0.15). Compound **3a** (15.00 ± 0.10 µg/mL) has the highest potency among the compounds tested. Similar studies in the literature, have reported effective urease inhibition properties of compounds containing a triazole ring and having a thiosemicarbazide structure (Menteşe et al., 2019; Akyüz et al., 2022).

Table 2. Urease enzyme inhibition activity of synthesized compounds Compound (**2a-c**, **3a-c**).

Compound	IC ₅₀ (µg/mL)
2a	16.00 ± 0.25
2b	15.90 ± 0.55
2c	15.00 ± 0.05
3a	15.00 ± 0.10
3b	15.55 ± 0.15
3c	15.85 ± 0.10
Thiourea	15.75 ± 0.15

4. Conclusions and Recommendations

Triazole derivatives are widely used in synthesis chemistry in studies to discover new bioactive compounds because of their broad biological activity. In this study, new thiosemicarbazide derivatives containing 1,2,4-triazole moiety (**2a-c**) and bis-(1,2,4-triazole) compounds (**3a-c**) were synthesized and their urease enzyme inhibition properties were evaluated by *in vitro* Weatherburn method. With IC₅₀ values ranging from 15.00 ± 0.10 to 16.00 ± 0.25 µg/mL, all the synthesized compounds showed good activities when compared with thiourea (IC₅₀ = 15.75 ± 0.15 µg/mL) as a reference inhibitor. Among the thiosemicarbazide derivatives, compound **2c** (IC₅₀ = 15.00 ± 0.05 µg/mL) containing 4-methyl phenyl group and compound **3a** (IC₅₀ = 15.00 ± 0.10 µg/mL) containing methyl group among bis-(1,2,4-triazole) derivatives showed the highest inhibition potential against urease enzyme. These results will help in design of novel enzyme inhibitors with bis-(1,2,4-triazole) structures.

Authors' Contributions

Nesrin Ünal Karaali: Contributed to manuscript preparation, and carried out Synthesis and biological experimental studies. Havva Nur Cihangir: Contributed to Synthesis studies.

Statement of Conflicts of Interest

There is no conflict of interest between the authors.

Statement of Research and Publication Ethics

The author declares that this study complies with Research and Publication Ethics.

References

- Amir, M., and Shikha, K. (2004). Synthesis and Anti-inflammatory, Analgesic, Ulcerogenic and Lipid Peroxidation Activities of Some New 2-[(2,6-Dichloroanilino)phenyl]acetic Acid Derivatives. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 39, 535–545.
- Akyüz, G., Emirik, M., Sökmen, B. B., and Menteşe, E. (2022). Synthesis and Docking Studies of Novel Benzimidazole Derivatives Containing Thiophene and Triazole Rings as Potential Urease Inhibitors. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, 48, 87–95.
- Akyuz, G., and Mentese, E. (2023). Synthesis of New Coumarin-C3 Benzimidazole Hybrids and Their Urease Inhibition Studies. *Letters in Organic Chemistry*, 20, 9, 864–870.
- Bentley, A., Butters, M.S., Green, P., Learmonth, W. J., MacRae, J. A., Morland, M. C. G., Connor, O., and Skuse, J. (2002). The Discovery and Process Development of a Commercial Route to the Water-Soluble Prodrug, Fosfluconazole. *Organic Process Research & Development*, 6, 109–112.
- Bekhit, A. A., El-Sayed, O. A., Aboulmagd, E., and Park, J. Y. (2004). Tetrazolo[1,5- a] quinoline as a potential promising new scaffold for the synthesis of novel anti-inflammatory and antibacterial agents. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 39, 249–255.
- El-Khawass, S. D. M., and Habib, N. S. (1989). Synthesis of 1,2,4-triazole, 1,2,4-triazolo[3,4-b][1,3,4]thiazine derivatives of benzotriazole. *Journal of Heterocyclic Chemistry*, 26, 177–181.
- Farghaly, A. M., Bekhit, A. A., and Park, J. Y. (2000). Design and synthesis of some oxadiazolyl, thiadiazolyl, thiazolidinyl, and thiazolyl derivatives of 1H-pyrazole as anti-inflammatory antimicrobial agents. *Archiv der Pharmazie*, 333, 53–57.
- Gupta, A., Unadkat, J. D., and Mao, Q. (2007). Interactions of Azole Antifungal Agents with the Human Breast Cancer Resistance Protein (BCRP). *Journal of Pharmaceutical Science*, 96, 3226–3235.
- Kahveci, B., Yılmaz, F., Menteşe, E., and Ülker, S. (2015). Microwave-assisted synthesis of some new coumarin derivatives including 1,2,4-triazol-3-one and investigation of their biological activities. *Chemistry of Heterocyclic Compounds*, 51, 5, 447–456.
- Karaali, N. and Mentese, E. (2016). Synthesis and Study of Antitumor Activity of Some New 2-(4-Methoxybenzyl)-1H-Benzimidazole Derivatives Bearing Triazole, Oxadiazole and Ethanol Moiety. *Revue Roumaine De Chimie*, 61, 3, 187–192.
- Karaali, N., Atik, R., Baltas, N., Sasmaz, S., and Kahveci, B. (2019). Synthesis, Inhibitory Properties on The Metabolic Enzymes and Antioxidant Activity of A New Series Benzimidazole Derivatives. *Revue Roumaine De Chimie*, 64, 8, 719–726.
- Menteşe, E., Akyüz, G., Emirik, M., and Baltaş, N. (2019). Synthesis, in vitro urease inhibition and molecular docking studies of some novel quinazolin-4(3H)-one derivatives containing triazole, thiadiazole and thiosemicarbazide functionalities. *Bioorganic Chemistry*, 83, 289–296.

- Ram, V. J., Ram, V. J., and Vlietinck, A. J. (1988). Synthesis and Pesticidal activities of Sulphides and Sulphones Derived from bis [4-Aryl-1,2,4-triazoline-5-thione-3-yl]alkane and 5-Phenyl-1,3,4-oxadiazole-2-thione. *Journal of Heterocyclic Chemistry*, 25, 253–259.
- Schiller, S. D., and Fung, H. B. (2007). Posaconazole: An extended spectrum triazole antifungal agent. *Clinical Therapeutics*, 29, 1862–1886.

Kireç ve Sodyum Aljinat Biyopolimeri ile İyileştirilen Yüksek Plastisiteli Kil Zeminin Donma-Çözülme Özelliklerinin Araştırılması

Dilber TEBER¹ , Harun AKOĞUZ^{2*} 

Öz

Bu çalışmada yüksek plastisiteli bir kil zeminin iyileştirilmesinde sodyum aljinat biyopolimerinin ve kireçle birlikte sodyum aljinat biyopolimerinin etkinliğinin iyileştirmeye etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla kil zemine %0, %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında biyopolimer ve %0, %2, %4 ve %6 oranlarında kireç ilave edilmiştir. 7 ve 28 günlük kür süresi sonunda mukavemet sonuçları serbest basınç mukavemeti deneyleri ile değerlendirilmiştir. Çevresel etkilerin etkisinin incelenmesi amacıyla da iyileştirilen zemin örnekleri 5 ve 10 döngü olarak donma-çözülme maruz bırakılmıştır. Sonuç olarak kür süreleri sonunda sodyum aljinat biyopolimerinin katkısız numunelere kıyasla daha yüksek serbest basınç mukavemetlerine sahip olduğu görülmüştür. Donma çözülme döngüleri sonucunda da biyopolimer katkısının mukavemet sonuçlarını iyileştirdiği belirlenmiştir. Kireçle birlikte biyopolimer kullanımında ise biyopolimerin zemin iyileştirmede kirecin etkinliğini artırdığı mukavemet deneyleri ve donma çözülme döngüleri sonucunda belirlenebilmiştir. Sonuç olarak çevre dostu bir biyopolimer olan sodyum aljinatın kil zeminlerin iyileştirilmesindeki mühendislik uygulamalarına olumlu katkılarının olabileceği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek plastisiteli kil, Sodyum aljinat, Biyopolimer, Kireç, Donma çözülme.

Investigation of Freeze-Thaw Properties of High Plasticity Clay Soil Improved with Lime and Sodium Alginate Biopolymer

Abstract

In this study, the effect of sodium alginate biopolymer and the effectiveness of sodium alginate biopolymer combined with lime in improving a high-plasticity clay soil were investigated. For this purpose, 0%, 0.5%, 1%, and 1.5% biopolymers and 0%, 2%, 4%, and 6% lime were added to the clay soil. At the end of the 7 and 28 day curing period, the strength results were evaluated with unconfined compressive strength tests. In order to examine the effects of environmental factors, the improved soil samples were exposed to freeze-thaw cycles for 5 and 10 cycles. As a result, it was observed that sodium alginate biopolymers had higher unconfined compressive strengths compared to pure samples at the end of the curing periods. As a result of freeze-thaw cycles, it was determined that the biopolymer additive improved the strength results. When using biopolymer with lime, it was determined as a result of strength tests and freeze-thaw cycles that biopolymer increased the effectiveness of lime in soil improvement. As a result, it has been evaluated that sodium alginate, an environmentally friendly biopolymer, may have positive contributions to engineering applications in the improvement of clay soils.

Keywords: High plasticity clay, Sodium alginate, Biopolymer, Lime, Freeze-thaw.

¹Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzincan, Türkiye, dilberteber2525@gmail.com

²Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzincan, Türkiye, hakoguz@erzincan.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 01.04.2024

Kabul/Accepted: 26.06.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Giriş

Günümüzde zeminlerin iyileştirilmesinde birçok farklı metot kullanılmaktadır. Bu metotlar ile taşıma gücü düşük veya problemlili zeminlerin mühendislik özellikleri iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Dünya çapında yaygın olarak bulunan yüksek plastisiteli kil zeminler neme maruz kaldıklarında nispeten hassas olduklarından sorunlu zeminler olarak bilinmektedir (Ghorbani ve ark., 2019). Uzun bir süredir Portland çimentosu ve kireç, kil zeminlerin stabilizasyonunda başarıyla kullanılmaktadır (Prusinski ve Bhattacharja, 1999). Ancak Portland çimentosu kullanımının bazı dezavantajlarının olduğu bilinmektedir. Portland çimentosunun artan kullanımı karbondioksit (CO₂) salınımına bu durumda küresel ısınmaya sebep olabilmektedir (Pavithra ve ark., 2016). Zeminlerin mukavemet özellikleri mühendislik yapılarının ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde kireç kullanımı ile iyileştirilebildiğinden çok sayıda bilim adamı kireçle iyileştirilmiş zeminlerin mekanik özellikleri üzerine araştırmalar yapmışlardır (Jiang ve ark., 2022). Kil zeminlerin iyileştirilmesinde, sıklıkla kullanılan kireç ile birlikte doğal veya çevreci polimerlerin kullanımının, zeminin dayanımına ve diğer mühendislik özelliklerine olumlu katkısının olabileceğini gösteren birçok çalışma bulunmaktadır (Onah ve ark. 2022; Yuliia ve ark. 2023). Bu kapsamda araştırmacılar son yıllarda özellikle bu yapı malzemelerinin zemin iyileştirmedeki avantajları üzerine çalışmalar yapmaktadırlar (Tunç ve ark. 2022; Fatehi ve ark. 2024; Chen ve ark. 2024).

Keskin ve ark. (2017) çalışmalarında katkı malzemelerinin (%5 ve %10 oranlarında mermer tozu, ponza tozu ve kireç tozu) kil zeminler üzerindeki etkilerini incelemiş, iyileştirilen ve iyileştirilmeyen numunelerin donma-çözülme etkisi altındaki serbest basınç mukavemetlerini karşılaştırmışlardır. Çalışmada donma-çözülme maruz kalan zemin örneklerinin serbest basınç dayanımında azalma olduğunu, kireç tozunun %5 ve %10 oranında eklenmesi ile serbest basınç mukavemetinde 5 kata varan artış gözlemlediklerini ifade etmişlerdir. Taşçı (2011) çalışmasında yüksek plastisiteli kil zemini kireç ve silis dumanı katkılarıyla iyileştirmeyi amaçlamıştır. Çalışmada kireç oranını %3'te sabit tutup silis dumanı oranını değiştirerek uygulama yapmış ve %3 kireç + %10 silis dumanı oranlarının şişme basıncı ve üç eksenli basınç deneyleri için optimum olduğunu belirtmiştir. Ok ve Bağrıaçık (2022) çalışmalarında guar gum biyopolimeri (%1, %2, %3) ile kil zeminleri iyileştirmiş, %1 guar gum oranına sahip zemin numunelerinin en yüksek serbest basınç mukavemetine sahip olduğunu belirtmişlerdir. 56 günden sonra dayanımda çok fazla bir artış olmadığını ifade etmişlerdir. Donma çözülmenin etkisini belirleyebilmek için 1, 3, 5 ve 10 donma-çözülme çevrimi uygulamışlar ve çevrim sayısı arttıkça dayanımda azalmalar olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca kil zeminin şişme parametrelerini incelemiş ve şişme parametreleri üzerinde guar gum biyopolimer kullanımının olumlu etkilerinin olduğunu ifade etmişlerdir. Kurt Albayrak ve Altun (2021) çalışmalarında kil zemini mermer tozu ve biyopolimer kullanarak iyileştirmeyi

amaçlamışlardır. Yüksek plastisiteli kil zemine ağırlıkça %5, %15 ve %25 oranlarında mermer tozu ve su miktarının yüzdesi şeklinde %0,5, %1,0 ve %1,5 oranlarında keçiyoynuzu gamı eklemiştir. Genel olarak tüm mermer tozu oranlarında biyopolimer oranı arttıkça serbest basınç dayanımının da arttığını belirtmişlerdir. Literatürde yapılmış çalışmalardan özetle kil zeminlerde biyopolimer kullanımı ile zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilebileceği anlaşılmaktadır.

Yapılan bu çalışmanın amacı, literatürde kil zeminlerin iyileştirilmesinde sıklıkla kullanılan kireç ile birlikte sodyum aljinat biyopolimerinin yüksek plastisiteli kil zeminin mukavemet özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaktır. Bu amaçla iyileştirilen ve iyileştirilmeyen kil zeminlerin mukavemet özellikleri serbest basınç deneyleri ile araştırılmış ve çevresel etkilerin değerlendirilmesi amacıyla da donma çözülme çevrimleri uygulanmıştır. Çalışmadan elde edilen bulguların, zeminlerin iyileştirilmesinde çevre dostu biyopolimerlerin kullanımına dair mühendislik uygulamalarına katkıda bulunabileceği değerlendirilmektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Zemin Özellikleri

Çalışmada kullanılan zemin Erzurum Horasan yöresinden temin edilmiştir (Şekil 1-a). Araziden getirilen zemin öğütücü ile öğütüldükten sonra 0,075 μm elekten elenerek deneylere hazır hale getirilmiştir (Şekil 1-b). Sonrasında zeminin kompaksiyon parametrelerinin belirlenmesi amacıyla standart proktor kompaksiyon deneyi yapılmıştır (ASTM D698). Bu deney sonucunda zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmax}) 12,4 kN/m^3 ve optimum su muhtevası (w) %30,00 olarak belirlenmiştir. Farklı kireç oranları için kompaksiyon parametreleri yeniden belirlenmiş ve deney sonuçları dikkate alınarak numuneler sıkıştırılmıştır. Kil zemin üzerinde yapılan kıvam limitleri deneyleri (ASTM D2487) zeminin yüksek plastisiteli kil zemin olduğunu göstermiştir.



Şekil 1. (a) Araziden alınan kil zemin, (b) öğütme ve eleme sonrası elde edilen kil zemin

2.2. Sodyum Aljinat ve Kireç

Çalışmamızda zeminlerin iyileştirmesinde ticari olarak elde edilebilen sodyum aljinat biyopolimeri ve kireç kullanılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. (a) Sodyum aljinat, (b) kireç

2.3. Deney Metodu ve Analizler

Çalışmada kil zeminin iyileştirilmesinde kireç, sodyum aljinat ve kireç ile birlikte sodyum aljinat farklı oranlarda kullanılmıştır. Zemin iyileştirmede kullanılan oranlara ait detaylar Tablo 1’de verilmiştir. Deney sonuçlarının sunumunda numunelerin adlandırılmasında ilk yazılan değer kil yüzdesini, ikinci değer kireç yüzdesini son değer ise sodyum aljinat biyopolimerin yüzdesini belirtmektedir.

Tablo 1. Kil zeminin iyileştirilmesinde ağırlıkça kil zemin, kireç ve sodyum aljinat oranları

Numune	Kil (%)	Kireç (%)	Sodyum Aljinat (%)	Optimum Su Muhtevası (%)
100-0-0	100	0	0.00%	30.00%
100-0-0.5	100	0	0.50%	30.00%
100-0-1.0	100	0	1.00%	30.00%
100-0-1.5	100	0	1.50%	30.00%
98-2-0	98	2	0.00%	30.90%
98-2-0.5	98	2	0.50%	30.90%
98-2-1	98	2	1.00%	30.90%
98-2-1.5	98	2	1.50%	30.90%
96-4-0	96	4	0.00%	31.95%
96-4-0.5	96	4	0.50%	31.95%
96-4-1	96	4	1.00%	31.95%
96-4-1.5	96	4	1.50%	31.95%

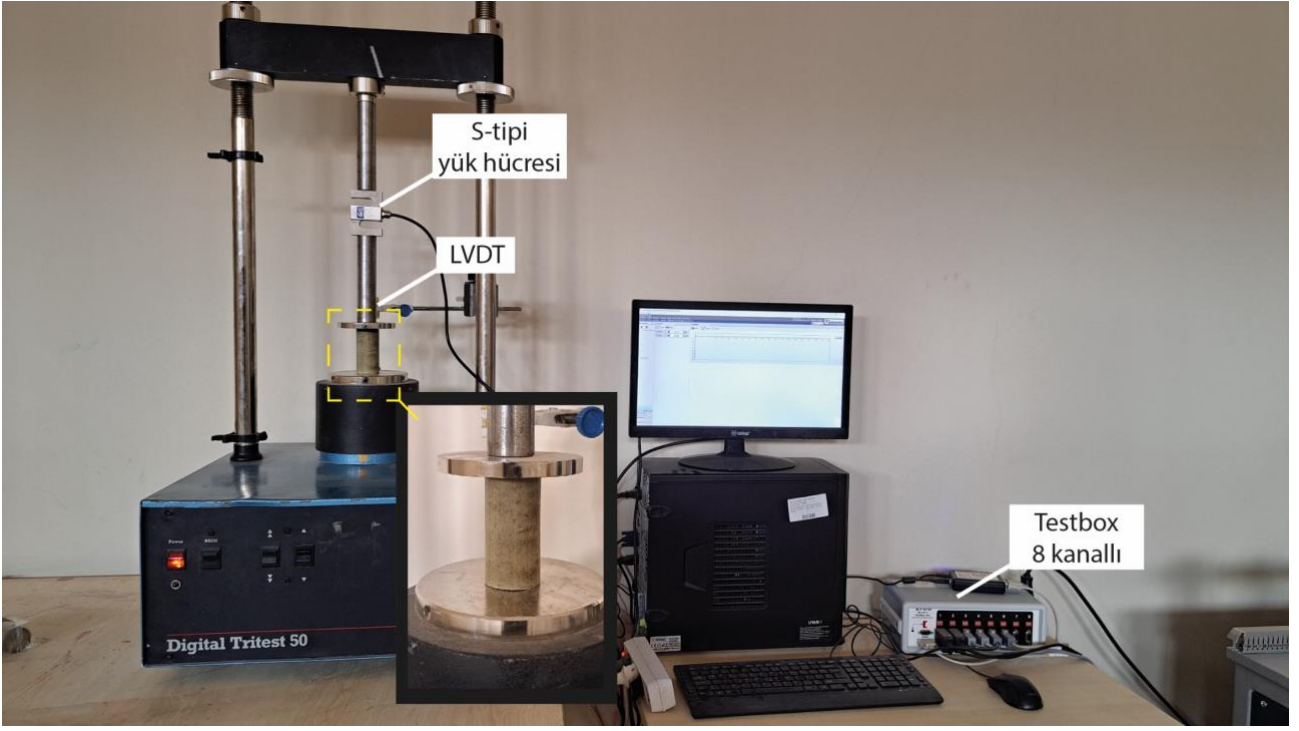
94-6-0	94	6	0.00%	33.00%
94-6-0.5	94	6	0.50%	33.00%
94-6-1	94	6	1.00%	33.00%
94-6-1.5	94	6	1.50%	33.00%

Kireç ve biyopolimerin zemine uygulama aşamasına ait görsel Şekil 3'te verilmiştir. Kireç zemine belirtilen oranda toz halinde eklendikten sonra karıştırıcı ile en az 5 dakika boyunca karıştırılmıştır. Kompaksiyon deney sonuçlarına göre belirlenen optimum su muhtevası kadar su mezür ile ölçülmüş ve içerisine biyopolimer suyun yüzdesi olarak Tablo 1'de belirtilen oranlarda katılarak manyetik karıştırıcıda en az 10 dakika boyunca karıştırılmıştır. Bu karışım mikser içerisine sabit sıvı akışı sağlayan dozaj pompası vasıtası ile verilmiştir. Biyopolimer-su ve kil-kireç karışımları karıştırıcı içerisinde en az 10 dakika karıştırılmıştır.



Şekil 3. (a) Karışımların zemine uygulanması, (b) uygulamada kullanılan malzemeler.

Elde edilen katkılı zemin 38 mm çapında, 76 mm yüksekliğindeki kalıplar içerisinde optimum su muhtevasında sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Kalıplardan çıkarılan zeminler hava almayacak şekilde oda sıcaklığında muhafaza edilmiştir (Şekil 5). 7 gün ve 28 gün süresince kürede bekletilen zeminler üzerinde ASTM D 2166 standardına uygun olarak serbest basınç deneyleri yapılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Serbest basınç deney düzeneği

Çevresel etkilerin zeminlerin mukavemeti üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla numunelere donma-çözülme çevrimleri uygulanmıştır. 28 gün kürde bekletilen zemin örneklerine Şekil 5'te gösterildiği gibi alüminyum folyo sarılarak donma çözülme 5 ve 10 çevrim olacak şekilde uygulanmıştır. Donma çözülme aşamaları her bir çevrim için $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 6 saat dondurucuda bekletilerek dondurma, ardından $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 6 saat çözülme şeklindedir (Ghazavi ve Roustaie, 2010). Donma-çözülme çevrimleri sonrası numunelerin serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir.

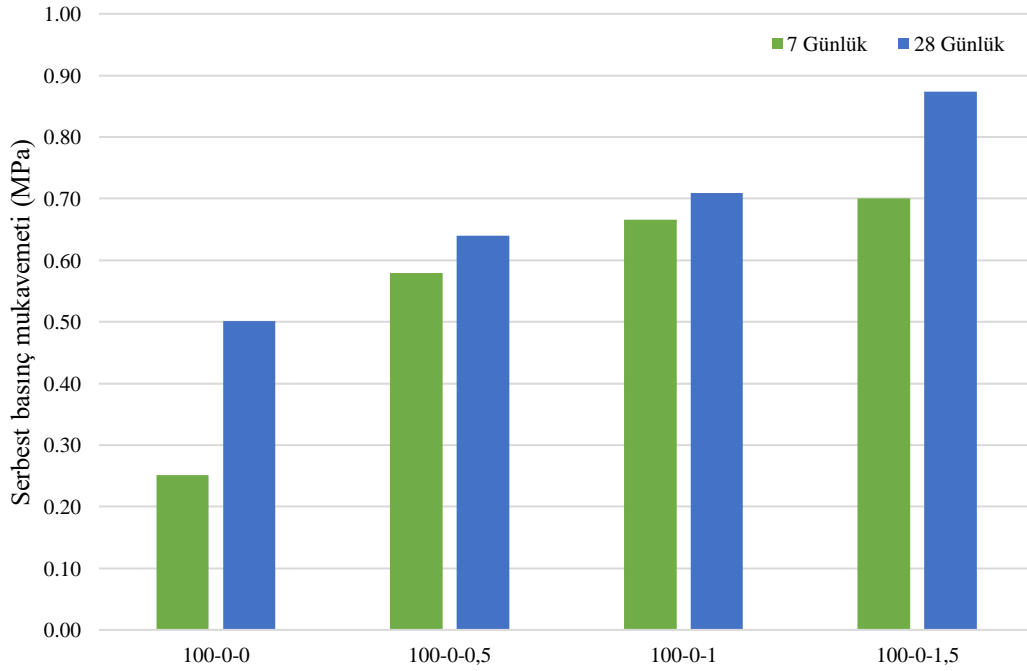


Şekil 5. (a) 7 ve 28 gün bekletilen iyileştirilen zemin örnekleri, (b) donma-çözülme deneyi için hazırlanan zemin örnekleri.

3. Bulgular ve Tartışma

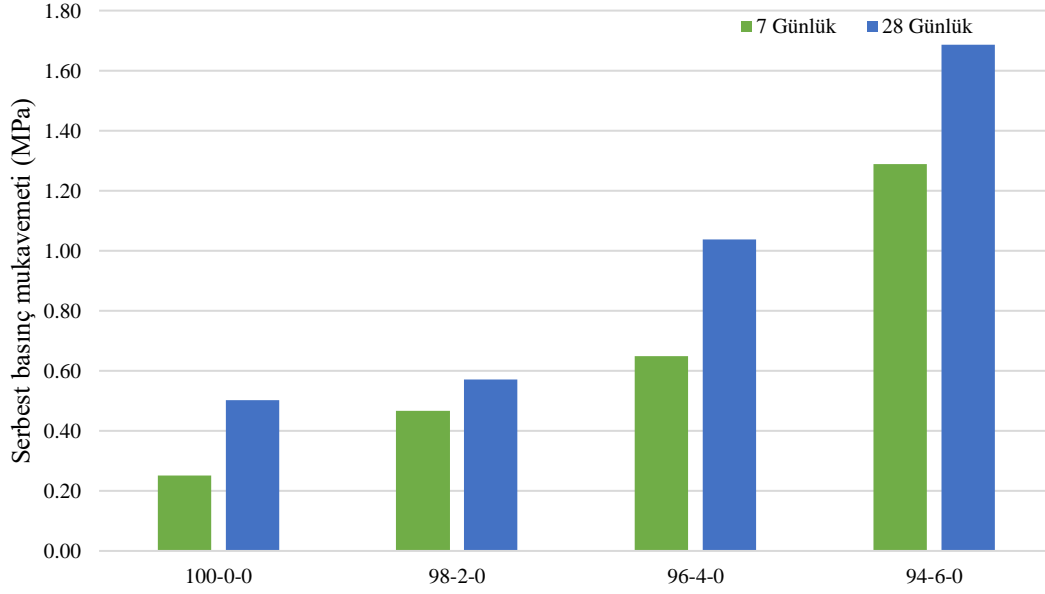
3.1. Serbest Basınç Deney Sonuçları

Çalışmada kil zeminin iyileştirilmesinde sadece biyopolimer, sadece kireç ve biyopolimerle birlikte kireç kullanılarak bunların mukavemet sonuçlarına etkisi araştırılmıştır. Sadece biyopolimer ile iyileştirilen 7 ve 28 gün kür süresine sahip kil zeminlerin mukavemet sonuçları Şekil 6'da sunulmuştur. Şekil 6'da sunulan sonuçlar incelendiğinde, biyopolimer katkılı tüm örneklerde katkı uygulanmayan örneğe göre mukavemet sonuçları artmıştır. Bu artış 28 günlük örnekler için %0,5, %1 ve %1,5 biyopolimer uygulamasıyla, uygulanmayan örneklere kıyasla sırasıyla %28, %42 ve %75 olarak gerçekleşmiştir. Biyopolimer katkısı arttıkça mukavemette arttığından biyopolimer katkısının kil zeminin iyileştirilmesinde oldukça etkili olduğu anlaşılmaktadır. Cheng ve Geng, (2023) çalışmalarında farklı biyopolimerler ile kil zeminlerin iyileştirmesini araştırmışlardır. Kürlenme süresinin 28 ile 42 gün arasında olduğu durumlarda optimum biyopolimer konsantrasyonunun %1-2 arasında olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 6. Biyopolimer ile iyileştirilen zeminlerin 7 ve 28 günlük serbest basınç deney sonuçları

Sadece kireç kullanılarak iyileştirilen kil zeminin mukavemet sonuçları Şekil 7'de sunulmuştur. Sadece kireç uygulanan zemin örneklerinde hiç uygulama yapılmayan zemin örneklerine göre tüm oranlarda mukavemet artışı elde edilmiştir.

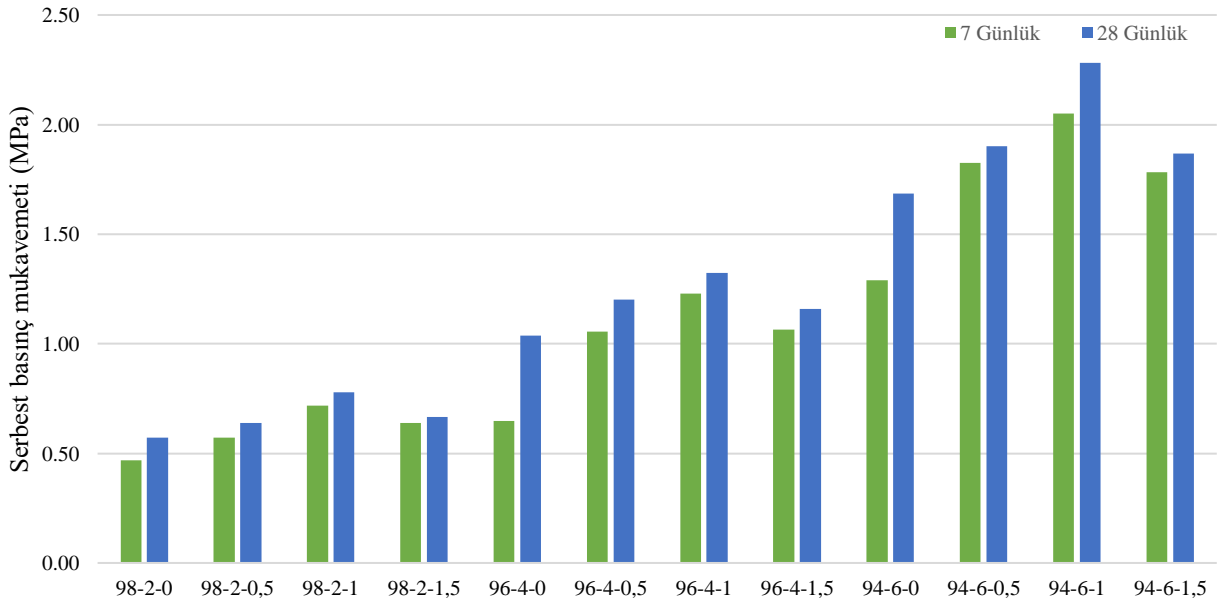


Şekil 7. Kireç ile iyileştirilen zeminlerin 7 ve 28 günlük serbest basınç deney sonuçları

Kireç ile birlikte biyopolimer uygulanan zemin örneklerinin mukavemet sonuçları Şekil 8’de sunulmuştur. Şekil 8’de verilen sonuçlar incelendiğinde sadece biyopolimer veya sadece kireç uygulanan zemin örneklerinin mukavemet sonuçlarından farklı olarak %1 biyopolimer katkısından sonra mukavemet değerlerinde azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Chang ve ark. (2015) çalışmalarında farklı tür zeminlerin biyopolimer (xanthan gum) ile iyileştirilmesi üzerine araştırma yapmışlardır. Biyopolimer konsantrasyonunun artmasıyla mukavemetin de arttığını, ancak belirli bir düzeyden sonra azalma veya düzleşme eğilimi başladığını belirtmişlerdir. Ayrıca biyopolimer konsantrasyonunun artmasıyla daha fazla suyun biyopolimerler tarafından adsorbe edilebileceğini ve oldukça viskoz bir süspansiyon oluşarak zemin içerisindeki boş alanların küresel hacminin artabileceğini vurgulamışlardır. Sonuç olarak %1-1,5 arasında biyopolimer kullanımının hem daha etkili hem de ekonomik olabileceğini belirtmişlerdir. Bakhshizadeh ve ark. (2022) sodyum aljinat biyopolimeri ile kil zeminlerin iyileştirilmesinde hem daldırma hem de püskürtme yöntemlerini kullanmış ve optimum sodyum aljinat konsantrasyonunu %1,25 olarak bulmuşlardır. Bagherinia (2024) kil zeminin iyileştirilmesi üzerine yaptığı çalışmada optimum sodyum aljinat yüzdesini %1 olarak belirtmiştir. Çalışmamızda da benzer şekilde belirli bir biyopolimer konsantrasyonundan sonra mukavemet azalma eğilimi göstermiş ve optimum sodyum aljinat yüzdesi %1 olarak belirlenmiştir. Biyopolimer ve kirecin ortak etkisi incelendiğinde biyopolimer katkısı tüm farklı kireç oranlarında mukavemet sonuçlarını olumlu etkilemiştir. Örneğin sadece %2 kireç uygulanan zemin örneğine %0,5 biyopolimer katkısı 28 günlük mukavemetini %12 artırırken biyopolimer oranı %1 olduğunda bu artış %36 olarak gerçekleşmiştir. Bu artış sadece kireç olarak %4 ve %6 uygulanan zemin

örneklerinde ise %1 biyopolimer uygulamasıyla sırasıyla %27 ve %35 olarak meydana gelmiştir. Biyopolimer kullanımının %1 oranından fazla olması durumunda mukavemet azaldığından kireçle birlikte sodyum aljinat biyopolimer kullanımında aljinat yüzdesinin %1 olarak seçilmesinin faydalı olabileceği değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlardan anlaşılacağı üzere kil zeminlerin iyileştirilmesinde sodyum aljinat biyopolimer kullanımı hem kil zeminin mukavemetini artırmış hem de kireç katkısının daha iyi mukavemet sonuçları vermesine katkı sağlamıştır.



Şekil 8. Kireç ile birlikte biyopolimer uygulanarak iyileştirilen zeminlerin 7 ve 28 günlük serbest basınç deney sonuçları

3.2. Donma-Çözülme Deney Sonuçları

Çevresel etkilerin mukavemet sonuçlarına etkisini değerlendirebilmek amacıyla iyileştirilen kil zeminlerde uygulanan donma çözülme çevrimleri sonrası yapılan serbest basınç mukavemeti deney sonuçları Şekil 9’da sunulmuştur. Şekil 9 incelendiğinde, biyopolimer veya kireç katkısının uygulama yapılmayan kil zeminlere kıyasla donma çözülme sonuçlarında iyileştirici etkilerinin olduğu anlaşılmaktadır.

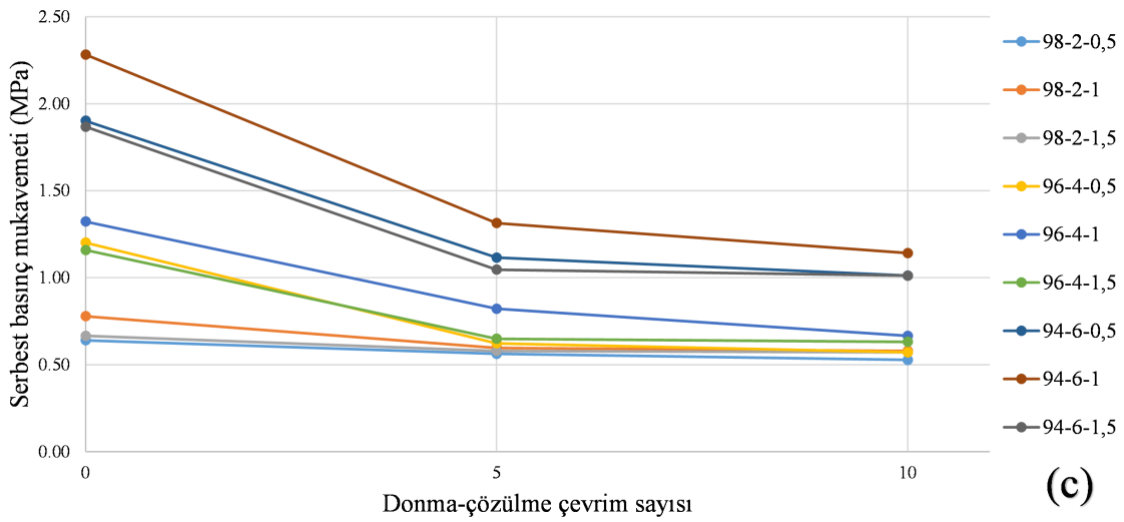
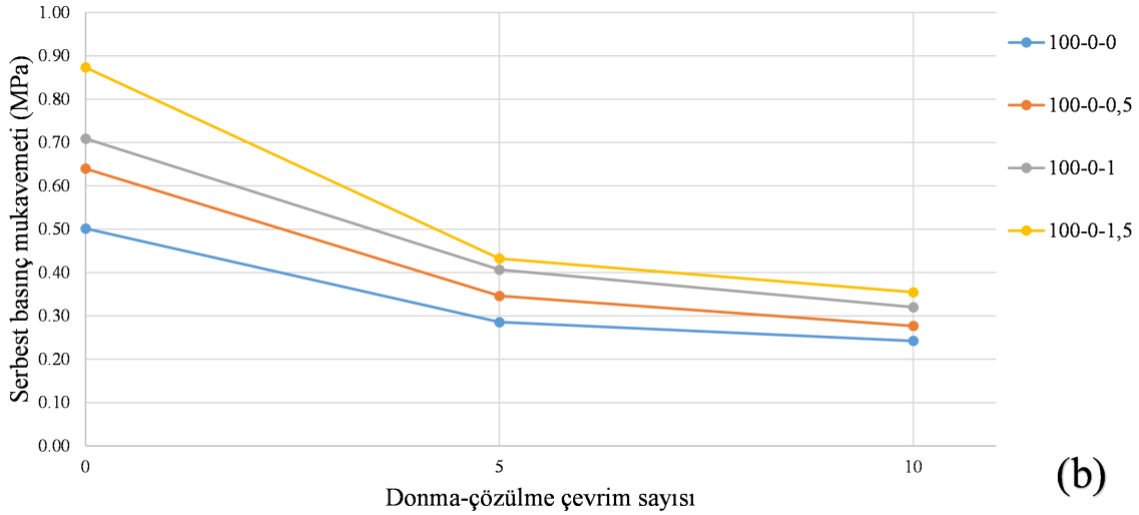
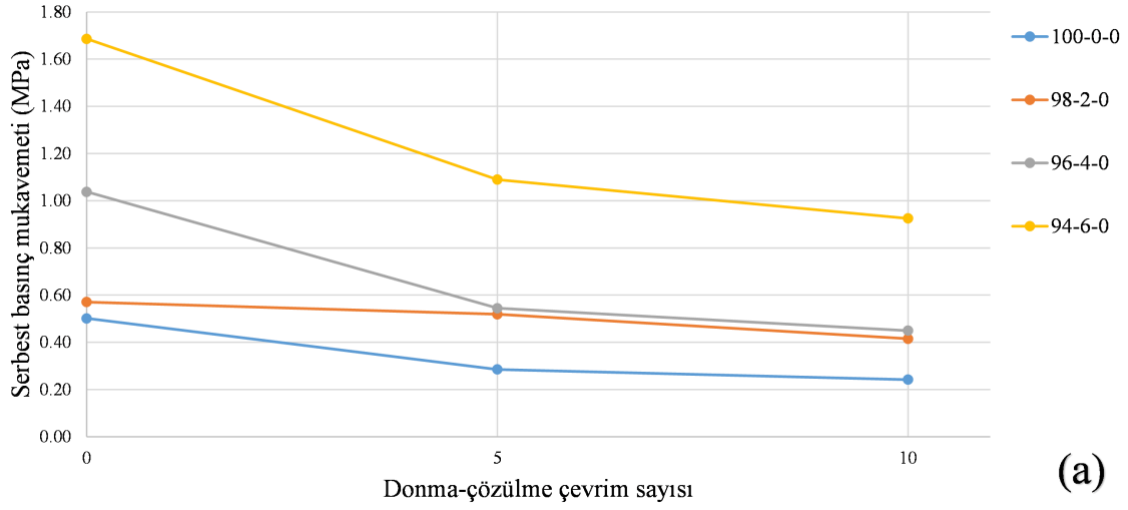
Şekil 9’da sadece kireç uygulanan zemin örnekleri sonuçları incelendiğinde 5 donma çözülme çevriminin 10 donma çözülme çevrimine göre daha etkili olduğu görülmektedir. 5 donma çözülme sonrası sadece kireç uygulanan zemin örneklerinde ortalama mukavemet %31 azalırken 10 çevrim uygulama sonrasında bu değer %43 olarak gerçekleşmiştir. 5 çevrim ile 10 çevrim arasındaki farkın 5 çevrimdeki mukavemet düşüşünden oldukça az olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, donma çözülme çevrimleri sonucunda elde edilen mukavemet değerlerinin 28 günlük mukavemet sonuçları ile paralel

olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan donma çözülme çevriminin etkisinde donma çözülme uygulanmayan örnekler benzer şekilde optimum kireç yüzdesinin %6 olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 9’da verilen sonuçlar incelendiğinde sadece biyopolimer uygulanan zemin örneklerinde de sadece kireç uygulanan zemin örneklerinde olduğu gibi 5 donma çözülme çevriminin (%46) 10 çevrime (%57) oranla daha etkili olduğu görülmektedir. Ayrıca sadece kireç uygulanan zemin örneklerine kıyasla sadece biyopolimer uygulanan zemin örneklerinde donma çözülmede daha fazla düşüş görülmüştür. Biyopolimerler ortam sıcaklığına göre değişebilen polisakkaritlerden oluşmaktadır ve donma çözülmeye bağlı olarak polimerlerin yapısının bozulmasıyla mukavemette azalabilmektedir (Bozyigit ve ark. 2023). Buradan donma çözülmenin sadece biyopolimer uygulanan zemin örnekleri üzerinde daha etkili olduğu anlaşılmaktadır. Optimum biyopolimer oranının donma çözülme çevrime sahip zemin örneklerinde %1,5 olduğu ve katkı kullanılmayan kil zemin örneğine kıyasla biyopolimer kullanımının donma çözülme çevrimlerinde olumlu etkilerinin olabileceği görülmektedir.

Şekil 9’da verilen iyileştirilen zemin örneklerinde biyopolimer ve kirecin donma çözülme çevrimlerindeki ortak etkisi değerlendirildiğinde 28 günlük mukavemet sonuçlarına benzer şekilde optimum kireç yüzdesinin %6 ve optimum biyopolimer yüzdesinin %1 olduğu görülmektedir. Sadece biyopolimer veya sadece kireç uygulanan zemin örneklerinin donma çözülme döngüleri sonuçlarına benzer şekilde kil ve kirecin birlikte uygulandığı örneklerin ortalaması dikkate alındığında mukavemetin azalmasında 5 çevrimin etkisinin (%34) 10 çevrim etkisine (%39) kıyasla daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu etki mukavemet sonuçlarının daha yüksek olduğu %4 ve %6 oranlarında kireç ile birlikte biyopolimer uygulanan örneklerde daha fazla görülmüştür. Sadece kireç uygulanan zemin örneklerine kıyasla biyopolimer katkısı donma çözülme çevrimi sonucunda elde edilen mukavemet sonuçlarına büyük oranda olumlu katkıda bulunmuştur. Örneğin %2 ve %4 kireç uygulanan zemin örneklerinde 10 donma çözülme döngüsü sonucunda mukavemet sırasıyla %27 ve %57 oranlarında azalırken bu örnekler %1 biyopolimer uygulandıktan sonra mukavemet değerlerinde meydana gelen azalma sırasıyla %26 ve %50 olarak gerçekleşmiştir. Liu ve ark. (2023) çalışmalarında kil zemini kalsiyum klorür ve sodyum aljinat içeren bir solüsyonla iyileştirmiş ve 12 donma çözülme çevrimi sonucunda serbest basınç mukavemetinin sadece %20 oranında azaldığını belirtmiştir. Çalışmamızda zeminlerin donma çözülme çevrimlerinden daha fazla etkilenmesinde hem farklı bir zeminin hem de sadece sodyum aljinat kullanımının etkili olabileceği düşünülmektedir. İleride yapılacak çalışmalarda kireç, sodyum aljinat ile birlikte kalsiyum klorürle uygulama yapılmasının donma çözülme çevrimleri sonucunda daha iyi sonuçlar verebileceği değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, literatürde yapılan çalışmalarda biyopolimer kullanımı ile zeminlerin donma çözülme davranışlarının iyileştirilebileceği (Güven ve ark., 2023; Hamza ve ark., 2023) ve biyopolimerin kireç ile birlikte kullanımının hem mukavemetlerin artmasına hem de donma

çözülme sonucunda oluşabilecek olumsuz etkilerin azalmasına katkıda bulunabileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 9. İyileştirilen kil zeminlerin 28 günlük, 5 ve 10 çevrim donma çözülme döngüleri sonrasında elde edilen mukavemet sonuçları. (a) kireç uygulanan zemin örnekleri, (b) biyopolimer uygulanan zemin örnekleri, (c) kireçle birlikte biyopolimer uygulanan zemin örnekleri.

4. Sonuçlar ve neriler

Bu çalışmada yüksek plastisiteli kil zeminin iyileştirilmesinde biyopolimer, kireç ve biyopolimer ile birlikte kireç katkılarının iyileştirmeye etkisi araştırılmıştır. Çevresel etkilerin değerlendirilebilmesi amacıyla katkılı numunelere donma özölme döngüleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar sodyum aljinat biyopolimerinin hem zemin iyileştirmede hem de iyileştirilen zeminin donma özölme döngüleri sonucunda elde edilen mukavemetlerinde olumlu etkilerinin olabileceğini göstermiştir. Ayrıca kireçle iyileştirilen örneklerde biyopolimer katkısının mukavemet sonuçlarını artırdığı belirlenmiştir. Sodyum aljinat ve kireç birlikte uygulandığında optimum kireç ve biyopolimer oranlarının sırasıyla %6 ve %1 olduğu grlmştir. Çalışma sonucunda, sodyum aljinat biyopolimerinin kil zeminin donma özölme davranışını iyileştirebileceği ve kirecin iyileştirmedeki etkinliğini artırabileceği sonucuna varılmıştır.

Yazarların Katkısı

Bu alışma Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Dilber TEBER'in Dr. Öğr. Üyesi Harun Akoğuz danışmanlığında yürüttüğü yüksek lisans tez çalışması kapsamında üretilmiştir.

ıkar atışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar atışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Bagherinia, M. (2024). Mechanical, durability, and microstructure of soft clay stabilised with anionic biopolymer. *Construction and Building Materials*, 417, 135343.
- Bozyigit, I., Zingil, H. O., & Altun, S. (2023). Performance of eco-friendly polymers for soil stabilization and their resistance to freeze–thaw action. *Construction and Building Materials*, 379, 131133.
- Bakhshizadeh, A., Khayat, N., & Horpibulsuk, S. (2022). Surface stabilization of clay using sodium alginate. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01006.
- Chang, I., Im, J., Prasadhi, A. K., & Cho, G. C. (2015). Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening. *Construction and Building Materials*, 74, 65-72.
- Chen, Z., Liu, J., Wang, Y., Qi, C., Ma, X., Che, W., & Ma, K. (2024). Wetting–drying effects on the mechanical performance of xanthan gum biopolymer-stabilized soil. *Environmental Earth Sciences*, 83(7), 197.

- Cheng, Z., Geng, X., 2023. Investigation of unconfined compressive strength for biopolymer treated clay. *Constr Build Mater* 385, 131458. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131458>
- Fatehi, H., Ong, D. E., Yu, J., & Chang, I. (2024). Sustainable soil treatment: Investigating the efficacy of carrageenan biopolymer on the geotechnical properties of soil. *Construction and Building Materials*, 411, 134627.
- Ghazavi, M., Roustaei, M., 2010. The influence of freeze–thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay. *Cold Reg Sci Technol* 61, 125–131. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.12.005>
- Ghorbani, A., Hasanzadehshoosli, H., Mohammadi, M., Sianati, F., Salimi, M., Sadowski, L., Szymanowski, J., 2019. Effect of Selected Nanospheres on the Mechanical Strength of Lime-Stabilized High-Plasticity Clay Soils. *Advances in Civil Engineering* 2019, 4257530. <https://doi.org/10.1155/2019/4257530>
- Günek, Ş., 2024. LİF İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BİYOPOLİMER KATKILI YÜKSEK PLASTİSİTELİ BİR KİLİN DONMA-ÇÖZÜLME ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI (Yüksek Lisans Tezi). Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Güven, B., Günek, Ş., & Kurt Albayrak, Z. N. (2023). KİLİN MUKAVEMETİ VE DONMA-ÇÖZÜLME SONRASI MUKAVEMETİ ÜZERİNDE BİYOPOLİMER VE LİF KATKISININ ORTAK ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(4), 951-961.
- Hamza, M., Nie, Z., Aziz, M., Ijaz, N., Akram, O., Fang, C., Ghani, M.U., Ijaz, Z., Noshin, S., Madni, M.F., 2023. Geotechnical behavior of high-plastic clays treated with biopolymer: macro–micro-study. *Environ Earth Sci* 82, 91. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10760-2>
- Jiang, P., Zhou, L., Zhang, W., Wang, W., Li, N., 2022. Unconfined compressive strength and splitting tensile strength of lime soil modified by nano clay and polypropylene fiber. *Crystals (Basel)* 12, 285. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/cryst12020285>
- Keskin, S.N., SUNGUR, A., Recep, A., UZUNDURUKAN, S., 2017. İnce Daneli Zeminlerde Katkı Maddelerinin ve Donma-Çözülme Çevriminin Serbest Basınç Dayanımına Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 5, 473–478. <https://doi.org/https://doi.org/10.21923/jesd.321924>
- Kurt Albayrak, Z.N., Altun, B., 2021. Strength properties of biopolymer treated clay/marble powder mixtures. *Challenge Journal Of Concrete Research Letters* 12, 131–137. <https://doi.org/https://doi.org/10.20528/cjcr1.2021.04.003>
- Liu, S., Du, K., Wen, K., Armwood-Gordon, C., Li, Y., Navarro, I., & Li, L. (2023). Stabilization of Expansive Clayey Soil Through Hydrogel for Mechanical Improvements. *Int J Civ Eng* 21, 1423–1431 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40999-023-00835-3>
- Ok, B., Bağrıaçık, B., 2022. Guar Gum ile İyileştirilen Kil Zeminlerin Donma Çözülme Etkisinde Mukavemet ve Şişme Basınçlarının Araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* 37, 589–600. <https://doi.org/https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1189181>
- Onah, H.N., Nwonu, D.C. & Ikeagwuani, C.C. Feasibility of lime and biopolymer treatment for soft clay improvement: a comparative and complementary approach. *Arab J Geosci* 15, 337 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09552-y>
- Pavithra, P., Srinivasula Reddy, M., Dinakar, P., Hanumantha Rao, B., Satpathy, B.K., Mohanty, A.N., 2016. Effect of the Na₂SiO₃/NaOH ratio and NaOH molarity on the synthesis of fly ash-based geopolymer mortar, in: *Geo-Chicago 2016*. pp. 336–344. <https://doi.org/https://doi.org/10.1061/9780784480151.034>
- Prusinski, J.R., Bhattacharja, S., 1999. Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. *Transp Res Rec* 1652, 215–227. <https://doi.org/10.3141/1652-28>
- Taşçı, G., 2011. Problemlili Kil Zeminin Geoteknik Özelliklerine Silis Dumanı ve Kireç Katkısının Etkisi (Yüksek Lisans Tezi). *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği*. Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Tunç, U., Bağrıaçık, B., Aslan, H., Altay, G., et al. (2022). Arabik Gam Katkılı Doğal Kil Zeminin Konsolidasyon Sonuçlarının Değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(3), 731-740. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1190348>.
- Yuliia, B., Viktor, D., Pavlo, T. and Andrii, B. (2023). ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF LIME AND XANTHAN GUM USE IN THE SOFT SOIL FOUNDATION OF TRANSPORTATION STRUCTURES. *Proceedings of I International Scientific and Practical Conference* (pp. 62-66). Chicago, USA.

Yeşil Meyveli Soğuk İçeceklerin Probiyotik Bakteriler ile Fermantasyonu: Biyoaktif, Mikrobiyolojik ve Fizikokimyasal Özellikleri

Selin KALKAN^{1*}, Emine KIRKOÇOĞLU², Zeliha KAYA³, Mustafa Remzi OTAĞ⁴

Öz

Bu çalışmada, ıspanak, maydanoz, kivi, yeşil elma ve elma suyu ile yapılan yeşil meyve (YS) bazlı probiyotik soğuk bir içecek formülasyonunun geliştirilmesini amaçlamıştır. *Bifidobacterium animalis ssp lactis* B94 ve *Lactobacillus rhamnosus* GG olmak üzere iki ticari laktik asit bakterisi (LAB) kullanılarak hazırlanan yeşil meyveli soğuk içeceklerin (YS), fenolik bileşik içeriği, antioksidan kapasiteleri ve fizikokimyasal özellikleri 4 °C'deki 7 günlük depolama süresi boyunca araştırılmıştır. Tüm örneklerin pH, titrasyon asiditesi, kül, kuru madde, brix, yoğunluk ve renk değerleri belirlenmiştir. 7 günlük depolama süresinden sonra elde edilen sonuçlar doğrultusunda, her iki YS, LAB büyümesi için uygun matrisler olduğu ve fermantasyon sonrası koloni sayılarının 6,26 - 9,45 log KOB/mL arasında değiştiği tespit edilmiştir. YS toplam fenolik ve flavonoid miktarı fermantasyon sonrasında artış göstermiştir. Örneklerin toplam fenolik içerikleri 139,84 ile 146,29 gallik asit eşdeğeri (mg/L) arasında belirlenmiştir. Benzer şekilde, DPPH ve ABTS yöntemlerine dayalı antioksidan kapasitelerin önemli ölçüde ve özellikle depolamanın ilk gününde artış gösterdiği tespit edilmiştir ($p \leq 0,05$). Sonuç olarak, YS'de probiyotik bakterilerin depolama süresi boyunca tatmin edici bir düzeyde kaldığı ve bu nedenle YS probiyotiklerin ve liflerin dahil edilmesi için uygun bir içecek olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Antioksidan kapasite, Fonksiyonel içecek, Mikrobiyel canlılık, Probiyotik, Meyveli soğuk içecek.

Fermentation of Green Fruit-Based Cold Beverages by Probiotic Bacteria: Bioactive, Microbiological and Physicochemical Properties

Abstract

This study aims to develop a green fruit (YS)-based probiotic cold beverage formulation made with spinach, parsley, kiwi, green apple, and apple juice. Two commercial lactic acid bacteria (LAB), namely *Bifidobacterium animalis ssp lactis* B94 and *Lactobacillus rhamnosus* GG were used to investigate the effects on the phenolic compounds, antioxidant capacities and physicochemical properties of the YS during 7 days of storage at 4 °C. The physicochemical characterization of the formulations with better performance regarding the maintenance of probiotic counts was carried out. The pH, titration acidity, ash, dry matter, brix, density and color values of all samples were determined. After the period of storage for 7 days, results showed that both YS were favourable matrices for LAB growth and the colony counts remained between 6.26 – 9.45 log CFU/mL after fermentation. Total phenolics and flavonoids in YS were increased after fermentation period. The total phenolic contents of the samples were varied between 139.84 and 146.29 gallic acid equivalent in mg/L. Correspondingly, antioxidant capacities based on DPPH and ABTS methods were improved significantly and positively ($p \leq 0.05$) especially in the first day of the storage. Consequently, the YS can be considered an appropriate vehicle for the incorporation of probiotics and fibres, whereas, the probiotic bacteria remain at a satisfactory level throughout storage.

Keywords: Antioxidant capacity, Functional beverage, Microbial viability, Probiotic, Fruit-based cold beverages.

¹Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Giresun, Türkiye, selin.kalkan@giresun.edu.tr

²Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Giresun, Türkiye, eminekirkocoglu@gmail.com

³Giresun Üniversitesi, Turizm Fakültesi, Gastronomi ve Mutfak Sanatları Bölümü, Giresun, Türkiye, zeliha.kaya@giresun.edu.tr

⁴Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Giresun, Türkiye, mustafa.otag@giresun.edu.tr

1. Giriş

Meyve ve sebzeler, insan beslenmesinin temel bir parçasıdır. Özellikle, diyet lifi, vitaminler ve çeşitli fitokimyasallar açısından zengindirler. Sayısız çalışma, sağlığı teşvik etmede ve hipertansiyon, kanser, koroner kalp hastalığı, inme gibi belirli kronik hastalıkların önlenmesinde önemli bir rol oynadıklarını kanıtlamıştır. Ayrıca, meyve ve sebzeler renkli, lezzetli ve tat verici bileşikler açısından zengin olup, pek çok duyuşsal his sağlarlar (Cagno ve ark., 2011; Mirmiran ve ark., 2014).

Çeşitli çalışmalar, yeterli miktarda meyve ve sebze tüketiminin bazı kronik hastalıkların (Ör; hipertansiyon koroner kalp hastalıkları ve inme riski) önlenmesinde etkin olduğunu belirtmektedir (Dauchet ve ark., 2007; He ve ark., 2007). Meyve ve sebze tüketimini artırmak için, alternatif ve/veya tamamlayıcı olarak gıda endüstrisi meyve-sebzeli soğuk içecek üretimini sunmaktadır.

Meyve-sebzeli soğuk içecekler (Smoothieler), taze meyve ve sebzelerden oluşan karışımlar olarak ilk kez 1960'larda Amerika Birleşik Devletleri'nde tanıtılmış ve 2000'lerde yeniden ortaya çıkmıştır (Titus, 2008). Smoothie üretimi, genellikle tohumları ve kabuklarını çıkardıktan sonra meyve ve sebzelerin ezilmiş veya püre haline getirilmiş karışımlarının kullanılmasına dayanmaktadır (Qian, 2006). Bu meyve ve sebze karışımları çoğunlukla rengi, lezzeti, içilebilir dokusu ve özellikle düşük enerji içeriği ile yüksek besin değerini garanti etmek için seçilir. Aynı zamanda smoothieler, özellikle taze meyve ve sebzeleri tedarik edemeyen ve/veya tüketimini pratik bulmayan insanlara da bir alternatif olarak sunulabilmektedir. Üretim ve içeriğe bağlı olarak, bir smoothie en az bir porsiyon meyve veya sebzenin besin değerini yerine koymak için yeterli olabilmektedir (Watzl, 2008).

Yapılan araştırmalara göre, smoothielerle ilgili literatür oldukça sınırlıdır. Bazı çalışmalarda smoothielerin raf ömrü ve duyuşsal özellikleri üzerinde ısı ve darbeleri elektrik alanların etkisi araştırılmıştır (Walkling-Ribeiro ve ark., 2010). Başka bir çalışmada Muller ve ark. (2010) farklı meyve formülasyonlarının antioksidan kapasitesi ve biyoaktif özelliklerini ele almışlardır. Seçilmiş laktik asit bakterilerinin (LAB) smoothielerin fermantasyonunda kullanımıyla ilgili ise literatürde sınırlı sayıda çalışma yer almaktadır.

Yeşil meyveli soğuk içeceklerin üretiminde kullanılan ıspanak (*Spinacia oleracea*), genellikle taze veya dondurulmuş yaprakları haşlanarak tüketilen en önemli antioksidan sebzelerden biridir. Yeni kesilmiş ıspanak yaprakları kilogram başına yaklaşık 1.000 mg toplam flavonoid içerir (Lomnitski ve ark., 2003). Maydanoz ise, antioksidan, hepatoprotektif, nöroprotektif, antidiyabetik, analjezik, spazmolitik, immünosüpresan, antikoagülan, anti-ülser, laksatif, östrojenik, diüretik, hipotansif, antibakteriyel ve antifungal aktiviteler gibi çeşitli kanıtlanmış farmakolojik özelliklere sahip bir tıbbi bitkidir (Farzaei ve ark., 2013). İçeceklerin üretiminde kullanılan bir diğer yeşil meyve olan kivi meyvesinin çeşitli farmakolojik aktiviteleri, onun önemli besin ve aktif içeriklerinden kaynaklanmaktadır. Kivi meyvesi, çeşitli proteinler, vitaminler (Vit A, Vit C, Vit E, Vit K, vb.) ve

mineraller (potasyum, kalsiyum, demir, magnezyum, vb.) açısından zengin bir kaynaktır ve polifenoller, polisakkaritler, terpenoidler, alkaloidler vb. dahil olmak üzere geniş bir yelpazede biyoaktif bileşenler içerir. Bu bileşenler, çeşitli fizyolojik olarak aktif işlevlere sahiptir ve bu nedenle gıda, eczacılık ve kozmetik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kivi meyvesi ve biyoaktif bileşenleri bu nedenle fonksiyonel gıdalar ve nutrasötik bileşenler olarak araştırılmaktadır. Gıda endüstrisinde, kivi meyvesi genellikle korunmuş meyveler, meyve tozları ve meyve içeceklerine işlenmiştir. Kivi meyvesi yapraklarının ekstrelerinin serbest radikal hasarından koruduğu ve bu nedenle antioksidan gıda katkı maddeleri olarak kullanılabileceği bildirilmiştir (Li ve ark., 2024). Elma meyvesinin iç kalite özellikleri, fenolik bileşikler, askorbik asit, tiyoller, β -karoten, fitosteroller ve pektinler dahil olmak üzere diyet lifi gibi çok sayıda biyolojik olarak aktif bileşiklerle karakterize edilir. Fenolik bileşikler grubunda, elma meyvelerinde en yüksek konsantrasyonda bulunanlar klorojenik asit, (+)-kateşin, (-)-epikateşin, rutin, florizin, kuersetin ve bir grup prosiyanidinlerdir. Bu bileşiklerin çoğu antioksidan aktivite sergiler ve serbest radikallerin giderilmesinde rol oynar (Sawicka ve ark., 2023). Elma suyunda bulunan fenolik bileşikler, sitoprotektif özellikleri nedeniyle biyolojik aktivite sergileyen çeşitli sistemlerde güçlü antioksidan özellikler göstermektedir. Bu bileşikler, kanser, koroner hastalıklar ve nörodejeneratif hastalıklar (Alzheimer ve Parkinson) gibi çeşitli hastalıkların görülme riskinin azaltılması ile ilişkilendirilmektedir (Silva ve ark., 2018).

Çeşitli teknolojik seçenekler arasında, LAB tarafından yapılan fermantasyon, meyve ve sebzelerin güvenlik, besin değeri, duyuşal özellikler ve raf ömrü özelliklerini korumak ve/veya iyileştirmek için doğal ve değerli bir biyoteknoloji olarak değerlendirilebilmektedir. Gıdalarda yaygın olarak kullanılan probiyotik bakteriler *Lactobacillus* ve *Bifidobacterium* cinslerine ait türlerdir. Bunlardan *L. rhamnosus* ise en sık başvuru alan probiyotik bakteri türüdür ve “GRAS” yani tüketimi genellikle güvenli olarak tanımlanmıştır. Bu probiyotik bakterinin sağlık üzerinde bağışıklık sistemini güçlendirme, gastrointestinal enfeksiyonları, diareyi ve gıda kaynaklı bazı alerjileri önleme gibi faydaları vardır (Turhan ve ark., 2019). Son zamanlarda yapılan çalışmalar, seçilmiş otokton LAB starterlerinin kullanımının, fermente havuç, yeşil fasulye, domates suyu, kırmızı ve sarı biber, ananas meyvesi ve vişne püresinde uzun raf ömrünü garanti ettiğini ve ayrıca besin değeri, reoloji ve duyuşal özellikleri koruduğunu göstermiştir (Di Cagno ve ark., 2008; 2009a,b; 2010a,b). Fermente meyvelerin istenen özelliklerini elde etmek için LAB'nin ham maddeye özgül karakteristiklere uyum sağlaması gerekmektedir. Spontane fermantasyonlar genellikle çeşitli doğal ve kontaminasyon kaynaklı mikroorganizmaların rekabetçi etkinlikleri sonucunda meydana gelir ve başarısızlık riskini yüksek tutabilir. Starter kültür kullanımı, bozulmaya neden olan patojenik bakterilerin hızlı bir şekilde inhibisyonuna ve tutarlı duyuşal ve besinsel kaliteye sahip işlenmiş bir meyve/meyve suyu elde edilmesine olanak sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir (Rodríguez ve ark., 2010).

Bu çalışmada, ıspanak, maydanoz, kivi, yeşil elma ve elma suyu ile hazırlanan yeşil meyve bazlı probiyotik bir soğuk içecek formülasyonu geliştirmek amaçlanmıştır. *Bifidobacterium animalis ssp. lactis* B94 ve *Lactobacillus rhamnosus* GG olmak üzere iki ticari LAB kullanılarak geliştirilen YS'lerin fenolik bileşik içeriği, antioksidan kapasiteleri, mikrobiyolojik ve fizikokimyasal özellikleri, örneklerin 4 °C'de 7 günlük depolama süresince incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Probiyotik Bakteriyel Kültürlerin Hazırlanması

Çalışmada kullanılan LAB, *Bifidobacterium animalis ssp. lactis* B94 ve *Lactobacillus rhamnosus* GG olmak üzere iki ticari suş, Giresun Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü kültür koleksiyonundan elde edilmiştir. Bu bakteri kültürleri, %30 gliserol (v/v) içeren de Man, Rogosa Sharp (MRS) besiyeri içinde -80 °C'de saklanmıştır. Aktivasyon için 1,5 mL kültür, 150 mL MRS Broth besiyerine eklenerek 37 °C'de 12 saat inkübe edilmiştir. Elde edilen bu süspansiyon daha sonra 150 mL MRS Broth besiyeri için inokulum olarak kullanılmış ve 37 °C'de 12 saat inkübasyona bırakılmıştır. Daha sonra, bakteriler santrifüjlenerek (6000×g, 10 dakika, 4 °C) toplanmış ve eşit hacimde, sterilize su ile iki kez yıkanmıştır.

2.2. Probiyotik Yeşil Meyveli Soğuk İçeceklerin Üretimi

Probiyotik yeşil meyveli soğuk içeceklerin (YS) üretimde kullanılan ıspanak, maydanoz, kivi, yeşil elma Giresun ili (Türkiye) yerel pazarlarından, elma suyu ise sterilize edilmiş olarak temin DİMES A.Ş.'den temin edilmiştir. Alınan tüm meyve ve sebzeler musluk suyuyla yıkanarak ardından 0,1 ppm sıvı klor (EcoLab Cleaning Systems Co. Ltd., >30% dekolorant, Türkiye) ile dezenfekte edilmiştir. YS'lerin hazırlanması için elma suyu (500 mL), ıspanak (200 g), kivi (100 g), maydanoz (50 g) ve yeşil elma (200 g) bir blendere (Simbo, Türkiye) konulmuş ve karıştırılmıştır. Daha sonra, örnekler su banyosu kullanılarak 85 °C'de 10 dakika boyunca pastörize edilmiştir. Isıl işlemden sonra, hazırlanan içecekler hızla oda sıcaklığına soğutularak ve pastörize edilmiş örneklerin 1 L'sine 10 mL bireysel inokülumlar ($\approx 9,8 \times 10^9$ KOB/mL; LAB) eklenerek örnekler 37 °C'de 48 saat boyunca inkübe edilmiştir. Aynı koşullarda starter kültür ilavesi yapılmamış taze örnekler kontrol grubu olarak kullanılmıştır. İnkübasyondan sonra, tüm örnekler 7 gün boyunca buzdolabında saklanmıştır.

2.3. Fizikokimyasal Analizler

Örneklerin pH değerleri bir pH metre (FiveEasy Plus pH metre FP20, Mettler Toledo, ABD) kullanılarak ölçülmüştür. Titre edilebilir asitliği titrimetrik yöntemle belirlenmiş ve sonuçlar malik asit olarak $g.100 mL^{-1}$ olarak ifade edilmiştir. Toplam çözünür katı (TSS) değerleri °Brix cinsinden ve yoğunluk değerleri bir yoğunlukölçer (Anton Paar GmbH, DMA 4500 M, ABD) kullanılarak belirlenmiştir. Toplam kuru madde ve kül değerleri gravimetrik yöntemle belirlenmiştir. Örneklerin renk parametreleri L^* (parlaklık), a^* (kırmızı-yeşil) ve b^* (sarı-mavi) bir HunterLab MiniScan EZ (Hunter Associates Laboratory, Inc., ABD) cihazıyla beyaz standart bir yüzey üzerinde ölçülmüş, renk değişiklikleri (ΔE^*) aşağıdaki denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır (Cemeroğlu, 2013; Sengun ve ark., 2020).

$$\Delta E^* = [(L_o^* - L^*)^2 + (a_o^* - a^*)^2 + (b_o^* - b^*)^2]^{1/2} \quad (1)$$

2.4. DPPH Radikal Süpürme Analizi

Örneklerin DPPH radikal giderme aktivitesi, Kwaw ve ark. (2018) tarafından bildirilen yöntemin modifikasyonu ile belirlenmiştir. Kısaca, 2 mL seyreltilmiş YS örnekleri, 4 mL DPPH metanol çözeltisi (0.045 mg/mL) ile karıştırılmıştır. Karışım karanlık bir ortamda 30 dakika bekletilmiş ve absorpsiyon 517 nm'de UV-VIS spektrofotometre kullanılarak izlenmiştir. Sonuçlar, DPPH radikal inhibisyonu yüzde (%) olarak ifade edilmiştir (Sengun ve ark., 2020).

2.5. ABTS Antioksidan Kapasite Analizi

ABTS radikal giderme aktivitesi, Tao ve ark. (2016) tarafından bildirilen yöntemin modifikasyonu ile belirlenmiştir. Kısaca, 7 mmol/L ABTS çözeltisi, eşit hacimde 2.45 mmol/L $K_2S_2O_8$ çözeltisi ile karıştırılmış ve karanlık bir ortamda 16 saat bekletilerek ABTS radikal katyonu oluşturulmuştur. Daha sonra, karışım %80 etanol çözeltisiyle seyreltilmiş ve 734 nm'de absorpsiyonun 0.70 ± 0.02 olması sağlanmıştır. Örnek (0.3 mL) ve 5 mL ABTS çözeltisi karıştırılmış ve 6 dakika boyunca reaksiyona bırakılmıştır. Ardından, absorpsiyon 734 nm'de UV-VIS spektrofotometre kullanılarak okunmuştur. Sonuçlar, ABTS radikal inhibisyonunun yüzdesi olarak ifade edilmiştir (Tao ve ark., 2016).

2.6. Toplam Fenolik Madde İçeriği

Örneklerin toplam fenolik içeriği Folin-Ciocalteu yöntemi kullanılarak belirlenmiştir (Singleton ve Rossi, 1965). Kısaca, 1 mL karışımın büyük filtreden geçirilerek elde edilen süzüntüsü, 75 mL distile suya eklenmiştir. Ardından, 5 mL Folin-Ciocalteu çözeltisi (10% v/v, Sigma-Aldrich-BCBR8781V) karışıma eklenerek karıştırılmış ve oda sıcaklığında 3 dakika bekletilmiştir. Daha sonra, doymuş Na₂CO₃ çözeltisi 10 mL olarak karışıma eklenerek oda sıcaklığında karanlık bir ortamda 90 dakika bekletilmiştir. Absorbans değerleri 720 nm'de ölçülmüştür. Referans standart olarak gallik asit (Merck- M842649) kullanılmış ve sonuçlar gallik asit eşdeğerinde mg/L olarak ifade edilmiştir (Sengun ve ark., 2020).

2.7. Mikrobiyolojik Analizler

Her bir örnek için hazırlanan seri dilüsyonlardan, örneklerin *L. rhamnosus* GG sayılarının belirlenmesi için MRS (pH 6.2 ± 0.2, Merck) besiyeri kullanılarak ekim yapılmış, ekim sonrası petri kutuları 37 °C'de 3-5 gün inkübasyona bırakılmıştır. Örneklerin Toplam Mezofilik Aerobik (TMAB) sayıları Plate Count Agar (PCA, pH 7.0 ± 0.2, Merck) besiyerine ekim yapılarak 37 °C'de 24-48 saat inkübasyon ile belirlenmiştir. *Bifidobacterium animalis* ssp *lactis* sayıları için M17 Agar (M17, pH 7.0 ± 0.2, Merck) besiyeri kullanılmış, ekim sonrası petri kutuları 37 °C'de 24-48 saat inkübasyona bırakılmıştır. Örneklerin toplam maya-küf sayıları Potato Dekstroz Agar (PDA, pH 5.6 ± 0.2, Merck) besiyeri kullanılarak ekimi tamamlanan petri kutularının 25 °C'de 3-5 günlük inkübasyonu sonrası belirlenmiştir (BAM, 2001).

2.8. İstatiksel Analizler

Çalışma sonucunda elde edilen veriler üç bağımsız deneyin ortalaması ± standart sapma olarak sunulmuştur. İstatistiksel analiz SPSS 20.0 (SPSS Inc., ABD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Değerler arasında anlamlı farklılıkların belirlenmesi için Tukey testi uygulanmıştır (p≤0,05).

3. Bulgular ve Tartışma

YS'lerin depolama süresince depolamanın 1. ve 7. günlerinde ölçülen fizikokimyasal özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir. YS örneklerinin toplam kuru madde değerleri % 10,40±0,14-11,25±0,04 arasında değişim göstermiştir (Tablo 1). En yüksek kuru madde değerlerine Kontrol-YS örneklerinin depolamanın 7. gününde sahip olduğu, en düşük kuru madde değerlerine ise L.rhm-YS örneklerinin

depolamanın 1. gününde sahip olduğu tespit edilmiştir ($p \leq 0,05$). Benzer şekilde YS örneklerinin Briks değerleri $9,53 \pm 0,12 - 10,52 \pm 0,07$ arasında değişim göstermiş ve en yüksek briks değerlerine yine Kontrol-YS örnekleri sahip iken en düşük briks değerlerine ise L.rhm-YS örneklerinin sahip olduğu tespit edilmiştir ($p \leq 0,05$). Di Cagno ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışmada laktik asit fermantasyonları ile üretimleri yapılan kırmızı ve yeşil smoothie örneklerinin briks değerleri çalışmamıza benzer olarak $9,0 \pm 0,4 - 13,1 \pm 0,5$ arasında tespit edilmiştir. Kidon ve Uwineza (2022) tarafından yapılan farklı bir çalışmada ise kabak, muz ve mor havuçtan hazırlanan smoothie örneklerinin kuru madde değerlerinin $7,9 \pm 0,1 - 16,7 \pm 0,2$ arasında değiştiği tespit edilmiştir. Çalışmalardan elde edilen kuru madde ve briks değerlerindeki farklılıkların smoothielerin hazırlanmasında kullanılan meyve çeşitlerinin farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 1. Probiyotik yeşil meyveli soğuk içeceklerin fizikokimyasal özellikleri

Fizikokimyasal özellikler	Örnekler					
	Kontrol-YS		B.lac-YS		L. rhm-YS	
	Depolama süresi (gün)					
	1	7	1	7	1	7
Kuru madde (%)	11,07±0,20 ^{aAB}	11,25±0,04 ^{aAB}	11,01±0,16 ^{abAB}	10,69±0,02 ^{aA}	10,40±0,14 ^{aA}	10,95±0,02 ^{aA}
Briks (°Bx)	9,84±0,09 ^{aA}	10,52±0,07 ^{abA}	10,17±0,17 ^{aA}	10,25±0,08 ^{aA}	9,53±0,12 ^{aA}	10,30±0,08 ^{abA}
Kül (%)	0,29±0,04 ^{aA}	0,31±0,02 ^{aA}	0,29±0,02 ^{aA}	0,31±0,02 ^{aA}	0,37±0,00 ^{aAB}	0,36±0,02 ^{aA}
pH	4,79±0,04 ^{abAB}	4,78±0,04 ^{abAB}	4,51±0,04 ^{aA}	4,50±0,01 ^{aA}	4,53±0,04 ^{aA}	4,55±0,01 ^{aA}
Titrasyon asitliği (% MA)	0,038±0,08 ^{aA}	0,041±0,00 ^{aA}	0,046±0,00 ^{aAB}	0,049±0,00 ^{aA}	0,045±0,00 ^{aAB}	0,048±0,00 ^{aA}
Yoğunluk (g/cm ³)	1,0375±0,00 ^{aA}	1,0402±0,00 ^{aA}	1,0564±0,03 ^{aB}	1,0558±0,03 ^{aB}	1,0362±0,02 ^{aA}	1,0390±0,00 ^{aA}

*Ortalama±std. sp.; a-b: Depolama günlerine göre aynı harflerle gösterilen değerler istatistiksel olarak önemli değildir ($p \leq 0,05$); A-B: YS örneklerine göre aynı harflerle gösterilen değerler istatistiksel olarak önemli değildir ($p \leq 0,05$); Kontrol-YS: Probiyotik ilavesi yapılmayan yeşil meyveli soğuk içecek örnekleri; B.lac-YS: *B. lactis* ilave edilmiş probiyotik yeşil meyveli soğuk içecek örnekleri; L.rhm-YS: *L. rhammosus* ilave edilmiş probiyotik yeşil meyveli soğuk içecek örnekleri.

Tablo 1’de de görüldüğü üzere, YS örneklerinin kül değerleri $0,29 \pm 0,02 - 0,37 \pm 0,00$ olarak tespit edilmiş olup, değerler arasındaki fark istatistiksel olarak önemli değildir ($p \leq 0,05$). Tkacz ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada, deniz iğdesi (yalancı iğde) bitkisi bazlı elde edilen smoothie örneklerinin (farklı formülasyonlarla hazırlanan deniz iğdesi bazlı kayısı, şeftali, portakal, üzüm, havuç ve marul ilavesi ile) kül değerleri çalışmamıza benzer olarak $0,26 \pm 0,02 - 1,08 \pm 0,02$ arasında değiştiği tespit edilmiştir. Çalışmada üretilen YS örneklerinin pH değerlerinin ise $4,50 \pm 0,01 - 4,79 \pm 0,04$ arasında değiştiği belirlenmiştir. Fermente YS örneklerinin pH değerleri kontrol grup örneklerine kıyasla kısmen daha düşük olarak tespit edilmiştir ($p \leq 0,05$). Benzer olarak, Kuria ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada, farklı LAB ile fermente edilen mango kabuk pulplarının pH değerleri $3,80 \pm 0,02 - 4,06 \pm 0,02$ arasında bulunmuştur. Aderinola (2018) yapmış olduğu çalışmada ise, ananas, muz ve elma ve *Moringa oleifera* yaprakları ile hazırlanan smoothie örneklerinin pH değerleri $6,30 - 6,51$ arasında tespit etmiştir. Çalışmalar sonucunda elde edilen pH değerlerindeki

farklılığın smoothie hazırlamada kullanılan hammadde ve üretim yöntemlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çalışmamızda YS örneklerinin %TA değerlerinin $0,038\pm 0,08$ - $0,049\pm 0,00$ arasında değiştiği görülmektedir. Örneklerin %TA değerlerinin fermentasyonun etkisi ile yükseldiği görülmektedir ($p\leq 0,05$). YS örneklerinin yoğunluk değerleri ise $1,0362\pm 0,02$ - $1,0564\pm 0,03$ g/cm³ olarak tespit edilmiştir ve *B. lactis* ile fermente edilen YS örneklerinin yoğunluk değerlerinin diğer örneklerle kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir ($p\leq 0,05$).

Tablo 2. Probiyotik yeşil meyveli soğuk içeceklerin renk değerleri

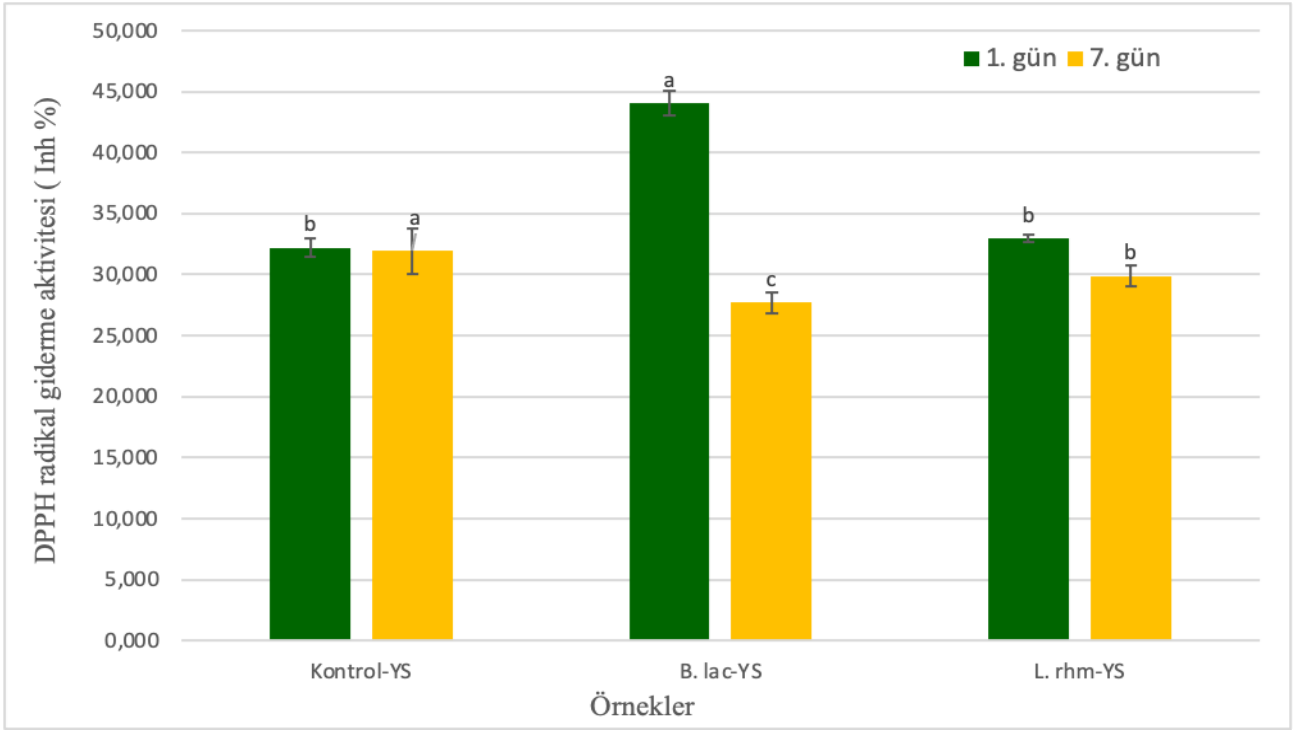
Örnekler	Renk özellikleri	Depolama süresi (gün)	
		1	7
Kontrol-YS	<i>L</i>	$2,70\pm 1,2^b$	$0,19\pm 0,07^a$
	<i>a</i>	$3,03\pm 0,66^b$	$0,45\pm 0,17^a$
	<i>b</i>	$4,64\pm 1,75^b$	$0,32\pm 0,12^a$
	ΔE	$93,94\pm 0,88^a$	$96,13\pm 0,05^b$
B. lac-YS	<i>L</i>	$6,99\pm 0,46^b$	$0,70\pm 0,22^a$
	<i>a</i>	$4,67\pm 0,56^b$	$1,53\pm 0,35^a$
	<i>b</i>	$1,98\pm 0,77^a$	$1,21\pm 0,37^a$
	ΔE	$90,37\pm 0,45^a$	$95,71\pm 0,18^b$
L. rhm-YS	<i>L</i>	$3,82\pm 1,02^b$	$0,55\pm 0,27^a$
	<i>a</i>	$3,66\pm 0,10^b$	$1,15\pm 0,50^a$
	<i>b</i>	$6,57\pm 1,74^b$	$0,94\pm 0,47^a$
	ΔE	$92,97\pm 0,92^a$	$95,83\pm 0,22^b$

*Ortalama±std. sp.; a-b: Depolama günlerine göre aynı harflerle gösterilen değerler istatistiksel olarak önemli değildir ($p\leq 0,05$); Kontrol-YS: Probiyotik ilavesi yapılmayan yeşil meyveli soğuk içecek örnekleri; B.lac-YS: *B. lactis* ilave edilmiş probiyotik yeşil meyveli soğuk içecek örnekleri; L.rhm-YS: *L. rhamnosus* ilave edilmiş probiyotik yeşil meyveli soğuk içecek örnekleri

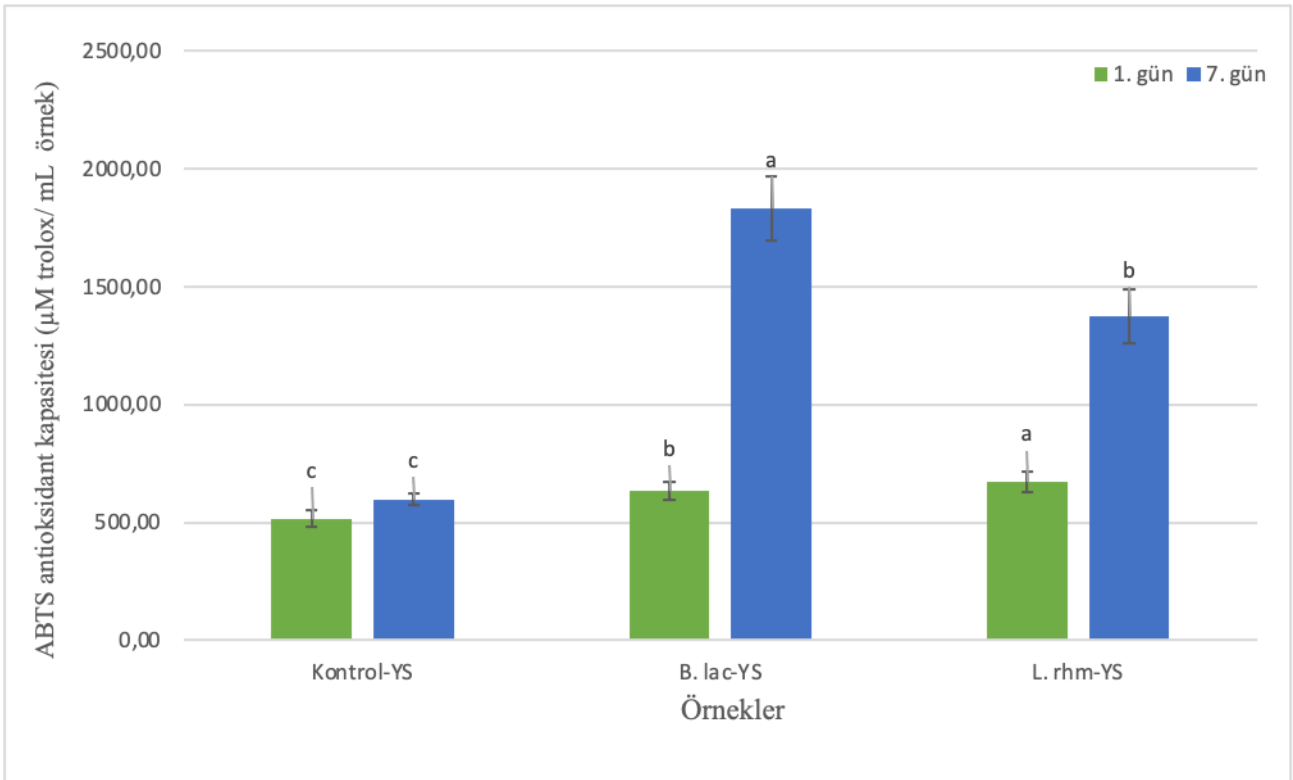
Renk, taze ve işlenmiş gıda ürünlerinin önemli bir niteliksel özelliğidir ve tüketicilerin tercihlerini, algılarını ve satın alma davranışlarını etkilemektedir (Kidon ve Uwineza, 2022). Tablo 2’de üretimi yapılan YS örneklerinin depolamanın 1. ve 7. günlerinde ölçülen renk değerleri gösterilmiştir. *L* (parlaklık) değerlerinin $0,19\pm 0,07$ - $6,99\pm 0,46$ arasında değiştiği görülmektedir (Tablo 2). En yüksek parlaklık değeri depolamanın 1. gününde B.lac-YS örneklerinde iken, en düşük parlaklık değeri ise depolamanın 7. gününde kontrol grup örneklerindedir. Pozitif *a** değerleri, rengin kırmızı olduğunu göstermektedir ve çalışmamızda bu değerler $0,45\pm 0,17$ ile $4,67\pm 0,56$ arasında değişmektedir. Üretilen YS örneklerinde kırmızılık değerlerinin düşük olması, üretimde kullanılan meyve ve sebzelerin yeşil renkli olmaları ile ilişkilendirilmiştir. YS’lerin *b** (sarılık) değerleri $0,32\pm 0,12$ - $6,57\pm 1,74$ arasında değişmektedir. *a* değerlerine kıyasla *b* değerlerinin daha yüksek olması, üretimde kullanılan hammaddelerden biri olan elma suyundan kaynaklandığı düşünülmektedir. YS örneklerinin ΔE değerleri $90,37\pm 0,45$ - $96,13\pm 0,05$ arasında değişmektedir. Elde edilen renk değerleri genel olarak değerlendirildiğinde depolamanın 1. gününe kıyasla depolamanın son günü olan 7. günde istatistiksel olarak anlamlı bir azalma vardır ($p\leq 0,05$). Artan renk bozulmasının

genellikle termal işleme ile ilişkili olduğu kabul edilmektedir. Pastörizasyon, sterilizasyon veya konsantrasyon işlemleri sırasındaki ısı işlem, bozunma ürünlerinin oluşumunu ve dolayısıyla eş zamanlı renk kaybını arttırmaktadır (Sadilova ve ark., 2009). YS örneklerinin LAB ile inokulasyonu öncesi yapılan pastörizasyon işlemi renk değişim sürecini hızlandırmıştır.

Çalışmalar, diyabet, hipertansiyon ve kanser de dahil olmak üzere birçok hastalığa neden olan serbest radikallerin etkilerini önlemede veya hafifletmede antioksidanların rollerini bildirmişlerdir (Varela-Santos ve ark., 2012; Aderinola ve ark., 2018). Fenolik bileşikler, antioksidan ve anti-enflamatuar özellikler de dahil olmak üzere sağlığı teşvik edici özelliklere sahip gıdaların biyoaktif bileşenleridir (Sun-Waterhouse ve ark., 2010). Çalışmada üretilen YS örneklerinin depolamanın 1. ve 7. gününde ölçümü yapılan DPPH radikal giderme değerleri Şekil 1’de, ABTS radikal giderme aktiviteleri ise Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekil 1’de de görüldüğü üzere YS örneklerinin DPPH radikal giderme değerleri %27,71-44,04 arasında değişim göstermektedir. B.lac-YS örnekleri depolamanın 1. gününde en yüksek radikal giderme değerine sahip iken, bu oran depolamanın 7. gününde düşüş göstermiştir ($p \leq 0,05$). Hem B.lac-YS örneklerinin hem de L.rhm-YS örneklerinin radikal giderme değerlerinin kontrol grup örneklere kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir ($p \leq 0,05$). Örneklerin ABTS antioksidant kapasitesi incelendiğinde (Şekil 2) ise değerlerin 516,35-1831 μM troloks/mL arasında değiştiği tespit edilmiştir ($p \leq 0,05$). DPPH radikal giderme değerlerine benzer şekilde hem B.lac-YS örneklerinin hem de L.rhm-YS örneklerinin ABTS antioksidant kapasitesi değerlerinin kontrol grup örneklere kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu farklılık özellikle depolamanın 7. gününde oldukça belirgin ve istatistiksel olarak da önemlidir ($p \leq 0,05$). Çalışmamıza benzer olarak Wang ve ark (2021) tarafından yapılan çalışmada, kivi suyu örneklerinin LAB fermentasyonu sırasında DPPH ve ABTS radikal temizleme aktiviteleri belirgin şekilde artış göstermiştir.



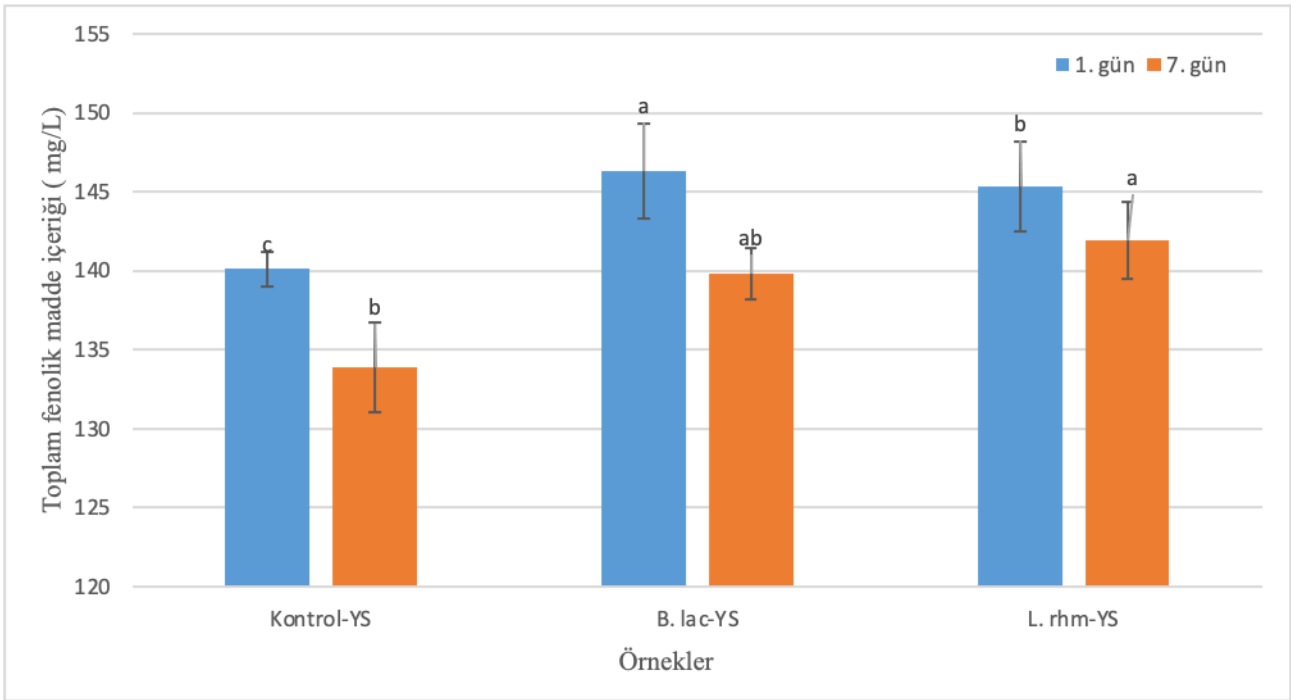
Şekil 1. Yeşil meyveli soğuk içecek örneklerinin DPPH radikal giderme aktiviteleri (%)



Şekil 2. Yeşil meyveli soğuk içecek örneklerinin ABTS antioksidant kapasiteleri (µM troluks/ mL örnek)

Fenolik ve flavonoid bileşikleri de dahil olmak üzere polifenolik bileşikler, anti-enflamatuar, antidiyabetik ve antihipertansif gibi sağlık destekleyici özelliklere sahip biyoaktif bileşenlerin bir parçasıdır. Bu özellikler, birçok araştırma çalışmasının odağı olmuştur (Aderinola, 2018). YS

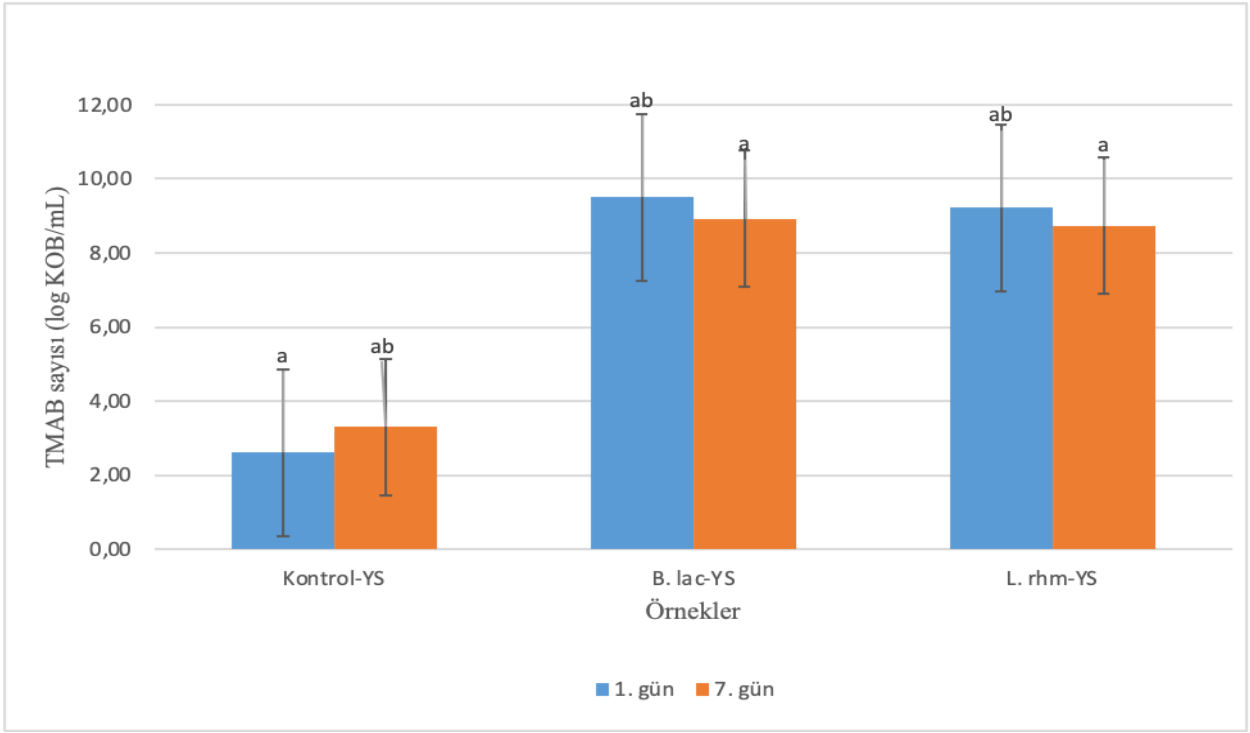
örneklerinin depolamanın 1. ve 7. günlerinde tespit edilen toplam fenolik madde (TFM) içeriği Şekil 3’de gösterilmiştir. Şekil 3’de de görüldüğü üzere örneklerin TFM içeriği 133,87-146,29 mg/L arasında değişiklik göstermektedir. Örneklerin TFM miktarı incelendiğinde, kontrol grup örneklere kıyasla fermente edilen probiyotik YS örneklerinin TFM miktarlarının daha yüksek olduğu görülmektedir ($p \leq 0,05$). Bu farklılık, LAB suşlarının hidrolitik enzimler tarafından kompleks fenolik bileşiklerin daha basit formlara hidroliz edilmesine bağlanabilir (Kwaw ve ark., 2018; Li ve ark.,2021). Kuria ve ark. (2021) tarafından yapılan benzer bir çalışmada örneklerin TFM değerleri 2,66-3,58 mg TAE/100 g olarak bulunmuştur. Çalışmada YS üretiminde kullanılan tüm hammaddelerin fenolik maddelerin bir kaynağı olmasına rağmen, örneklerin TFM miktarları literatüre göre farklı düzeylerde tespit edilmişlerdir. Toplam fenolik içeriğindeki tespit edilen farklılıklar, YS formülasyonunda kullanılan farklı bileşenlere bağlanabilir.



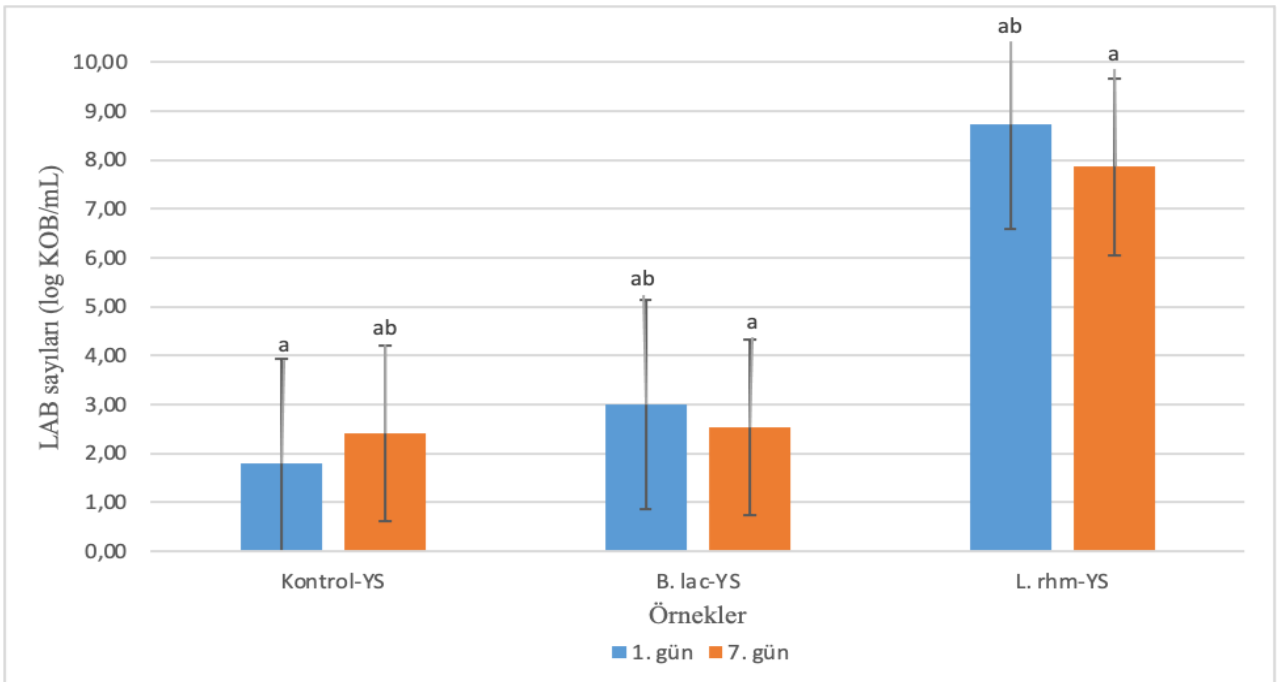
Şekil 3. Yeşil meyveli soğuk içecek örneklerinin toplam fenolik madde içeriği (mg/L)

Üretimi yapılan YS örneklerinin 7 günlük depolama sürecinde, 1 ve 7. günlerde tespit edilen mikrobiyolojik özellikleri Şekil 4a- 4d’de gösterilmiştir. Şekil 4a,b ve c’de görüldüğü üzere kontrol grup YS örnekleri ile fermente edilen YS örnekleri arasındaki temel farklılık toplam mezofilik aerobik bakteri sayıları (TMAB) ile toplam LAB ve *Lactococcus spp.* sayımlarındadır ($p \leq 0,05$). Şekil 4a incelendiğinde, kontrol grubuna kıyasla fermentasyonun ilk günü ile 7. günü arasında B.lac-YS örnekleri için 5,92-6,89 log KOB/mL, L.rhm-YS örnekleri için ise 5,44-6,61 log KOB/mL’lik fark bulunmaktadır ($p \leq 0,05$). Şekil 4b’deki toplam LAB sayısı incelendiğinde ise, B.lac-YS örneklerinde kontrol grubu örneklere göre depolama sürecinde 0,14-1,22 log KOB/mL’lik bir artış görüldüğü tespit

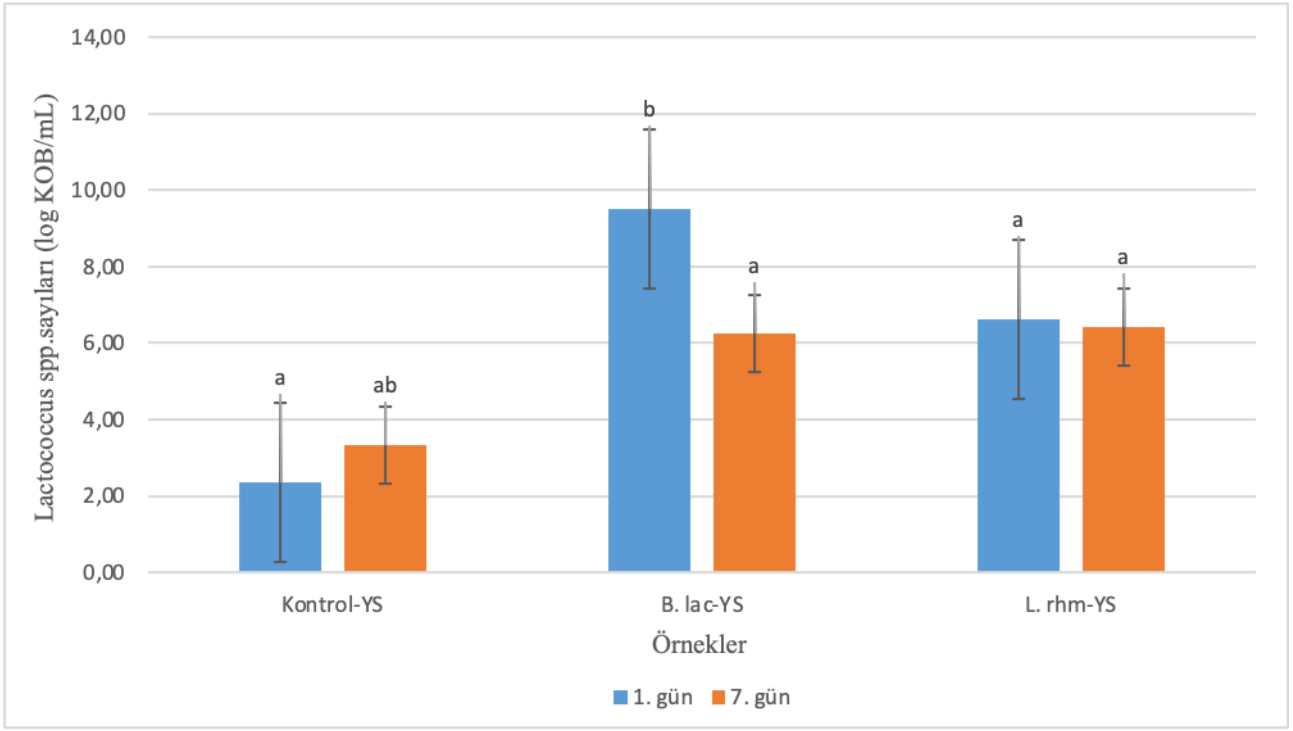
edilmiştir. Bu değerlerin L.rhm-YS örneklerinin kontrol YS örneklerine kıyasla toplam LAB sayısı artışı ile karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Lrhm-YS örneklerindeki toplam LAB sayısı artışı 5,46-6,94 log KOB/mL olarak gerçekleşmiştir. L.rhm-YS örneklerinin toplam LAB sayısı 7,86 – 8,74 log KOB/mL arasında değişim göstermiştir. Benzer şekilde, *L. rhamnosus GG*'nin portakal suyundaki hayatta kalması 4 °C'de 12 hafta boyunca incelenmiş ve depolamanın sonunda GG sayısının 7.90 log KOB/mL olduğu belirlenmiştir (Sheehan ve ark., 2007). Başka bir çalışmada, portakal suyuna inoküle edilen *L. rhamnosus* HN001™ sayısının, soğuk depolama sonrasında 28. günde 7.14 ± 0.07 log KOB/mL olduğu rapor edilmiştir (Sady ve ark., 2017). Şekil 4c'de gösterilen toplam *Lactococcus spp.* sayıları incelendiğinde fermnastasyonun ilk günü B.lac-YS örneklerinde meydana gelen 7,15 log KOB/mL'lik bir artış göze çarpmaktadır ($p \leq 0,05$). L.rhm-YS grup örneklerde toplam *Lactococcus spp.* sayısında meydana gelen artış depolamanın 1 ve 7. gününde 3,09-4,27 log KOB/mL arasında değişmektedir. Çalışmamız sonuçları YS örneklerinin hazırlanmasında kullanılan hammaddelerin *L. rhamnosus* ile *B.lactis* probiyotik suşlarının büyümesini destekleyen prebiyotik etkisini gösterdiğini ($p \leq 0,05$) ve kullanılan probiyotik mikroorganizmaları metabolize edebildiklerini göstermiştir. YS örneklerinin depolama süreci boyunca toplam maya-küf sayısında meydana gelen değişim ise Şekil 4d'de gösterilmiştir. Gallina ve ark. (2019) toplam maya-küf sayımı ile toplam koliform grubu mikroorganizma sayılarının ürünün hijyenik kaliteleri açısından önemli bir gösterge olduğunu belirtmişlerdir. Analize alınan YS örneklerinin hiç birinde koliform grup mikroorganizma tespit edilmemiştir. Toplam maya-küf sayısının ise 1,32-1,80 lob KOB/mL arasında değişim gösterdiği belirlenmiştir. Fermente YS örneklerinde depolama sürecinde toplam maya-küf sayısında kontrol grup YS örneklerine kıyasla 0,03-0,28 log KOB/mL arasında bir azalma olduğu görülmektedir. Elde edilen mikrobiyolojik sonuçlar, örneklerin yüksek hijyenik ve sanitasyon kalitesini ve iyi gıda işleme uygulamaları ile üretildiklerini göstermektedir.



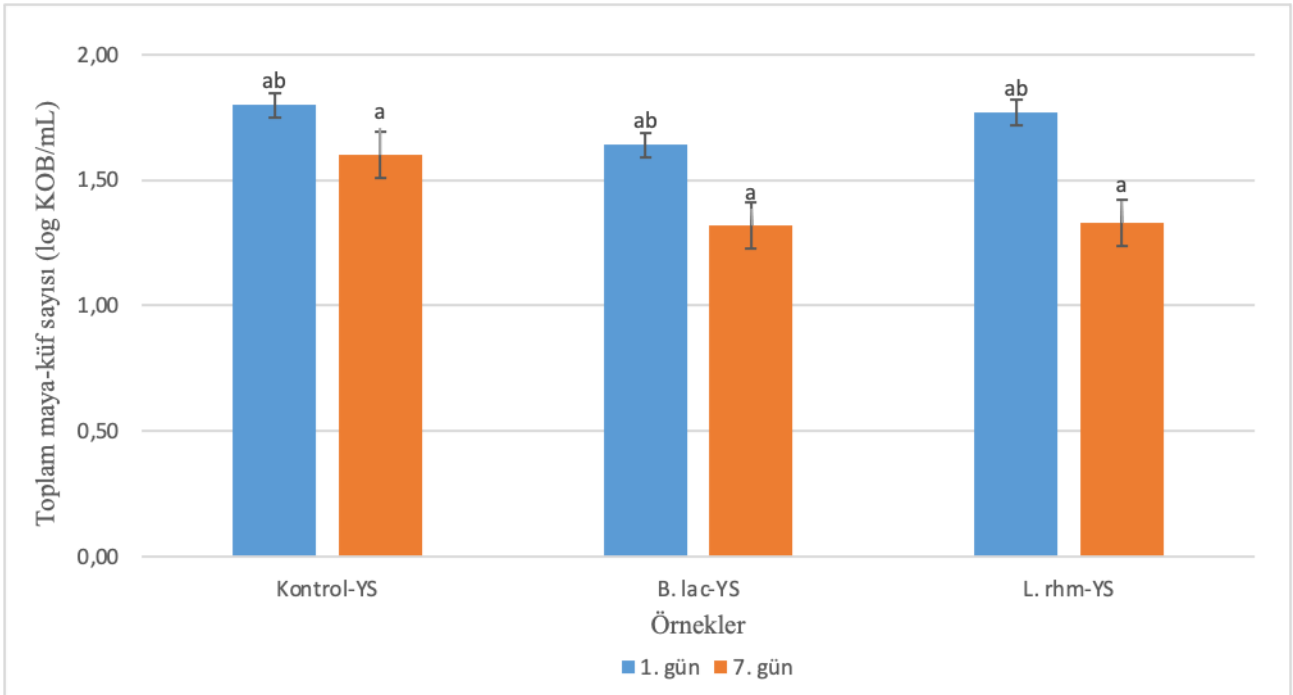
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4. Yeşil meyveli soğuk içecek örneklerinin mikrobiyolojik özellikleri (log KOB/mL)

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, *Bifidobacterium animalis ssp lactis* B94 ve *Lactobacillus rhamnosus* GG probiyotik kültürleri kullanılarak başarılı bir şekilde yeşil meyveli soğuk içecek içecekleri

üretmiştir. Kullanılan probiyotik mikroorganizmaların canlılığının, 4 °C'de 7 gün boyunca 6 log KOB/mL'nin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle elde edilen sonuçlar, YS içeceklerinin *L. rhamnosus* ve *B. lactis*'in büyümesi için uygun şartlara sahip olduğunu ve bu ürünlerin probiyotik ürünler olarak düşünülebileceğini göstermektedir. Özellikle, soğuk depolama süresince yeşil YS örneklerindeki *L. rhamnosus*'un canlılığını önemli ölçüde artırmıştır. Bununla birlikte, probiyotiklerin kullanımı ile YS örneklerinin toplam fenolik içeriğini artırmış ve depolama süresince antioksidan aktivite azalmasının hızını yavaşlatmıştır. Bu çalışmanın sonuçları probiyotik katkısının örneklerin antioksidan aktivitelerini artırdığını göstermektedir. Gelecekte, farklı hammadde kullanımları ile farklı prebiyotik kaynakları değerlendirileceği gibi probiyotik YS içecekleri geliştirmek için farklı probiyotik kültürler de test edilebilecektir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Aderinola, T. A. (2018). Nutritional, antioxidant and quality acceptability of smoothies supplemented with *Moringa oleifera* leaves. *Beverages*, 4(4), 104.
- Bacteriological Analytical Manual (BAM). (2001). Aerobic Plate Count. <http://www.cfsan.fda.gov/~ebam/bam-18.html>
- Cemeroğlu, B. (2013). Gıda Analizleri. Ankara: Bizim Grup Basımevi.
- Dauchet, L., Kesse-Guyot, E., Czernichow, S., Bertrais, S., Estaquio, C., Peneau, S., Vergnaud, A.C., Chat-Yun, S., Castetbon, K., Deschamps, V., Brindel, P., and Hercberg, S. (2007). Dietary patterns and blood pressure change over 5-y follow-up in the SU.VI.MAX cohort. *American Journal of Clinical Nutrition*, 85, 1650-1656.
- Di Cagno, R., Minervini, G., Rizzello, C.G., De Angelis, M., and Gobbetti, M. (2011). Effect of lactic acid fermentation on antioxidant, texture, color and sensory properties of red and green smoothies. *Food Microbiology*, 28(5), 1062-1071.
- Di Cagno, R., Cardinali, G., Minervini, G., Antonielli, L., Rizzello, C.G., Ricciuti, P., and Gobbetti, M. (2010a). Taxonomic structure of the yeasts and lactic acid bacteria microbiota of pineapple (*Ananas comosus* L. Merr.) and use of autochthonous starters for minimally processing. *Food Microbiology*, 27, 381-389.

- Di Cagno, R., Minervini, G., Rizzello, C.G., Lovino, R., Servili, M., Taticchi, A., Urbani S., and Gobbetti, M. (2010b). Exploitation of sweet cherry (*Prunus avium* L.) puree added of stem infusion through fermentation by selected autochthonous lactic acid bacteria. *Food Microbiology*, 28, 900-909.
- Di Cagno, R., Surico, R.F., Paradiso, A., De Angelis, M., Salmon, J.C., Buchin, S., De Gara, L., and Gobbetti, M. (2009a). Effect of autochthonous lactic acid bacteria starters on health-promoting and sensory properties of tomato juices. *International Journal of Food Microbiology*, 128, 473-483.
- Di Cagno, R., Surico, R.F., Minervini, G., De Angelis, M., Rizzello, C.G., and Gobbetti, M. (2009b). Use of autochthonous starter to ferment red and yellow peppers (*Capsicum Annum* L.) to be stored at room temperature. *International Journal of Food Microbiology*, 130, 108-116.
- Di Cagno, R., Surico, R.F., Siragusa, S., De Angelis, M., Paradiso, A., Minervini, F., De Gara, L., and Gobbetti, M. (2008). Selection and use of autochthonous mixed starter for lactic acid fermentation of carrots, French beans or marrows. *International Journal of Food Microbiology*, 127, 220-228.
- Farzaei, M. H., Abbasabadi, Z., Ardekani, M. R. S., Rahimi, R., & Farzaei, F. (2013). Parsley: a review of ethnopharmacology, phytochemistry and biological activities. *Journal of traditional Chinese medicine*, 33(6), 815-826.
- Gallina, D.A., Pacheco, M.T.B., Barbosa, P.D.P.M., Amorim, M.M.F., and Cobas, A.C. (2019). Effect of modified chitoooligosaccharides on the physicochemical and microbiological characteristics of a probiotic fermented beverage. *Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes*, 74(4), 240-251.
- Gebbers, J.O. (2007). Atherosclerosis, cholesterol, nutrition, and statins e a critical review. *German Medical Science*, 5, 1-11.
- He, F.J., Nowson, C.A., Lucas, M., and MacGregor, G.A. (2007). Increased consumption of fruit and vegetables is related to a reduced risk of coronary heart disease: metaanalysis of cohort studies. *Journal of Human Hypertension*, 21, 717-728.
- Kidoń, M., and Uwineza, P.A. (2022). New Smoothie Products Based on Pumpkin, Banana, and Purple Carrot as a Source of Bioactive Compounds. *Molecules*, 27(10), 3049.
- Kuria, M.W., Matofari, J.W., and Nduko, J.M. (2021). Physicochemical, antioxidant, and sensory properties of functional mango (*Mangifera indica* L.) leather fermented by lactic acid bacteria. *Journal of Agriculture and Food Research*, 6, 100206.
- Kwaw, E., Ma, Y., Tchabo, W., Apaliya, M.T., Wu, M., Sackey, A.S., and Tahir, H.E. (2008). Effect of lactobacillus strains on phenolic profile, color attributes and antioxidant activities of lactic-acid-fermented mulberry juice. *Food Chemistry*, 250, 148-154.
- Li, T., Jiang, T., Liu, N., Wu, C., Xu, H., and Lei, H. (2021). Biotransformation of phenolic profiles and improvement of antioxidant capacities in jujube juice by select lactic acid bacteria. *Food Chemistry*, 339, 127859.
- Li, K., Liu, L., McClements, D. J., Liu, Z., Liu, X., & Liu, F. (2024). A review of the bioactive compounds of kiwifruit: Bioactivity, extraction, processing and challenges. *Food Reviews International*, 40(3), 996-1027.
- Lomnitski, L., Bergman, M., Nyska, A., Ben-Shaul, V., & Grossman, S. (2003). Composition, efficacy, and safety of spinach extracts. *Nutrition and cancer*, 46(2), 222-231.
- Max-Rubner-Institut. (2008). Bundesforschungsinstitut für Ernährung und Lebensmittel. *Haid-und-Neu-Str.* 9, 76131 Nationale Verzehrsstudie (NVS) Karlsruhe, Germany.
- Mirmiran, P., Bahadoran, Z., & Azizi, F. (2014). Functional foods-based diet as a novel dietary approach for management of type 2 diabetes and its complications: A review. *World journal of diabetes*, 5(3), 267.
- Muller, L., Gnoyke, S., Popken, A.M., and Böhm, V. (2010). Antioxidant capacity and related parameters of different fruit formulations. *LWT-Food Science and Technology*, 43, 992-999.
- Qian, N. (2006). Fruit and vegetable smoothies, and its processing method. *Faming Zhuanli Shenqing Gongkai Shuomingshu CN*, 1817192.
- Rechkemmer, G. (2002). Fünf am Tag e Obst und Gemüse. *Onkologe*, 8, 241-248.
- Rodríguez, E., Martín, J.D., and Romero, C.D. (2010). Aloe vera as a Functional ingredient in Foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50, 305-328.
- Sadilova, E., Stintzing, F.C., Kammerer, D.R., and Carle, R. (2009). Matrix dependent impact of sugar and ascorbic acid addition on color and anthocyanin stability of black carrot, elderberry and strawberry single strength and from concentrate juices upon thermal treatment. *Food Research International*, 42(8), 1023-1033.
- Sady, M., Najgebauer-Lejko, D., and Domagała, J. (2017). The suitability of different probiotic strains for the production of fruit- whey beverages. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 16(4), 421-429.

- Sawicka, M., Latocha, P., & Łata, B. (2023). Peel to flesh bioactive compounds ratio affect apple antioxidant potential and cultivar functional properties. *Agriculture*, 13(2), 478.
- Sheehan, V.M., Ross, P., and Fitzgerald, G.F. (2007). Assessing the acid tolerance and the technological robustness of probiotic cultures for fortification in fruit juices. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 8(2), 279-284.
- Silva, K. M. D., Zielinski, A. A. F., Benvenuti, L., Bortolini, D. G., Zardo, D. M., Beltrame, F. L., ... & Alberti, A. (2018). Effect of fruit ripening on bioactive compounds and antioxidant capacity of apple beverages. *Food Science and Technology*, 39, 294-300.
- Sengun, I. Y., Kirmizigul, A., Atlama, K., & Yilmaz, B. (2020). The viability of *Lactobacillus rhamnosus* in orange juice fortified with nettle (*Urtica dioica* L.) and bioactive properties of the juice during storage. *LWT*, 118, 108707.
- Singleton, V.L., and Rossi, J.A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144-158.
- Sun-Waterhouse, D., Nair, S., Wibisono, R., Wadhwa, S.S., Massarotto, C., Hedderley, D.I., Zhou, J., Jaeger, S.R., and Corrigan, V. (2010). Insights into Smoothies with High Levels of Fibre and Polyphenols: Factors Influencing Chemical, Rheological and Sensory Properties. *International Journal Nutrition Food Engineering*, 4, 378-387.
- Tao, Y., Sun, D.W., Górecki, A., Błaszczak, W., Lamparski, G., Amarowicz, R., and Jeliński, T.A. (2016). Preliminary study about the influence of high hydrostatic pressure processing in parallel with oak chip maceration on the physicochemical and sensory properties of a young red wine. *Food Chemistry*, 194, 545-554.
- Titus, D. (2008). *Smoothies! The Original Smoothies Book*. Juice Gallery, Chino Hills, CA, USA 162.
- Tkacz, K., Wojdyło, A., Turkiewicz, I.P., and Nowicka, P. (2021). Anti-diabetic, anti-cholinesterase, and antioxidant potential, chemical composition and sensory evaluation of novel sea buckthorn-based smoothies. *Food Chemistry*, 338, 128105.
- Turhan, E.Ü., Erginkaya, Z., Sarıkodal, E., Özkütük, S. T., Konuray, G. (2019). Probiyotik bitter çikolata üretiminde mikroenkapsüle *Lactobacillus rhamnosus* kullanımı. *Gıda*, 44(2), 238-247.
- Varela, P., and Fiszman, S.M. (2011). Hydrocolloids in fried foods. A review. *Food Hydrocolloid*, 25, 1801-1812.
- Varela-Santos, E., Ochoa-Martinez, A., Tabilo-Munizaga, G., Reyes, J.E., Pérez-Won, M., Briones-Labarca, V., and Morales-Castro, J. (2012). Effect of high hydrostatic pressure (HHP) processing on physicochemical properties, bioactive compounds and shelf-life of pomegranate juice. *Innovation Food Science Emerging Technology*, 13, 13-22.
- Walkling-Ribeiro, M., Noci, F., Cronin, D.A., Lyng, J.G., and Morgan, D.J. (2010). Shelf life and sensory attributes of a fruit smoothie-type beverage processed with moderate heat and pulsed electric fields. *LWT-Food Science and Technology*, 43(7), 1067-1073.
- Wang, S., Qiu, Y., and Zhu, F. (2021). Kiwifruit (*Actinidia* spp.): A review of chemical diversity and biological activities. *Food Chemistry*, 350, 128469.
- Watzl, B. (2008). Smoothies e wellness aus der Flasche? *Ernährungsumschau*, 6, 352-353.

A Mathematical Review Study on Dynamical Models of Symmetrical Three-Phase Induction Machine in Various Reference Frames

Mehmet Ali USTA^{1*} 

Abstract

This paper presents dynamic models of a three-phase induction machine in various reference frames widely employed in alternating-current (ac) machine analysis. The main objective is to derive and explain the machine model in relatively basic terms by using the idea of rotating reference frame theory. Many matrix manipulations and complex frame-to-frame transformations performed to obtain an advanced model from primitive dynamical equations are presented in a more compact and easy-to-understand way. Therefore, this paper reviews a detailed, yet simple and understandable mathematical background on the dynamic models of the induction machine. Furthermore, a unified and broadly applicable simulation model is proposed for simulating the dynamic behavior of the machine in any desired reference frame. The simulation model has also a modular and user-friendly structure. For the simulation studies, Matlab/Simulink environment is preferred due to its popularity. A Simulink machine model with several subsystems is explicitly given. The simulation study is realized for a small power induction machine operating under both load and no-load conditions. The variations of three-phase currents, electromagnetic torque, and rotor mechanical speed as well as the rotor flux-linkage components are shown. The key features of each reference frame are discussed, especially through the measured rotor flux-linkage components.

Keywords: Induction machine, Reference frame theory, Dynamic model, Simulation model.

Simetrik Üç Fazlı Asenkron Makinanın Çeşitli Referans Çerçevesinde Dinamik Modelleri Üzerine Matematiksel Bir İnceleme Çalışması

Öz

Bu makale, alternatif akım (aa) makine analizinde yaygın olarak kullanılan çeşitli referans çerçevelerinde üç fazlı asenkron makinanın dinamik modellerini sunmaktadır. Temel amaç, dönen referans çerçeve teorisi fikrini kullanarak makina modelini nispeten basit terimlerle üretmek ve açıklamaktır. İlkel dinamik denklemlerden gelişmiş bir model elde etmek için gerçekleştirilen birçok matris manipülasyonu ve karmaşık çerçeveden çerçeveye dönüşümler, daha kompakt ve anlaşılması kolay bir şekilde sunulmaktadır. Bu nedenle, bu makale asenkron makinanın dinamik modellerine ilişkin ayrıntılı, ancak basit ve anlaşılır bir matematiksel arka planı gözden geçirmektedir. Bundan başka, makinanın dinamik davranışını istenen herhangi bir referans çerçevesinde simüle etmek için birleşik ve geniş çapta uygulanabilir bir simülasyon modeli önerilmektedir. Simülasyon modeli aynı zamanda modüler ve kullanıcı dostu bir yapıya sahiptir. Simülasyon çalışmalarında popülerliği nedeniyle Matlab/Simulink ortamı tercih edilmektedir. Birkaç alt sisteme sahip bir Simulink makina modeli açıkça verilmiştir. Simülasyon çalışması hem yük hem de yüksüz koşullar altında çalışan küçük güçlü bir asenkron makina için gerçekleştirilmiştir. Üç fazlı akımların, elektromanyetik torkun ve rotor mekanik hızının yanı sıra rotor akı bileşenlerinin değişimleri gösterilmektedir. Her bir referans çerçevesinin temel özellikleri, özellikle ölçülen rotor akı bileşenleri aracılığıyla tartışılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Asenkron makina, Referans çerçeve teorisi, Dinamik model, Benzetim modeli.

¹Giresun University, Department of Computer Engineering, Giresun, Turkey, mehmet.usta@giresun.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 22.04.2024

Kabul/Accepted: 08.08.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Introduction

The induction machine is used extensively in a great number of industrial applications, especially in variable-speed drives. They are considered to be the workhorses of the electric power industry (Vas, 1998; Krause et al., 2002). This is because it has many needful features in comparison with a direct-current (dc) machine, e.g., simple and rugged structure, low-cost, low-maintenance requirement, high efficiency, reliability, and so on. However, unlike a dc machine, the control of an induction machine is quite sophisticated, and they require various complex types of hardware and software equipment to solve its control problem. So far, there have been many advances in power converters, microprocessor technologies, and control techniques to fulfill these control requirements. Therefore, induction motor drives have now gained a considerable place in the world market and replaced variable-speed dc drives.

The dynamic model of the induction machine is used to simulate the transient and steady-state behaviors of the machine not only under balanced conditions but also under various unbalanced conditions. The dynamic model is also necessary to develop and analyze the control structures. The dynamic behavior of any rotary machine is defined by a system of differential equations. In ac machines, these equations contain time-varying coefficients and are inherently nonlinear. The reason is that the mutual inductances change in the form of a function of rotor speed as the rotor phase windings rotate relative to the stator. Reference frame theory is used to eliminate all these time-dependent inductances and hence transform them into a linear system. The main idea of the theory is based on the redefinition of machine variables (rotor and stator side voltages, currents, flux-linkages) with their corresponding equivalents in the desired reference frames. Herein, a “reference frame” is referred to as a set of direct and quadrature axes (dq axes) that rotate at a particular angular speed (or do not rotate when angular speed is zero). The development of the reference frame theory can be given as follows:

- The stator variables were transferred into a reference frame rotating with the rotor (Park, 1929). In other words, all three-phase abc (rotor and stator) quantities were referred to a dq^r reference frame fixed to the rotor. The Park’s transformation was first applied to a synchronous machine. Then, Brereton et al. (1957) was used it in a similar way to analyze a symmetrical induction machine. This reference frame is commonly called the rotor reference frame.
- The rotor variables were transferred into a reference frame which is stationary with respect to the stator (Stanley, 1938). In this case, all three-phase abc (rotor and stator) quantities were referred to a dq^0 reference frame fixed to the stator. This reference frame is commonly called the stationary reference frame.

- The stator and rotor variables were transferred into a reference frame rotating in synchronism with the rotating magnetic field (Kron, 1951). In other words, all three-phase abc (rotor and stator) quantities were referred to a dq^s reference frame rotating with synchronous speed. This reference frame is commonly called the synchronous reference frame.

Initially, it was believed that the three reference frames given above was different, and these were applied individually to help with the study of ac machines for a long time. However, Krause and Thomas (1965) described that all these reference frames are contained in one general reference frame. This is called the “arbitrary reference frame” in which the dq axes rotate at an arbitrary speed. Other reference frames correspond to specific applications of this arbitrary reference frame. That is, the dq axes are rotated at a specified speed rather than an arbitrary speed. As mentioned above, there are three reference frame speeds in the analysis of ac machine. These are; (i) (stationary reference frame) the dq axes do not rotate, (ii) (synchronous reference frame) the dq axes rotate at synchronous speed, and (iii) (rotor reference frame) the dq axes rotate at rotor speed. The readers can refer to (Lee et al., 1984; Q'Rourke et al., 2019) for a more comprehensive description of reference frames. As a result, a unified model that can be easily arranged to simulate an induction machine in any desired reference frame is developed in (Krause and Thomas, 1965). In the following years, an analytical method for introducing stator and rotor leakage inductance saturation into this simulation model is developed (Lipo and Consoli, 1984). In addition, several linear and nonlinear models suitable for transient and steady-state analysis are also presented (Slemon, 1988).

The machine model based on the theory of rotating reference frame is quite proper for the study of transient and steady-state behaviors and the design of control structures. It has proven to be reliable and accurate by many studies. To this end, many graduate-level textbooks (Novotny and Lipo, 1996; Vas, 1998; Krishnan, 2001; Krause et al., 2002; Bose, 2002; Wack, 2011; Abu-Rub et al., 2012; Melkebeek, 2018) discuss and present the reference frame theory and the dq axes machine model in different ways. Some textbooks even show in detail how to perform complex mathematical operations to derive an advanced model from primitive dynamical equations. This paper aims to derive the dynamic models of the induction machine in a more compact and simple way. In addition, this study complements previous studies due to the following contributions:

- This study first obtains all the primitive dynamic equations step by step before the machine model is expressed in the arbitrary reference frame. These are provided from an interrelated three-step workflow. Each stage corresponds respectively to “three-phase model”, “two-phase slip-ring model” and “two-phase commutator model” of the machine. Subsequently, the general machine model in the arbitrary reference frame is obtained, and the ready-to-use advanced model is presented. Throughout this process, all the mathematical operations are given in a

simple and compact form. Hence, it can be said that a simple and understandable mathematical background on the dynamic models of the induction machine is reviewed by this study.

- This study specifically focuses on the arbitrary reference frame, and how this relates to other reference frames. It is introduced how to transfer the machine model from the arbitrary reference frame to other reference frames. The key features of each reference frame are briefly highlighted.
- This study presents three distinct state-space models for the induction machine. Each state-space model is given in a compact form on the arbitrary reference frame. From this point of view, it is shown that an induction machine can be defined by a total of nine dynamic models.
- This study presents a general simulation block diagram that is valid for all the reference frames. Various software packages can be used for simulation studies such as Pscipe (Akherraz, 1997), Labview (Li and Hu, 2010), and Matlab (Shi et al., 1997; Ozpineci and Tolbert, 2003; Abu-Rub et al., 2012). Among them, Matlab/Simulink environment is very popular, and it was preferred for simulation studies. The simulation model is divided into many sub-models. It allows us to access all the machine variables for monitoring, comparison, and control purposes. Therefore, it has a modular and user-friendly structure. The simulation model can be easily altered so that it can be simulated in three different reference frames without any modifications to sub-models. This shows that the simulation model has a unified and universally applicable structure.

This paper is organized into eight sections. In Section 2, the primitive machine models are presented, and the advanced machine model is obtained in the arbitrary reference frame. Sections 3 and 4 present the space-phasor forms of voltage and flux-linkage equations, and three different state-space models, respectively. Section 5 discusses the mechanism of electromagnetic torque production in ac machines, and the torque equations are given in different forms. Section 6 explains widely used reference frames in the analysis of ac machines. Sections 7 and 8 present simulation studies, obtained results, and discussions. Finally, the drawn conclusions are evaluated in Section 9.

2. Modeling of Induction Machine

Fig. 1 illustrates the schematic view of an induction machine under consideration. In order to simplify the analysis and modeling stages, the following assumptions are considered:

- It has a symmetrical two-pole structure with a smooth air-gap.
- Stator and rotor have three-phase windings placed by 120 electrical degrees from each other.

- The phase windings are composed of distributed windings that generate sinusoidal magnetomotive force (mmf) waves centered on the magnetic axes of the corresponding phases. The effects of mmf space harmonics are neglected.
- The iron losses and end-effects are neglected, such that the flux density is radial in the air-gap and the iron parts have infinite permeability.

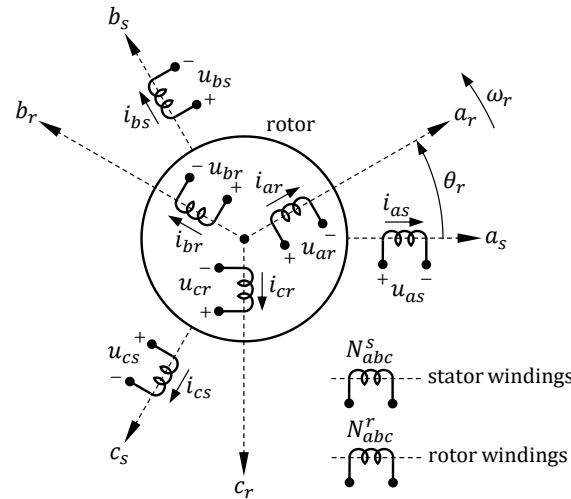


Figure 1. Schematic view of an elementary symmetrical three-phase machine

2.1. Three-Phase Model

The first step in modeling is to obtain the three-phase stator and rotor voltage equations in three-phase (natural) reference frames. Therefore, the stator voltage equations are defined in the stationary reference frame fixed to the stator, and the rotor voltage equations are defined in the rotating reference frame fixed to the rotor. The three-phase stator and rotor voltage equations are as follows:

$$\begin{aligned} \bar{u}_{abcs} &= \mathbf{R}_s \bar{i}_{abcs} + \rho \bar{\psi}_{abcs} \\ \bar{u}_{abcr} &= \mathbf{R}_r \bar{i}_{abcr} + \rho \bar{\psi}_{abcr} \end{aligned} \quad (1)$$

where $\rho = d/dt$ is the differential operator. The stator and rotor resistance matrices are

$$\mathbf{R}_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

where R_s and R_r are the resistances of a stator and rotor phase winding, respectively. \bar{u}_{abcx} , \bar{i}_{abcx} , and $\bar{\psi}_{abcx}$ (the subscript x is s or r) denote the column matrices for the stator and rotor quantities.

These are defined by $\bar{u}_{abcs} = [u_{as} \ u_{bs} \ u_{cs}]^t$, $\bar{u}_{abcr} = [u_{ar} \ u_{br} \ u_{cr}]^t$, $\bar{i}_{abcs} = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^t$, $\bar{i}_{abcr} = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^t$, $\bar{\psi}_{abcs} = [\psi_{as} \ \psi_{bs} \ \psi_{cs}]^t$, and $\bar{\psi}_{abcr} = [\psi_{ar} \ \psi_{br} \ \psi_{cr}]^t$. Also, the stator and rotor flux-linkages are defined by

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_{abcs} &= \mathbf{L}_{abcs(s)}\bar{i}_{abcs} + \mathbf{L}_{abcs(r)}\bar{i}_{abcr} \\ \bar{\psi}_{abcr} &= \mathbf{L}_{abcr(s)}\bar{i}_{abcs} + \mathbf{L}_{abcr(r)}\bar{i}_{abcr} \end{aligned} \tag{3}$$

There is no change in the magnetic circuit for a machine with a smooth air-gap when its rotor rotates. Thus, the self-inductance of a stator phase winding \bar{L}_s and the mutual inductance between two stator windings \bar{M}_s do not depend on the rotor electrical angle θ_r . Then, the inductance matrix between the stator windings $\mathbf{L}_{abcs(s)}$ is

$$\mathbf{L}_{abcs(s)} = \begin{bmatrix} \bar{L}_s & \bar{M}_s & \bar{M}_s \\ \bar{M}_s & \bar{L}_s & \bar{M}_s \\ \bar{M}_s & \bar{M}_s & \bar{L}_s \end{bmatrix} \tag{4}$$

and

$$\bar{L}_s = L_{ls} + L_{ms} \quad , \quad \bar{M}_s = L_{ms} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2}L_{ms} \tag{5}$$

where L_{ls} and L_{ms} are the leakage inductance and magnetizing inductance of a stator phase winding, respectively. Similarly, the self-inductance of a rotor phase winding \bar{L}_r and the mutual inductance between two rotor windings \bar{M}_r are independent of the rotor electrical angle θ_r . Then, the inductance matrix between the rotor windings $\mathbf{L}_{abcr(r)}$ is

$$\mathbf{L}_{abcr(r)} = \begin{bmatrix} \bar{L}_r & \bar{M}_r & \bar{M}_r \\ \bar{M}_r & \bar{L}_r & \bar{M}_r \\ \bar{M}_r & \bar{M}_r & \bar{L}_r \end{bmatrix} \tag{6}$$

and

$$\bar{L}_r = L_{lr} + L_{mr} \quad , \quad \bar{M}_r = L_{mr} \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2}L_{mr} \tag{7}$$

where L_{lr} and L_{mr} are the leakage inductance and magnetizing inductance of a rotor phase winding, respectively. On the contrary, since the rotor phase windings rotate relative to the stator, the mutual inductance between the rotor and stator phase windings change depending on the rotor electrical angle θ_r . Then, the rotor-stator mutual inductance matrix $\mathbf{L}_{abcs(r)}$ is

$$\mathbf{L}_{abcs(r)} = \begin{bmatrix} \bar{M}_{sr} \cos \theta_1 & \bar{M}_{sr} \cos \theta_2 & \bar{M}_{sr} \cos \theta_3 \\ \bar{M}_{sr} \cos \theta_3 & \bar{M}_{sr} \cos \theta_1 & \bar{M}_{sr} \cos \theta_2 \\ \bar{M}_{sr} \cos \theta_2 & \bar{M}_{sr} \cos \theta_3 & \bar{M}_{sr} \cos \theta_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

where \bar{M}_{sr} is the maximum value of the stator-rotor mutual inductance. The angles θ_1, θ_2 and θ_3 are defined as $\theta_1 = \theta_r, \theta_2 = \theta_r + 2\pi/3$ and $\theta_3 = \theta_r - 2\pi/3$. For the number of pole-pairs $p = 1, \theta_r$ is equal to θ_m , where θ_m is the rotor mechanical angle. A similar definition can be made for the stator-rotor mutual inductance matrix $\mathbf{L}_{abcr(s)}$. Due to the symmetry of the machine structure, it is given by

$$\mathbf{L}_{abcr(s)} = \mathbf{L}_{abcs(r)}^t \quad (9)$$

On the other hand, the relationship between the magnetizing inductance of the stator or rotor winding (L_{ms} or L_{mr}) and the maximum value of the mutual inductance \bar{M}_{sr} is formulated by

$$L_{ms} = N\bar{M}_{sr} \quad , \quad L_{mr} = N\bar{M}_{sr} \quad (10)$$

where N is the effective turn ratio and is equal to N_{abc}^s/N_{abc}^r . It also follows that $L_{ms} = N^2 L_{mr}$. For convenience, the stator and rotor voltage equations of a three-phase machine can be combined into a single matrix form as follows:

$$\bar{u}_{abc} = \mathbf{R}\bar{i}_{abc} + \frac{d}{dt}\bar{\psi}_{abc} \quad (11.a)$$

where $\bar{u}_{abc} = [\bar{u}_{abcs} \ \bar{u}_{abcr}]^t, \bar{i}_{abc} = [\bar{i}_{abcs} \ \bar{i}_{abcr}]^t, \bar{\psi}_{abc} = [\bar{\psi}_{abcs} \ \bar{\psi}_{abcr}]^t$. Since $\bar{\psi}_{abc} = \mathbf{L}_{abc}\bar{i}_{abc}$, Eq. (11.a) can be rearranged by

$$\bar{u}_{abc} = (\mathbf{R} + \rho\mathbf{L}_{abc})\bar{i}_{abc} \quad (11.b)$$

and

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_{abc} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{abcs(s)} & \mathbf{L}_{abcs(r)} \\ \mathbf{L}_{abcs(r)}^t & \mathbf{L}_{abcr(r)} \end{bmatrix}$$

The mathematical model of induction machine in three-phase reference frame is represented by Eq. (11.b). In this model, the impedance matrix $\mathbf{Z}_{abc} = \mathbf{R} + \rho\mathbf{L}_{abc}$ is nonlinear, and contains variable, time-dependent coefficients, because the rotor angle varies with time. Consequently, it is not possible to solve the system of differential equations derived from this fully coupled impedance matrix.

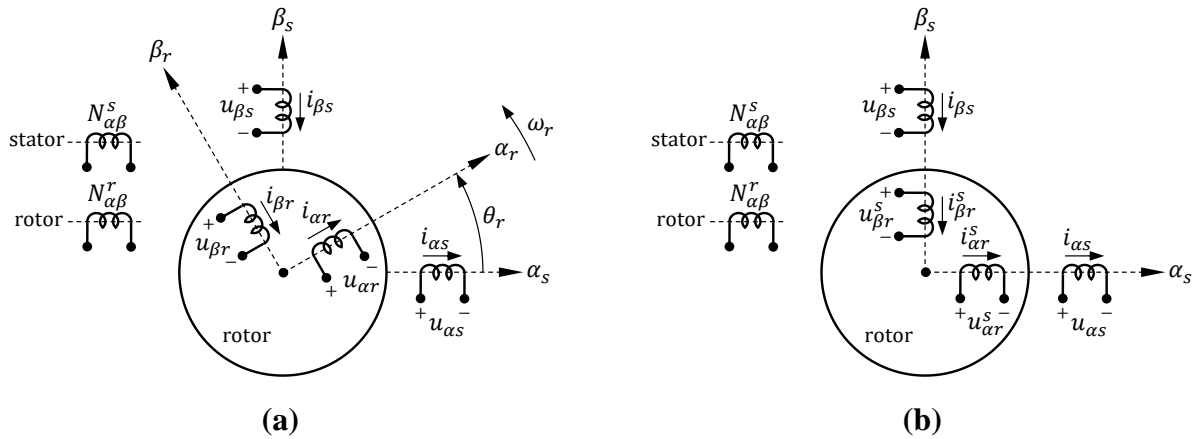


Figure 2. Schematic view of two-phase machine models; **(a)** two-phase slip-ring model, **(b)** two-phase commutator model

2.2. Two-Phase Slip-Ring Model

The two-phase slip-ring model is obtained as shown in Fig. 2a when the three-phase quantities (voltages, currents, flux-linkages) in the previous voltage equations are replaced by their two-phase equivalents expressed in the same reference frame. In this case, assuming that there are no zero-sequence voltages and currents on the stator and rotor, only four voltage equations can be written in total. They correspond to alpha- and beta-axis ($\alpha\beta$ axes) stator and rotor voltage equations. The phase transformation matrix \mathbf{C}_1 is applied to the three-phase quantities to obtain the two-phase equivalent quantities. The transformation matrix \mathbf{C}_1 is

$$\mathbf{C}_1 = \mathbf{c} \cdot \mathbf{M} \tag{12}$$

where

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

and c is a constant. For the power-invariant case, c is equal to $\sqrt{2/3}$. However, for the non-power-invariant case, $c = 2/3$. Then, the relationship between the two-phase voltage components and their three-phase components is defined by

$$\begin{bmatrix} \bar{u}_{\alpha\beta s} \\ \bar{u}_{\alpha\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{u}_{abcs} \\ \bar{u}_{abcr} \end{bmatrix} \tag{13}$$

where $\bar{u}_{\alpha\beta s} = [u_{\alpha s} \ u_{\beta s}]^t$ and $\bar{u}_{\alpha\beta r} = [u_{\alpha r} \ u_{\beta r}]^t$. It should be noted that the zero-sequence voltages on the stator and rotor are ignored. This means that the third row of \mathbf{M} is discarded for the above transformation. Similar transformations hold for the stator and rotor currents.

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_{\alpha\beta s} \\ \bar{i}_{\alpha\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_{abcs} \\ \bar{i}_{abcr} \end{bmatrix} \tag{14}$$

where $\bar{i}_{\alpha\beta s} = [i_{\alpha s} \ i_{\beta s}]^t$ and $\bar{i}_{\alpha\beta r} = [i_{\alpha r} \ i_{\beta r}]^t$.

The inverse transformations are performed by

$$\bar{u}_{abc} = \mathbf{C}_{11}^{-1} \bar{u}_{\alpha\beta} \quad , \quad \bar{i}_{abc} = \mathbf{C}_{11}^{-1} \bar{i}_{\alpha\beta} \tag{15}$$

where $\bar{u}_{\alpha\beta} = [\bar{u}_{\alpha\beta s} \ \bar{u}_{\alpha\beta r}]^t$ and $\bar{i}_{\alpha\beta} = [\bar{i}_{\alpha\beta s} \ \bar{i}_{\alpha\beta r}]^t$. Also, \mathbf{C}_{11} is

$$\mathbf{C}_{11} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_1 \end{bmatrix} = c \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M} \end{bmatrix}$$

and for the power-invariant case, the inverse of \mathbf{C}_{11} is given by,

$$\mathbf{C}_{11}^{-1} = \mathbf{C}_{11}^t = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \mathbf{M}^t & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}^t \end{bmatrix}$$

and for the non-power-invariant case, it is obtained by

$$\mathbf{C}_{11}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}^t & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}^t \end{bmatrix}$$

Thus, by substituting Eq. (15) into Eq. (11.b) and after some algebraic manipulation, the machine model takes the following form:

$$\bar{u}_{\alpha\beta} = \mathbf{R}\bar{i}_{\alpha\beta} + \frac{d}{dt}(\mathbf{L}_{\alpha\beta}\bar{i}_{\alpha\beta}) \tag{16}$$

where the total inductance matrix is

$$\mathbf{L}_{\alpha\beta} = \mathbf{C}_{11}\mathbf{L}_{abc}\mathbf{C}_{11}^{-1} = \begin{bmatrix} L_S & 0 & M_{Sr} \cos \theta_r & -M_{Sr} \sin \theta_r \\ 0 & L_S & M_{Sr} \sin \theta_r & M_{Sr} \cos \theta_r \\ M_{Sr} \cos \theta_r & M_{Sr} \sin \theta_r & L_r & 0 \\ -M_{Sr} \sin \theta_r & M_{Sr} \cos \theta_r & 0 & L_r \end{bmatrix} \tag{17}$$

and L_S , L_r , and M_{Sr} are obtained by using Eqs. (5) and (7) as

$$\begin{aligned} L_S &= \bar{L}_S - \bar{M}_S = L_{ls} + \frac{3}{2}L_{ms} \quad , \quad L_r = \bar{L}_r - \bar{M}_r = L_{lr} + \frac{3}{2}L_{mr} \\ M_{Sr} &= \frac{3}{2}\bar{M}_{Sr} \end{aligned} \tag{18}$$

where L_S and L_r represent the total three-phase stator and rotor inductances, respectively. M_{Sr} is the three-phase magnetizing inductance.

The two-phase slip-ring model of the induction machine is represented by Eq. (16). In this model, the total inductance matrix still contains the rotor angle. It is noted that when the phase transformation is applied to the three-phase model, the stationary three-phase is reduced to the two-phase fixed to the stator while the rotating three-phase is reduced to the two-phase fixed to the rotor. Therefore, the transformed impedance matrix $\mathbf{Z}_{\alpha\beta} = \mathbf{R} + \rho\mathbf{L}_{\alpha\beta}$ includes time-dependent terms even if all of the machine parameters are considered to be constant.

2.3. Two-Phase Commutator Model

The two-phase commutator model is obtained as shown in Fig. 2b if the rotor quantities of the two-phase slip-ring model are transferred into a new reference frame fixed to the stator, providing

that the stator quantities are unchanged. In this case, in the absence of the zero-sequence components, there will still be four voltage equations, but these resulting equations are now purified from the rotor angle. The rotor voltages and currents are transferred to the pseudo-stationary windings fixed to the stator by the transformation matrix \mathbf{C}_2 . The transformation matrix \mathbf{C}_2 is

$$\mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (19)$$

Then, the corresponding stator and rotor quantities to the commutator model are obtained by

$$\begin{bmatrix} \bar{u}_{\alpha\beta s} \\ \bar{u}_{\alpha\beta r}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{u}_{\alpha\beta s} \\ \bar{u}_{\alpha\beta r} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \bar{i}_{\alpha\beta s} \\ \bar{i}_{\alpha\beta r}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_{\alpha\beta s} \\ \bar{i}_{\alpha\beta r} \end{bmatrix} \quad (20)$$

where $\bar{u}_{\alpha\beta r}^s = [u_{\alpha r}^s \ u_{\beta r}^s]^t$ and $\bar{i}_{\alpha\beta r}^s = [i_{\alpha r}^s \ i_{\beta r}^s]^t$. It should be noted that all the stator quantities are already stationary with respect to the stator and no transformations are made for them.

The inverse transformations are performed by

$$\bar{u}_{\alpha\beta} = \mathbf{C}_{22}^{-1} \bar{u}_{\alpha\beta}^s, \quad \bar{i}_{\alpha\beta} = \mathbf{C}_{22}^{-1} \bar{i}_{\alpha\beta}^s \quad (21)$$

where $\bar{u}_{\alpha\beta}^s = [\bar{u}_{\alpha\beta s} \ \bar{u}_{\alpha\beta r}^s]^t$ and $\bar{i}_{\alpha\beta}^s = [\bar{i}_{\alpha\beta s} \ \bar{i}_{\alpha\beta r}^s]^t$. Also, \mathbf{C}_{22} is

$$\mathbf{C}_{22} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_2 \end{bmatrix}$$

and \mathbf{C}_2 is an orthogonal matrix, that is $\mathbf{C}_{22}^{-1} = \mathbf{C}_{22}^t$. Thus, by substituting Eq. (21) into Eq. (16) and after some algebraic manipulation, the two-phase commutator model is obtained by

$$\bar{u}_{\alpha\beta}^s = \mathbf{R} \bar{i}_{\alpha\beta}^s + \mathbf{L}_{\alpha\beta}^s \frac{d}{dt} \bar{i}_{\alpha\beta}^s + \mathbf{G}_{\alpha\beta}^s \frac{d\theta_r}{dt} \bar{i}_{\alpha\beta}^s \quad (22)$$

where

$$\mathbf{L}_{\alpha\beta}^s = \mathbf{C}_{22} \mathbf{L}_{\alpha\beta} \mathbf{C}_{22}^t = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M_{sr} & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M_{sr} \\ M_{sr} & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M_{sr} & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad (23)$$

and

$$\mathbf{G}_{\alpha\beta}^s \frac{d\theta_r}{dt} = \mathbf{C}_{22} \frac{d}{dt} (\mathbf{L}_{\alpha\beta} \mathbf{C}_{22}^t)$$

where $d\theta_r/dt = \omega_r$ is the rotor electrical angular speed, and the speed matrix $\mathbf{G}_{\alpha\beta}^s$ is

$$\mathbf{G}_{\alpha\beta}^s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{sr} & 0 & L_r \\ -M_{sr} & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Eventually, from Eqs. (23) and (24), the two-phase commutator model can be given in a more compact form as follows:

$$\bar{u}_{\alpha\beta}^s = (\mathbf{R} + \mathbf{L}_{\alpha\beta}^s \rho + \mathbf{G}_{\alpha\beta}^s \omega_r) \bar{i}_{\alpha\beta}^s \quad (25.a)$$

or it is more explicitly as

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha s} \\ u_{\beta s} \\ u_{\alpha r}^s \\ u_{\beta r}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \rho & 0 & M_{sr} \rho & 0 \\ 0 & R_s + L_s \rho & 0 & M_{sr} \rho \\ M_{sr} \rho & M_{sr} \omega_r & R_r + L_r \rho & L_r \omega_r \\ -M_{sr} \omega_r & M_{sr} \rho & -L_r \omega_r & R_r + L_r \rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r}^s \\ i_{\beta r}^s \end{bmatrix} \quad (25.b)$$

It is seen that the impedance matrix $\mathbf{Z}_{\alpha\beta}^s = \mathbf{R} + \mathbf{L}_{\alpha\beta}^s \rho + \mathbf{G}_{\alpha\beta}^s \omega_r$ in the commutator model does not now include a function dependent on the rotor angle, but only includes the rotor electrical angular speed in the rotor voltage equations. Therefore, this system of differential equations will be linear if all the parameters of the machine are constant.

2.4. Machine Model in Arbitrary Reference Frame

In the two-phase commutator model, the stator and rotor voltage equations are defined relative to a reference frame fixed to the stator (which is often called the stationary reference frame). However, a more general machine model can be obtained when a general (arbitrary) reference frame rotating at an arbitrary angular speed ω_a is used rather than the stationary reference frame. The machine model in the arbitrary reference frame is shown in Fig. 3, where θ_a is the angle between the real axes of the stationary and arbitrary reference frames.

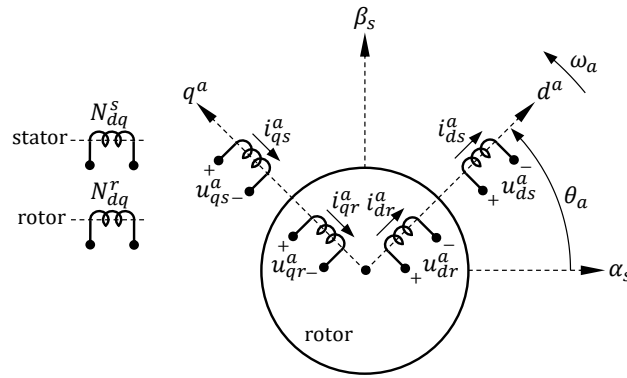


Figure 3. Schematic view of machine model in the arbitrary reference frame

The transformation matrix \mathbf{C}_3 is used to transform the stator and rotor quantities in the stationary reference frame into the arbitrary reference frame.

$$\mathbf{C}_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_a & \sin \theta_a \\ -\sin \theta_a & \cos \theta_a \end{bmatrix} \quad (26)$$

and hence, the following can be written:

$$\begin{bmatrix} \bar{u}_{dqs}^a \\ \bar{u}_{dqr}^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{u}_{\alpha\beta s} \\ \bar{u}_{\alpha\beta r} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \bar{i}_{dqs}^a \\ \bar{i}_{dqr}^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_{\alpha\beta s} \\ \bar{i}_{\alpha\beta r} \end{bmatrix} \quad (27)$$

where $\bar{u}_{dqs}^a = [u_{ds}^a \ u_{qs}^a]^t$, $\bar{u}_{dqr}^a = [u_{dr}^a \ u_{qr}^a]^t$, $\bar{i}_{dqs}^a = [i_{ds}^a \ i_{qs}^a]^t$, and $\bar{i}_{dqr}^a = [i_{dr}^a \ i_{qr}^a]^t$.

The inverse transformations are performed by

$$\bar{u}_{\alpha\beta}^s = \mathbf{C}_{33}^{-1} \bar{u}_{dq}^a, \quad \bar{i}_{\alpha\beta}^s = \mathbf{C}_{33}^{-1} \bar{i}_{dq}^a \quad (28)$$

where $\bar{u}_{dq}^a = [\bar{u}_{dqs}^a \ \bar{u}_{dqr}^a]^t$ and $\bar{i}_{dq}^a = [\bar{i}_{dqs}^a \ \bar{i}_{dqr}^a]^t$. Also, \mathbf{C}_{33} is

$$\mathbf{C}_{33} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_3 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_3 \end{bmatrix}$$

and \mathbf{C}_{33} is an orthogonal matrix, that is $\mathbf{C}_{33}^{-1} = \mathbf{C}_{33}^t$. Thus, by substituting Eq. (28) into Eq. (22) and after some algebraic manipulation, the machine model in the arbitrary reference frame is obtained by

$$\bar{u}_{dq}^a = \mathbf{R} \bar{i}_{dq}^a + \mathbf{L}_{dq}^a \frac{d}{dt} \bar{i}_{dq}^a + \left(\mathbf{G}_{dq(\omega_a)}^a \frac{d\theta_a}{dt} + \mathbf{G}_{dq(\omega_r)}^a \frac{d\theta_r}{dt} \right) \bar{i}_{dq}^a \quad (29)$$

where $\mathbf{L}_{dq}^a = \mathbf{L}_{\alpha\beta}^s$, $\mathbf{G}_{dq(\omega_r)}^a = \mathbf{G}_{\alpha\beta}^s$ and

$$\mathbf{G}_{dq(\omega_a)}^a \frac{d\theta_a}{dt} = \mathbf{C}_{33} \mathbf{L}_{\alpha\beta}^s \frac{d}{dt} \mathbf{C}_{33}^t$$

where $d\theta_a/dt = \omega_a$ is the arbitrary angular speed and the speed matrix $\mathbf{G}_{dq(\omega_a)}^a$ is

$$\mathbf{G}_{dq(\omega_a)}^a = \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M_{sr} \\ L_s & 0 & M_{sr} & 0 \\ 0 & -M_{sr} & 0 & -L_r \\ M_{sr} & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Consequently, the machine model can be written more explicitly from Eq. (29) as follows:

$$\begin{bmatrix} u_{ds}^a \\ u_{qs}^a \\ u_{dr}^a \\ u_{qr}^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \rho & -L_s \omega_a & M_{sr} \rho & -M_{sr} \omega_a \\ L_s \omega_a & R_s + L_s \rho & M_{sr} \omega_a & M_{sr} \rho \\ M_{sr} \rho & -M_{sr} (\omega_a - \omega_r) & R_r + L_r \rho & -L_r (\omega_a - \omega_r) \\ M_{sr} (\omega_a - \omega_r) & M_{sr} \rho & L_r (\omega_a - \omega_r) & R_r + L_r \rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^a \\ i_{qs}^a \\ i_{dr}^a \\ i_{qr}^a \end{bmatrix} \quad (31)$$

In the above model, u_{dr}^a , u_{qr}^a and i_{dr}^a , i_{qr}^a are the voltage and current quantities on the rotor side. To produce the final per-phase equivalent circuit for an induction machine, it is necessary to refer the quantities of the rotor side to the stator side. As in an ordinary transformer, the voltages and currents on the rotor side can be referred to the stator side by means of the effective turn ratio of the machine.

$$\bar{u}_{dqr}^a = \frac{N_{dq}^r}{N_{dq}^s} \bar{u}_{dqr}^{a'} \quad , \quad \bar{i}_{dqr}^a = \frac{N_{dq}^s}{N_{dq}^r} \bar{i}_{dqr}^{a'} \quad (32)$$

where

$$\frac{N_{abc}^s}{N_{abc}^r} = \frac{N_{\alpha\beta}^s}{N_{\alpha\beta}^r} = \frac{N_{dq}^s}{N_{dq}^r} = N$$

It should be noted that the effective turn ratio N is never unchanged, no matter which axis transformation is applied to the machine model. As mentioned earlier, Eq. (31) holds for a machine with a symmetrical two-pole structure, i.e., $p = 1$ and $\omega_r = \omega_m$, where ω_m is the rotor mechanical angular speed. When $p > 1$, the rotor electrical angular speed ω_r is replaced by $p\omega_m$. Then, for $p > 1$ and the manipulation of Eq. (31) with Eq. (32) gives

$$\begin{bmatrix} u_{ds}^a \\ u_{qs}^a \\ u_{dr}^{a'} \\ u_{qr}^{a'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \rho & -L_s \omega_a \\ L_s \omega_a & R_s + L_s \rho \\ L_m \rho & -L_m (\omega_a - p \omega_m) \\ L_m (\omega_a - p \omega_m) & L_m \rho \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^a \\ i_{qs}^a \\ i_{dr}^{a'} \\ i_{qr}^{a'} \end{bmatrix} \quad (33)$$

where $L_m = NM_{sr}$, and by using Eq. (10) and Eq. (18), it can be written by

$$L_m = \frac{3}{2} L_{ms} \quad \vee \quad L_m = N^2 \frac{3}{2} L_{mr}$$

and also, we can write

$$R_r' = N^2 R_r \quad , \quad L_r' = N^2 L_r = N^2 \left(L_{lr} + \frac{3}{2} L_{mr} \right) = L_{lr}' + L_m$$

$$L_s = L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ms} = L_{ls} + L_m$$

where the ' superscript represents the rotor quantities reduced to the stator side. On the other hand, since $\bar{\psi}_{dq}^a = \mathbf{L}_{dq}^a \bar{i}_{dq}^a$ in Eq. (29), the stator and rotor flux-linkages are given by

$$\begin{bmatrix} \bar{\psi}_{dqs}^a \\ \bar{\psi}_{dqr}^a \end{bmatrix} = \mathbf{L}_{dq}^a \begin{bmatrix} \bar{i}_{dqs}^a \\ \bar{i}_{dqr}^a \end{bmatrix} \quad (34)$$

where $\bar{\psi}_{dqs}^a = [\psi_{ds}^a \ \psi_{qs}^a]^t$ and $\bar{\psi}_{dqr}^a = [\psi_{dr}^a \ \psi_{qr}^a]^t$. ψ_{dr}^a , ψ_{qr}^a and i_{dr}^a , i_{qr}^a are the flux-linkage and current quantities on the rotor side. When these rotor quantities are referred to the stator side by using

$$\bar{\psi}_{dqr}^a = \frac{1}{N} \bar{\psi}_{dqr}^{a'} \quad , \quad \bar{i}_{dqr}^a = N \bar{i}_{dqr}^{a'}$$

the flux-linkages reduced to the stator side are

$$\begin{bmatrix} \bar{\psi}_{dqs}^a \\ \bar{\psi}_{dqr}^{a'} \end{bmatrix} = \mathbf{L}_{dq}^{a'} \begin{bmatrix} \bar{i}_{dqs}^a \\ \bar{i}_{dqr}^{a'} \end{bmatrix} \quad (35)$$

where since $\mathbf{L}_{dq}^a = \mathbf{L}_{\alpha\beta}^s$, we obtain

$$\mathbf{L}_{dq}^{a'} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & NM_{sr} & 0 \\ 0 & L_s & 0 & NM_{sr} \\ NM_{sr} & 0 & N^2 L_r & 0 \\ 0 & NM_{sr} & 0 & N^2 L_r \end{bmatrix} \quad (36)$$

Then, the flux-linkage matrix becomes

$$\begin{bmatrix} \psi_{ds}^a \\ \psi_{qs}^a \\ \psi_{dr}^{a'} \\ \psi_{qr}^{a'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L'_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^a \\ i_{qs}^a \\ i_{dr}^{a'} \\ i_{qr}^{a'} \end{bmatrix} \quad (37)$$

The stator and rotor voltage equations and flux-linkage equations in the arbitrary reference frame are written by using Eqs. (33) and (37), respectively. It follows that these equations are suitable for simulating the operation of induction machines and for designing various control schemes.

3. Space-Phasor Representation of Equations

In this section, the voltage and flux-linkage space-phasor equations will be presented only in the arbitrary reference frame. Then, the space-phasor of the stator quantities (current, voltage, flux-linkage) are described through their direct- and quadrature-axis components in the arbitrary reference frame as

$$\vec{\mathbf{i}}_s = i_{ds}^a + ji_{qs}^a \quad , \quad \vec{\mathbf{u}}_s = u_{ds}^a + ju_{qs}^a \quad , \quad \vec{\Psi}_s = \psi_{ds}^a + j\psi_{qs}^a \quad (38)$$

and similarly

$$\vec{\mathbf{i}}'_r = i_{dr}^{a'} + ji_{qr}^{a'} \quad , \quad \vec{\mathbf{u}}'_r = u_{dr}^{a'} + ju_{qr}^{a'} \quad , \quad \vec{\Psi}'_r = \psi_{dr}^{a'} + j\psi_{qr}^{a'} \quad (39)$$

Using the above definitions of the current and flux-linkage space-phasors, the stator and rotor flux-linkage equations in Eq. (37) can be put into the following space-phasor form:

$$\vec{\Psi}_s = L_s \vec{\mathbf{i}}_s + L_m \vec{\mathbf{i}}'_r \quad (40.a)$$

$$\vec{\Psi}'_r = L'_r \vec{\mathbf{i}}'_r + L_m \vec{\mathbf{i}}_s \quad (40.b)$$

Similar space-phasor forms of the voltage equations can be derived from Eq. (33). Then, by utilizing the space-phasor definitions and equations in Eqs. (38), (39), and (40), the stator and rotor voltage equations can be put into the following space-phasor form:

$$\vec{u}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d\vec{\Psi}_s}{dt} + j\omega_a \vec{\Psi}_s \quad (41.a)$$

$$\vec{u}'_r = R'_r \vec{i}'_r + \frac{d\vec{\Psi}'_r}{dt} + j(\omega_a - p\omega_m) \vec{\Psi}'_r \quad (41.b)$$

The per-phase equivalent circuit for an induction machine is shown in Fig. 4a, where the space-phasor quantities are given. The direct- and quadrature-axis equivalent circuits are also illustrated in Fig. 4b and 4c, respectively. In these equivalent circuits, the rotor terminals are short-circuited, i.e., $\vec{u}'_r = 0$. This means that the induction machine under consideration has a squirrel-cage-type rotor.

4. State-Space Equations in Arbitrary Reference Frame

The stator voltages and currents can be directly sensed from the fixed stator windings. Similarly, the rotor voltages and currents can be measured from the rotating rotor windings, but it is almost impossible in the case of a squirrel-cage-type rotor. Therefore, the rotor currents are not preferred as the state variables in the state-space machine models. However, the stator and rotor flux-linkages can be chosen as state variables since they can be observed from measurable quantities. In this case, three different state-space models of the machine can be derived according to the state variables to be selected. For this study, the state variables were taken for Models #1, #2, and #3 as follows:

Model #1: The space-phasor of the stator current \vec{i}_s and the space-phasor of the stator flux-linkage $\vec{\Psi}_s$ are selected as the state variables. From Eq. (41.a), we obtain

$$\frac{d\vec{\Psi}_s}{dt} = -R_s \vec{i}_s - j\omega_a \vec{\Psi}_s + \vec{u}_s \quad (42)$$

From Eqs. (40.a) and (40.b), we have

$$\vec{i}'_r = \frac{1}{L_m} \vec{\Psi}_s - \frac{L_s}{L_m} \vec{i}_s \quad (43.a)$$

$$\vec{\Psi}'_r = \frac{L'_r}{L_m} \vec{\Psi}_s - \sigma \frac{L_s L'_r}{L_m} \vec{i}_s \quad (43.b)$$

where $\sigma = 1 - (L_m^2/L_s L_r')$ is the total leakage factor. Firstly, Eqs. (43.a) and (43.b) are substituted into Eq. (41.b) and subsequently if it is rearranged with Eq. (42) for $\vec{u}'_r = 0$, it yields

$$\frac{d\vec{i}_s}{dt} = \left[-\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1}{\sigma \tau_r}\right) - j(\omega_a - p\omega_m) \right] \vec{i}_s + \left(\frac{1}{\sigma L_s \tau_r} - jp\omega_m \frac{1}{\sigma L_s}\right) \vec{\Psi}_s + \frac{1}{\sigma L_s} \vec{u}_s \quad (44)$$

where $\tau_r = L_r'/R_r'$ is the rotor time-constant. The state-space equations are now represented by Eqs. (42) and (44). When these space-phasors are expanded by using the phasor definitions of \vec{u}_s , \vec{i}_s and $\vec{\Psi}_s$ in Eq. (38), the machine model is written by

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{i}_{dqs}^a \\ \bar{\psi}_{dqs}^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_{dqs}^a \\ \bar{\psi}_{dqs}^a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \end{bmatrix} \bar{u}_{dqs}^a \quad , \quad \bar{i}_{dqs}^a = \mathbf{C} \begin{bmatrix} \bar{i}_{dqs}^a \\ \bar{\psi}_{dqs}^a \end{bmatrix} \quad (45)$$

The output **C** matrix and the sub-matrices of the system **A** and input **B** matrices are given in Table 1, where the matrices **I**, **J** and **O** that expand the terms are as in

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad , \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad , \quad \mathbf{O} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

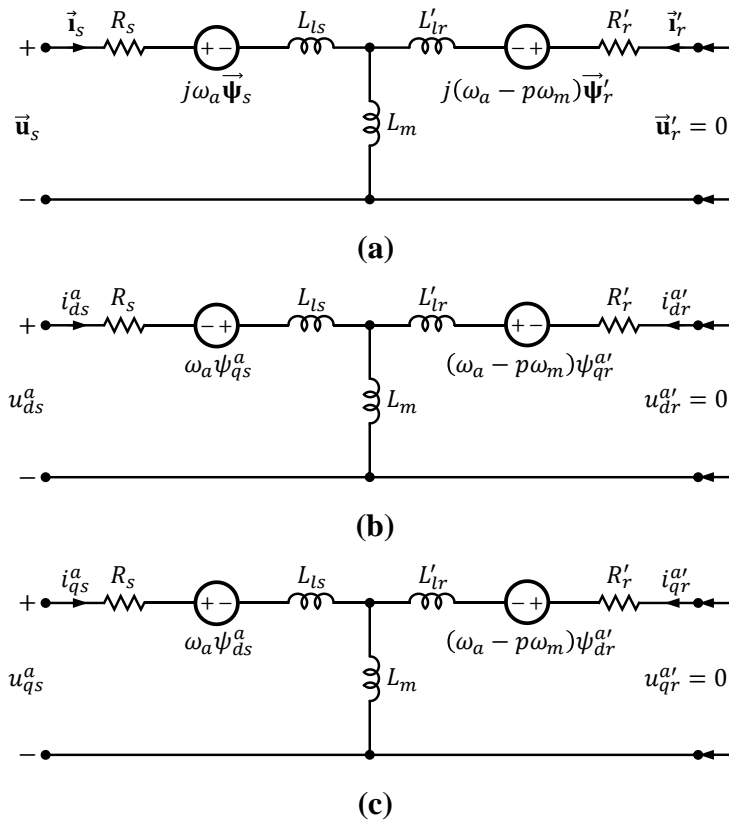


Figure 4. Per-phase equivalent circuit in the arbitrary reference frame; (a) space-phasor equivalent circuit, (b) direct-axis equivalent circuit, (c) quadrature-axis equivalent circuit

Model #2: The space-phasor of the stator current $\vec{\mathbf{i}}_s$ and the space-phasor of the rotor flux-linkage $\vec{\Psi}'_r$ are selected as the state variables. From Eqs. (40.a) and (40.b), we obtain

$$\vec{\mathbf{i}}'_r = \frac{1}{L'_r} \vec{\Psi}'_r - \frac{L_m}{L'_r} \vec{\mathbf{i}}_s \tag{46.a}$$

$$\vec{\Psi}_s = \frac{L_m}{L'_r} \vec{\Psi}'_r + \sigma L_s \vec{\mathbf{i}}_s \tag{46.b}$$

Firstly, if substituting Eq. (46.a) into Eq. (41.b), (for $\vec{\mathbf{u}}'_r = 0$) it results in

$$\frac{d\vec{\Psi}'_r}{dt} = \frac{L_m}{\tau_r} \vec{\mathbf{i}}_s + \left[-\frac{1}{\tau_r} - j(\omega_a - p\omega_m) \right] \vec{\Psi}'_r \tag{47}$$

Secondly, Eq. (46.b) is substituted into Eq. (41.a) and then if the obtained is rearranged with Eq. (47), we have

$$\frac{d\vec{\mathbf{i}}_s}{dt} = -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1 - \sigma}{\sigma \tau_r} + j\omega_a \right) \vec{\mathbf{i}}_s + \frac{L_m}{\sigma L_s L'_r} \left(\frac{1}{\tau_r} - jp\omega_m \right) \vec{\Psi}'_r + \frac{1}{\sigma L_s} \vec{\mathbf{u}}_s \tag{48}$$

The system of differential equations is now represented by Eqs. (47) and (48). When the space-phasors are expanded by using the phasor definitions of $\vec{\mathbf{u}}_s$, $\vec{\mathbf{i}}_s$ and $\vec{\Psi}'_r$ in Eqs. (38) and (39), the machine model is written by

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vec{\mathbf{i}}^a_{dqs} \\ \vec{\Psi}^a_{dqr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{\mathbf{i}}^a_{dqs} \\ \vec{\Psi}^a_{dqr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \end{bmatrix} \vec{\mathbf{u}}^a_{dqs} \quad , \quad \vec{\mathbf{i}}^a_{dqs} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} \vec{\mathbf{i}}^a_{dqs} \\ \vec{\Psi}^a_{dqr} \end{bmatrix} \tag{49}$$

where the output \mathbf{C} matrix and the sub-matrices of \mathbf{A} and \mathbf{B} are given in Table 1.

Model #3: The space-phasor of the stator flux-linkage $\vec{\Psi}_s$ and the space-phasor of the rotor flux-linkage $\vec{\Psi}'_r$ are selected as the state variables. From Eqs. (40.a) and (40.b), we obtain

$$\vec{\mathbf{i}}_s = \frac{1}{\sigma L_s} \vec{\Psi}_s + \frac{\sigma - 1}{\sigma L_m} \vec{\Psi}'_r \tag{50.a}$$

$$\vec{\mathbf{i}}'_r = \frac{\sigma - 1}{\sigma L_m} \vec{\Psi}_s + \frac{1}{\sigma L'_r} \vec{\Psi}'_r \tag{50.b}$$

Table 1. Sub-matrices of the system **A** and input **B** matrices, and the output **C** matrix for the state-space models #1, #2, and #3

Model #1
$\mathbf{x} = [\bar{i}_{dqs}^a \ \bar{\psi}_{dqs}^a]^t \text{ where } \bar{i}_{dqs}^a = [i_{ds}^a \ i_{qs}^a]^t \text{ and } \bar{\psi}_{dqs}^a = [\psi_{ds}^a \ \psi_{qs}^a]^t$ $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1}{\sigma \tau_r}\right) \mathbf{I} - (\omega_a - p\omega_m) \mathbf{J} & \frac{1}{\sigma L_s \tau_r} \mathbf{I} - p\omega_m \frac{1}{\sigma L_s} \mathbf{J} \\ -R_s \mathbf{I} & -\omega_a \mathbf{J} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} \mathbf{I} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}$ $\mathbf{C} = [\mathbf{I} \ \mathbf{0}]$
Model #2
$\mathbf{x} = [\bar{i}_{dqs}^a \ \bar{\psi}_{dqr}^{a'}]^t \text{ where } \bar{i}_{dqs}^a = [i_{ds}^a \ i_{qs}^a]^t \text{ and } \bar{\psi}_{dqr}^{a'} = [\psi_{dr}^{a'} \ \psi_{qr}^{a'}]^t$ $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma \tau_r}\right) \mathbf{I} - \omega_a \mathbf{J} & \frac{L_m}{\sigma L_s L_r'} \left(\frac{1}{\tau_r} \mathbf{I} - p\omega_m \mathbf{J}\right) \\ \frac{L_m}{\tau_r} \mathbf{I} & -\frac{1}{\tau_r} \mathbf{I} - (\omega_a - p\omega_m) \mathbf{J} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} \mathbf{I} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$ $\mathbf{C} = [\mathbf{I} \ \mathbf{0}]$
Model #3
$\mathbf{x} = [\bar{\psi}_{dqs}^a \ \bar{\psi}_{dqr}^{a'}]^t \text{ where } \bar{\psi}_{dqs}^a = [\psi_{ds}^a \ \psi_{qs}^a]^t \text{ and } \bar{\psi}_{dqr}^{a'} = [\psi_{dr}^{a'} \ \psi_{qr}^{a'}]^t$ $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} \mathbf{I} - \omega_a \mathbf{J} & R_s \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} \mathbf{I} \\ R_r' \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} \mathbf{I} & -\frac{1}{\sigma \tau_r} \mathbf{I} - (\omega_a - p\omega_m) \mathbf{J} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$ $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} \mathbf{I} & \frac{\sigma-1}{\sigma L_m} \mathbf{I} \end{bmatrix}$

In a similar manner to the previous algebraic manipulations, by using Eqs. (50.a) and (50.b), the system of differential equations is obtained from Eqs. (41.a) and (41.b) as follows:

$$\frac{d\vec{\Psi}_s}{dt} = \left(-\frac{R_s}{\sigma L_s} - j\omega_a\right) \vec{\Psi}_s + R_s \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} \vec{\Psi}'_r + \vec{\mathbf{u}}_s \tag{51}$$

$$\frac{d\vec{\Psi}'_r}{dt} = R_r' \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} \vec{\Psi}_s + \left[-\frac{1}{\sigma \tau_r} - j(\omega_a - p\omega_m)\right] \vec{\Psi}'_r \tag{52}$$

and the above space-phasors are expanded as

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{\psi}_{dqs}^a \\ \bar{\psi}_{dqr}^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\psi}_{dqs}^a \\ \bar{\psi}_{dqr}^a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \end{bmatrix} \bar{u}_{dqs}^a, \quad \bar{i}_{dqs}^a = \mathbf{C} \begin{bmatrix} \bar{\psi}_{dqs}^a \\ \bar{\psi}_{dqr}^a \end{bmatrix} \quad (53)$$

where the output matrix and the sub-matrices are given in Table 1.

5. Electromagnetic Torque in Induction Machine

The main output variables of the machine are the produced torque t_e and the rotor mechanical speed ω_m . The mechanical output power P_m is also equal to $t_e \omega_m$ or $t_e \omega_r / p$ for $p > 1$. Then, the produced torque is defined as

$$t_e = p \frac{P_m}{\omega_r} \quad (54)$$

The mechanical output power can be derived from the instantaneous value of the input power supplied to the machine by considering the principle of conservation of energy. The definition of the output power is first obtained for the three-phase model. Thereafter, the relevant transformations are applied, and their corresponding expressions to the other two-phase models are found. After some complex algebraic operations, the output power in the arbitrary reference frame is obtained by

$$P_m = k \cdot \left(\bar{i}_{dq}^a \mathbf{G}_{dq(\omega_r)}^a \frac{d\theta_r}{dt} \bar{i}_{dq}^a \right) \quad (55)$$

where $\mathbf{G}_{dq(\omega_r)}^a = \mathbf{G}_{\alpha\beta}^s$. Using Eqs. (54) and (24), the electromagnetic torque is given as

$$t_e = k \cdot p M_{sr} (i_{qs}^a i_{dr}^a - i_{ds}^a i_{qr}^a) \quad (56)$$

where k is a torque constant. For the power-invariant form of the phase transformation, $k = 1$, but for the non-power-invariant case, $k = 3/2$. On the other hand, when the rotor currents are reduced to the stator side, it becomes

$$t_e = k \cdot p L_m (i_{qs}^a i_{dr}^a - i_{ds}^a i_{qr}^a) \quad (57)$$

The electromagnetic torque can also be expressed in the space-phasor form. By considering the space-phasor definitions of $\vec{\mathbf{i}}_s$ and $\vec{\mathbf{i}}_r'$, the torque equation can be put into the following form:

$$t_e = k \cdot p L_m (\vec{i}'_r \times \vec{i}_s) \quad (58.a)$$

where \times denotes the cross product of two vectors. Considering Eqs. (43.a), (46.a), and (50.a), other equivalent expressions for the electromagnetic torque can be defined as

$$t_e = k \cdot p (\vec{\Psi}_s \times \vec{i}_s) = k \cdot p (\psi_{ds}^a i_{qs}^a - \psi_{qs}^a i_{ds}^a) \quad (58.a)$$

$$t_e = k \cdot p \frac{L_m}{L_r} (\vec{\Psi}'_r \times \vec{i}_s) = k \cdot p \frac{L_m}{L_r} (\psi_{dr}^{a'} i_{qs}^a - \psi_{qr}^{a'} i_{ds}^a) \quad (58.b)$$

$$t_e = k \cdot p \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} (\vec{\Psi}'_r \times \vec{\Psi}_s) = k \cdot p \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} (\psi_{dr}^{a'} \psi_{qs}^a - \psi_{qr}^{a'} \psi_{ds}^a) \quad (58.c)$$

where Eqs. (58.b), (58.c), and (58.d) are respectively proper torque equations for Models #1, #2, and #3. Finally, the state-space and torque equations of the machine hold under both transient and steady-state conditions. However, the equation of motion

$$t_e = t_l + J_l \frac{d\omega_m}{dt} + f_d \omega_m \quad (59)$$

is also required for transient conditions, where t_l is the load torque, J_l is the inertia of the rotor and f_d is the damping constant which denotes dissipation due to windage and friction. The motion equation introduces the relationship between the developed torque and rotor mechanical speed, and hence it is used to determine the rotor speed in simulation studies.

6. Reference Frames Used in Machine Model

The dynamic behavior of any induction machine can be simulated by using the general block diagram in Fig. 5. As seen in Fig. 5, the inputs of the model are the stator voltages and load torque. The outputs are the stator currents, developed torque, and rotor mechanical speed. The transformation angle θ_a is obtained by

$$\theta_a = \int \omega_a dt \quad (60)$$

where ω_a is an arbitrary angular speed. Since the state-space models in Table 1 are expressed in the reference frame rotating with an unspecified angular speed, the machine model cannot be simulated as such. To make the machine model more suitable for simulation, the state-space equations need to

be re-expressed in one of the following reference frames. The main function of the “Reference Frame Selector” sub-block is to perform this operation.

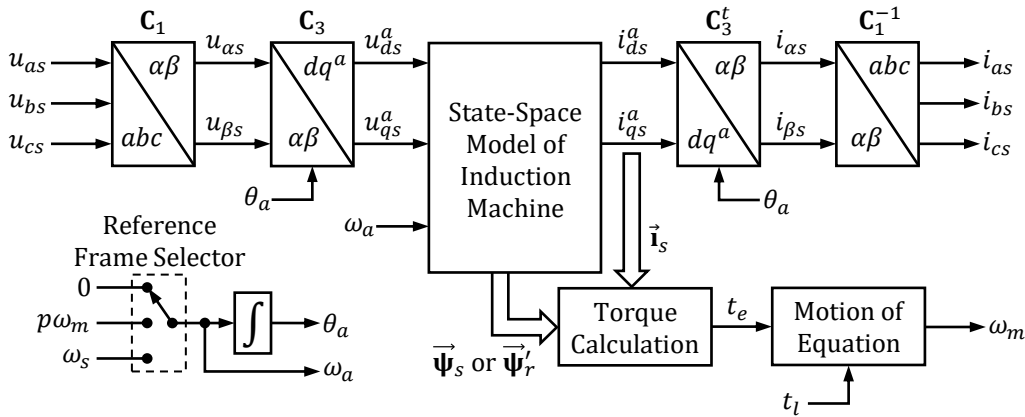


Figure 5. General simulation block diagram of an induction machine

Fig. 6 depicts commonly used reference frames in ac machine analysis. It follows that the machine model can be described in three different reference frames, namely stationary, rotor, and synchronous reference frames. How to transfer the state-space models in Table 1 from the arbitrary reference frame to other reference frames will be shown below, and their basic features will be briefly introduced.

1. The machine model is expressed in the stationary reference frame if the arbitrary reference frame coincides with the phase- a_s axis of the stator. Then, when ω_a is zero in Table 1, the state-space equations in the stationary reference frame are obtained. Since $\omega_a = 0$, the arbitrary reference frame does not rotate. Therefore, the stator and rotor quantities change sinusoidally with synchronous angular speed ω_s , where $\omega_s = 2\pi f_s$ and f_s is the fundamental frequency of the stator currents or voltages.
2. The machine model is expressed in the rotor reference frame if the arbitrary reference frame coincides with the phase- a_r axis of the rotor. Then, if ω_a is taken as ω_r or $p\omega_m$ in Table 1, the state-space equations in the rotor reference frame are achieved. Since $\omega_a = \omega_r$, the arbitrary reference frame rotates at the rotor electrical speed ω_r . Therefore, the stator and rotor quantities change sinusoidally with slip angular speed ω_{sl} , where $\omega_{sl} = \omega_s - \omega_r$.
3. The machine model is expressed in the synchronous reference frame if the arbitrary reference frame coincides with the reference frame rotating with synchronous speed ω_s . Then, if ω_a is replaced by ω_s in Table 1, the state-space equations in the synchronous reference frame are attained. Since $\omega_a = \omega_s$, the arbitrary reference frame rotates at the synchronous speed ω_s . Similarly, the stator and rotor quantities change sinusoidally with synchronous speed ω_s . Thus, these ac quantities convert into dc quantities in the synchronous reference frame.

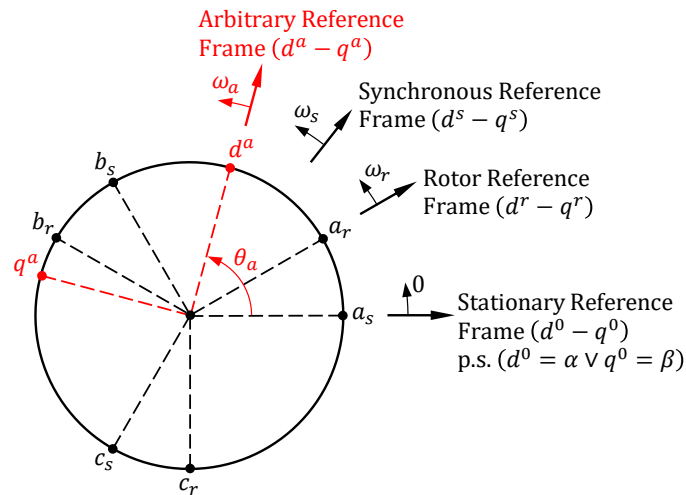


Figure 6. Commonly used reference frames in AC machine analysis

The above three reference frames provide the state-space models that can be used to analyze and/or simulate the induction machine. The most convenient reference frame is determined by the operating conditions. In general, to study balanced conditions, either the stationary or synchronously rotating reference frame is preferred rather than the rotor reference frame. However, if the stator voltages are unbalanced and the rotor voltages are balanced or zero, then the stationary reference frame is more convenient. On the contrary, if the rotor voltages are unbalanced and the stator voltages are balanced, then the rotor reference frame is more convenient. Moreover, the synchronously rotating reference frame is more useful in variable frequency applications for balanced conditions.

Table 2. Equivalent circuit and other parameters of induction machine

Parameter	Symbol	Value	Unit
Stator resistance	R_s	2.65	Ω
Rotor resistance	R_r	2.85	Ω
Stator self-inductance	L_s	0.2082	H
Rotor self-inductance	L_r	0.2122	H
Mutual inductance	L_m	0.1941	H
Number of pole-pairs	p	2	—
Moment of inertia	J_l	0.025	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
Damping coefficient	f_d	0.001	$\text{Nm} \cdot \text{s}/\text{rad}$
Rated torque	t_e	15	Nm
Rated base speed	n_m	1500	rpm

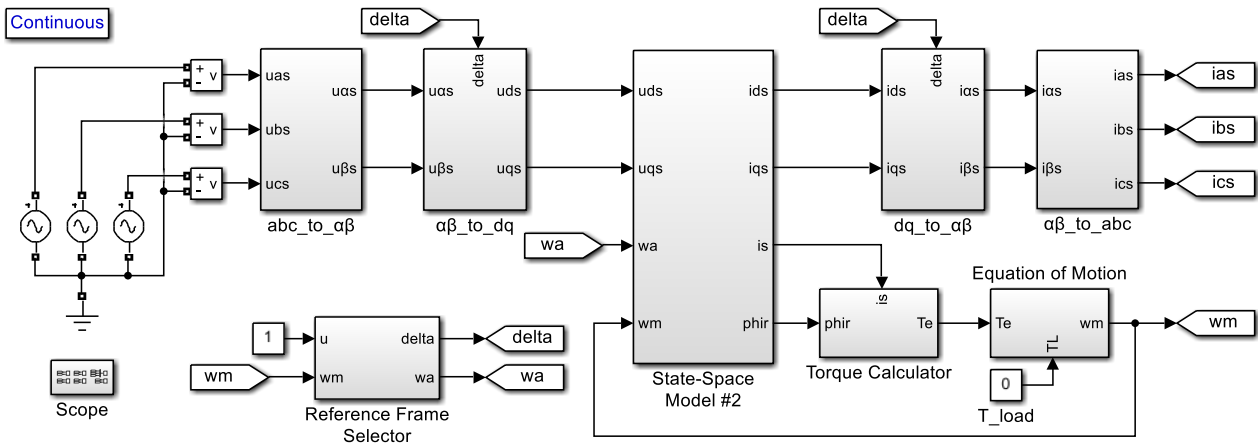
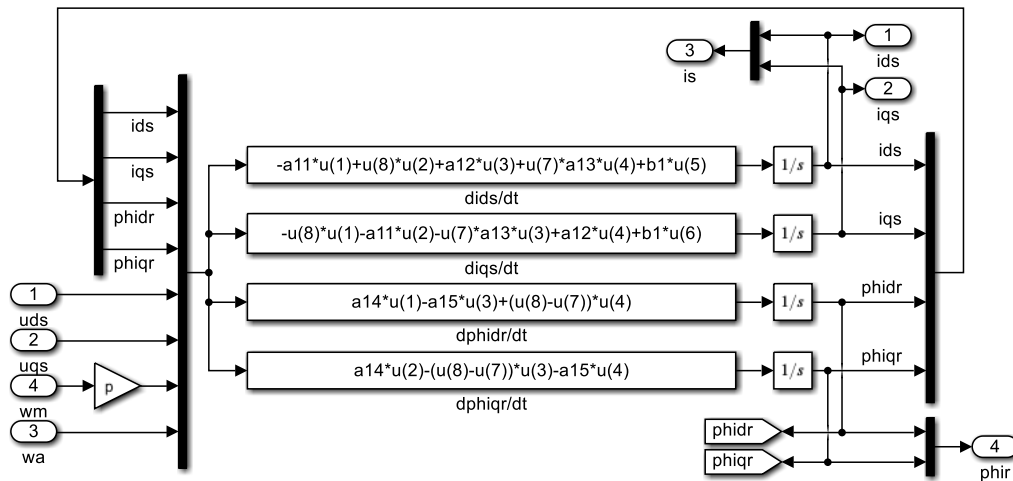
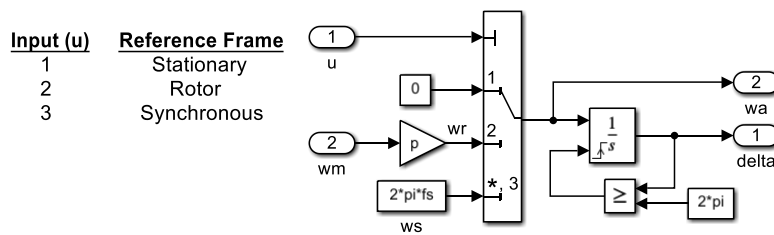


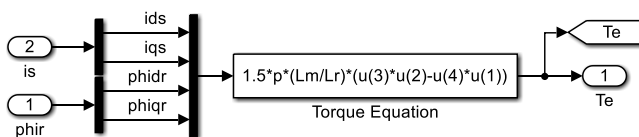
Figure 7. Simulink model of a symmetrical three-phase induction machine



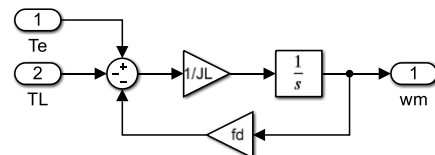
(a) State-space model #2



(b) Reference frame selector



(c) Torque calculator



(d) Equation of motion

Figure 8. Simulink models of subsystems in the machine model

7. Simulation Studies

All the simulation studies on the presented machine models are realized in Matlab environment. The schematic simulation model and each sub-models of the machine given in Fig. 5 are created by using the blocks under Simulink library. Fig. 7 shows the simulation model of an induction machine, where its subsystem models are separately given in Fig. 8. An induction machine with 220/380V, 50Hz, 2.2kW is examined in the simulation studies. The equivalent circuit parameters are given in Table 2. The following can be said for this simulation model:

- The phase transformation is carried out by using the non-power-invariant form of \mathbf{C}_1 ; that is, while the coefficient c in Eq. (12) is taken as $2/3$ in the transformation from abc to $\alpha\beta$, $\mathbf{C}_1^{-1} = \mathbf{M}^t$ is used in the inverse transformation from $\alpha\beta$ to abc .
- The transformation angle for $\alpha\beta$ to dq and vice versa is determined under the "Reference Frame Selector" subsystem. The stationary, rotor, and synchronously rotating reference frames can be chosen when the input u is 1, 2, and 3, respectively.
- Model #2 among the state-space models in Table 1 is simulated; that is, the components of $\vec{\mathbf{i}}_s$ and $\vec{\Psi}'_r$ space-phasors are selected as the state variables. In this case, the auxiliary model parameters seen in Fig. 8a are as follows:

$$a_{11} = \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{1 - \sigma}{\sigma \tau_r} \quad , \quad a_{12} = \frac{L_m}{\sigma L_s L'_r} \frac{1}{\tau_r}$$

$$a_{13} = \frac{L_m}{\sigma L_s L'_r} \quad , \quad a_{14} = \frac{L_m}{\tau_r} \quad , \quad a_{15} = \frac{1}{\tau_r} \quad , \quad b_1 = \frac{1}{\sigma L_s}$$

- The developed torque is calculated by Eq. (58.c). Because this torque equation is expressed in terms of the state variables of Model #2. In addition, since the non-power-invariant form of \mathbf{C}_1 is applied in the phase transformation, the torque constant k is taken as $3/2$. The mechanical rotor speed is calculated by solving Eq. (59) under the "Equation of Motion" subsystem.

8. Results and Discussions

The simulations were realized for two case studies. Firstly, the free acceleration characteristic of the machine and secondly, the dynamic performance during sudden changes in the load torque are examined. For both cases, the stator windings are supplied by the rated and balanced voltages. The torque vs. speed characteristic and the machine variables during free acceleration are shown in Figs.

9a and 10a, respectively. Since the machine is initially at rest and the rated voltage is applied, the starting current and thusly the starting torque are considerably greater than their rated values. The friction and windage losses are so small that they can be neglected. Hence, the rotor shaft accelerates up to around synchronous speed and the produced torque is almost zero at this speed.

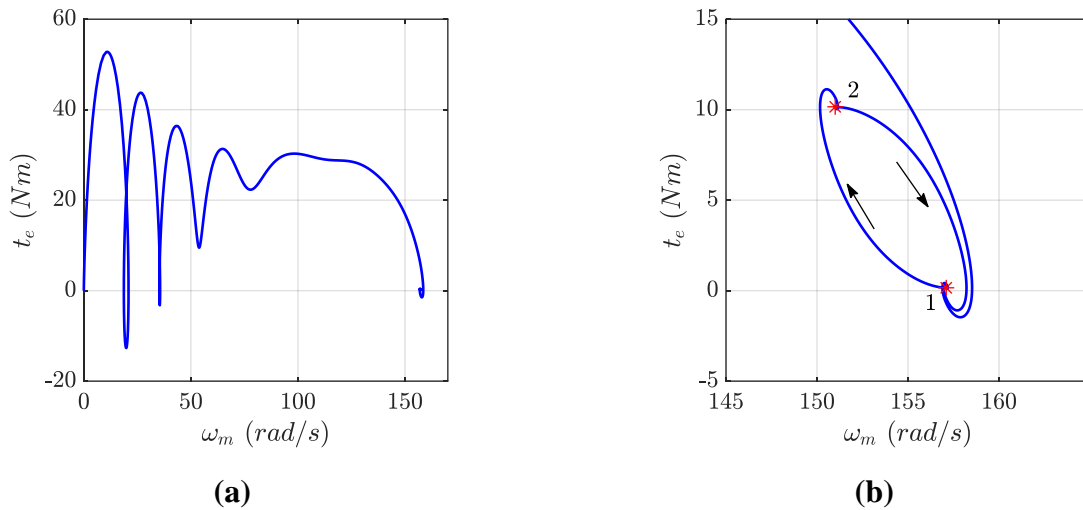


Figure 9. Torque-speed characteristics; (a) during free acceleration, (b) during step changes in load torque from zero to 10 Nm to zero

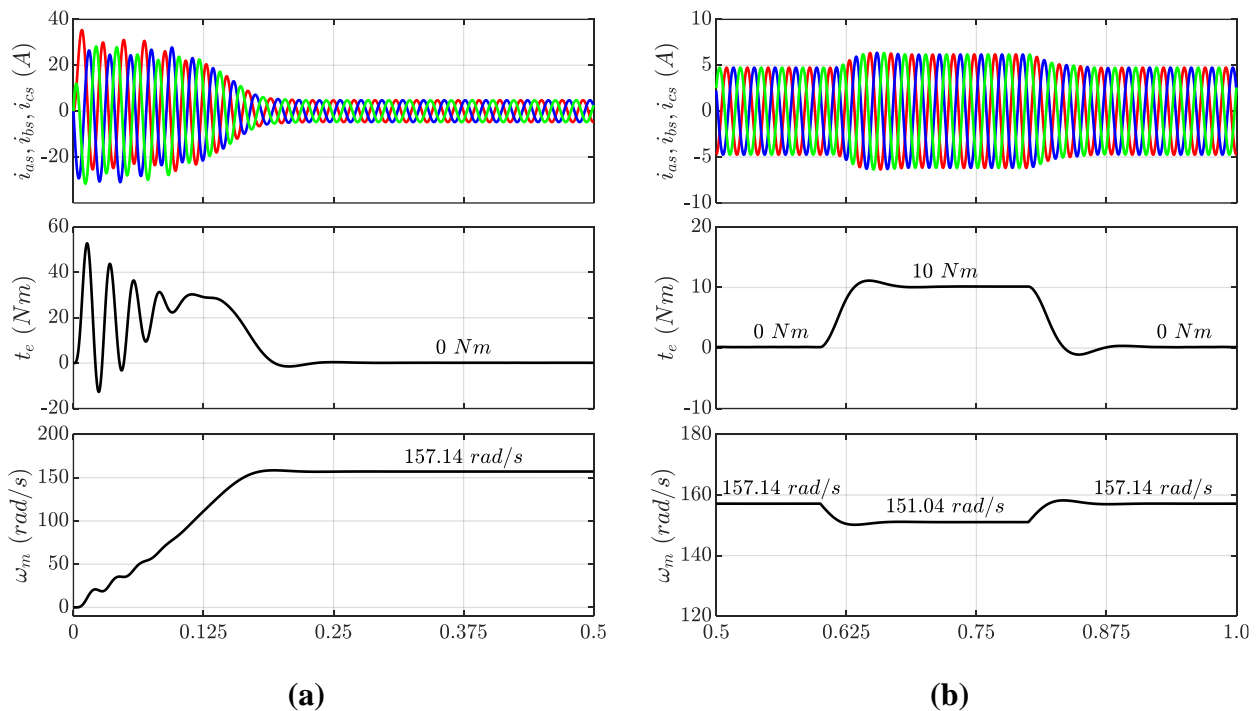


Figure 10. Machine currents, rotor mechanical speed, and electromagnetic torque; (a) during free acceleration, (b) during step changes in load torque from zero to 10 Nm to zero

The dynamic behavior of the machine during sudden changes in the load torque is shown in Fig. 10b. Initially, (before changing the load torque), the machine is operating at synchronous speed.

The load torque is first stepped up from zero to 10 Nm and for a while, the machine is allowed to move to this new operating point. Next, the load torque is again stepped down from 10 Nm to zero. The machine returns to its original operating point. The transition trajectories between these two operating points can be seen from the torque-speed characteristic in Fig. 9b. The transition directions between the two operating points are also indicated by the arrows. Due to the characteristics of the examined machine, the machine variables approximate each operating point in an overdamped way.

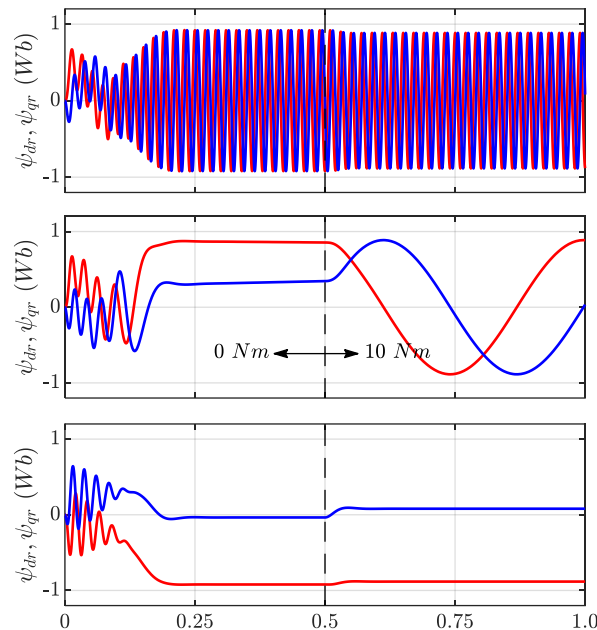


Figure 11. Variations of rotor flux-linkage components in the stationary, rotor and synchronously rotating reference frame, respectively (from top to bottom)

Finally, it will be instructive to observe the d and q components of the machine variables in various reference frames. Fig. 11 shows the components of the rotor flux-linkage in the stationary, rotor, and synchronous reference frames during two operating conditions. All the stator and rotor quantities change sinusoidally with synchronous speed in the stationary reference frame. However, these are in the form of dc quantities in the synchronous reference frame. This is respectively evident from the top and bottom figures of Fig. 11. The remaining middle figure shows the variation of the rotor flux-linkage in the rotor reference frame. These quantities change sinusoidally with slip speed. The sinusoidal changes occur in the range of a long period of time as the slip is very small initially. Under the load torque of 10 Nm, the slip increases compared to the no-load condition. Thus, the changes of these components become more pronounced depending on the increasing slip speed.

9. Conclusions

This study presents a mathematical investigation on the dynamic models of a symmetrical three-phase induction machine. All the primitive machine equations are derived in relatively simple terms by using the idea of rotating reference frame. Moreover, the ready-to-use advanced machine equations are derived in the arbitrary reference frame. The evolution of machine equations from primitive to advanced forms is presented as comprehensibly as possible and in a more compact form. This study also proposes three different state-space models derived from the advanced machine equations in the arbitrary reference frame. It is shown how to transform these state-space models from the arbitrary reference frame to the stationary, rotor, or synchronous reference frames. A general simulation block diagram is further presented which can be used in all the reference frames without any modifications to its structure. The given machine model and reference frames are discussed through some simulation studies, and the expected results are achieved. In future work, the development of vector control methods for the control of induction machines as well as observer designs for flux and speed estimation can be discussed comprehensively using the given machine models.

Statement of Research and Publication Ethics

The authors declare that all the rules required to be followed within the scope of "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" have been complied with in all processes of the article, that The Black Sea Journal of Science and the editorial board have no responsibility for any ethical violations that may be encountered, and that this study has not been evaluated in any academic publication environment other than The Black Sea Journal of Science.

References

- Abu-Rub, H., Iqbal, A., and Guzinski, J. (2012). *High performance control of ac drives with Matlab/Simulink models*. West Sussex, UK: John Wiley & Sons.
- Akherraz, M. (1997). Pspice-assisted dynamic modeling and simulation of induction motor drives. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record* (pp. MB1/8.1-MB1/8.3). Milwaukee, WI, USA.
- Brereton, D. S., Lewis, D. G., and Young, C. G. (1957). Representation of induction-motor loads during power-system stability studies. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part-III: Power Apparatus and Systems*, 76(3), 451-460.
- Bose, B. K. (2002). *Modern power electronics and ac drives*. New Jersey, NJ: Prentice Hall.
- Krause, P. C., and Thomas, C. H. (1965). Simulation of symmetrical induction machinery. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-84(11), 1038-1053.
- Krause, P. C., Wasynczuk, O., and Sudhoff, S. D. (2002). *Analysis of electric machinery and drive systems* (2nd ed.). New Jersey, NJ: IEEE Press.
- Krishnan, R. (2001). *Electric motor drives – Modeling, analysis, and control*. New Jersey, NJ: Prentice Hall.
- Kron, G. (1951). *Equivalent circuits of electric machinery*. New York, NY: John Wiley & Sons.

- Lee, R. J., Pillay, P., and Harley, R. G. (1984). D,Q reference frames for the simulation of induction motors. *Electric Power Systems Research*, 8(1), 15-26.
- Li, Q., and Hu, J. (2010). Simulation model of induction motor based on Labview. *Third International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems* (pp. 273-276). Shenyang, China.
- Lipo, T. A., and Consoli, A. (1984). Modeling and simulation of induction motors with saturable leakage reactances. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-20(1), 180-189.
- Melkebeek, J. A. (2018). *Electrical machines and drives – Fundamentals and advanced modelling*. Springer International Publishing.
- Novotny, D. W., and Lipo, T. A. (1996). *Vector control and dynamics of ac drives*. New York, NY: Oxford University Press.
- Ozpineci, B., and Tolbert, L. M. (2003). Simulink implementation of induction machine model – A modular approach. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference* (pp. 728-734), Madison, WI, USA.
- Park, R. H. (1929). Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis – part I. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 48(3), 716-727.
- Q'Rourke, C. J., Qasim, M. M., Overlin, M. R., and Kirtley, J. L. (2019). A geometric interpretation of reference frames and transformations: dq0, Clarke, and Park. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 34(4), 2070-2083.
- Shi, K. L., Chan, T. F., and Wong, Y. K. (1997). Modelling of the three-phase induction motor using Simulink. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record* (pp. WB3/6.1-WB3/6.3). Milwaukee, WI, USA.
- Slemon, G. R. (1988). Modelling of induction machines for electric drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 25(6), 1126-1131.
- Stanley, H. C. (1938). An analysis of the induction machine. *Electrical Engineering*, 57(12), 751-757.
- Vas, P. (1998). *Sensorless vector and direct torque control*. New York, NY: Oxford University Press.
- Wack, P. (2011). *Dynamics and control of electrical drives*. Chennai, India: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Chemical Profile and Antioxidant Activity of Giresun Quality Hazelnut Skin

Sibel KACMAZ^{1*}, Evren ALTIOK²

Abstract

Hazelnut skin is the thin and brown outer tissue layer, completely surrounds the hazelnut kernel and is released as a food by-product during the roasting process. Beyond its diverse composition including dietary fiber, phenolic compounds, flavonoids, vitamins, and minerals, hazelnut husk demonstrates substantial antioxidant activity. The chemical composition and the nutritional value of hazelnut and hazelnut skin can vary according to hazelnut varieties and the region where they grow. In this study, the chemical profile and antioxidant activity of skins from hazelnut grown in Giresun in the Black Sea Region of Türkiye were determined and its potential for use as a functional food component was investigated. Hazelnut skin samples extracted with different solvents such as acetone/methanol and ethanol/methanol, were found to have total phenolic compounds equivalent to 437.45 GAEq (mg GA/g sample) and 307.38 GAEq (mg GA/g sample), respectively. The fat content of the hazelnut skin was found to be 35.1% by mass on the dry matter, and the ratio of dietary fiber was found to be 53.5%. In addition, the total antioxidant value was calculated in samples extracted with different solvents that was found at 3.38 ± 0.2 mmol TE/g – 2.67 ± 0.1 mmol TE/g, respectively. Functional cake enriched with hazelnut skin was made, and sensory analysis studies of this functional product were also carried out.

Keywords: Hazelnut skin, Giresun, Antioxidant activity, Total phenolics.

Giresun Kalite Fındık Zarının Kimyasal Profili ve Antioksidan Aktivitesi

Öz

Fındık zarı, fındığı tamamen saran ince ve kahverengi dış doku tabakasıdır ve kavurma işlemi sırasında gıda yan ürünü olarak açığa çıkar. Genellikle kavurma işleminden sonra fındıktan ayrılır ve fındık endüstrisindeki yan ürünlerden biridir. Fındık zarı diyet lifi, fenolik bileşenler, flavonoidler, vitamin ve mineral gibi birçok faydalı bileşen içerir ve yüksek antioksidan kapasiteye sahiptir. Fındık ve fındık zarının kimyasal bileşimi ve besin değeri fındık çeşidine ve yetiştirildiği bölgeye göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu çalışmada, Türkiye'nin Karadeniz Bölgesi'nde Giresun'da yetiştirilen fındıklardan yan ürün olarak elde edilen fındık zarının kimyasal profili ve antioksidan aktivitesi belirlenerek fonksiyonel gıda bileşeni olarak kullanım potansiyeli araştırılmıştır. Aseton/metanol ve etanol/metanol ile ekstrakte edilen fındık zarı örneklerinde sırasıyla 437.45 GAEq (mg GA/g örnek) ve 307.38 GAEq (mg GA/g örnek) eşdeğerinde toplam fenolik madde olduğu bulunmuştur. Fındık zarına ait toplam yağ miktarı kuru madde üzerinden kütlece %35,1 iken, diyet lifi oranı %53,5 olarak bulunmuştur. Ayrıca, Farklı çözücülerle ekstrakte edilen fındık zarı örneklerinde toplam antioksidan değeri 3.38 ± 0.2 mmol TE/g ve 2.67 ± 0.1 mmol TE/g fındık zarı eşdeğeri olarak hesaplanmıştır. Fındık Zarı ile zenginleştirilmiş fonksiyonel kek üretimi yapılmış, ayrıca bu fonksiyonel ürünün duyu analizi çalışmaları yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fındık zarı, Giresun, Antioksidan aktivite, Total fenolikler.

¹Giresun University, Engineering Faculty, Department of Food Engineering, Giresun, Türkiye, sibel.kacmaz@giresun.edu.tr

²Giresun University, Engineering Faculty, Food Engineering Department, Giresun, Türkiye, evren.altiok@giresun.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 23.04.2024

Kabul/Accepted: 03.07.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Introduction

Hazelnuts (*Corylus avellana* L.) have the largest share among Türkiye export products and cover almost all of the agricultural areas of the Black Sea Region of Türkiye (TMO, 2012). Hazelnuts and their components such as hazelnut oil, dietary fibers, and hazelnut skin have a good and essential source of human nutrition. Hazelnut skin is the thin and brown outer tissue layer that completely surrounds the hazelnut kernel and it is separated from the hazelnut after roasting process and a form one of the by-products in the hazelnut industry. They are mostly arising as waste materials or used as animal feed by most companies (Uzuner and Cekmecelioğlu, 2014; Del Rio et al., 2011).

The predominant constituent of hazelnut skin is dietary fiber (Tuncgil, 2020), with additional presence of various beneficial nutrients such as phenolic compounds and flavonoids, accompanied by a notable antioxidant capacity. In addition to these properties, hazelnut skin offers the potential to be used as a natural coloring additive and provides a natural brown color to foods (Özdemir et al., 2014; Balasundram et al., 2002).

The chemical composition of hazelnuts and other by-products such as hazelnut skin, hard shell, green leafy cover and tree leaf vary depending on the region where they were grown. In the literature, some studies have been conducted on hazelnut and by-products from different hazelnut varieties and different regions (Pfeil et al., 2024; Pelvan et al., 2018; Yuan et al., 2018; Xu et al., 2012; Locatelli et al. 2010). Even Though, eighteen different hazelnut varieties cultivated in Türkiye, Giresun Tombul hazelnuts is a type of grown in Giresun province, is grading as high-quality (premium quality) (Islam, 2018). It has been previously reported that the hazelnuts have a rich source of polyphenolic components, unsaturated fatty acids, essential amino acids, vitamins and minerals, and also have important flavonoids and high antioxidant activity exhibiting components (Alasalvar et al., 2003; 2009a; 2009b)

The current study examines the chemical composition and constituents of hazelnut skins (HS) sourced as a by-product from Giresun quality hazelnuts cultivated in the Black Sea Region of Türkiye, and explores their potential utility as functional ingredients in diverse food formulations.

2. Materials and Methods

2.1. Chemicals and Materials

Acetone, ethanol, methanol, and n-hexane were of reagent-grade level and purchased from Sigma–Aldrich. All chemicals gallic acid, Folin–Ciocalteu, potassium persulfate, ABTS reagent [2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)] were supplied by Sigma Aldrich (Steinheim,

Germany). Trolox [6-hydroxy- 2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid], Sodium Carbonate, Acetic Acid, Sulfuric Acid and citric acid monohydrate were purchased from Merck (Germany). Ultra-pure water was used throughout the experiments (Milli Q-System, Millipore, Milford, MA, USA).

Hazelnut skin samples (Tombul variety) used in the study were kindly provided from Fiskobirlik Ltd. (Giresun province, Türkiye), at the harvest season of 2020. They were obtained from Giresun Quality hazelnut kernels (*Corylus avellana* L.), cultivated in areas of Giresun province. Brown skin of hazelnuts was separated after roasting at 150 °C for 30 min from dried unshelled hazelnuts and ground using a domestic type grinder (Delonghi KG49 grinder). The samples were stored in the dark at -20 °C until analyzed. Ground hazelnut skin was chemically characterized for its basic composition.

2.2. Proximate Composition Analysis of Hazelnut Skin

Moisture content was determined by using Standard AACC (American Association of Cereal Chemists) methods (AACC, 2000). Ground hazelnut skin was used for moisture determination. The device's special weighing cup is placed on the device (Ohaus Mb35). Approximately 5 g of the ground sample is placed in a container and distributed homogeneously. Drying was achieved at 110 (\pm 2) °C by selecting the standard program.

Water activity (a_w) was determined by using Water Activity Meter (Aqua Lab Dew Point Water Activity Meter 4). The ground sample is evenly spread within the sample chamber to form a mass of uniform thickness that completely covers the base. A sample is then placed in the device calibrated with a NaCl/H₂O saturated solution containing salt crystals, and measurements are conducted at 20°C. Each measurement takes approximately 10-15 minutes, during which equilibrium is achieved.

Color measurement of hazelnut skin was determined by using the Hunter method (Hunterlab Miniscan Ez 4500I). For the analysis, ground hazelnut skin is placed inside a petri dish in a manner that covers the entire surface of the dish. Subsequently, the petri dish is placed on a white background, and readings are taken using the Hunter device. The color of ground hazelnut skin was investigated via the L* (lightness), a* (redness) and b* (yellowness) and ΔE (color difference) parameters.

Total lipid contents were determined by extracting the crude oil with hexane (Merck, Darmstadt, Germany) from dried hazelnut samples using a Soxhlet extraction apparatus (Şimşek Labortechnik PI 400, Türkiye). 5 g of the sample is weighed onto a coarse filter paper, which is then folded and placed into a cartridge, with cotton placed on top. The cartridge is then inserted into the Soxhlet extraction unit at 130 °C for 6 hours. Defatted samples were used for protein and ash contents determinations.

Total protein contents were determined according to the Kjeldahl Method using an automatic distillation unit (UDK-149; VELP). Total protein content was calculated by multiplying the total nitrogen content by a factor of 6.25 ($N \times 6.25$) according to Association of Official Analytical Chemists methods (AOAC, 1990). Ash contents were determined by weight difference after combustion of the samples at 550 °C in a furnace (Protherm furnaces, Ankara, Turkey) for 14 h (Tuncil & Celik, 2019). All proximate analyses were triplicate.

2.3. Determination of Total Phenolic Content (TPC)

The Folin-Ciocalteu method, widely favored for determining total phenolic content, relies on measuring absorbance based on the color intensity formed through the Folin reactive agent (Huang et al., 2005). This method operates on the principle of phenolic compounds, which are soluble in water and other organic solvents, forming colored complexes with the Folin reagent in an alkaline environment (Slinkard and Singleton, 1977). Its extensive application stems from its methodological ease, reproducibility, and strong correlation with alternative techniques. The results of this method are typically expressed in terms of a standard phenolic compound, often equated to gallic acid and catechin.

Total phenolic content (TPC) of hazelnut skin was determined using sequential extraction procedure (SEP) in order to evaluate the solvent effects of extraction process. In the sequential extraction procedure, hazelnut skin samples were first treated with acetone or ethanol solvents, and then the solid part was extracted again with methanol as triplicate.

Total phenol determination was carried out using the Folin-Ciocalteu colorimetric method. In the analysis, 0.5 mL of the sample was mixed with 2.5 mL of freshly prepared 1N Folin solution and left in the dark for 2.5 minutes. Then, 7% Na_2CO_3 solution was added, and the mixture was left to react in the dark for 1 hour. The color intensity resulting from phenolic components was determined by measuring absorbance values at 725 nm using a UV-Visible Spectrophotometer (Mapada Uv-6100psc). The total phenol value was expressed in terms of gallic acid equivalents (GAE) using a calibration curve constructed with gallic acid.

2.4. Determination of The Total Antioxidant Activity

Antioxidant activity of hazelnut skin was determined using ABTS method. Hazelnut skin was extracted with acetone/methanol and ethanol/methanol using sequential extraction procedure. Trolox equivalent antioxidant capacity (TEAC) determination is a method based on the radical scavenging effects of antioxidant components present in the extract. In this method, the ABTS⁺ radical formed

by oxidation with 7 mM ABTS/2.45 mM K₂S₈O₂ reaction gives a color that can be determined spectrophotometrically at 734 nm (Huang et al., 2005; Re et al., 1999; Serpen et al. 2008). The initial absorbance value is adjusted to 0.70 (± 0.03), and the color loss caused by the extract added to the solution at appropriate dilutions (at a concentration that can inhibit the blank absorbance by 20-80%) is monitored kinetically (Mapada Uv-6100psc). Through a calibration curve generated with Trolox (0–600 $\mu\text{g/mL}$), antioxidant activity determination is achieved as mmol Trolox equivalent (TE) per gram of sample.

2.5. Dietary Fiber Analyses

Dietary fiber analyses were conducted using the Total dietary fiber Kit (Merck). The working principle of the Total Dietary Fiber analysis kit was based on the combination of enzymatic and gravimetric methods. Since the sample contained more than 5% fat, the fat in the sample was removed. The sample was shaken three times with 25 mL of petroleum ether and then filtered. Subsequently, the obtained fat-free sample was dried at 70°C for 2-3 hours. The fat-free sample was ground to a particle size of 0.3-0.5 mm mesh.

The analysis was performed through the following stages:

A. Enzymatic hydrolysis

- 1g of the sample was weighed into 50 mL Falcon tubes. Then, 40 mL of MES/TRIS solution was added onto the sample, and the solution is vortexed.
- 50 μl of α -amylase solution was added, vortexed, and incubated at 95-100°C for 30 minutes. The solution was then cooled to 60°C.
- 50 μl of protease solution was added, vortexed, and incubated at 60°C for 30 minutes.
- 5 mL of 0.561 N HCl was added to adjust the solution's pH to the range of 4.1-4.8.
- 150 μl of amyl glucosidase solution was added, vortexed, and incubated at 60°C for 30 minutes.

B. Total dietary fiber analysis

- After the enzymatic digestion process was completed, the sample was transferred to a beaker containing 220 mL of ethanol at 60°C.
- The solution was left to stand for 1 hour with the lid closed
- It was then filtered through previously tared Gooch crucibles under vacuum.
- The precipitate was washed with 78% ethanol (3x15 mL), 95% ethanol (2x10 mL), and acetone (3x10 mL).
- It was left in an oven at 105°C overnight, Weight is recorded.

2.6. Functional Cake Production Enriched with Hazelnut Skin

Functional cake enriched with hazelnut skin was made as homemade style. The recipe used for the production of functional cake is given in Table 1. While preparing cakes enriched with hazelnut skin, 4 different samples were prepared together with the control sample by changing the hazelnut skin ratio. All used materials quantities and applied conditions as the heat treatments were kept at the same in these samples. The only changed parameter between products was the amount of hazelnut skin. In this way, the sensory analysis was applied to see the effects of hazelnut skin on the product. The ingredients in the recipe were prepared by weighing and mixed with a mixer (Tefal, Masterblend Pro Activ Flow Technology). 30 g portions were taken from the mixture and hazelnut skin were added into each mixture as 7%, 10%, 13% by weight. The mixtures were poured into cake molds and baked in the oven (Luxell, granitech) initially heated at 160°C for a 30 min.

Table 1. Production recipe for cake

Ingredients	Quantity
Sugar	250 g
Eggs	3 pieces (L size)
Milk	200 mL
oil	160 mL
Baking powder	10 g
Vanilla powder	5 g
White Flour	200 g

2.7. Sampling Procedure and Direct Measurement of The Antioxidant Capacity in Functional Products

Functional nutritive properties in cakes formulated to include hazelnut skin were monitored by comparing the antioxidant capacities acquired directly from the samples. The homogeneous distribution of hazelnut skin within the products is very important. In this process, sampling had to be done meticulously, so a representative sample was obtained using cluster sampling. The sample with reduced particle size was divided into 4 different clusters in equal weights, and samples were taken from all these clusters and brought together. This process was repeated to create four new clusters from the combined sample, and samples were again taken from each cluster, pooled, and utilized for measurements. All measurements were conducted in triplicate to ensure reliability and consistency. The decolorization of the solution containing 1.5 mL of ABTS⁺ reagent adjusted to an

absorbance of 1.797, upon the addition of 20 ± 1.5 mg of cake or cookie samples, was monitored. Measurements were intermittently taken from the mixture, which was centrifuged at 3000 rpm for 3 minutes, with absorbance recorded at 734 nm, and the reaction continued accordingly. Monitoring lasted for 4.5 hours in cake samples with a negative control also included in the observation.

2.8. Statistical analysis

All experiments were performed in triplicate, all quantitative data are expressed as mean values of at least three analytical determinations with the standard deviation.

3. Results and discussion

3.1. Proximate composition of hazelnut skin

In this study, chemical analyses such as total phenolic content analysis (TPC), total antioxidant activity analysis, color determination, water activity tests, moisture, protein, total dietary fiber and total oil content were conducted to determine the chemical and physical properties of Giresun quality hazelnut skin.

Table 2 shows proximate composition of roasted hazelnut skin. Protein (7.10%), moisture (4.8%), water activity (aw) (0.3517) and ash (1.8%) contents of hazelnut skin were found a proximate composition similar to those reported by Locatelli et al. (2010), Anil (2007), and Ozdemir et al., 2014. Roasted hazelnut skin color was determined using the parameters, L* (lightness), a* (redness) and b* (yellowness) and also ΔE (color difference). The L*, a* and b* values were found 32.20 ± 0.66 , 11.29 ± 0.12 and 16.57 ± 0.15 , respectively. Hazelnut skin exhibited brown color intensity. This shows that it can be used as a functional ingredient when brown coloring agent is needed.

Total dietary fiber was found to be the main component of hazelnut skin with a contribution of 53.5%. High dietary fiber amount has an importance in terms of health benefits; therefore, although hazelnut skin are waste materials of hazelnut industry, they can be considered as a functional food ingredient in food formulations.

Total lipid content of hazelnut skin was $35.1 \pm 1.2\%$ which almost 2-times higher than that reported by others (Anil, 2007; Özdemir et al. 2014). These differences could be attributed from differences in the cultivated land of hazelnuts. Additionally, when different techniques or roasting processes are used to remove the hazelnut skins, it is known that the skin absorbs the oil during the process (Alasalvar et al., 2009, Pelvan et al., 2018), as well as the amount of oil absorbed by the skin could possibly was impacted by different roasting procedures.

Table 2. Chemical composition of hazelnut skin

Component		Amount		
Moisture		4.8 ± 0.04%		
Total dietary fibers		53.5 ± 1.2%		
Proteins		7.10 ± 0.3%		
Oil (% Mass on Dry Matter)		35.1 ± 1.2%		
Ash		1.7 ± 0.1%		
Total phenolic content		437.5 ± 7 mg GAE/g -307.4 GAEq		
Total antioxidant capacity		3.38 ± 0.2 mmol TE/g – 2.67 ± 0.1 mmol TE/g		
Color measurement values (Average ± SD)	L* (lightness)	a* (redness)	b* (yellowness)	
	32.20 ± 0.66	11.29 ± 0.12	16.57 ± 0.15	
Water activity (aw)		0.3517		

Results are expressed as mean ± SD (n = 3).

Total phenolic content (TPC) of roasted hazelnut skin in acetone/methanol and ethanol/methanol extract (See Figure 1) were found to 437.5 mg GAE/g and 307.4 GAEq (mg GA / g sample), respectively. Monagas et al. (2009) and Ozdemir et al. (2014) was studied with different cultivated hazelnut skin and reported total phenolic content of 107 mg GAE/g and 233.7 mg GAE/g, respectively. This difference might be because of the various hazelnut component, extraction conditions and extraction solvents. However, total phenolic content of hazelnut skin was found to be higher compared with the other nut skins such as almond (22.8 mg GAE/g), peanut (73.9 mg GAE/g), walnut (101 mg GAE/g) and pistachio (116.32 mg GAE/g) (Monagas et al., 2009; Salcedo et al., 2010; Tomaino et al., 2010) (See Table 1, Figure 1).

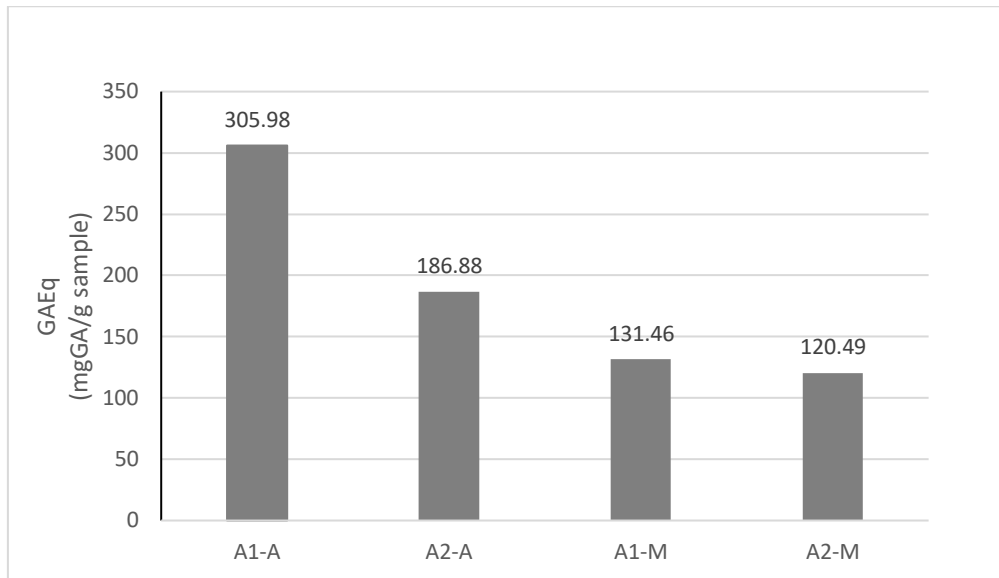


Figure 1. Total Phenolic content of hazelnut skins in different extraction solvents A1-A: Extraction with acetone, A2-E: Extraction with ethanol, A1-M: Extraction with methanol after acetone, A2-M: Extraction with methanol after ethanol

Total antioxidant of hazelnut skin was determined in acetone/methanol and ethanol/methanol extract that was found at 3.38 ± 0.2 mmol TE/g – 2.67 ± 0.1 mmol TE/g, respectively (Table 1, Figure 2). The highest antioxidant value in the obtained extracts was achieved in the extraction with acetone + methanol solvents. Total antioxidant capacity of hazelnut skin was found higher to those reported by Shahidi et al., 2007; and Ozdemir et al. 2014. However, total antioxidant capacity of hazelnut skin was higher than those of other nut skins such as almond, peanut, walnut and pistachio (Monagas et al., 2009; Salcedo et al., 2010; Tomaino et al., 2010).

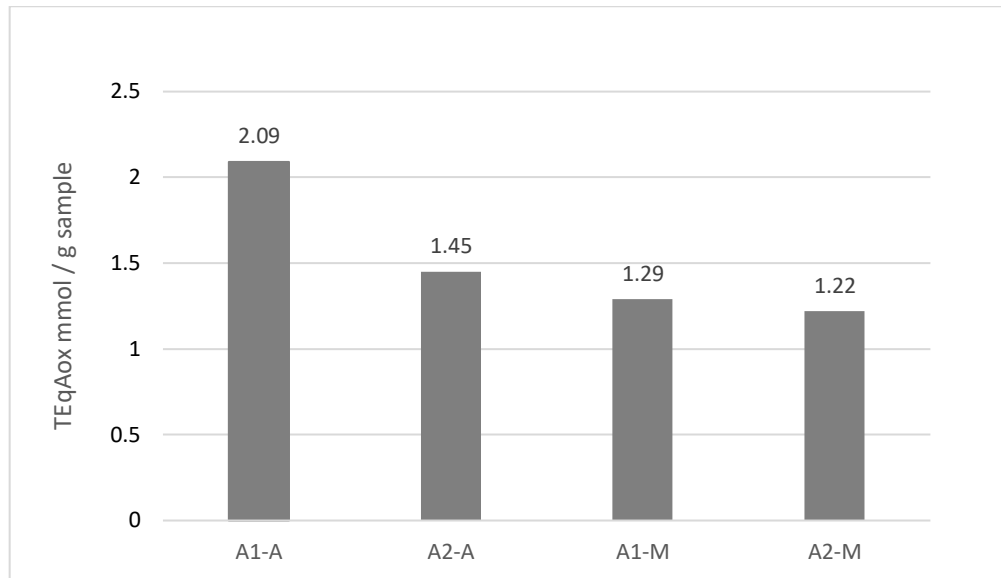


Figure 2. Antioxidant activity of hazelnut skins in different extraction solvents A1-A: Extraction with acetone, A2-E: Extraction with ethanol, A1-M: Extraction with methanol after acetone, A2-M: Extraction with methanol after ethanol

3.2. Functional Cake Enriched with Hazelnut Skin and Sensory analysis

Hazelnut skin (HS) were used as functional food ingredient to enrich the cake. By changing the hazelnut skin ratio (%7, %10 and %13), three (3) different functional cake samples were prepared as well as the control sample (see Figure 3).

The direct measure of the antioxidant capacity of functional cake enriched with hazelnut skin was made. Hazelnut skin addition led to a significant increase in the reduction rate of ABTS⁺ reagent, as depicted in the figure 4. It was observed that the antioxidant capacity of the cakes increased by 3 to 8 times with the addition of HS, depending on the amount used. Notably, there was a strong correlation (0.982) between the quantity of added HS and the extent of decolorization.

In this way, the sensory analysis was applied on the functional product to see the hazelnut skin effects on flavor. The sensory analysis test conducted with 30 participants. The results show that the most popular and frequently preferred product was 7% hazelnut skin containing cake among the cake products with 7%, 10% and 13% hazelnut skin. Additionally, 60% of the participants stated that they liked the product and wanted to consume it.

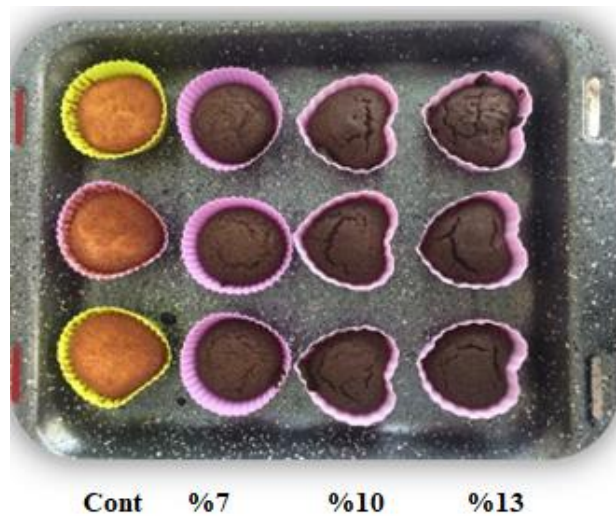


Figure 3. Cake Enriched with Hazelnut Skin,
Cont: Control samples, and %7, %10 and %13 Enriched with Hazelnut Skin

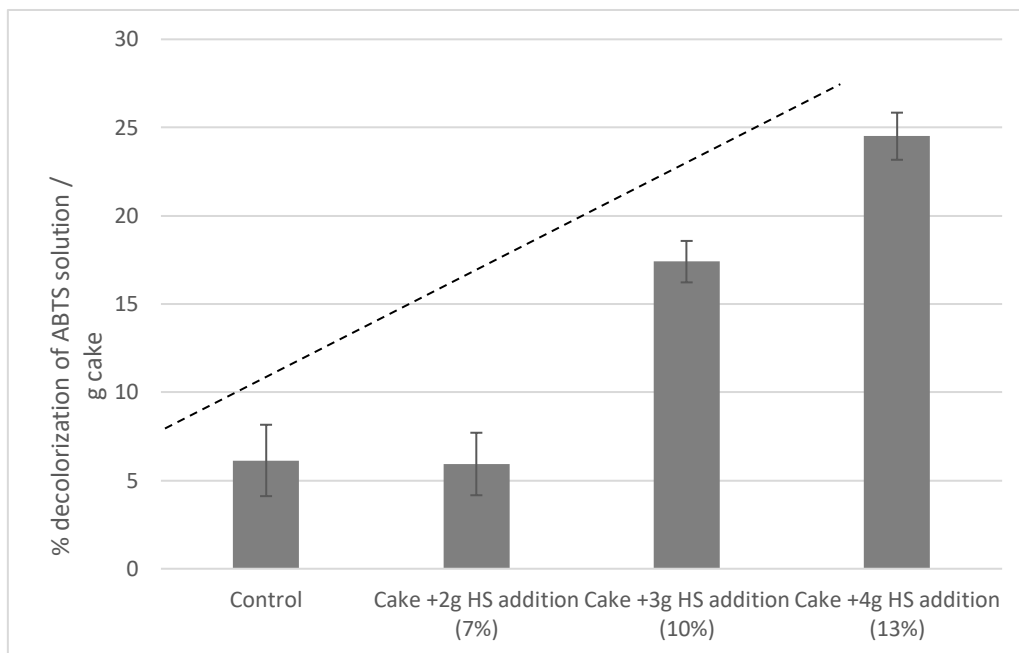


Figure 4. Effect of HS addition on the antioxidant capacity of the products.

4. Conclusions

In this study, the chemical composition of Giresun Quality hazelnut skins (HS) and usability as functional food ingredient was evaluated. Hazelnut skin (HS) was obtained as a by-product in the roasting process of Giresun Quality hazelnuts. Total phenolic compounds in acetone/methanol and ethanol/methanol extract was found at 437.45 GAEq (mg GA/ g sample) and 307.38 GAEq (mg GA / g sample), respectively. The fat content of the hazelnut skin was determined 35.1% by mass on the

dry matter and the dietary fiber was 53.5%. Total antioxidant was found at 3.38 ± 0.2 mmol TE/g in acetone/methanol and 2.67 ± 0.1 mmol TE/g as equivalent in ethanol/methanol extract. Additionally, Hazelnut skin (HS) was used as functional food ingredient to enrich the cake. Concluding, Giresun Quality hazelnut skins (HS) can be considered a low-cost natural source of antioxidants, dietary fiber and also colorant and it has a potential in application as functional ingredient of various food products.

Acknowledgements

This study was supported by Scientific Research Projects Unit of Giresun University under Grant FEN-BAP-A-150219-12.

Statement of Conflicts of Interest

There is no conflict of interest between the authors.

Statement of Research and Publication Ethics


The authors declare that this study complies with Research and Publication Ethics.

References

- American Association of Cereal Chemists (AACC) (2000). *Approved Methods of American Association of Cereal Chemists*, 10th ed., St. Paul, Minn., USA.
- Alasalvar, C., Amaral, J. S., Satir, G., and Shahidi, F. (2009a). Lipid characteristics and essential minerals of native Turkish hazelnut varieties (*Corylus avellana* L.). *Food Chemistry*, 113(4), 919–925.
- Alasalvar, C., Karamac, M., Kosinska, A., Rybarczyk, A., Shahidi, F., and Amarowicz, R. (2009b). Antioxidant activity of hazelnut skin phenolics. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(11), 4645–4650.
- Alasalvar, C., Shahidi, F., Liyanapathirana, C. M., and Ohshima, T. (2003). Turkish Tombul Hazelnut (*Corylus avellana* L.). 1. Compositional characteristics. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(13), 3790–3796.
- Anil, M. (2007). Using of hazelnut testa as a source of dietary fiber in breadmaking. *Journal of Food Engineering*, 80(1), 61–67.
- Balasundram, N., Sundram, K., Samman, S., 2006, Phenolic Compounds in plants and agri-industrial by-products: Antioxidant activity, occurrence, and potential uses, *Food Chemistry*, 99, 191–203.
- Del Rio, D., Calani, L., Dall'Asta, M., and Brighenti, F. (2011). Polyphenolic composition of hazelnut skin. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(18), 9935–9941.
- Huang D, Ou B, and Prior RL. (2005). The chemistry behind antioxidant capacity assays. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(6):1841-56.
- Islam, A. (2018). Hazelnut cultivation in Turkey. *Academic Journal of Agriculture*, 7(2), 259–266.
- Locatelli, M., Travaglia, F., Coisson, J.D., Martelli, A., Stevigny, C., and Arlorio, M. (2010). Total antioxidant activity of hazelnut skin (Nocciola Piemonte PGI): Impact of different roasting conditions. *Food Chemistry*, 119(4), 1647–1655.

- Monagas, M., Garrido, I., Lebron-Aguilar, R., Gomez-Cordoves, M. C., Rybarczyk, A., Amarowicz, R., et al. (2009). Comparative flavan-3-ol profile and antioxidant capacity of roasted peanut, hazelnut, and almond skins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(22), 10590–10599.
- Özdemir K. S, Yılmaz C. Durmaz G. Gökmen V. (2014). Hazelnut Skin Powder: A New Brown Colored Functional Ingredient, *Food Research International*, 65(B), 291-297.
- Pelvan, E., Olgun, E. O., Karadag, A., & Alasalvar, C. (2018). Phenolic profiles and antioxidant activity of Turkish Tombul hazelnut samples (natural, roasted, and roasted hazelnut skin). *Food Chemistry*, 244, 102–108.
- Pfeil, J.A., Zhao, Y., McGorin, R.J. (2024). Chemical composition, phytochemical content, and antioxidant activity of hazelnut (*Corylus avellana* L.) skins from Oregon. *LWT*, 201, 116204.
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., and Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9–10), 1231–1237.
- Salcedo, C. L., Lopez de Mishima, B.A., and Nazareno, M.A. (2010). Walnuts and almonds as model systems of foods constituted by oxidisable, pro-oxidant and antioxidant factors. *Food Research International*, 43(4), 1187–1197.
- Serpen, A., Gokmen, V., Pellegrini, N., & Fogliano, V. (2008). Direct measurement of the total antioxidant capacity of cereal products. *Journal of Cereal Science*, 48, 816–820.
- Shahidi, F., Alasalvar, C., and Liyana-Pathirana, C. M. (2007). Antioxidant phytochemicals in hazelnut kernel (*Corylus avellana* L.) and hazelnut byproducts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(8), 1212–1220.
- Slinkard, K., & Singleton, V.L. (1977). Total Phenol Analysis: Automation and Comparison with Manual Methods, *American Journal of Enology and Viticulture*. 28, 49-55.
- TMO (2012). Turkish Grain Board, hazelnut bulletin. <http://www.tmo.gov.tr/Upload/Document/bultenler/2012/10082012findikbultening.pdf> (19.01.2024)
- Tomaino, A., Martorana, M., Arcoraci, T., Monteleone, D., Giovinazzo, C., and Saija, A. (2010). Antioxidant activity and phenolic profile of pistachio (*Pistacia vera* L., variety Bronte) seeds and skins. *Biochimie*, 92(9), 1115–1122.
- Tunçil, Y. E., & Çelik, Ö. F. (2019). Total phenolic contents, antioxidant and antibacterial activities of chia seeds (*Salvia hispanica* L.) having different coat color. *Akademik Ziraat Dergisi*, 8(1), 113-120.
- Tunçil Y. E. (2020). Dietary fibre profiles of Turkish Tombul hazelnut (*Corylus avellana* L.) and hazelnut skin, *Food Chemistry*, 316, 126338.
- Uzuner, S., and Cekmecelioglu, D. (2014). Hydrolysis of hazelnut shells as a carbon source for bioprocessing applications and fermentation. *International Journal of Food Engineering*, 10 (4), 799–808.
- Xu, Y., Sismour, E. N., Parry, J., Hanna, M. A., and Li, H. (2012). Nutritional composition and antioxidant activity in hazelnut shells from US-grown cultivars. *International Journal of Food Science & Technology*, 47(5), 940–946.
- Yuan B., Lu M., Eskridge K. M., Isom L. D., and Hanna M. A. (2018). Extraction, identification, and quantification of antioxidant phenolics from hazelnut (*Corylus avellana* L.) shells. *Food Chemistry*, 244, 7-15.

Ek Parametre İçermeyen Dönüşüm Tekniklerinin Karşılaştırılması ve İki Veri Seti Üzerinde Modellenmesi

Hasan Hüseyin GÜL^{1*} 

Öz

İstatistik literatüründe, yeni dağılım elde etmek için bazı teknikler geliştirilmiştir. Geliştirilen bu teknikler, var olan dağılıma yeni bir veya birkaç parametre ekleyerek oluşturulmaktadır. Parametre eklemek esneklik bağlamında olumlu bir etki yaratırken, parametre tahmini ve diğer istatistiksel çıkarımlarda işlem zorluğunu da beraberinde getirmektedir. Bu noktada son yıllarda araştırmacılar tarafından ek parametre içermeyen yeni dağılım üretme teknikleri önerilmeye başlanmıştır. Bu çalışmada, Dinesh-Umesh-Sanjay (DUS), Logaritmik dönüşüm (LT) ve Kavya-Manoharan (KM) teknikleri ele alınmış ve bu tekniklerin önerilen üstel dağılım versiyonları (DUSE, LTE, KME) üzerinde durulmuştur. Bu dağılımların r . momentleri, moment çıkaran fonksiyonları ve quantile fonksiyonları gibi istatistiksel özellikleri ve en çok olabilirlik tahminleri incelenmiştir. Ayrıca iki veri seti üzerinde tekniklerin modelleme yetenekleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, KM tekniği kullanılarak önerilen KME dağılımının iki veri setini de daha iyi modellediği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Dönüşüm Teknikleri, İstatistiksel Özellikler, En Çok Olabilirlik Tahmini, Üstel Dağılım.

Comparison of Additional Parameter-Free Transformation Techniques and Modelling on Two Data Sets

Abstract

In the statistics literature, some techniques have been developed to obtain new distributions. These techniques are created by adding one or more parameters to the existing distribution. While adding parameters creates a positive effect in terms of flexibility, it also brings processing difficulties in parameter estimation and other statistical inferences. At this point, new distribution generation techniques without additional parameters have been proposed by researchers in recent years. In this study, Dinesh-Umesh-Sanjay (DUS), Logarithmic transformation (LT) and Kavya-Manoharan (KM) techniques are discussed and the proposed exponential distribution versions of these techniques (DUSE, LTE, KME) are examined. Statistical properties of these distributions such as r . moments, moment generating functions, quantile functions and maximum likelihood estimates are analysed. In addition, the modelling capabilities of the techniques are compared on two data sets. As a result, it was found that the KME distribution proposed using the KM technique modelled both data sets better.

Keywords: Transformation techniques, Statistical properties, Maximum likelihood estimation, Exponential distribution.

¹Giresun Üniversitesi, İstatistik Bölümü Fen-Edebiyat Fakültesi, Giresun, Türkiye, hasan.huseyin@giresun.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 24.04.2024

Kabul/Accepted: 14.08.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Giriş

Uzun yıllardır, dağılımların oluşturulması, önerilmesi ve geliştirilmesi için bir yarışın devam ettiğini ve araştırmacıların daha esnek, gerçek yaşam senaryosunda uygulanabilir yeni dağılımlar önermek için yoğun çaba sarf ettiğini görüyoruz. Yaşam dağılımları, gerçek hayat problemlerini analiz etmek ve modellemek için temel oluşturur.

Standart olarak kullanılan dağılımların kısıtları veya istatistiksel sonuç çıkarımlardaki hesaplama zorlukları araştırmacıları yeni dağılım veya dağılım aileleri önermeye teşvik etmiştir. Örneğin, üstel dağılım, yaşam süresi olgularının incelenmesinde çok yapıcı bir rol oynamasına karşın dağılımın kullanımı, sabit hazard oranı nedeniyle oldukça kısıtlayıcıdır. Bunun üstesinden gelmek için Weibull ve Gamma dağılımları yaygın olarak kullanılmakta ve tercih edilmektedir. Bununla birlikte araştırmacılar farklı yapıda verileri modelleyebilmek için farklı şekillerde hazard oranına sahip yeni dağılım veya dağılım aileleri aramaktadır. Literatürde bazı temel dağılımları kullanarak yeni bir dağılım önermek için çeşitli yöntemler vardır.

Bunlardan bazıları; Gupta ve ark. (1998), Nadarajah ve Kotz (2006), Shaw ve Buckley (2007) and Corderio ve ark. (2013). Bu tekniklerden en sık kullanılanı Shaw ve Buckley (2007) tarafından önerilen Quadratic Rank Transmutation Map (QRTM) tekniğidir. Bu teknik kullanılarak; Ahmad ve ark. (2015) tarafından transmuted Weibull, Khan ve ark. (2016) tarafından transmuted Gompertz, Haq ve ark. (2016) tarafından transmuted Power function, Balaswamy (2018) tarafından transmuted half-normal, Adeyinka (2019) tarafından transmuted Logistic, Samuel ve Kenide (2019) tarafından transmuted Half-Logistic, Badr ve ark. (2020) transmuted odd Frechet-G, Al-Babtain ve ark. (2020) tarafından transmuted Muth, Abu El Azm ve ark. (2021) tarafından transmuted geliştirilmiş Lomax, Onyekwere ve ark. (2022) tarafından transmuted Shanker, Tanış (2022) tarafından transmuted lower record type inverse Rayleigh, Adetunji (2023) tarafından transmuted Ailamujia, Chakraborty ve ark. (2024) tarafından transmuted shifted Lindley, XI ve ark. (2024) tarafından üç parametrelili transmuted Lindley, Sabri ve Adetunji (2024) tarafından Poisson-transmuted Üstel dağılımları önerilmiştir.

Burada dikkat edilmesi gereken nokta yukarıda bahsedilen tüm dönüşüm teknikleri yeni bir veya birkaç parametre ekleyerek yapılmaktadır. Bu durum işlem karmaşıklığını beraberinde getirecektir. Diğer bir deyişle, ek parametreler esneklik sağlamasına rağmen, aynı zamanda parametre tahmini ve diğer çıkarımlarda karmaşıklık meydana getirecektir (Maurya ve ark. 2017).

Bu noktada Kumar ve ark. (2015) yeni bir dağılım elde etmek için Dinesh-Umesh-Sanjay (DUS) olarak adlandırılan bir dönüşüm tekniği önermişlerdir. Benzer düşünceyle, Maurya ve ark. (2016) logaritmik transformation (LT) olarak adlandırılan ve yaşam süresi dağılımı elde eden yeni bir metot geliştirmişlerdir. Son olarak Kavya ve Manoharan (2021) ise Kavya-Manoharan (KM)

dönüşümü olarak adlandırılan yeni bir yöntem önermişler. Bu dönüşüm metotları kullanılarak; Irshad ve ark. (2021) tarafından Generalized DUS transmuted log-normal, Karakaya ve ark. (2021) tarafından DUS Kumaraswamy, Hassan ve ark. (2022) tarafından KM Burr X, Kaushic ve Nigam (2022) tarafından Generalized DUS modified Topp-Leone, Hassan ve Aslam (2023) tarafından DUS-neutrosophic multivariate inverse Weibull, Alrashidi ve Ragab (2023) tarafından Generalized DUS geliştirilmiş üstel, Khan ve Mustafa (2023) DUS powered inverse Rayleigh, Akkanphudit (2023) tarafından Generalized DUS transformed Garima, Elbatal ve ark. (2023) tarafından KM Weibull-G, Gül ve ark. (2023) tarafından DUS inverse Weibull, Shafiq ve ark. (2024) tarafından KM Bilal dağılımları önerilmiştir.

Bu metotlar, parsimonious metotlar olarak adlandırılırlar. Burada “parsimonious” ek parametre içermeyen anlamında kullanılmaktadır. Bahsedilen bu dönüşüm metotları, temel dağılımı dikkate alarak dağılımın esnekliğini arttıran, ek parametre içermeyen ayrıca işlem karmaşıklığını ortadan kaldıran yeni yaşam süresi dağılımı elde etmek için geliştirilmişlerdir. Ayrıca bu dönüşüm metotları, bozulma oranlarının tüm çeşitlerini birleştiren ve monoton olmayan bozulma oranına sahip yeni bir dağılım üretirler.

Bu çalışmada DUS, LT ve KM dönüşümleri kullanılarak elde edilen DUS Üstel (DUSE), LT Üstel (LTE) ve KM Üstel (KME) dağılımları incelenmiştir. Bu dağılımların olasılık yoğunluk fonksiyonu ve hazard fonksiyonu grafikleri ile momentler, moment çıkarıcı fonksiyonu ve quantile fonksiyonu gibi çeşitli istatistiksel özellikleri ve en çok olabirlik tahmin edicileri incelenmiştir. Ayrıca iki veri seti üzerinde dağılımların modelleme yetenekleri karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. DUS Tekniği ve DUSE Dağılımı

DUS dönüşüm tekniği Kumar ve ark. (2015) tarafından önerilmiştir. $f(x)$ ve $F(x)$ sırasıyla temel dağılım olasılık yoğunluk fonksiyonu (oyf) ile dağılım fonksiyonu (df) olmak üzere, yeni dağılımın oyf $g(x)$, df $G(x)$ ve hazard fonksiyonu (hf) $h(x)$ aşağıdaki gibidir,

$$g(x) = \frac{1}{e-1} f(x)e^{F(x)}, \quad (1)$$

$$G(x) = \frac{1}{e-1} [e^{F(x)} - 1], \quad (2)$$

$$h(x) = \frac{1}{e-e^{F(x)}} f(x)e^{F(x)}. \quad (3)$$

Üstel dağılımın oyf ve df aşağıda verildiği gibidir,

$$f(x) = \theta e^{-\theta x} \quad \text{ve} \quad F(x) = 1 - e^{-\theta x}, \quad x, \theta > 0.$$

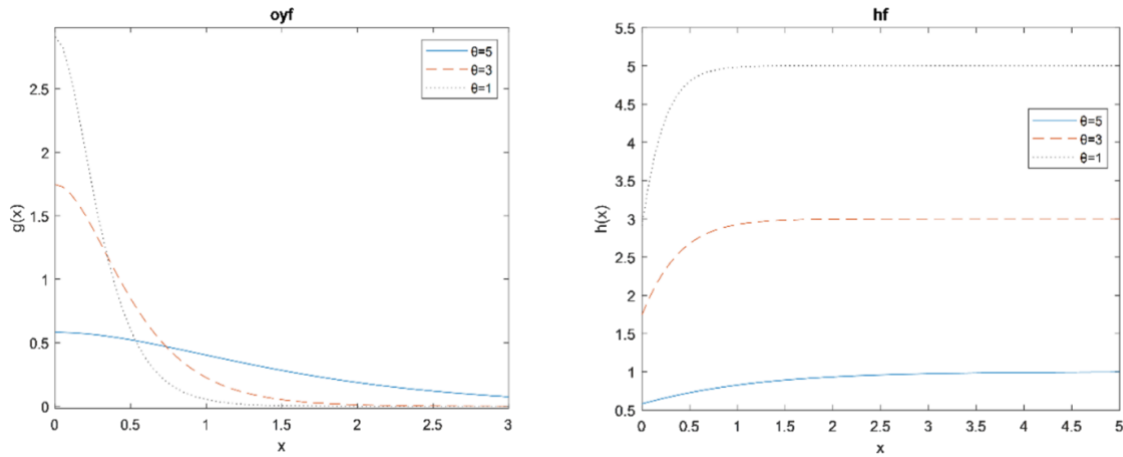
Kumar ve ark. (2015) temel dağılımı, üstel dağılım olarak ele alıp, DUSE dağılımını önermişler ve DUSE dağılımının ofy, df ve hf sırasıyla aşağıdaki gibi elde etmişlerdir,

$$g(x) = \frac{1}{e-1} \theta e^{-\theta x} e^{1-e^{-\theta x}}, \quad (4)$$

$$g(x) = \frac{1}{e-1} \theta e^{-\theta x} e^{1-e^{-\theta x}}, \quad (5)$$

$$h(x) = \theta e^{-\theta x} e^{1-e^{-\theta x}} \left[e^{e^{-\theta x}} - 1 \right]^{-1}. \quad (6)$$

DUSE dağılımının ofy ve hf grafikleri Şekil 1 de verilmiştir.



Şekil 1. DUSE dağılımının ofy ve hf grafikleri.

DUSE dağılımının r . momenti, moment çıkarıcı fonksiyonu ve quantile fonksiyonu sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilir,

$$E(X^r) = \int_0^{\infty} x^r \frac{1}{e-1} \theta e^{-\theta x} e^{1-e^{-\theta x}} dx = \frac{e}{e-1} \frac{r!}{\theta^r} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!(1+k)^{r+1}}, \quad (7)$$

$$\mu_X(t) = E(e^{tx}) = \int_0^{\infty} e^{tx} \frac{1}{e-1} \theta e^{-\theta x} e^{1-e^{-\theta x}} dx = \frac{e}{e-1} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(1+k)!} \left[1 - \frac{t}{(1+k)\theta} \right]^{-1}, \quad (8)$$

$$Q(p) = F^{-1}(p) = \frac{-\ln(1-\ln(1+p(e-1)))}{\theta}. \quad (9)$$

2.1.1. En Çok Olabilirlik Tahmini

X_1, X_2, \dots, X_n , DUSE dağılımından bağımsız ve aynı dağılıma sahip n çaplı rasgele örneklem olsun. DUSE dağılımının olabilirlik ve log-olabilirlik fonksiyonları aşağıda verildiği gibidir,

$$L(x; \theta) = \prod_{i=1}^n \left(\frac{1}{e-1} \theta e^{-\theta x_i} e^{1-e^{-\theta x_i}} \right), \quad (10)$$

$$l(x; \theta) = n \log \left(\frac{e}{e-1} \right) + n \log(\theta) - \theta \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n e^{-x_i}. \quad (11)$$

Log-olabilirlik fonksiyonunun θ parametresine göre kısmi türevi,

$$\frac{\partial l}{\partial \theta} = \frac{n}{\theta} - \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n x_i e^{-x_i}, \quad (12)$$

şekinde elde edilmiştir.

2.2. LT Tekniği ve LTE Dağılımı

LT dönüşüm tekniği Maurya ve ark. (2016) tarafından önerilmiştir. $f(x)$ ve $F(x)$ sırasıyla temel dağılım olasılık yoğunluk fonksiyonu (oyf) ile dağılım fonksiyonu (df) olmak üzere, yeni dağılımın oyf $g(x)$, df $G(x)$ ve hazard fonksiyonu (hf) $h(x)$ aşağıdaki gibidir,

$$g(x) = \frac{f(x)}{(2-F(x)) \log(2)}, \quad (13)$$

$$G(x) = 1 - \frac{\log(2-F(x))}{\log(2)}, \quad (14)$$

$$h(x) = \frac{f(x)}{(2-F(x)) \log(2-F(x))}. \quad (15)$$

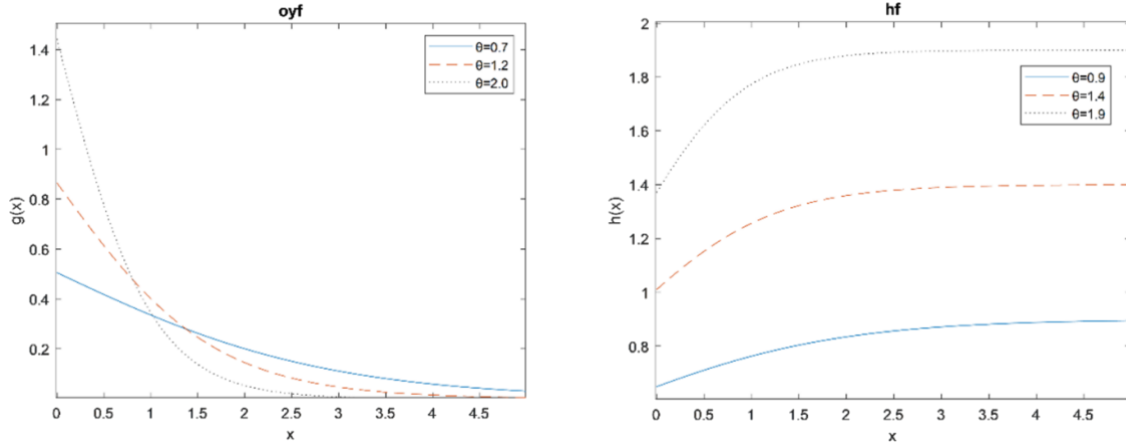
Maurya ve ark. (2016) temel dağılımı, üstel dağılım olarak ele alıp, LTE dağılımını önermişler ve LTE dağılımının oyf, df ve hf sırasıyla aşağıdaki gibi elde etmişlerdir,

$$g(x) = \frac{\theta e^{-\theta x}}{(1+e^{-\theta x}) \log(2)}, \quad (16)$$

$$G(x) = 1 - \frac{\log(1+e^{-\theta x})}{\log(2)}, \quad (17)$$

$$h(x) = \frac{\theta e^{-\theta x}}{(1+e^{-\theta x}) \log(1+e^{-\theta x})}. \quad (18)$$

LTE dağılımının ofy ve hf grafikleri Şekil 2 de verilmiştir.



Şekil 2. LTE dağılımının ofy ve hf grafikleri.

LTE dağılımının r . momentini, moment çıkarıcı fonksiyonu ve quantile fonksiyonu sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilir,

$$E(X^r) = \int_0^{\infty} x^r \frac{\theta e^{-\theta x}}{(1+e^{-\theta x}) \log(2)} dx = \frac{\theta}{\log(2)} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k r!}{(\theta + \theta k)^{r+1}}, \quad (19)$$

$$\mu_x(t) = E(e^{tx}) = \int_0^{\infty} e^{tx} \frac{\theta e^{-\theta x}}{(1+e^{-\theta x}) \log(2)} dx = \frac{\theta}{\log(2)} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k r!}{(\theta + (\theta - t)k)^{r+1}}, \quad (20)$$

$$Q(p) = F^{-1}(p) = \frac{-1}{\theta} \log[2^{1-p} - 1]. \quad (21)$$

2.2.1. En Çok Olabilirlik Tahmini

X_1, X_2, \dots, X_n , LTE dağılımından bağımsız ve aynı dağılıma sahip n çaplı rasgele örneklem olsun. LTE dağılımının olabilirlik ve log-olabilirlik fonksiyonları aşağıda verildiği gibidir,

$$L(x; \theta) = \prod_{i=1}^n \left(\frac{\theta e^{-\theta x_i}}{(1+e^{-\theta x_i}) \log(2)} \right), \quad (22)$$

$$l(x; \theta) = \log \left(\frac{\theta}{\log(2)} \right) + \sum_{i=1}^n \left(\theta x_i + \log(1 + e^{-\theta x_i}) \right). \quad (23)$$

Log-olabilirlik fonksiyonunun θ parametresine göre kısmi türevi,

$$\frac{\partial l}{\partial \theta} = \frac{n}{\theta} - \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{1+e^{-\theta x_i}} \quad (24)$$

şekinde elde edilmiştir.

2.3. KM Tekniği ve KME Dağılımı

KM dönüşüm tekniği Kavya ve Manoharan (2021) tarafından önerilmiştir. $f(x)$ ve $F(x)$ sırasıyla temel dağılım olasılık yoğunluk fonksiyonu (oyf) ile dağılım fonksiyonu (df) olmak üzere, yeni dağılımın oyf $g(x)$, df $G(x)$ ve hazard fonksiyonu (hf) $h(x)$ aşağıdaki gibidir,

$$g(x) = \frac{e}{e-1} f(x) e^{-F(x)}, \quad (25)$$

$$G(x) = \frac{e}{e-1} [1 - e^{F(x)}], \quad (26)$$

$$h(x) = \frac{1}{e^{1-F(x)} - 1} f(x) e^{-F(x)}. \quad (27)$$

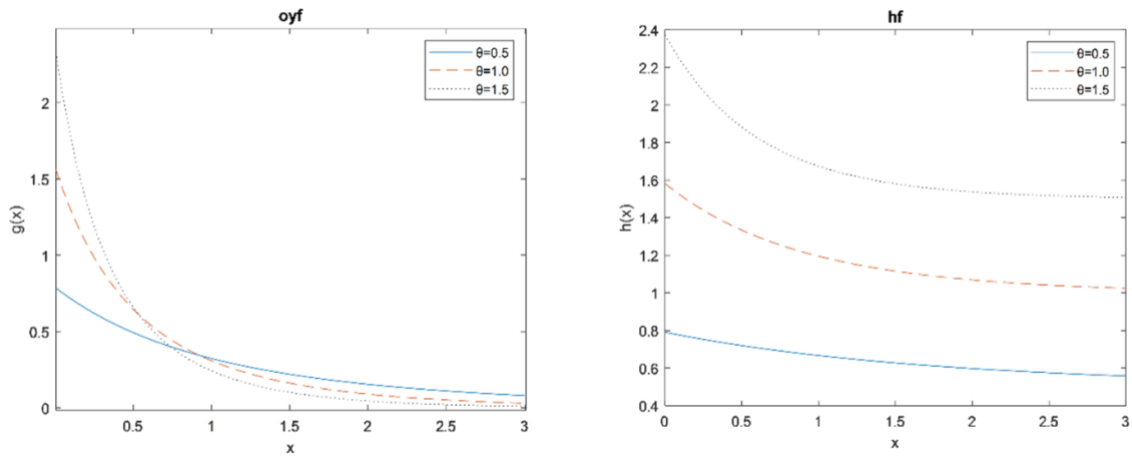
Kavya ve Manoharan (2021) temel dağılımı, üstel dağılım olarak ele alıp, KME dağılımını önermişler ve KME dağılımının oyf, df ve hf sırasıyla aşağıdaki gibi elde etmişlerdir,

$$g(x) = \frac{1}{e-1} \theta e^{-\theta x} e^{e^{-\theta x}}, \quad (28)$$

$$G(x) = \frac{e}{e-1} [1 - e^{-(1-e^{-\theta x})}], \quad (29)$$

$$h(x) = \theta e^{-\theta x} e^{e^{-\theta x}} [e^{e^{-\theta x}} - 1]^{-1}. \quad (30)$$

KME dağılımının oyf ve hf grafikleri Şekil 3 de verilmiştir.



Şekil 3. KME dağılımının oyf ve hf grafikleri.

KME dağılımının r . momentini, moment çıkarıcı fonksiyonu ve quantile fonksiyonu sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilir,

$$E(X^r) = \int_0^{\infty} x^r \frac{1}{e-1} \theta e^{-\theta x} e^{e^{-\theta x}} dx = \frac{1}{\theta^r (e-1)} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{r!}{k!(1+k)^{r+1}}, \quad (31)$$

$$\mu_X(t) = E(e^{tx}) = \int_0^{\infty} e^{tx} \frac{1}{e-1} \theta e^{-\theta x} e^{e^{-\theta x}} dx = \frac{\theta}{e-1} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!(\theta + \theta k - t)}, \quad (32)$$

$$Q(p) = F^{-1}(p) = \frac{-1}{\theta} \ln \left[1 + \ln \left(1 - \frac{p(e-1)}{e} \right) \right]. \quad (33)$$

2.3.1. En Çok Olabilirlik Tahmini

X_1, X_2, \dots, X_n , KME dağılımından bağımsız ve aynı dağılıma sahip n çaplı rasgele örneklem olsun. KME dağılımının olabilirlik ve log-olabilirlik fonksiyonları aşağıda verildiği gibidir,

$$L(x; \theta) = \prod_{i=1}^n \left(\frac{1}{e-1} \theta e^{-\theta x_i} e^{e^{-\theta x_i}} \right), \quad (34)$$

$$l(x; \theta) = -n \log(e-1) + n \log(\theta) - \theta \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n e^{-\theta x_i}. \quad (35)$$

Log-olabilirlik fonksiyonunun θ parametresine göre kısmi türevi,

$$\frac{\partial l}{\partial \theta} = \frac{n}{\theta} - \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n x_i e^{-\theta x_i}, \quad (36)$$

şeklinde elde edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. 44 Kanser Hastasının Hayatta Kalma Süreleri

Efron (1988) dan alınan baş ve boyun kanseri hastalığından muzdarip iki grup hastanın hayatta kalma sürelerini temsil eden bir veri seti kullanılmıştır. Veri seti Tablo 1 de verildiği gibidir.

Tablo 1. 44 hastanın hayatta kalma süreleri.

12.2	23.56	23.74	25.87	31.98	37	41.35	47.38	55.46	58.36	63.47	68.46
78.26	74.47	81.43	84	92	94	110	112	119	127	130	133
140	146	155	159	173	179	194	195	209	249	281	319
339	432	469	519	633	725	817	1776				

Veri setinin ML tahmini, AIC, BIC ve K-S değerleri Çizelge 2 de listelenmiştir.

Tablo 2. 44 hastanın hayatta kalma süreleri için ML tahmini, AIC, BIC ve K-S değerleri.

44 hastanın hayatta kalma süreleri						
Dağılım	ML Tahmini		KS Testi		AIC	BIC
	$\hat{\theta}$	p -değeri	Test istatistiği			
DUSE	0.0056	0.1144	0.1764		569.8193	571.6035
LTE	0.0053	0.1445	0.1689		568.5517	570.3359
KME	0.0034	0.5455	0.1169		476.0766	477.8608

Tablo 2 incelendiğinde, 44 hastanın hayatta kalma süreleri verisinin, KS testinin p değerlerine göre, her üç dağılıma da uygun olduğu görülmektedir. Dağılımların AIC ve BIC kriterlerine bakıldığında ise, KME dağılımının, LTE ve KME dağılımlarına göre daha düşük AIC ve BIC değerlerine sahip olduğundan dolayı, veri setini daha iyi modellediği söylenebilir.

3.2. 50 Cihazın Bozulma Zamanı Verisi

Lawless (2011) dan alınan 50 cihazın yaşam ömürlerine dayalı olarak bozulma zamanlarını gösteren bir veri seti kullanılmıştır. Veri seti Tablo 3 de verildiği gibidir.

Tablo 3. 50 cihazın bozulma zamanı verisi.

0.1	0.2	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	3.0	6.0	7.0	11.0	12.0
18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	21.0	32.0	36.0	40.0	45.0	46.0	47.0
50.0	55.0	60.0	63.0	63.0	67.0	67.0	67.0	67.0	72.0	75.0	79.0
82.0	82.0	83.0	84.0	84.0	84.0	85.0	85.0	85.0	85.0	85.0	86.0

Veri setinin ML tahmini, AIC, BIC ve K-S değerleri Tablo 4 de listelenmiştir.

Tablo 4. 50 cihazın bozulma zamanı verisi için ML tahmini, AIC, BIC ve K-S değerleri.

50 cihazın bozulma zamanları						
Dağılım	ML Tahmini		KS Testi		AIC	BIC
	$\hat{\theta}$	p -değeri	Test istatistiği			
DUSE	0.0270	0.0814	0.1754		482.5855	484.4976
LTE	0.0259	0.0595	0.1839		482.1719	484.0839
KME	0.0162	0.0522	0.1994		387.7121	389.6241

Tablo 4 incelendiğinde, 50 cihazın bozulma zamanı verisinin, KS testinin p değerlerine göre, her üç dağılıma da uygun olduğu görülmektedir. Dağılımların AIC ve BIC kriterlerine bakıldığında ise, KME dağılımının, LTE ve KME dağılımlarına göre daha düşük AIC ve BIC değerlerine sahip olduğundan dolayı, veri setini daha iyi modellediği söylenebilir.

4. Sonuçlar ve neriler

Bu alışmada, DUS, LT ve KM parsimonious dönüşüm teknikleri kullanılarak elde edilen DUSE, LTE ve KME dağılımları tanıtılmıştır. DUSE, LTE ve KME dağılımlarının olasılık yoğunluk fonksiyonu ve hazard oran fonksiyonun grafikleri ve momentler, moment çıkaran fonksiyonu ve quantile fonksiyonu gibi çeşitli istatistiksel özellikleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca dağılımların en çok olabilirlik tahmin edicileri incelenmiştir. Buna ek olarak, bu dağılımlar iki gerçek veri seti ile modellenmiştir. Buradaki amaç veri setleri ile dağılımların verilere uygunluğu ve dağılımların esnekliğinin karşılaştırılmasıdır. Sonuçlara bakıldığında, KME dağılımının iki veri setinde de DUSE ve LTE dağılımlarından daha düşük AIC ve BIC değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Buradan ıkarılacak iki önemli sonuç vardır. Birincisi, KME dağılımının iki veri setini de DUSE ve LTE dağılımlarından daha iyi modellediği, ikincisi ise KME dağılımının DUSE ve LTE dağılımlarına göre daha esnek olduğudur. Makalede incelenen dağılımlar arasında KME dağılımını araştırmacılar için iyi bir alternatif olabilir.

Bu çalışmanın amacı, yeni dağılım veya dağılımlar önermek isteyen araştırmacılara, ek parametre kullanmadan yeni dağılımlar önerebilen metotların tanıtılmasıdır. Çünkü incelenen bu dönüşüm metotları diğer metotlarla karşılaştırıldığında ek parametre içermeyen, işlem karmaşıklığını ortadan kaldıran ve bunun yanında dağılımın esnekliğini arttıran dönüşüm metotları olmasıdır. Gelecekteki çalışmalarda, bahsedilen bu dönüşüm metotları kullanılarak yeni dağılımlar elde edilebilir, farklı parametre tahmin metotları kullanarak parametreler karşılaştırılabilir ve farklı veri setleri kullanarak diğer dağılımlarla modelleme performansları karşılaştırılabilir.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

ıkar atışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar atışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Abu El Azm, W. S., Almetwally, E. M., Naji AL-Aziz, S., El-Bagoury, A. A. A. H., Alharbi, R., and Abo-Kasem, O. E. (2021). A New Transmuted Generalized Lomax Distribution: Properties and Applications to COVID-19 Data. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2021(1), 5918511.
- Adeyinka, F. S. (2019). On the Performance of Transmuted Logistic Distribution: Statistical Properties and Application. *Budapest International Research in Exact Sciences (BirEx) Journal*, 1(3), 34-42.
- Adetunji, A. A. (2023). Transmuted Ailamujia distribution with applications to lifetime observations. *Asian Journal of Probability and Statistics*, 21(1), 1-11.
- Ahmad, K., Ahmad, S. P., and Ahmed, A. (2015). Structural properties of transmuted Weibull distribution. *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, 14(2), 13.
- Akkanphudit, T. (2023). Generalized DUS Transformed Garima Distribution: Properties, Simulations and Applications. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 44(2), 803-814.
- Al-Babtain, A. A., Elbatal, I., Chesneau, C., and Jamal, F. (2020). The transmuted Muth generated class of distributions with applications. *Symmetry*, 12(10), 1677.
- Alrashidi, A., and Ragab, I. E. (2023). Generalized Dinesh–Umesh–Sanjay generalized exponential distribution with application to engineering data. *AIP Advances*, 13(11).
- Badr, M. M., Elbatal, I., Jamal, F., Chesneau, C., and Elgarhy, M. (2020). The transmuted odd Fréchet-G family of distributions: Theory and applications. *Mathematics*, 8(6), 958.
- Balaswamy, S. (2018). Transmuted Half Normal Distribution. *Int. J. Sci. Res. in Mathematical and Statistical Sciences*, 5(4).
- Chakraborty, A., Rana, S., and Maiti, S. I. (2024). Transmuted Shifted Lindley Distribution: Characterizations, Classical and Bayesian Estimation with Applications. *Annals of Data Science*, 1-28.
- Corderio, G. M., Ortega, E. M., and da Cunha, D. C. (2013). The exponentiated generalized class of distributions. *Journal of Data Science*, 11(1), 1-27.
- Efron, B. (1988). Logistic Resgression, Survavial Analysis, and the Kaplan-Meier Curve. *Journal of the American Statistical Association*, 83, 414-425.
- Elbatal, I., Alghamdi, S. M., Jamal, F., Khan, S., Almetwally, E. M., and Elgarhy, M. (2023). Kavya-Manoharan Weibull-G family of distributions: Statistical inference under progressive type-II censoring scheme. *Advances and Applications in Statistics*, 87(2), 191-223.
- Gupta, R. C., Gupta, P. L., and Gupta, R. D. (1998). Modelling failure time data by Lehman alternatives. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 27(4), 887-904.
- Gül, H. H., Acıtaş, Ş., Bayrak, H., and Şenoğlu, B. (2023). DUS Inverse Weibull Distribution and Parameter Estimation in Regression Model. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27(1), 42-50.
- Haq M. A., Butt, N. S., Usman, R. M., and Fattah, A. A. (2016). Transmuted power function distribution. *Gazi University Journal of Science*, 29(1), 177-185.
- Hassan, O. H. M., Elbatal, I., Al-Nefaie, A. H., and Elgarhy, M. (2022). On the Kavya–Manoharan–Burr X Model: Estimations under Ranked Set Sampling and Applications. *Journal of Risk and Financial Management*, 16(1), 19.
- Hassan, M. K., and Aslam, M. (2023). DUS-neutrosophic multivariate inverse Weibull distribution: properties and applications. *Complex & Intelligent Systems*, 9(5), 5679-5691.
- Irshad, M. R., Chesneau, C., Nitin, S. L., Shibu, D. S., and Maya, R. (2021). The generalized DUS transformed log-normal distribution and its applications to cancer and heart transplant datasets. *Mathematics*, 9(23), 3113.
- Karakaya, K., Kınacı, İ., Kuş, C., and Akdoğan, Y. (2021). On the DUS-Kumaraswamy distribution. *Istatistik Journal of The Turkish Statistical Association*, 13(1), 29-38.
- Kaushik, A., and Nigam, U. (2022). GDUS-Modified Topp-Leone Distribution: A New Distribution with Increasing, Decreasing, and Bathtub Hazard Functions. *Journal of Reliability and Statistical Studies*, 299-324.
- Kavya, P., and Manoharan, M. (2021). Some parsimonious models for lifetimes and applications. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 1-16.
- Khan, M. S., Robert, K., and Irene, L. H. (2016). Transmuted Gompertz distribution: Properties and estimation. *Pak. J. Statist*, 32(3), 161-182.
- Khan, M. I., and Mustafa, A. (2023). Powered Inverse Rayleigh Distribution Using DUS Transformation. *International Journal of Analysis and Applications*, 21, 61-61.

- Kumar, D., Singh, U., and Singh, S. K. (2015). A method of proposing new distribution and its application to Bladder cancer patients data. *J. Stat. Appl. Pro. Lett*, 2(3),235-245.
- Lawless, J. F. (2011). *Statistical models and methods for lifetime data*. John Wiley & Sons.
- Maurya, S. K., Kaushik, A., Singh, R. K., Singh, S. K., and Singh, U. (2016). A new method of proposing distribution and its application to real data. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, 2(6), 1331-1338.
- Maurya, S. K., Kaushik, A., Singh, S. K., and Singh, U. (2017). A new class of distribution having decreasing, increasing, and bathtub-shaped failure rate. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 46(20),10359-10372.
- Nadarajah, S., and Kotz, S. (2006). The exponentiated type distributions. *Acta Applicandae Mathematica*, 96(2), 97-111.
- Onyekwere, C. K., Okoro, C. N., Obulezi, O. J., Udofia, E. M., and Anabike, I. C. (2022). Modification of Shanker distribution using quadratic rank transmutation map. *Journal of Xidian University*, 16(8), 179-198.
- Sabri, S. R. M., and Adetunji, A. A. (2024). On the Poisson-transmuted exponential distribution and its application to frequency of claim in actuarial science. *Statistics in Transition*, 25(2), 103-120.
- Samuel, A. F., and Kehinde, O. A. (2019). A study on transmuted half logistic distribution: Properties and application. *International Journal of Statistical Distributions and Applications*, 5(3), 54.
- Shafiq, A., Sindhu, T. N., Riaz, M. B., Hassan, M. K., and Abushal, T. A. (2024). A statistical framework for a new Kavya-Manoharan Bilal distribution using ranked set sampling and simple random sampling. *Heliyon*, 10(9).
- Shaw, W. T., and Buckley, I. R. (2007). The alchemy of probability distributions: Beyond gram-charlier & cornish-fisher expansions, and skew-normal or kurtotic-normal distributions. *Submitted, Feb, 7*, 64.
- Taniş, C. (2022). Transmuted lower record type inverse rayleigh distribution: estimation, characterizations and applications. *Ricerche di Matematica*, 71(2), 777-802.
- X₁, Y., Lu, H., and Liang, F. (2024). On a New Transmuted Three-Parameter Lindley Distribution and Its Applications. *Sains Malaysiana*, 53(6), 1427-1440.

Meta-Sezgisel Yöntemlere Dayalı Kör Kaynak Sinyal Ayırma

Eyüp GEDİKLİ^{1*}, Emin TUĞCU²

Öz

Kör kaynak ayırma problemi, en az iki karışmış sinyalin bilinmeyen kaynak sinyallerini belirleme işlemidir. Kaynak sinyaller, tıbbi alanda doğru teşhisin yapılmasında, kablosuz haberleşmede, radar, görüntü, ses verilerinin analizi için önemlidir. Kör kaynak ayırma probleminde yaygın olarak bağımsız bileşen analizi kullanılır. Bağımsız bileşen analizinde, ileri istatistiksel ve cebirsel yöntemler kullanılarak entropi ve korelasyon uyumluluğuna bakılır. Sinyalleri ayırmak için en yaygın kullanılan bağımsız bileşen analizi (Independent Component Analysis, ICA) algoritmalarından FastICA, Gauss dağılımı olmama ve negentropinin maksimum uygunluk kriterlerini iterasyon tabanlı olarak araştırır. Bu çalışmada, benzer şekilde iterasyon tabanlı yöntemler olan meta-sezgisel algoritmalar (MSA), uygunluk fonksiyonunu optimize etmek için kullanılmıştır. Uygunluk fonksiyonu, karışık sinyal ayırma matris üretimi ve yakınsamayı kontrol etmek için kullanılır. Bu çalışmada, vektörleri ortogonalleştiren Gram Schmidt sürecine dayalı ayırma matris üretimi önerilmiştir. Deneyler, FastICA ile meta-sezgisel (MS) algoritmalarından ateş böceği algoritması ve parçacık sürü optimizasyonu algoritmasıyla yapılmıştır. Üç kaynaktan üretilen sinyallerin karıştırılıp gürültü eklenmesi ile karışık sinyaller oluşturulmuştur. Sinyallerin farklı frekanslarda üretilerek gerçekleştirilen deneylerde, önerilen yöntem ile geleneksel FastICA algoritmasından daha başarılı korelasyon katsayısı ve kök ortalama kare hata sonuçları elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ateş böceği algoritması, Bağımsız bileşen analizi, FastICA, Gram Schmidt süreci, Kör kaynak ayırma, Parçacık sürü optimizasyonu.

Blind Source Signal Separation Based on Meta-heuristics Methods

Abstract

The blind source separation problem is the process of identifying unknown source signals from at least two mixed signals. Source signals are important for accurate diagnosis in the medical field, wireless communication, and analysis of radar, image and sound data. Independent component analysis (ICA) is often used for the problem of blind source separation. In independent component analysis, entropy and correlation compatibility are checked using advanced statistical and algebraic methods. FastICA, one of the most widely used independent component analysis algorithms for signal separation, iteration-based searches for non-Gaussianity and negentropy maximum fitness criteria. In this study, meta-heuristic algorithms (MHA), which are also iteration-based methods, were used to optimize the fitness function. The fitness function is used to generate the separation matrix for mixed signal to control convergence. In this study, the generation of the separation matrix is proposed based on the Gram-Schmidt process, which orthogonalizes the vectors. Experiments were performed using FastICA and meta-heuristic algorithms such as the firefly algorithm and the particle swarm optimization algorithm. Mixed signals are generated by mixing the signals from three sources and adding noise. In the experiments carried out by generating signals with different frequencies, more successful correlation coefficients and root mean square error results were obtained with the proposed method than the traditional FastICA algorithm.

Keywords: Firefly algorithm, Independent component analysis, FastICA, Gram Schmidt Process, Blind source separation, Particle swarm optimization.

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, gediklie@ktu.edu.tr

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, emintugcu@ktu.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 28.04.2024

Kabul/Accepted: 12.09.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Giriş

Kör kaynak ayırıştırma (Blind Source Separation, BSS) problemi, kaynak sinyallerinin ve iletim modellerinin bilinmediği durumlarda, karışmış sinyallerden kaynak sinyallerini tahmin etme işlemidir (Zi ve ark., 2022; Comon ve Jutten, 2020). Kokteyl parti problemi olarak araştırma konusu olan bu problem, sonar ve radar sinyal işleme (Ghahramani ve ark., 2014; Jiang ve ark., 2015), kablosuz iletişim (Jin-Wang ve ark., 2014), biyomedikal sinyal işleme (Metsomaa ve ark., 2014), konuşma ve görüntü işlemede (Prakash ve Hepzibha, 2015; Barnie ve Oppenheimer, 2015) yaygın olarak araştırılan bir konudur.

BSS problemi, yaygın olarak bağımsız bileşen analizi (independent component analysis-ICA) yöntemi ile çözülür (Hyvarinen ve Oja, 2000). Bu yöntemlerde ileri istatistik gerektiren bağımsız sinyal ayırıştırması için lineer cebir yaklaşımları kullanılır. En yaygın kullanılan kurtosis ve negentropy yöntemleridir. FastICA bu yaklaşımlardan hızlı ve doğruluk olarak öne çıkan, iteratif yakınsamaya dayalı bir yöntemdir. FastICA' nın yakınsama yaklaşımından hareketle son zamanlarda meta-sezgisel algoritmalara (MSA) dayalı yaklaşımlarla BSS problemine çözüm araştırılmaktadır (Abbas ve Kabudian, 2017; Kumar ve Jayanti, 2020). MS algoritmalar, lokal optimumlardan kurtulma mekanizmalarına sahip, düşük maliyetli, hızlı ve robust yapay zeka algoritmalarıdır (Zi ve ark., 2022).

Bu çalışmada, MS algoritmalarından sürü tabanlı parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritması ve ateş böceği algoritması (FA), FastICA algoritması ile karşılaştırılmıştır. FastICA yönteminde de olduğu gibi genelde rastgele üretilen ayırma matrisi, bizim yaklaşımımızda Gram-Schmidt yöntemi ile orthonormal hale getirilerek başarımları artırılmıştır. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında, materyal ve yöntemlerden bahsedilerek elde edilen bulgular verilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu kısımda kör kaynak problemi hakkında genel bilgi, bağımsız bileşen analizi yaklaşımı ve kullanılan MSA hakkında bilgi sunulacaktır. Daha sonra önerilen yöntem ve işlem adımları verilecektir.

2.1. Kör Kaynak Ayırma Problemi

BSS problemi bilinmeyen kaynaklardan $S(t) = \{s_1(t), s_2(t), s_3(t), \dots, s_r(t)\}$ gelen sinyalleri, karışmış halinden $X(t) = \{x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots, x_r(t)\}$ tahmin etme işlemidir. Burada $S(t)$ sinyallerin, $A_{r \times r}$ matrisi ile karıştığı varsayılmaktadır. A matrisi ve $S(t)$ kaynak sinyalleri bilinmediği

için, karışmış $X(t)$ sinyallerinden $Y(t)$ sinyalleri $W_{r \times r}$ matrisi ile denklem 1'de olduğu gibi tahmin edilmeye çalışılır (Baysal ve Efe, 2023; Feng ve Kowalski, 2018; Jin-Wang ve ark., 2014; Kumar ve Jayanthi, 2020; Li ve ak., 2016; Prakash ve Hepzibha, 2015; Wang, 2021; Zi ve arka., 2020). $W = A^{-1}$ olması durumunda kaynak sinyaller doğru tahmin edilebilir. Ancak, burada A matrisi bilinmemektedir ve W 'nin farklı çözümleri her zaman mevcuttur.

$$Y_{rxd} = W_{rxr}X_{rxd} = W_{rxr}A_{rxr}S_{rxd} \quad (1)$$

Burada A ve W , $r \times r$ boyutlarında sırasıyla doğrusal karıştırma matrisi ve ayrıştırma matrisidir. r , kaynak sinyallerin sayısı ve genelde bağımsız bileşen analizinde bağımsız bileşen sayısı olur. d , sinyalin boyut sayısı (örneklem sayısı) olarak verilmiştir. A ve $S(t)$ bilinmediğinden W ayırma matrisi, korelasyon azaltma ve Gaussian olmama kriterlerine göre çözülür.

2.2. Bağımsız Bileşen Analizi

Bağımsız bileşen analizi (Independent Component Analysis, ICA), BSS için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (Pati ve ark., 2021). Bağımsız bileşen analizinde, kaynakların bağımsız ve Gaussian olmayan dağılım değerlerine sahip olduğu kabul edilir. ICA tabanlı geliştirilen çoğu algoritma, ayırma matrisini optimizasyon problemi olarak ele alır. Bu yaklaşımda maliyet fonksiyonu, kaynak sinyallerle ayrıştırılmış sinyaller arasındaki benzerliği, ayrıştırma matrisinin ayrıştırma başarısını oldukça etkilemektedir. Geleneksel ICA yönteminde maliyet fonksiyonu gradyant tabanlı yaklaşımlarla çözülür (Li ve ark., 2016). Bu yaklaşımın yerel optimumlara takılma dezavantajı oldukça fazla olup, Gaussian olmayan fonksiyonlarda yerel minimumlara daha fazla takılma olduğu belirtilmektedir (Kumar ve Jayanti, 2020). ICA, JADE, SOBI gibi yaklaşımlarla çözülmekte olup en yaygın kullanılan algoritma FastICA'dır (Zi ve ark., 2022; Luo ve ark., 2012).

FastICA: FastICA algoritması, kurtosis ve negentropy kullanarak ayrıştırılmış sinyallerin bağımsızlığına bakar. Negentropi maksimum olduğunda, ayrılmış sinyaller arasındaki Gauss olmayan özellik maksimum olur (Luo ve ark., 2012). Bundan hareketle FastICA algoritmasında negentropi veya kurtosis, ayrılmış sinyallerin tutarlılığını ölçmek için kullanılabilir. Sinyalin kurtosisi (4. moment) denklemleri 2'deki gibi tanımlanır (Hyvarinen ve Oja, 2000).

$$kurt(y) = k_4(y_i) = E(y_i^4) - 3E(y_i^2)^2 \quad (2)$$

Negentropinin tahmin edilmesi zordur ve bu nedenle bu kontrast fonksiyonu esasen teorik bir fonksiyon olarak kalmaktadır. Pratikte, bazı yaklaşımların kullanılması gerekmektedir. Burada, ICA

için verimli bir yöntem olarak kullanılan yaklaşım verilmiştir (Li ve ark., 2016). Li ve ark., (2016)'na göre, negentropiye yaklaşmanın klasik yöntemi, yüksek dereceli momentler kullanmaktır. Çok değişkenli negentropi yaklaşım olarak denklem 3 ile tanımlanabilir (Zi ve ark., 2022).

$$J(y_i) = \frac{1}{12} k_3^2(y_i) + \frac{1}{48} k_4^2(y_i) + \frac{7}{48} k_3^4(y_i) - \frac{1}{8} k_3^2(y_i) k_4(y_i) \quad (3)$$

Burada $k_3(y_i)$, sinyalin üçüncü dereceden ve $k_4(y_i)$ ise sinyalin dördüncü dereceden kümülanıdır. FastICA için farklı negentropi yöntemleri de kullanılmakta olup, (Hyvarinen ve Oja, 2000; Li ve ark., 2016) çalışmalarında maksimum entropi prensibine dayalı yaklaşımlar kullanılmıştır. FastICA algoritması, kurtosis veya negentropiyi, Newton yaklaşımı ile maksimize etmeye çalışarak ayırma matrisini bulmaya çalışır.

2.3. Meta-sezgisel Algoritmalar

MS algoritmalar, iteratif çözümlenme ile optimizasyon yapıp, evrimsel, doğadan etkilenen, biyolojik, insan tabanlı gibi gerçek hayattan seçilen genelde avlanma/beslenme/yaşam süreçlerin modellenmesi ile gerçekleştirilir. Tüm problemler için genel çözüme sahip bir algoritma olmayıp, analitik yöntemler ile kıyaslandığında kabul edilebilir şartlarda kullanılabilen yakınsama sağlayan popüler yaklaşımlardır. Bu kısımda, BSS için tüm MSA algoritmalarına temel oluşturabilecek genel işlem adımları sunulmuştur.

MSA tabanlı ICA genel algoritma adımları:

Adım 1. Merkezileştirme (denklem 4) ve beyazlatma (denklem 5) işlemi yapılır.

$$X(t) = X(t) - E[X(t)] \quad (4)$$

$$X(t) = \Lambda D^{-\frac{1}{2}} \Lambda^T X(t) \quad (5)$$

Beyazlatma denkleminde Λ ve D sırasıyla $X(t)$ 'nin özvektör ve özdeğerlerin köşegen matrisidir.

Adım 2. Başlangıç parametrelerinin değerleri belirlenir. (İterasyon sayısı, durdurma kriteri, popülasyon sayısı, başlangıç konum, hız, parlaklık, kromozom gibi MS algoritmasına özgü değerler)

Adım 3. Ayırıştırma matrisinin rastgele belirlenmesi (karışmış sinyal sayısı x bağımsız bileşen sayısı boyutlarında)

Adım 4. Uygunluk değerine göre en iyi ayırıştırma matrisinin belirlenmesi (amaç fonksiyonunun optimum noktasının bulunması)

Adım 5. Bireylerin güncellenmesi (ayrıştırma matrisi, konum, hız, parlaklık, çaprazlama, mutasyon gibi MS algoritmalarına özgü işlemler)

Adım 6. Durdurma kriter/leri (iterasyon sayısı, eşik değeri) sağlanana kadar Adım 4 ve Adım 5'in tekrar edilmesi

Adım 7. Ayrıştırma matrisi ile sinyallerin ayrıştırılması, $Y(t) = W_{eniye}X(t)$

2.3.1. Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması

Sürü tabanlı olan parçacık sürü optimizasyonu algoritması (PSO), pek çok problem için oldukça başarılı sonuçlar üreten yaygın kullanılan MS algoritmalarındandır (Bonyadi ve Michalewicz, 2017). PSO algoritmasının adımları şöyledir:

Adım 1. Başlangıç değerleri (parametreler, başlangıç konumu, iterasyon sayısı, yakınsama koşulu ilk hız değerleri) atanır. (c_1, c_2 : sabit değerler, $rand_1, rand_2$: rastgele üretilen değerler)

Adım 2. Her parçacık için uygunluk değeri, uygunluk fonksiyonundan hesaplanır. Denklem 6'da temsili gösterilen uygunluk fonksiyonu probleme göre değişen amaç fonksiyonudur.

$$fs_i = fitnessFunc(x_i) \quad (6)$$

Adım 3. Hesaplanan uygunluk değerlerinden parçacık için o ana kadar en iyi olan ($pBest$) parçacık konumu ve sürü içindeki o ana kadar en iyi ($gBest$) parçacıkların konumu belirlenir ve güncellenir.

Adım 4. Parçacıkların hızları denklem 7 ile hesaplanır.

$$v_{i+1} = v_i + c_1 * rand_1 * (pBest - x_i) + c_2 * rand_2 * (gBest - x_i) \quad (7)$$

Adım 5. Yeni hız değerlerine göre her parçacığın konumu denklem 8 ile güncellenir.

$$x_{i+1} = x_i + v_{i+1} \quad (8)$$

Adım 6. Durdurma kriteri sağlanana kadar adım 2'ye dönlür.

2.3.2. Ateşböceği Algoritması

Ateşböceği algoritması (FA), doğadan ilham alan veya evrimsel algoritmalar olarak da bilinen biyo-esinlenmiş algoritmalarındandır. FA, ateşböceklerinin yanıp sönme davranışlarına göre

hareketlerini taklit eder. Bu algoritma ilk olarak 2007 yılının sonlarında Xin-She Yang tarafından geliştirilmiş ve 2008 yılında yayınlanmıştır (Yang, 2008).

FA' nın uygun tasarımında iki önemli tanım vardır: ışık yoğunluğunun (I) değişimi ve çekiciliğin formülasyonu (β). Bir ateşböceğinin çekiciliği ışık yoğunluğu veya parlaklığı ile belirlenir. Amaç fonksiyonu, parlaklık ile ilişkilendirilir. Işık yoğunluğu $I(r)$, r mesafesi ile monotonik ve üstel olarak azalır ve denklem 9'daki gibi ifade edilebilir.

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r} \quad (9)$$

Denklem 9'da, I_0 orijinal ışık yoğunluğu ve γ ışık soğurma katsayısıdır. Bir ateşböceğinin çekiciliği, komşu ateşböcekleri tarafından görülen ışık yoğunluğu ile orantılı olduğundan, bir ateşböceğinin çekiciliği β , denklem 10 ile ifade edilebilir.

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (10)$$

Denklem 10'da, β_0 , $r = 0$ 'daki çekiciliktir. Herhangi iki ateşböceği s_i ve s_j arasındaki mesafe öklid mesafesi olarak denklem 11 ile hesaplanabilir.

$$r_{ij} = \|s_i - s_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^n (s_{ik} - s_{jk})^2} \quad (11)$$

Burada n , problemin boyutunu ifade eder. Birinci ateşböceği, daha çekici başka bir ateşböceği j' ye hareket eder. Ateşböceklerinin hareketleri üç şekilde oluşabilir: birinci ateşböceğinin mevcut konumu, daha çekici başka bir ateşböceğine çekilme ve bir rastgeleleştirme parametresi α ve $[0, 1]$ aralığında rastgele üretilen ε_i sayısından oluşan rastgele bir yürüyüş. Böylelikle ateşböceği hareketi denklem 12 ile ifade edilebilir.

$$s_i = s_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (s_i - s_j) + \alpha \varepsilon_i \quad (12)$$

Ateşböceği algoritmasının işlem adımları :

Adım 1. Ateş böceği popülasyonunun konumlarını arama uzayında rastgele dağıt.

Adım 2. Amaç fonksiyonundan her bir ateş böceğinin uygunluk değerini hesapla.

Adım 3. Her bir ateş böceğinin pozisyonunu, diğer ateş böceklerinin çekicilik ve parlaklığına bağlı olarak güncelle.

Adım 4. Uygunluk değerine bağlı olarak her bir ateş böceğinin parlaklık değerini güncelle.

Adım 5. Durdurma kriteri sağlanana dek adım 2' den devam et.

2.4. Gram-Schmidt Süreci

Doğrusal cebir ve sayısal analizde, Gram–Schmidt süreci bir dizi vektörleri bir iç çarpım uzayı içinde orthonormal etmek için kullanılan bir yöntemdir. Algoritma, bu işlem sonucunda vektörleri orthonormal hale getirir. Bu çalışmada, ayrıştırma matrisinin vektörleri orthonormal hale getirilerek maksimum entropi ve maksimum korelasyon araştırması yapılır. Bu işlem, MS algoritması ile hesaplanan ayrıştırma matrisi, uygunluk fonksiyonunda Gram-Schmidt sürecine tabi tutularak bağımsız vektörler haline getirme şeklinde gerçekleşir.

Gram-Schmidt süreci, $k \leq n$ için sonlu, doğrusal olarak bağımsız bir $S = \{v_1, \dots, v_k\}$ vektör kümesini alıp, R_n 'nin S ile aynı boyutlu k alt uzayını kapsayan bir $S' = \{u_1, \dots, u_k\}$ dik kümesini üretir. Sıfır olmayan bir u vektörü üzerinde v vektörünün izdüşümü denklem 13'deki gibi tanımlanır.

$$\text{projeksiyon}_u(v) = \frac{\langle v, u \rangle}{\langle u, u \rangle} u \quad (13)$$

Bilinen k vektör için v_i, u_i vektörleri denklem 14 ile hesaplanır.

$$\begin{aligned} u_1 &= v_1, \\ u_2 &= v_2 - \text{projeksiyon}_{u_1}(v_2), \\ u_i &= v_i - \sum_{j=1}^i \text{projeksiyon}_{u_j}(v_i) \end{aligned} \quad (14)$$

Elde edilen u_i dizisi ortogonal vektörler sistemidir ve denklem 15 ile normalleştirilerek bir orthonormal küme oluşturulur. Bu işlemler sarasıyla Gram-Schmidt ortogonalizasyonu ve orthonormalizasyonu olarak adlandırılır. Elde edilen vektör dizisi yeni ayrıştırma matrisi olarak değerlendirilir.

$$e_i = \frac{u_i}{\|u_i\|} \quad (15)$$

2.5. Önerilen Yöntem

Jiali ve ark. (2022) çalışmalarında, 2 karmaşık sinyal için MS algoritmalarını kullanmış, ayırma için korelasyondan faydalanmıştır. Burada karmaşıklık matrisi 2×2 boyutlarında rastgele üretilmiştir. Çalışmalarında sundukları karıştırma matrisi, korelasyon $V_{1 \times d}$ boyutlarında vektörün $(V_{1 \times d})^r$ hali ile

birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Bu durumda 2'den büyük bağımsız bileşenlerde orta sütunlar aynı olmaktadır.

Çalışmamızda algoritma akışı MS algoritmaları genel adımlarına benzerlik göstermektedir. Ancak bizim çalışmamızın farkı, ayırma matrisinin Gram-Schmidt süreci ile oluşturularak bağımsızlık sağlanmasıdır. Böylece vektörlerin ortalarında oluşan tekrarlılık önlenmiştir. Daha önemlisi, her bir ayırma vektörü birbirine dik olarak orthonormal formda üretilmektedir. Çalışmada, MS algoritmaları ile ilk ayırma vektörü oluşturulduktan sonra, diğer vektörler rastgele vektörlerin ortogonalleştirilmesi ile elde edilir. Böylece ilk belirlenen ayrıştırma vektörü referans alınarak diğer ayrıştırma vektörleri ortogonal bir şekilde üretilmiştir. Sonuç olarak, ilgili MS algoritmasının parlaklık, konum gibi parametrelerine göre belirlenen ilk sinyal ayırma vektöründen diğer ayırma vektörleri, birbirinden bağımsız olacak şekilde üretilmiştir.

Çalışmada ana yapı olarak Brian Moore (URL-1, 2024) kodu takip edilmiştir. Brian Moore (URL-1, 2024) paketinin ICA demosunda 3 sinyal üretilip gauss gürültüsü eklenmiştir. Sonra random üretilen bir A karıştırma matrisi ile karışmış sinyaller elde edilmiştir. Çalışmamızda, her bir sinyal için T- periyot parametresi değiştirilerek FastICA ile MS algoritmaları kıyaslanmıştır.

FastICA çalışmamızda, 150 iterasyonla sınırlandırılmıştır. Sinyal uzunlukları görsel olarak daha iyi sunum için $n=300$ alınmıştır. Sunulan demodan farklı olarak çalışmamızda, FA ve PSO algoritmaları, Gram Schmidt süreci tabanlı ayırma matrisi oluşturan amaç fonksiyonu ile geliştirilerek uygulamaya entegre edilmiştir. Çalışmamızda sinyallerin periyotları değiştirilerek FastICA, FA ve PSO algoritmalarının performansı karşılaştırılmıştır. Kullanılan sinyaller Şekil 1'deki gibi üretilip, T-periyot değişkenine göre farklı sinyaller üretilmiştir.

```
% Sinyal Parametreleri
n = 300;          % Örnekler
T = [t1,t2,t3];  % Her bir sinyal için periyot
SNR = 50;        % Sinyal SNR

% Sinyal üretme
t = @(n,T) linspace(0,1,n) * 2 * pi * T;
S1 = sin(t(n,T(1))); % Sinus
S2 = sign(sin(t(n,T(2)))); % Karedalga
S3 = sawtooth(t(n,T(3))); % Testere dişi

% Gürültü ekleme
sigma = @(SNR,X) exp(-SNR/10)*(norm(X(:))/sqrt(numel(X)));
Si = Si + sigma(SNR,Si) * randn(size(Si));
```

Şekil 1. Kaynak sinyal üretimi

Gerçekleştirilen uygulama Matlab2023 Akademik versiyonda, 8 GB belleğe sahip Intel(R) Xeon(R) CPU E5-1650 v3 @ 3.50GHz donanımlı x64 tabanlı işletim sisteminde geliştirilmiştir. MS

algoritmaların deneysel ayarlanmış parametreleri Tablo 1’de verilmiştir. MS algoritmalarının iterasyon sayısı FastICA ile aynı sayıda uygunluk fonksiyonu çağrısı yapılsın diye 50 tutulmuştur.

Tablo 1. MSA parametreleri

FA Algoritması		PSO Algoritması	
Popülasyon sayısı	30	Popülasyon sayısı	30
alpha	0,2	Pozisyon alt sınır	-30
beta	1,8	Pozisyon üst sınır	30
gamma	0,1	Hız alt sınır	-10
theta	0,98	Hız üst sınır	10
alpha_damp	0,98	wdamp	0,99
Alt sınır	-10	c1	1,7
Üst sınır	10	c2	2,3
İterasyon sayısı	50	İterasyon sayısı	50

3. Bulgular ve Tartışma

Tablo 2. Ayırıştırılmış sinyallerin kaynak sinyallerle olan korelasyon katsayıları

Kaynak	T	FastICA			FA			PSO		
S1	3	-0.00295	0.006762	-0.99997	-0.0508	-0.07501	0.995889	-0.01256	0.00209	0.999919
S2	4	0.002362	-0.99996	-0.00817	-0.99794	-0.03708	-0.05228	0.999831	-0.01196	0.013992
S3	5	-0.99991	0.013638	-1.8E-05	-0.02503	0.996728	0.076866	-0.00406	0.999992	0.000916
S1	4	-0.00395	-0.0078	0.999962	-0.00828	0.063061	0.997976	0.001935	-0.00442	-0.99999
S2	3	-0.00908	0.999801	0.017815	0.077735	0.995607	-0.0522	-0.00658	0.999874	-0.01448
S3	5	0.998624	-0.04436	0.027972	-0.99957	0.025651	0.014513	0.998663	-0.04668	-0.02224
S1	6	-0.62228	0.508341	0.595282	-0.46666	0.569655	-0.67656	0.454526	-0.61238	0.646842
S2	2	0.166478	0.971691	-0.16764	-0.98117	-0.15178	0.119491	0.98397	0.142278	-0.10752
S3	4	0.691456	0.023111	0.72205	-0.05367	0.753743	0.654975	-0.00991	0.713847	0.700232
S1	6	0.854584	0.116767	0.506017	-0.97527	-0.21714	0.041375	-0.19589	0.024922	0.98031
S2	4	-0.09302	-0.92385	0.371274	0.04599	-0.01856	0.99877	-0.00159	0.999681	-0.02522
S3	2	-0.61829	0.66994	0.410975	0.027052	0.918925	-0.39351	0.910947	-0.40889	-0.05463
S1	4	0.010755	-0.02934	-0.99951	0.106173	0.803214	0.586154	-0.70109	-0.66128	0.266806
S2	4	0.319191	-0.35482	-0.87876	0.076419	0.984229	0.159542	-0.54528	-0.49944	0.673229
S3	4	0.143787	0.654775	0.742022	0.474653	-0.85471	-0.21019	0.844962	0.037168	-0.53353
S1	20	0.701478	-0.00726	-0.71266	-0.05564	0.715641	-0.69625	0.711192	0.005093	-0.70298
S2	30	-0.0012	-0.99998	0.006504	-0.99847	-0.04717	0.028751	-0.00223	0.999995	0.002452
S3	40	-0.72038	-0.01483	-0.69342	-0.02284	0.688248	0.725117	0.695002	0.010971	0.718925
S1	50	0.679984	-0.00767	0.733188	-0.54791	0.091058	0.831569	0.815922	-0.00258	0.578157
S2	50	0.411609	-0.35591	0.838994	-0.12384	0.086483	0.988526	0.987105	0.009676	0.159787
S3	50	-0.66354	0.611629	-0.43085	0.141978	0.446507	-0.88345	-0.84601	0.51482	-0.13867
S1	7	-0.0097	0.008631	-0.99992	0.002687	-0.00493	0.999985	0.017572	-0.01202	0.999774
S2	12	-0.00604	-0.99996	-0.00665	0.001873	0.999994	0.002995	0.017348	0.999802	0.009787
S3	13	-0.99973	-0.02118	0.009528	-0.99958	0.029022	0.002819	0.999798	0.009988	-0.01746
S1	3	0.022135	-0.00603	0.999737	0.00447	-0.00412	0.999982	-0.00938	-0.00646	0.999936
S2	5	0.02411	0.999703	-0.00359	-0.01318	0.999902	-0.00491	-0.01034	0.999943	-0.00273
S3	8	-0.99911	0.026567	0.032875	-0.99983	-0.01075	0.015017	0.999718	0.012742	0.020056

Tablo 2’de satırlarda sinyaller periyot katsayısı (T) ile birlikte verilmiştir. Sütunlarda her bir algoritmanın ayrıştırma sinyali ile kaynak sinyallerinin korelasyon katsayısı verilmiştir. Tabloda mutlak 1’e yakın olan en çok benzeşen sinyallerdir. Yani sütunlarda maksimum olan değerli hücre, eşleşen kaynak sinyalini ifade eder. Tablo 2’de $T=\{6,2,4\}$ periyotlarında sadece FA’nın, $T=\{6,4,2\}$ periyotlarında ise FA ve PSO algoritmalarının tüm sinyalleri ayrıştırdığı görülmektedir. Diğer durumlarda başarı aynı olup neredeyse %99 korelasyon ile sinyaller ayrıştırılmaktadır.

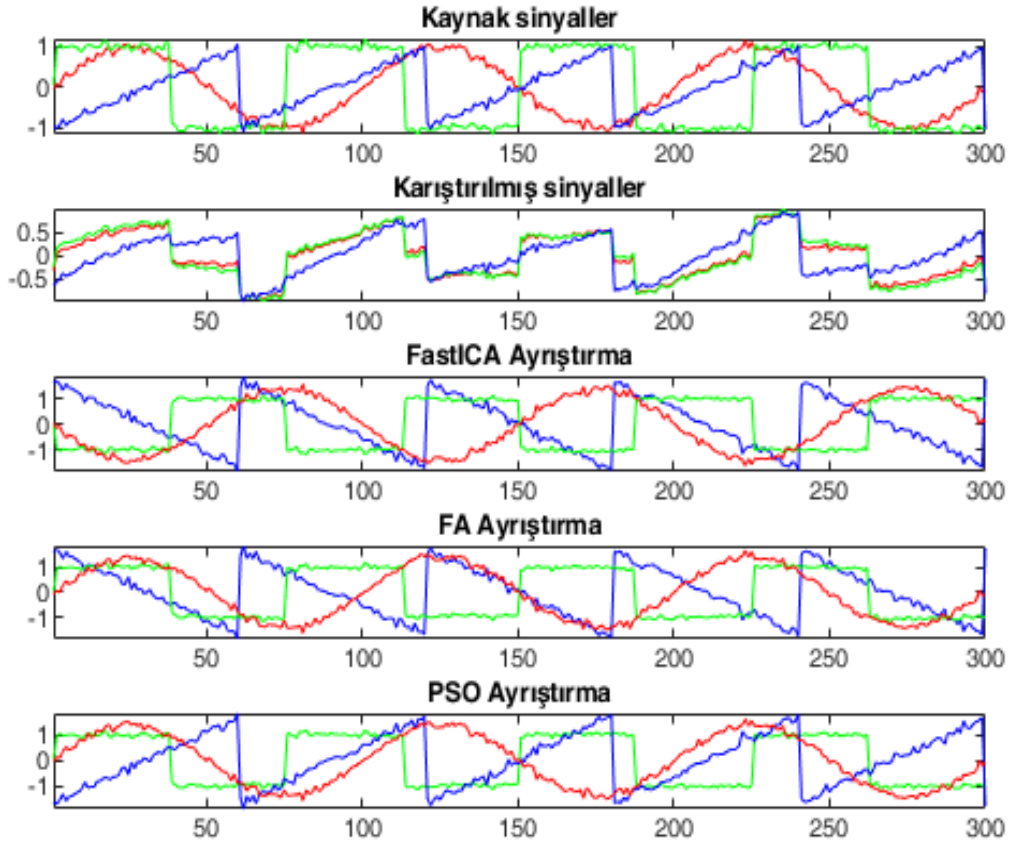
Tablo 3’de, kök ortalama kare hata (RMSE) değerleri verilmiştir. Tablonun 2-10 satırlarında, yöntemlerin 3 kaynak sinyalinin, 3-12 sütunlarında farklı periyotlar için RMSE değerleri verilmiştir. Son sütun, kaynak sinyallerinin farklı periyotlardaki RMSE değerinin ortalamasıdır. Son 3 satır her bir yöntemin deney bazlı farklı 3 kaynak sinyalin RMSE değerlerinin ortalamasıdır.

Buna göre son üç satır incelendiğinde, PSO $\{(6,4,2), (50,50,50), (7,12,13), (3,5,8)\}$ periyotlu işaretleri daha iyi ayrıştırırken diğer iki algoritma 2’şer deneyde daha başarılı olabilmektedir. Son 3 satırın son sütunlarında tüm deneylerin genel ortalaması verilmiştir. Buna göre kullanılan yöntemlerin yapılan deneylerdeki başarı sırası $PSO > FA > FastICA$ şeklindedir.

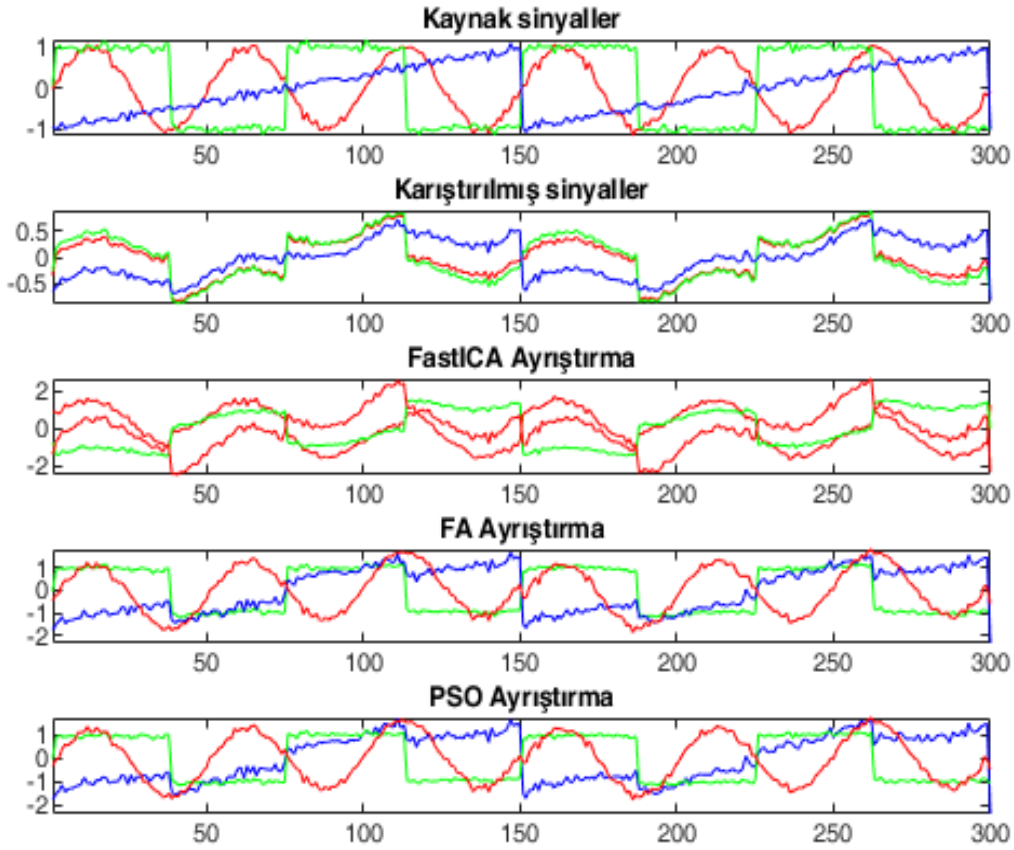
Tabloda kaynak sinyal bazlı değerlendirmelerde en iyi sonuç, ilgili deney sütunda kalın olarak sunulmuştur. Örneğin, (3,4,5) periyotlu deney için S1 ve S2 kaynaklarına en yakın sinyalleri FA ayırırken, S3 kaynağına en yakın sinyali PSO üretmiştir. Buna göre 9 deneyin hepsinin değerlendirilmesinde, toplam 27 sinyalin 6’sını FastICA, 9’nu FA ve geriye kalan 12’sini PSO daha bağımsız bulmuştur. PSO’nun genel ortalamasında da RMSE en düşük çıkmaktadır.

Tablo 3. Sinyallerin RMSE değerleri

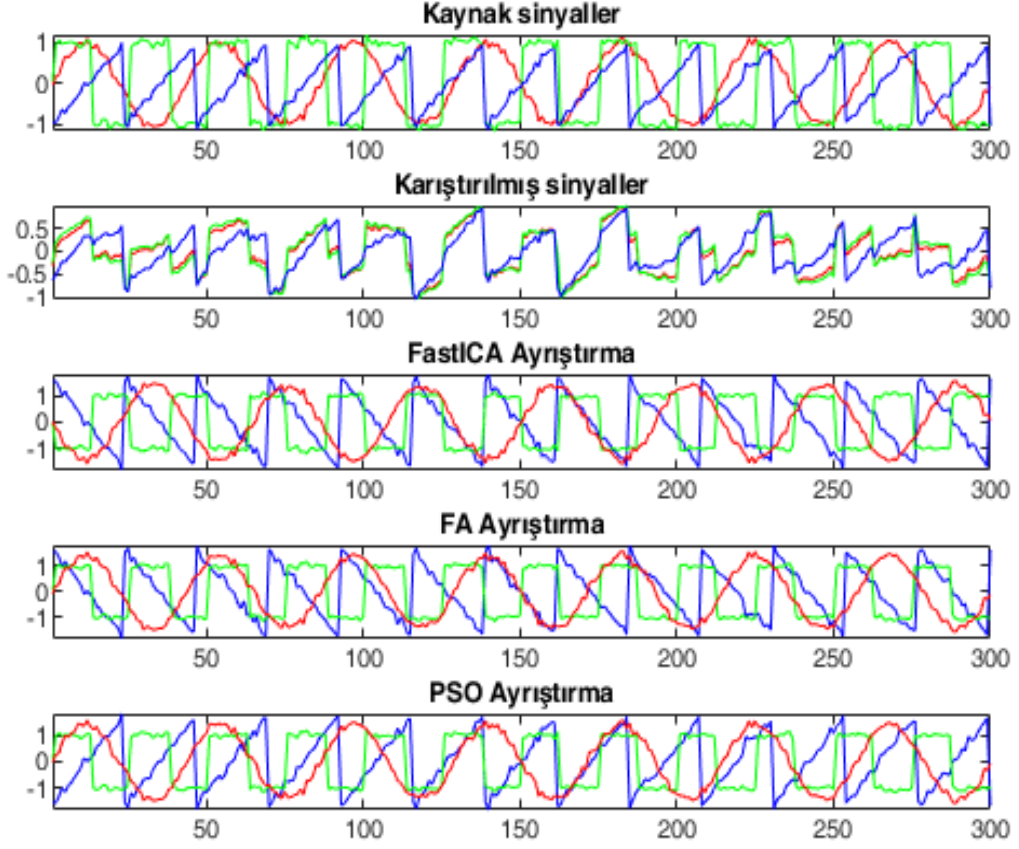
T		(3,4,5)	(4,3,5)	(6,2,4)	(6,4,2)	(4,4,4)	(20,30,40)	(50,50,50)	(7,12,13)	(3,5,8)	G.Ort.
FastICA	S1	0.0764	0.0178	1.1745	0.9145	2.0869	1.1888	1.6750	0.0658	0.0475	0.8052
	S2	0.1122	0.0092	0.0216	0.7764	0.0322	0.1098	2.3972	0.1255	0.0343	0.4020
	S3	2.5458	0.6703	0.2716	1.8174	0.9909	2.0425	1.7073	2.4607	2.5270	1.6704
FA	S1	0.0485	0.0966	0.9865	1.7165	2.7938	1.2096	2.9354	0.0159	0.0192	1.0913
	S2	0.0168	0.0380	0.0464	0.5243	0.3464	1.0272	0.3859	0.0021	0.0250	0.2680
	S3	2.5448	0.6637	0.0836	0.9137	1.3151	0.8825	1.1994	2.4607	2.5263	1.3989
PSO	S1	1.5736	0.0126	1.1861	0.3019	0.4855	1.1208	3.0119	0.0157	0.0271	0.8595
	S2	0.0940	0.0159	1.0967	0.0755	2.8651	0.0035	0.0714	0.0314	0.0123	0.4740
	S3	1.0033	0.6701	0.1037	0.8437	1.2976	0.1666	1.2800	0.5852	0.6526	0.7337
S. Ort.	FastICA	0.9115	0.2324	0.4892	1.1694	1.0367	1.1137	1.9265	0.8840	0.8696	0.9592
	FA	0.8700	0.2661	0.3721	1.0515	1.4851	1.0398	1.5069	0.8262	0.8568	0.9194
	PSO	0.8903	0.2329	0.7955	0.4071	1.5494	0.4303	1.4545	0.2108	0.2307	0.6890



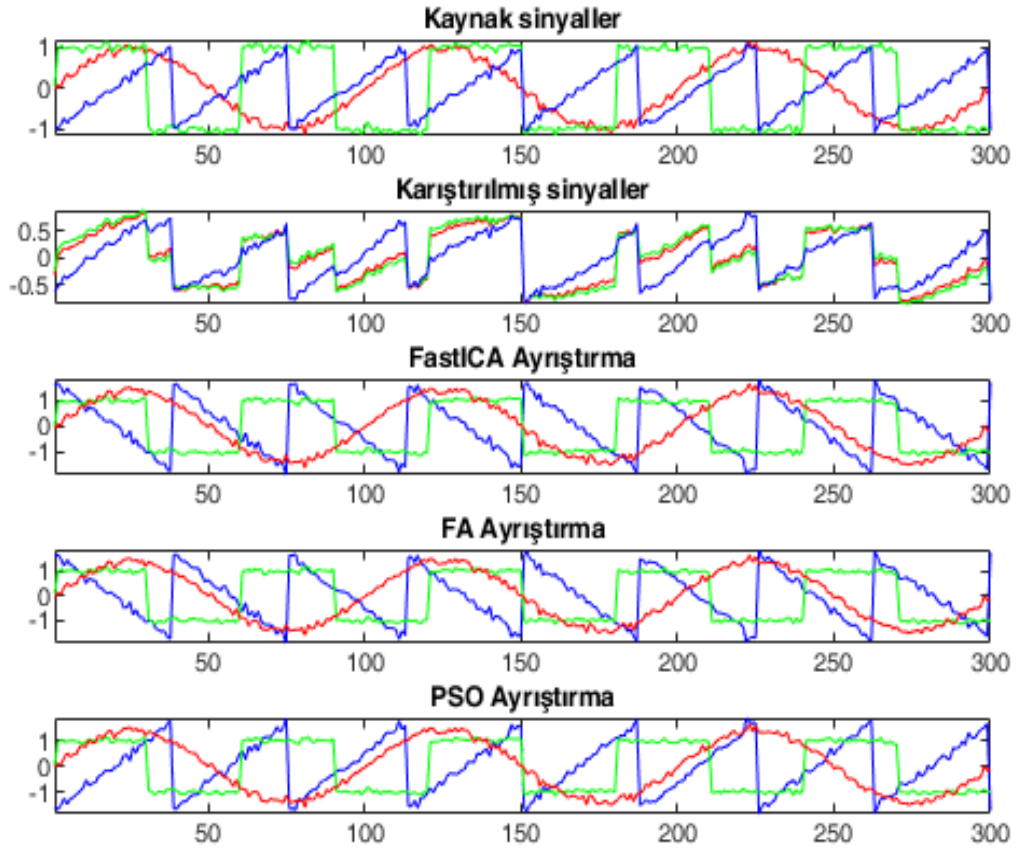
Şekil 2. (3,4,5) periyotlarındaki sinyallerin ayrıştırılması



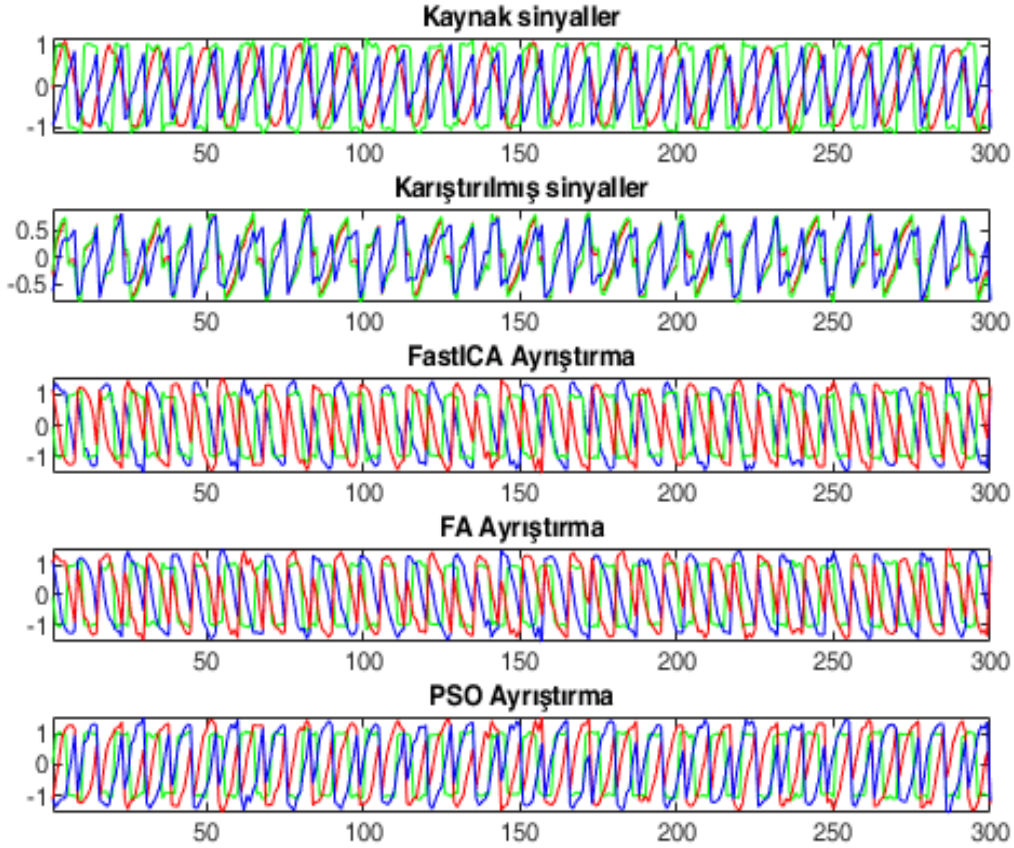
Şekil 3. (6,4,2) periyotlarındaki sinyallerin ayrıştırılması



Şekil 4. (7,12,13) periyotlarındaki sinyallerin ayrıştırılması



Şekil 5. (3,5,8) periyotlarındaki sinyallerin ayrıştırılması



Şekil 6. (20,30,40) periyotlarındaki sinyallerin ayrıştırılması

Şekil 2-6'da, yapılan deneylerdeki, karıştırma ve ayırma sonuç grafiklerinin bir kısmı verilmiştir. Şekil 2 ,4 ve 5'te tüm algoritmalar başarılı bir şekilde ayrıştırma yapabildiği gözükmektedir. Bunlardan bir kısmı negatif korelasyona sahiptir ancak bunlar üstesinden gelinebilen problemlerdir. Şekil 6'da ayrıştırma başarılı gözükmektedir. Tablo 2'ye göre bu kombinasyonda her algoritma sinyalleri farklı kaynaklarla eşleştirmiştir.

Şekil 3'de FastICA algoritmasının bulunduğu farklı üç sinyalden ikisinin, kaynak sinyallerle karşılaştırıldığında tek bir sinyale daha çok benzediği görülmektedir. Gerçekleştirilen uygulamada, en çok benzeyenler aynı renge boyandığı için Şekil 3'ün FastICA satırında aynı renkli iki sinyal mevcuttur. Burada, korelasyon tabanlı eşleştirme yapıldığı için, esas kaynağa çok uzak bir belirleme yapıldığı sonucuna varılabilir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada kör kaynak ayırma problemi için MS algoritmaların kullanılabilirliği görülmüştür. Mevcut FastICA algoritmasında yakınsama sürekli artmayıp dalgalanma yaparken MS algoritmalar her iterasyonda ya daha çok yakınsama yapmaktadır ya da en uygun çözümden

vazgeçmemektedir. Önerilen ayırma matris üretim yaklaşımı ile daima orthonormal uzayda ayırma yapılmakta ve bunun başarıyı artırdığı görülmüştür. Çalışmada orthonormal uzay, Gram-Schmidt süreci ile sağlanmıştır. Genel olarak bakıldığında PSO algoritmasının RMSE ortalama değeri diğer yaklaşımlardan daha iyi çıkmaktadır.

Sonraki çalışmalarda, orthonormal ayırma matrisi üretildikten sonra yerel arama yapıp daha iyi ayırma yapan orthonormal şartı olmayan ayırma matrisi türetilebilir mi diye araştırılabilir. Biyomedikal sinyal işlemede, belirli bir örüntünün karmaşık sinyallerde olup olmadığı MSA tabanlı BSS algoritmaları ile araştırılarak otomatik hastalık teşhisinde kullanılabilir. Bu çalışmada yaygın kullanılan MS algoritmaları denenmiştir. Problem için daha başarılı MS algoritmalarının olup olmadığı üzerine araştırma yapılabilir.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Abbas, N., and Kabudian, J., (2017). Speech Scrambling based on Independent Component Analysis and Particle Swarm Optimization, *The International Arab Journal of Information Technology (IAJIT)* , 14(4), 109–115.
- Baysal, B., and Efe, M.Ö., (2023). A comparative study of blind source separation methods. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 31(7). <https://doi.org/10.55730/1300-0632.4047>
- Bonyadi, M.R., and Michalewicz, Z., (2017). Particle swarm optimization for single objective continuous space problems: a review. *Evolutionary Computation*. 25(1),1–54. doi:10.1162/EVCO_r_00180
- Comon, P., and Jutten, C. (2010). *Handbook of Blind Source Separation: Independent Component Analysis and Applications*. Oxford, UK: Academic Press.
- Feng, F., and Kowalski, M., (2018). Revisiting sparse ICA from a synthesis point of view: Blind Source Separation for over and underdetermined mixtures. *Signal Processing*, 152, 165–177. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2018.05.017>
- Ghahramani, H., Barari, M., and Bastani, M.H. (2014). Maritime radar target detection in presence of strong sea clutter based on blind source separation. *IETE Journal of Research*, 60(5), 331–344. <https://doi.org/10.1080/03772063.2014.961573>

- Hyvärinen, A., and Oja, E., (2000). Independent component analysis: algorithms and applications. *Neural Networks*, 13 4–5, 411-430. [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(00\)00026-5](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(00)00026-5)
- Jiang, L., Li, L., and Zhao, G.Q. (2015, January). Pulse-compression radar signal sorting using the blind source separation algorithms. *International Conference on Estimation, Detection and Information Fusion (ICEDIF)* (pp.268-271). Harbin. doi: 10.1109/ICEDIF.2015.7280204
- Jin-Wang, H., Jiu-Chao, F., and Shan-Xiang, L. (2014). Blind source separation of chaotic signals in wireless sensor networks. *Acta Physica Sinica*, 63(5): 050502. <https://doi.org/10.7498/aps.63.050502>
- Kumar, M., and Jayanthi, V.E., (2020). Blind source separation using kurtosis, negentropy and maximum likelihood functions. *International Journal of Speech Technology*, 23, 13–21. <https://doi.org/10.1007/s10772-019-09664-z>
- Li, H., Li, Z., and Li, H., (2016). A Blind Source Separation Algorithm Based on Dynamic Niching Particle Swarm Optimization. *MATEC Web of Conferences* 61, 03008. DOI: 10.1051/mateconf/20166103008
- Luo, D., Sun, H., and Wen, X., (2012). Research and Application of Blind Signal Separation Algorithm to the Aircraft Engine Vibration Signal and Fault Diagnosis Based on Fast ICA. *J. Converg. Inf. Technol.* 7(10), 248–254. <http://dx.doi.org/10.4156/jcit.vol7.issue10.29>
- Metsomaa, J., Sarvas, J., and Ilmoniemi, R.J. (2014). Multi-trial evoked EEG and independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, 228, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2014.02.019>
- Pati, R., Pujari, A.K., Gahan, P., and Kumar, V., (2021). Independent Component Analysis: A Review, with Emphasis on Commonly used Algorithms and Contrast Function. *Computación y Sistemas*, 25(1). doi: 10.13053/CyS-25-1-3449
- Prakash, K., and Hepzibha Rani, D., (2015, January). Blind Source Separation for Speech Music and Speech Mixtures. *International Journal of Computer Applications*. 110, 40-43. DOI=10.5120/19372-1087
- URL-1: Moore, B., PCA and ICA Package, MATLAB Central File Exchange. (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/38300-pca-and-ica-package>), (Erişim tarihi 23 Nisan 2024).
- Wang, R., (2021). Blind Source Separation Based on Adaptive Artificial Bee Colony Optimization and Kurtosis. *Circuits System and Signal Processing*, 40, 3338–3354. <https://doi.org/10.1007/s00034-020-01621-5>
- Yang, X. S. (2008). *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*. United Kingdom: University of Cambridge, Luniver Press. ISBN 978-1-905986-10-1.
- Zi J., Lv D., Liu J., Huang X., Yao W., Gao M., Xi R., and Zhang Y. (2022). Improved Swarm Intelligent Blind Source Separation Based on Signal Cross-Correlation, *Sensors*, 22(1),118. <https://doi.org/10.3390/s22010118>

Alifatik Ester-Eter Yapılı Yeni Makromonomerlerin Sentezi ve “Dolaylı Aşılama” Stratejisinde Kullanımı

Efkan ÇATIKER¹ , Temel ÖZTÜRK^{*2} 

Öz

Bu çalışmada, poli(akrilik asit-g-hidroksietil akrilat) (PAA-g-PHEA) ve poli(akrilik asit-g-hidroksipropil akrilat) (PAA-g-PHPA) aşı kopolimerlerinin serbest radikal polimerizasyonu (SRP) yöntemiyle sentezleri gerçekleştirildi. Bunun için ilk aşamada, 2-hidroksietil akrilat (HEA) ve 2-hidroksipropil akrilat (HPA) kullanılarak baz katalizli hidrojen transfer polimerizasyonu (HTP) metoduyla sırasıyla poli(2-hidroksietil akrilat) (PHEA) ve poli(2-hidroksipropil akrilat) (PHPA) elde edildi. Elde edilen bu yapılar zincir uçlarında vinil grupları barındırdığından ikinci aşamada makromonomer olarak kullanıldılar. Bu aşamada “dolaylı aşılama” (“grafting through”) yaklaşımı ile akrilik asit ve bu makromonomerlerin ayrı ayrı serbest radikal polimerizasyonuna (SRP) uğratılmasıyla PAA-g-PHEA ve PAA-g-PHPA aşı kopolimeri elde edildi. Sentezlenen her iki ürünün yapısal ve termal karakterizasyonu en temel spektroskopik ve termal analiz yöntemlerinden olan ¹H-NMR, FT-IR ve TGA yöntemleri ile sağlandı. SRP verimlerinin neredeyse %100 olması, nihai ürünlerin ¹H-NMR spektrumlarında vinil uç grubuna ait sinyallerin olmaması ve TGA termogramlarında her iki bileşene ait kütle kayıp yüzdesinin neredeyse eşit olması uygulanan sentez stratejisinin başarısını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Serbest radikal polimerizasyonu, Hidrojen transfer polimerizasyonu, Aşı kopolimer, “Dolaylı aşılama” stratejisi, Makromonomer.

Synthesis of Novel Macromonomers with Aliphatic Ester-ether Backbone and Their Use in “Grafting Through” Strategy

Abstract

In this study, poly(acrylic acid-g-hydroxyethyl acrylate) (PAA-g-PHEA) and poly(acrylic acid-g-hydroxypropyl acrylate) (PAA-g-PHPA) graft copolymers were synthesized by the free-radical polymerization (SRP) method. For this, in the first step, poly(2-hydroxyethyl acrylate) (PHEA) and poly(2-hydroxypropyl acrylate) (PHPA) were obtained by base-catalyzed hydrogen transfer polymerization (HTP) method using 2-hydroxyethyl acrylate (HEA) and 2-hydroxypropyl acrylate (HPA) as monomers, respectively. Since these obtained structures contained vinyl groups at the chain ends, they were used as macromonomers in the second stage. At this stage, PAA-g-PHEA and PAA-g-PHPA graft copolymers were obtained by subjecting acrylic acid and these macromonomers separately to free radical polymerization (SRP) with the “grafting through” approach. Structural and thermal characterization of both synthesized products was achieved by ¹H-NMR, FT-IR, and TGA methods, which are among the most basic spectroscopic and thermal analysis methods. The fact that SRP yields are almost 100%, there are no signals of the vinyl end-group in the ¹H-NMR spectra of the final products, and the mass loss values of both components are almost equal in the TGA thermograms reveal the success of the applied synthesis strategy.

Keywords: Free radical polymerization, Hydrogen transfer polymerization, Graft copolymer, “Grafting through” strategy, Macromonomer.

¹Ordu University, Department of Chemistry, Ordu, Turkey, ecatiker@gmail.com

²Giresun University, Department of Chemistry, Giresun, Turkey, temel.ozturk@giresun.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 29.04.2024

Kabul/Accepted: 18.07.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Giriş

Kopolimerler, kendilerini oluşturan bileşenlerin bazı özelliklerin taşıyabildikleri için polimer bilimi ve teknolojisinde sentez ve uygulama bakımından büyük önem taşımaktadırlar (Saegusa ve ark., 1975; Çatıker ve ark., 2019; Savaş ve ark., 2021a). Endüstriyel ve biyoteknolojik uygulamalarda önemli bir kopolimer türü olan aşı kopolimerlerin eldesi sentetik kimyada başlıca araştırma alanlarındadır (Öztürk ve Türkoğlu, 2022; Savaş ve Öztürk, 2023; Savaş ve Öztürk, 2020; Öztürk ve Cavicchi, 2018; Dag ve ark., 2012). İyi tanımlanmış aşı kopolimerlerin sentezinde üç strateji çok yaygın olarak kullanılır: “Üzerinde aşılama” (“grafting to”), “doğrudan aşılama” (“grafting from”) ve “dolaylı aşılama” (“grafting through”) (Macchione ve ark., 2018). “Dolaylı aşılama” stratejisi, iki aşamalı sentez gerektirmesine rağmen iyi tanımlanmış yan zincirlere sahip bir aşı kopolimeri sentezlemenin en temel yoludur. Bu stratejinin kullanıldığı birçok aşı kopolimer sentezi literatürde mevcuttur (Savaş ve ark., 2021b; Çolakoğlu ve ark., 2022; Savaş ve ark., 2022; Martinez ve ark., 2020; Cho ve ark., 2015; Neugebauer ve ark., 2006). Makrobaşlatıcılar, makromonomerler ve telekhelik makromonomerler yeni moleküler mimariler ve dolayısıyla spesifik özellikler yaratmak için kullanılan çok yönlü araçlardır (Hazer ve ark., 1989; Hazer, 1992; Hazer ve ark., 1994; Asan ve ark., 2023). Hidrojen transfer polimerizasyonu (HTP) için şart olan gevşek proton(lar)a sahip vinil monomerlerin gerekmesi (Iwamura ve ark., 2019; Çatıker ve ark., 2018) ve oluşan polimerlerin genellikle oligomer düzeyinde kalması yöntemin en önemli dezavantajıdır. Ancak, HTP kuvvetli baz ile başlatıldığında başlama basamağında vinil grubunun korunmasından kaynaklı olarak vinil uçlu makromonomerlerin elde edilmesi yönüde önem kazandırmıştır (Savaş ve ark., 2021b; Çatıker ve ark., 2018; Savaş ve ark., 2022). Ayrıca, bu makromonomerler vinil uçlarının fonksiyonlandırılması sonrasında da makrobaşlatıcı rolü alabilmektedirler (Çatıker ve ark., 2019; Savaş ve ark., 2021a). Serbest radikal polimerizasyonu (SRP), eskiden beri iyi bilinen bir polimerizasyon yöntemidir ve günümüzde hem endüstride hem de akademik çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Çolakoğlu ve ark., 2022). SRP azo, peroksi ve hidroperoksi başlatıcılar kullanılarak su, organik çözücü veya çözücüsüz olarak birçok monomere uygulanarak karbon iskeletine sahip yüksek termal dayanıma sahip sayısız polimerin sentezinde kullanılmıştır.

Bu çalışmada, akrilik asit gibi akademik araştırmalarda en sık kullanılan monomerlerden biri özellikle seçilerek ticari öneme sahip olan poli(akrilik asit)’in türevi sayılabilecek poli(akrilik asit-g-hidroksietil akrilat) (PAA-g-PHEA) ve poli(akrilik asit-g-hidroksipropil akrilat) (PAA-g-PHPA) aşı kopolimerlerinin eldesi “dolaylı aşılama” stratejisi ve SRP yönteminin birlikte kullanımıyla gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Eşit kütlelerde alınan monomer (AA) ve makromonomerin (HEA ve HPA) yüksek verimde aşı kopolimerler verebilmesi hedeflenmiştir. Böylece sentezde kullanılacak makromonomerin türüne ve miktarına bağlı olarak farklı fiziksel, kimyasal, mekanik ve termal

özelliklere sahip poli(akrilik asit) türevlerinin sentezinin sağlanabileceği gösterilmiş olacaktır. Poli(akrilik asit) omurgasına asılı olarak bu türden alifatik ester eter segmentlerinin bulunduğu aşırı kopolimer yapısı bilindiği kadarıyla daha önce rapor edilmemiştir. Bu yapılan çalışmadan elde edilecek sonuçların önemini daha da arttırmaktadır. ¹H-NMR, FT-IR ve TGA yöntemleri elde edilen her iki aşırı kopolimerin oluşumunu kanıtlamaya yeterli olmuştur.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kimyasallar

2-hidroksietil akrilat (Sigma-Aldrich, %96), 2-hidroksipropil akrilat (Sigma-Aldrich, %95), kloroform (Aros Organics, %99.8), dietil eter (Thermo Scientific, %99.5), sodyum tersiyer bütoksit (Aldrich, %97) ve susuz sodyum sülfat (Acros Organics, %99+) ticari olarak elde edildi ve olduğu gibi kullanıldı. 1,4-diokzan (Sigma-Aldrich) destile edildi, kurutuldu, sieve üzerinde depolandı. Akriklik asit (Sigma-Aldrich, %99) inhibitör uzaklaştırılması için nötral alümina kolondan geçirildi.

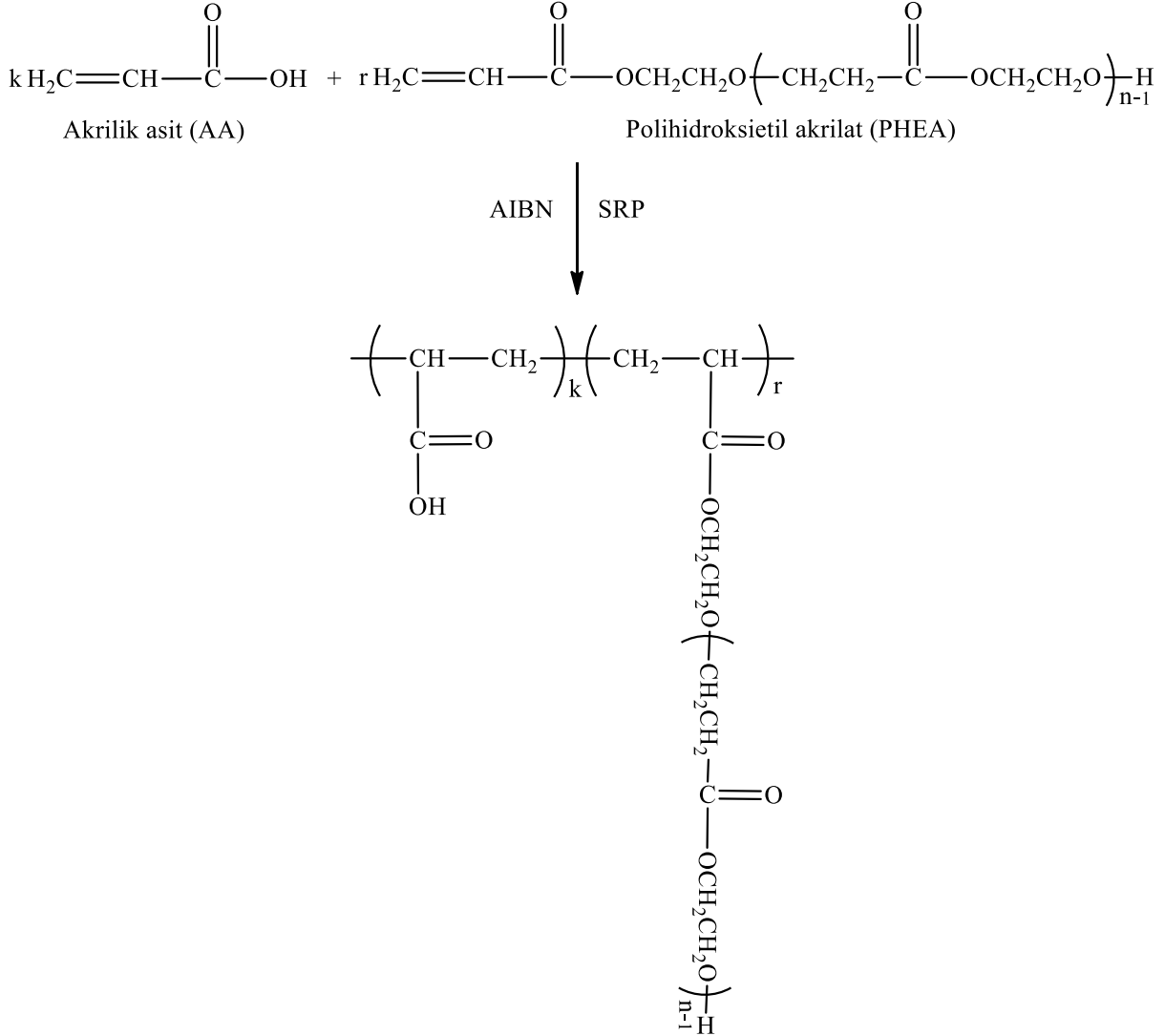
2.2. Cihazlar

ATR modülüne sahip FT-IR spektrometresi cihazı, Shimadzu IRaffinity1 model olup 600-4000 cm⁻¹ bant aralığında 32 taramayla spektrumlar kaydedilmesi için kullanıldı. ¹H-NMR spektrumları, Bruker Ultra Shield Plus, Ultra long hold time 400 MHz ile çözücü olarak D₂O kullanılarak elde edildi. TA Instruments Q600 TGA cihazı ile azot akışı altında 15 °C/dk. ısıtma hızı ile 25 °C' den 500 °C' ye ısıtılarak örneklerin termogramları kaydedildi.

2.3. PHEA ve PHPA Makromonomerlerinin Hidrojen-Transfer Polimerizasyonu (HTP) Yöntemiyle Sentezi

2-hidroksietil akrilatın (HEA) HTP yöntemi kullanılarak polimerizasyonu literatür (Saegusa ve ark., 1975) bilgileri ışığında ancak küçük değişiklikler yapılarak gerçekleştirildi. Bunun için 2-hidroksietil akrilat (0.200 mol) ve sodyum tersiyer bütoksit (0.010 mol) Schlenk tekniği kullanılarak 10 mL kapasiteli Schlenk kabına aktarıldı. 50 °C de 2 gün süren reaksiyon sonunda elde edilen vizkoz çözelti 3 mL kloroform ile seyreltildi. 2 mL su ile iki defa ekstraksiyon yapılarak monomer ve başlatıcı kalıntıları uzaklaştırıldıktan sonra sodyum sülfat üzerinde kurutulan polimer çözeltisi soğuk 25 mL dietil eter üzerine yavaşça aktarılarak PHEA diye adlandırdığımız kimyasal formülasyonu Şema 1'de verilen oligomerik vinil uçlu ürün izole edildi (verim: %94.3).

balon içerisine eklendi. Kauçuk septa ile kapatıldıktan sonra 15 dakika süre ile argon gazı ile yıkandı. 70 °C de yağ banyosunda manyetik karıştırıcı ile gece boyunca karıştırıldı. Tamamen jelleşen reaksiyon karışımı metanol ile yıkandıktan sonra süzülde ve vakumda kurutuldu (verim: %98.0).



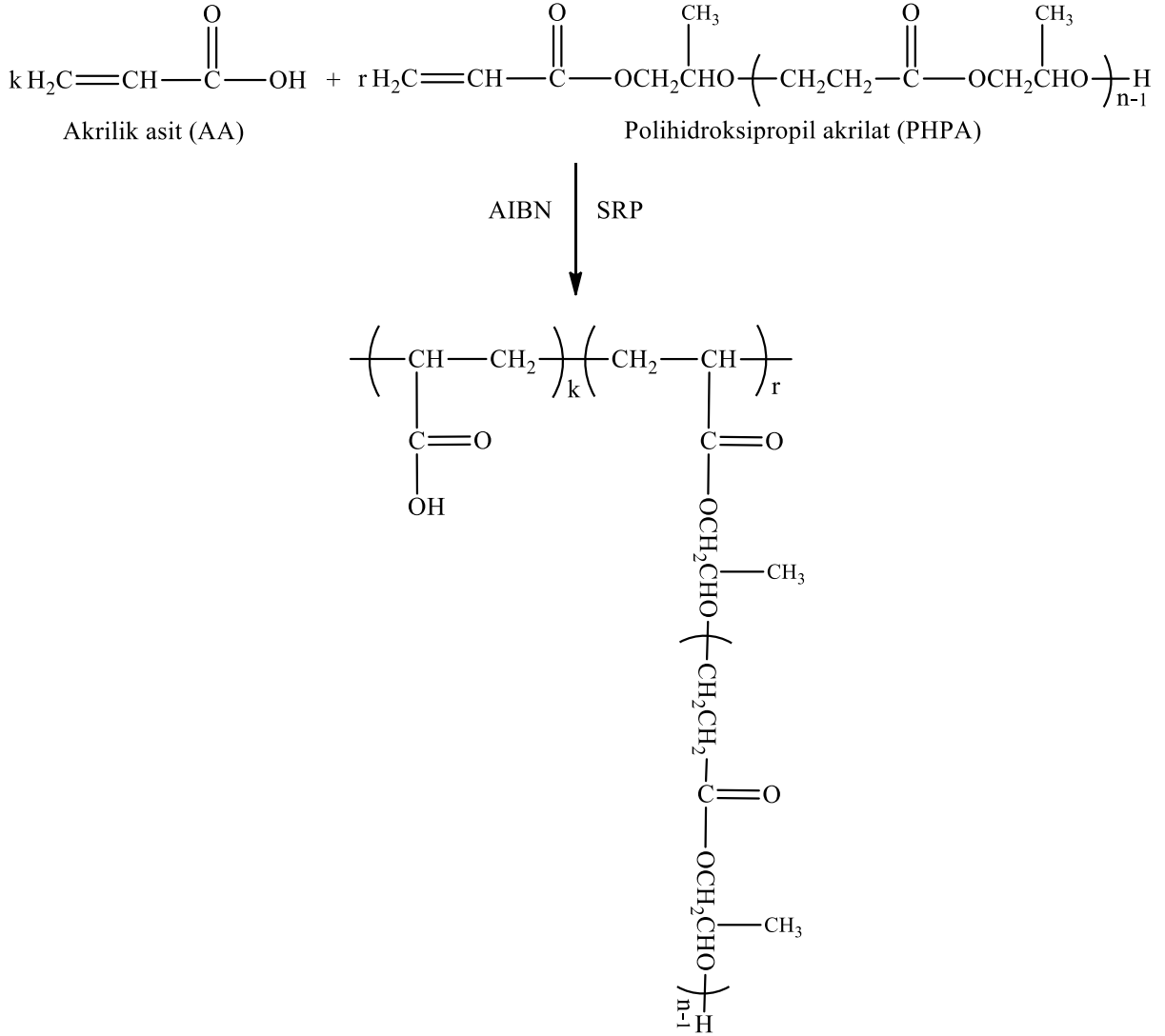
Poli(akrilik asit-g-hidroksietil akrilat) kopolimeri

Şema 3. Poli(akrilik asit-g-hidroksietil akrilat) aşısı kopolimerinin “dolaylı aşılama” stratejisi kullanarak serbest radikal polimerizasyonu yöntemiyle sentezi.

2.5. Poli(akrilik asit-g-hidroksipropil akrilat) Aşısı Kopolimerinin “Dolaylı Aşılama” Stratejisi ve Serbest Radikal Polimerizasyonu Yöntemiyle Sentezi

Şema 4’de poli(akrilik asit-g-hidroksipropil akrilat) (PAA-g-PHPA) aşısı kopolimerinin sentez rotası görülmektedir. 1.00 g akrilik asit, 1.00 g PHPA, 5.0 mg AIBN ve 4 mL 1,4-diokzan 10 mL kapasiteli balon içerisine eklendi. Kauçuk septa ile kapatıldıktan sonra 15 dakika süre ile argon gazı ile yıkandı. 70 °C de yağ banyosunda manyetik karıştırıcı ile gece boyunca karıştırıldı. Tamamen

jelleşen reaksiyon karışımı metanol ile yıkandıktan sonra süzülür ve vakumda kurutuldu (verim: %96.7).



Poli(akrilik asit-g-hidroksipropil akrilat) kopolimeri

Şema 4. Poli(akrilik asit-g-hidroksipropil akrilat) aşırı kopolimerinin “dolaylı aşılama” stratejisi kullanarak serbest radikal polimerizasyonu yöntemiyle sentezi.

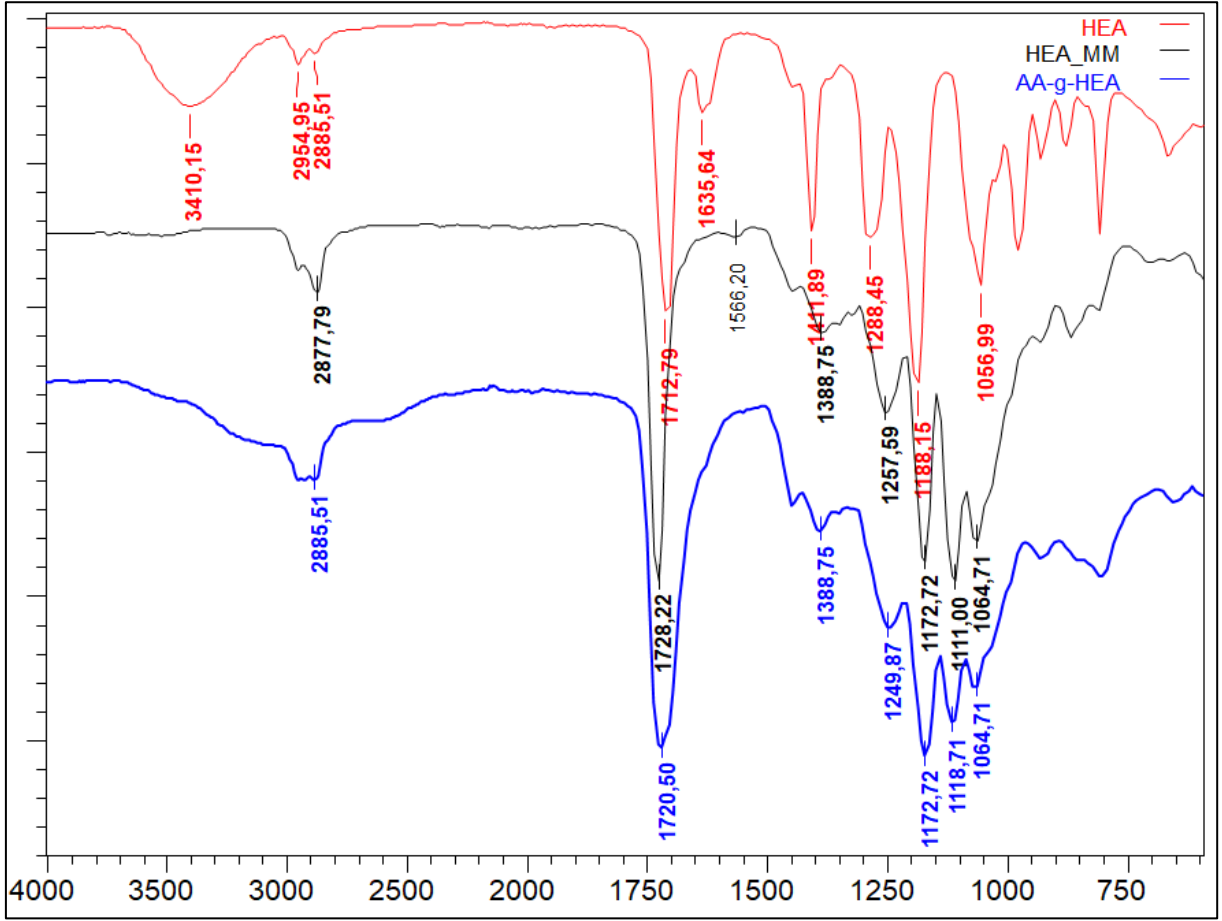
3. Bulgular ve Tartışma

3.1. PHEA Makromonomerinin ve PAA-g-PHEA Aşırı Kopolimerinin Sentezi

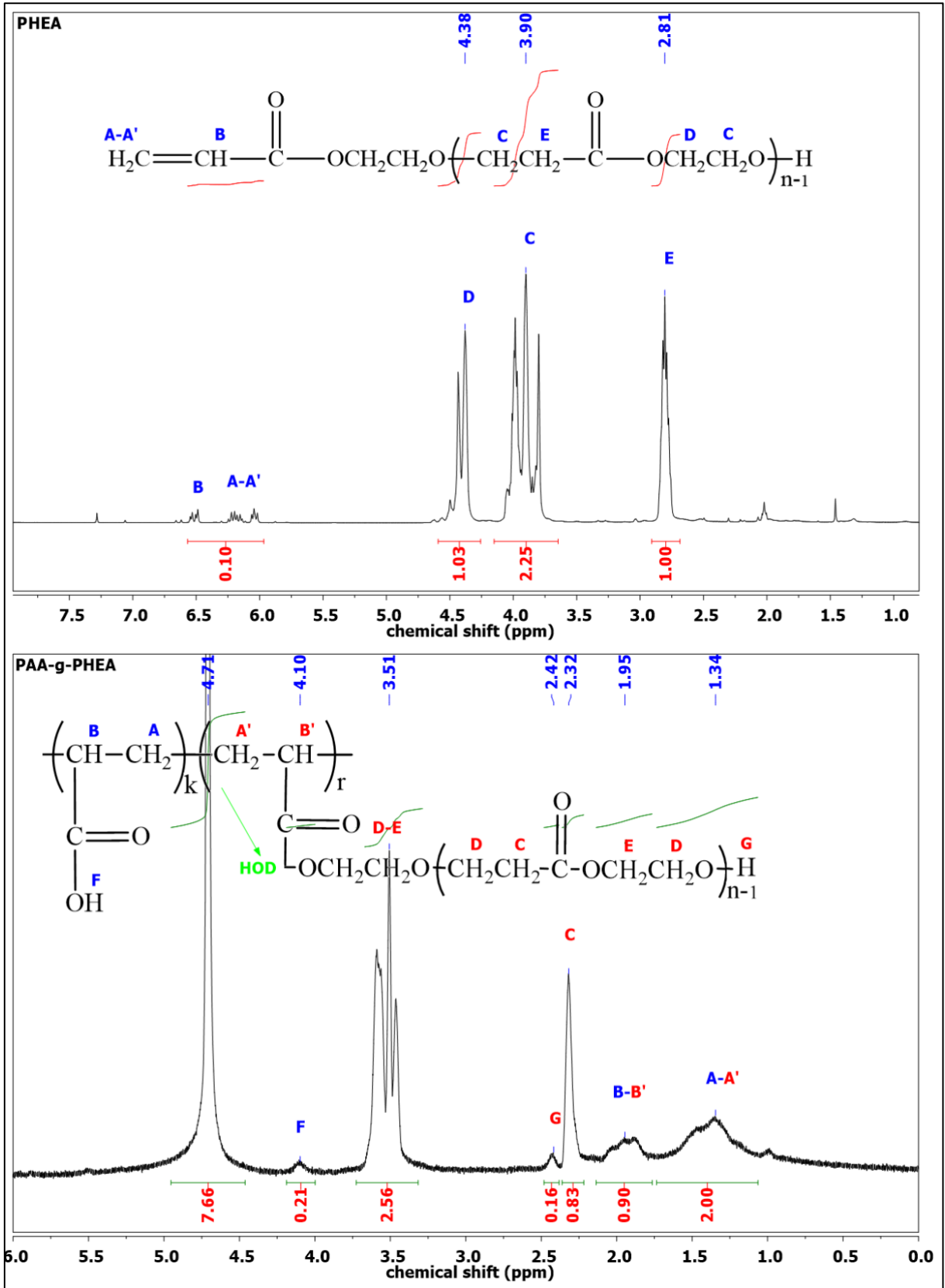
Sentezlenen PHEA ve monomerin FT-IR spektrumlarının karşılaştırılması HTP'nin başarısını benzer şekilde PHEA ve PAA-g-PHEA'nın FTIR spektrumlarının karşılaştırması da “dolaylı aşılama” stratejisinin başarısını teyit etmek için yapıldı. Şekil 1’de HEA, PHEA ve PAA-g-HEA’ya ait spektrumlar verilmektedir. HEA'nın FT-IR spektrumunda 3410 cm^{-1} 'de O-H, 1712 cm^{-1} 'de C=O, 1635 cm^{-1} 'de C=C ve 1056 cm^{-1} 'de eterik O-C gruplarının pikleri görülmektedir. PHEA'nın FT-IR

spektrumunda 1728 cm^{-1} 'de C=O, ve 1111 cm^{-1} 'de eterik O-C gruplarının pikleri görülmesine rağmen monomer spektrumunda varolan 3410 cm^{-1} (O-H) ve 1635 cm^{-1} (C=C) deki bantlar neredeyse kaybolmuştur. Bu tespit monomerin dönüştüğünü göstermektedir. PAA-g-PHEA aşılı kopolimerinin FT-IR spektrumunda yaklaşık 3550 cm^{-1} 'den başlayan ve 2600 cm^{-1} 'e kadar uzanan yayvan bant karboksilik asit O-H gerilmesine yani akrilik asit birimine yorulur. 1720 cm^{-1} 'de gözlenen yayvan ve şiddetli C=O bandı ise örnekte birden fazla türde (hem PHEA hem PAA) karbonil titreşimi olduğuna yorulabilir.

PHEA ve PAA-g-PHEA aşılı kopolimerinin $^1\text{H-NMR}$ spektrumları “dolaylı aşılama” stratejisinin başarısını ortaya daha net koymak için Şekil 2’de bir arada verilmiştir. PHEA’nın $^1\text{H-NMR}$ spektrumunda, polimer yapısında bulunan manyetik farklı protonlar (A, A’, B, C, D ve E) ve bunların karşılık geldiği pikler gösterilmiştir. Piklerin şiddeti, kimyasal kayma değerleri ve şekilleri (yarılmaları) kimyasal yapıdan beklendiği gibi gözlenmiştir. En önemli gözlem $6.00\text{-}6.50\text{ ppm}$ arasında CH=CH₂ (vinil) protonlarına karşılık gelen pik grubudur. Bu pik grubu mevcut yapının ucu vinil olan bir makromonomer olduğunu tartışmasız ortaya koymaktadır. PAA-g-PHEA aşılı kopolimerinin $^1\text{H-NMR}$ spektrumunda hem PHEA hem de PAA birimlerine ait kimyasal kayma değerleri ve şiddetleri önerilen yapıyla tutarlı pikler gözlenmiş ve işaretlenmiştir. Akrilik asit birimindeki asit protonunun sinyalinin çok düşük çıkmasının nedeni çözücünün D₂O olması ve asidik protonlarla yer değiştirmesidir. Bu nedenle de 4.71 ppm de HOD piki çıkmıştır. Bu spektrumda en önemli nokta ise $6.00\text{-}6.50\text{ ppm}$ aralığında vinil protonlarına ait piklerin olmayışıdır. Bu, PHEA makromonomerlerinin polimerizasyona dâhil olduğunu göstermektedir.



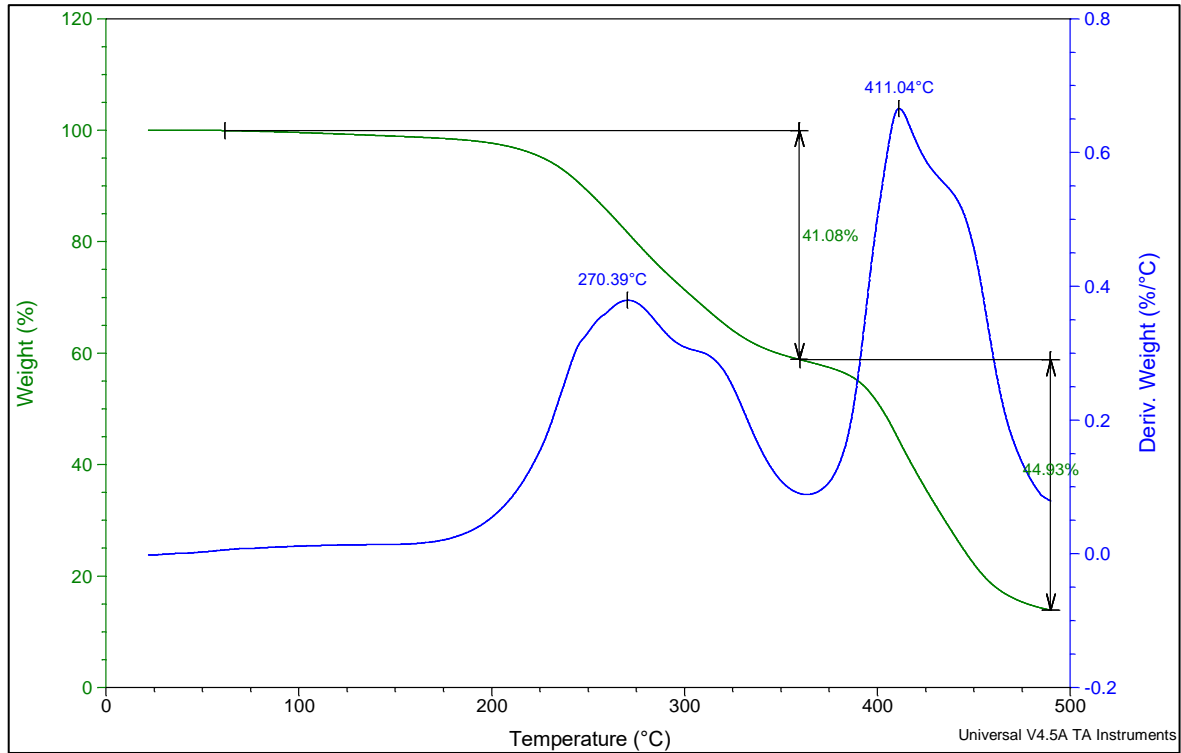
Şekil 1. Hidroksietil akrilat (HEA), polihidroksietil akrilat (PHEA) ve poli(akrilik asit-g-hidroksietil akrilat) (PAA-g-PHEA) aşılı kopolimerinin FT-IR spektrumları.



Şekil 2. PHEA ve PAA-g-PHEA aşı kopolimerinin $^1\text{H-NMR}$ spektrumları.

PAA-g-PHEA aşı kopolimerinin TGA diagramı Şekil 3’de verilmektedir. Türevi alınmış termogram PAA-g-PHEA aşı kopolimerinin termal bozunmasının beklendiği gibi çok basamakta gerçekleştiğini göstermektedir. PAA’in iki aşamada (278 °C ve 422 °C) termal bozunmaya uğradığı

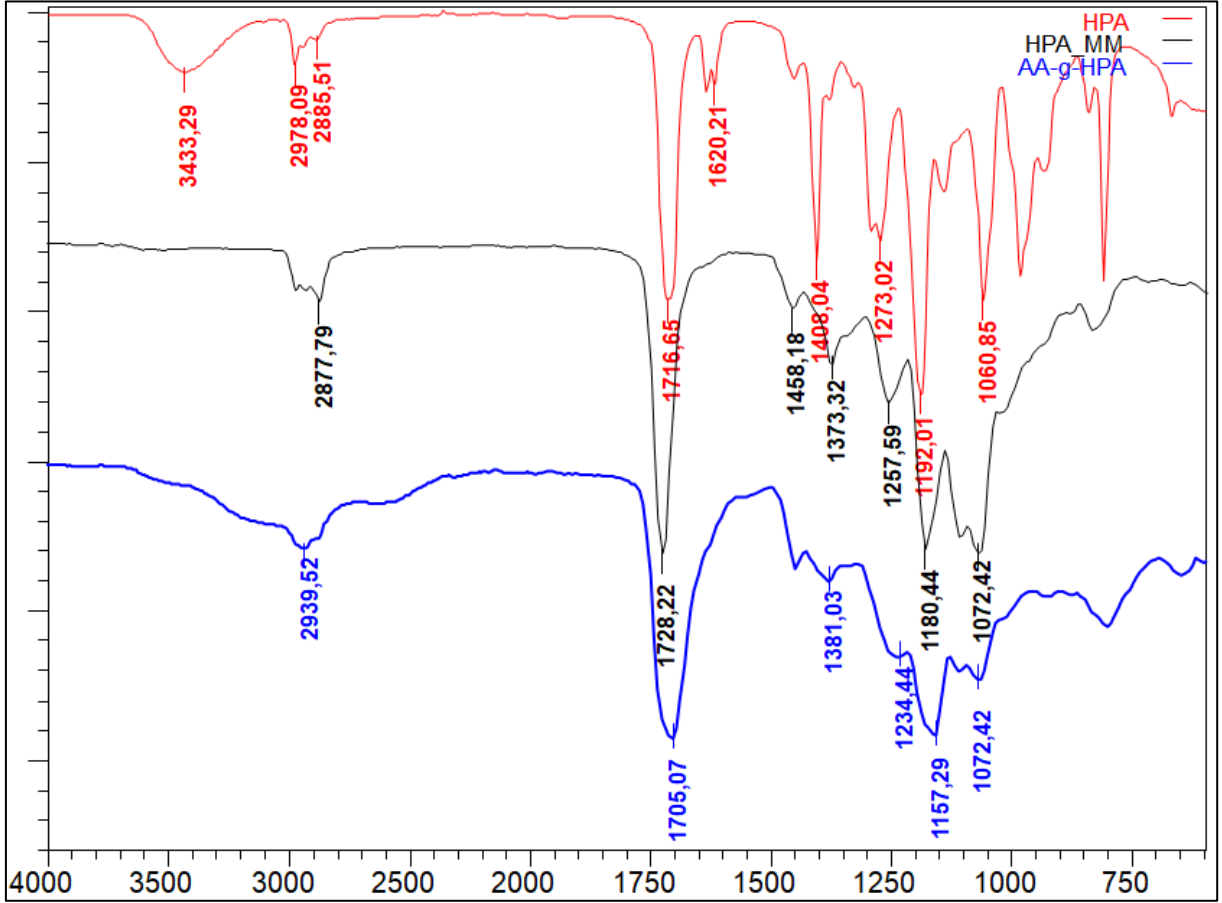
bilinmektedir (Beyler Çiğil ve ark., 2022). Yaklaşık 200 °C de başlayıp 350-400 °C de sonlanan ve iki aşamada olduğu görülen bozunmanın küçük bir kısmının akrilik asit birimlerindeki karboksil gruplarının kopmasına karşılık geldiği geri kalanının da HEA dallarının kopmasına karşılık geldiği düşünülebilir. Bu aşamada HEA dallarının rastgele koptuğu o nedenle de yayvan bir bant gözlenmesine sebep olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca toplam kütlenin neredeyse yarısının azalması beklenen bir sonuçtur. 350-400 °C de başlayıp 500 °C sıcaklığa kadar devam eden (bozunma hızının maksimum olduğu sıcaklık 411 °C) ikinci kısımda ise omurganın parçalanmasına karşılık gelmesi ve toplam kütlenin yaklaşık yarısına karşılık gelmesi de beklenen bir sonuçtur.



Şekil 3. Poli(akrilik asit-g-hidroksipropil akrilat) (PAA-g-PHEA) aşı kopolimerinin TGA diagramı.

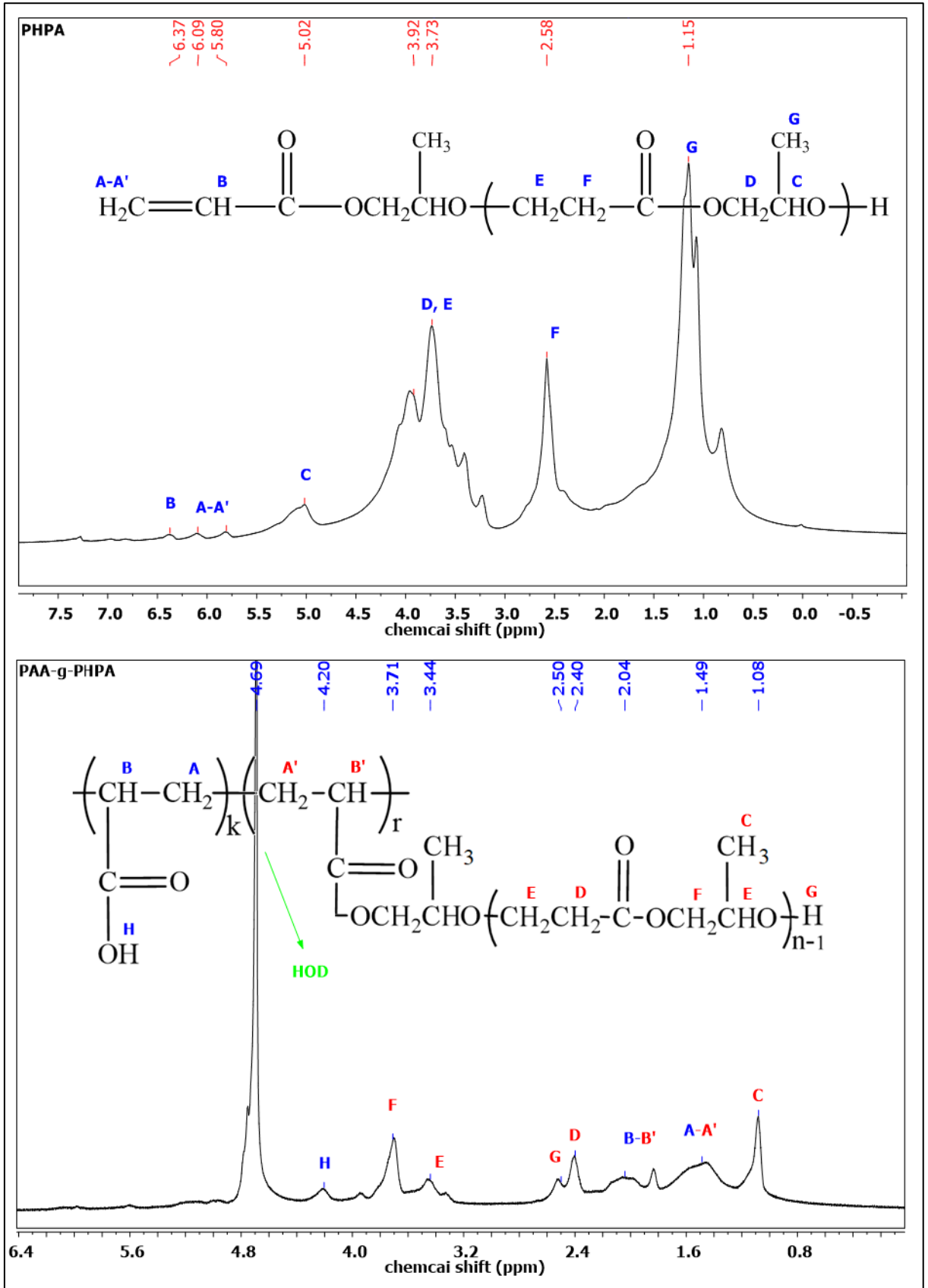
3.2. PHPA Makromonomerinin ve PAA-g-PHPA Aşı Kopolimerinin Sentezi

HPA, PHPA ve PAA-g-PHPA aşı kopolimerinin FT-IR spektrumları Şekil 4’de görülmektedir. HPA’nın FT-IR spektrumunda karakteristik 3433 cm^{-1} ’de O-H, 1716 cm^{-1} ’de C=O ve 1620 cm^{-1} ’de C=C bantları göze çarpmaktadır. PHPA’nın FT-IR spektrumunda ise 1728 cm^{-1} ’de C=O gözlenmesine rağmen O-H ve C=C bantlarının olmaması monomerin dönüşümünü göstermektedir. PAA-g-PHEA aşı kopolimerinin FT-IR spektrumunda 3600 cm^{-1} den başlayan ve 2600 cm^{-1} ’e kadar uzanan yayvan bant karboksilik asit O-H bandıdır. PAA-g-PHEA polimerinin FT-IR spektrumunda olduğu gibi PAA-g-PHPA spektrumunda da C=O bandı yapıda iki farklı karbonil (AA ve HPA karbonilleri) olmasından kaynaklı olarak yayvan çıkmıştır.



Şekil 4. Hidroksipropil akrilat (HPA), polihidroksipropil akrilat (PHPA) ve poli(akrilik asit-g-hidroksipropil akrilat) (PAA-g-PHPA) aşılı kopolimerinin FT-IR spektrumları.

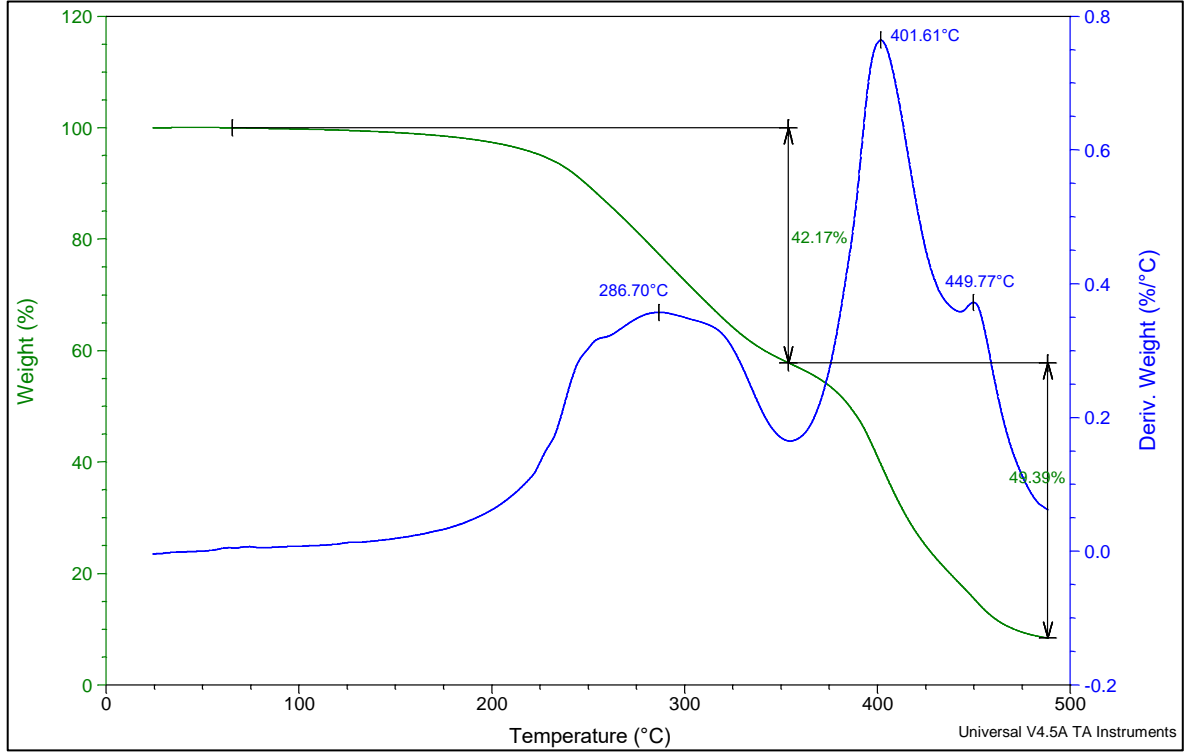
PHPA ve PAA-g-PHPA aşılı kopolimerinin $^1\text{H-NMR}$ spektrumları Şekil 5’de verilmektedir. PHPA’nın $^1\text{H-NMR}$ spektrumunda, 6.00-6.50 ppm arasında çıkan küçük pikler makromonomer oluşumunu göstermektedir. Diğer pikler şiddetleri ve kimyasal kayma değerleri incelendiğinde PHPA yapısını teyit etmektedir. PAA-g-PHPA aşılı kopolimerinin $^1\text{H-NMR}$ spektrumunda, AA ve HPA birimlerinden gelen bütün proton türlerine karşılık gelen pikler spektrum üzerinde verilmiştir. Piklerin sayısı, kimyasal kayma değerleri ve şiddetleri önerilen yapıya tamamen uygun görünmektedir. PHPA spektrumunda vinil protonlarına yorulan piklerin burada gözlenmemesi PHPA’nın SRP ye iştirak ettiğini kanıtlamaktadır.



Şekil 5. PHPA ve PAA-g-PHPA aşı kopolimerinin $^1\text{H-NMR}$ spektrumları.

PAA-g-PHPA aşı kopolimerinin TGA diagramı Şekil 6’da verilmektedir. Türev bozunma eğrisi incelendiğinde bozunmanın çok aşamalı olduğu görünmektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi PAA homo polimeri iki aşamada bozunmaktadır. İlk aşamada karboksil grupları kopmaktadır. 200-350 °C

aralığında (287 °C merkezli) meydana gelen kütle kaybının bir kısmı karboksil kopmasına ve HPA dallarının parçalanmasına yorulmuştur. 350 °C’de başlayıp 500 °C’ye kadar devam eden süreçte ise bağıl olarak daha kararlı olan karbon-karbon temelli omurga parçalanarak kütle kaybına sebep olmuştur. Asılı grupların kopması ve omurganın parçalanması süreçlerinde meydana gelen kütle kayıplarının neredeyse eşit olması beklenen bir sonuçtur.



Şekil 6. Poli(akrilik asit-g-hidroksipropil akrilat) (PAA-g-PHPA) aşısı kopolimerinin TGA diagramı.

4. Sonuçlar

HEA ve HPA'nın HTP'unun düşük mol kütleli alifatik poliester-eterler verdiği bilinmektedir. Ancak, bu oligomerik yapıların zincir uçlarındaki vinil gruplarının reaktivitesinin “dolaylı aşılama” stratejisi içerisinde yer alacak şekilde kullanılması yoluyla yeni aşısı kopolimer sentezinde kullanıldığı çalışma bulunmamaktadır. Yapılan çalışmayla poli(akrilik asit) türevi niteliğindeki PAA-g-PHEA ve PAA-g-PHPA aşısı kopolimeri SRP yöntemiyle sentezi hedeflenmiştir. Spektroskopik ve termal analizler ($^1\text{H-NMR}$, FT-IR ve TGA) eşit kütlelerde monomer (AA) ve makromonomer (PHEA ve PHPA) kullanılarak elde edilen her iki aşısı kopolimerin yüksek verimde ve her iki bileşeni yaklaşık olarak eşit içerecek şekilde sentezlenebildiğini ortaya koymaktadır. Bu durumda bu yaklaşımla, kullanılan monomer türü, makromonomer türü, oranı ve uzunluğu değiştirilerek özellikleri ayarlanabilir aşısı kopolimerler sentezlenebileceği anlaşılmaktadır.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı





Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Asan, N., Öztürk, T., Hazer B. (2023). Ters atom transfer radikal polimerizasyon yöntemi ile polietilen glikol ve polimetil metakrilat içeren çok dallı ya da çapraz bağlı kopolimerlerin sentezi ve karakterizasyonu. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 13, 1874-1893.
- Beyler Çiğil, A., Şen, F., Birtane, H. Kahraman, M. Z. (2022). Covalently bonded nanosilver-hydroxyethyl cellulose/polyacrylic acid/sorbitol hybrid matrix: thermal, morphological and antibacterial properties. *Polymer Bulletin*, 79, 11353-11368.
- Cho, H. Y., Krys, P., Szcześniak, K., Schroeder, H., Park, S., Jurga, S., Buback, M., Matyjaszewski, K. (2015). Synthesis of poly(OEOMA) using macromonomers via “grafting-through” ATRP. *Macromolecules*, 48, 6385-6395.
- Çatıker, E., Güven, O., Salih, B. (2018). Novel hydrophobic macromonomers for potential amphiphilic block copolymers. *Polymer Bulletin*, 75, 47-60.
- Çatıker, E., Meyvacı, E., Atakay, M., Salih, B., Öztürk, T. (2019). Synthesis and characterization of amphiphilic triblock copolymers including β -alanine/ α -methyl- β -alanine and ethylene glycol by “click” chemistry. *Polymer Bulletin*, 76, 2113-2128.
- Çolakoglu, G. N., Çatıker, E., Öztürk, T., Meyvacı, E. (2022). Synthesis and characterization of brush-type poly β -alanine-grafted polymethyl methacrylate using "grafting through" method, *Chemical Papers*, 76, 869-878.
- Dag, A., Aydın, M., Durmaz, H., Hizal, G., Tunca, U. (2012). Various polycarbonate graft copolymers via Diels-Alder click reaction. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 50, 4476-4483.
- Hazer, B., (1992). New macromonomeric initiators (macro-inimers). II. gelation in the bulk polymerization of styrene with macroinimers. *Die Makromolekulare Chemie*, 193, 1081-1086.
- Hazer, B., Ayas, A., Beşirli, N., Saltek, N., Baysal, B. M. (1989). Preparation of ABCBA-type block copolymers by use of macro-initiators containing peroxy and azo groups. *Die Makromolekulare Chemie*, 190, 1987-1996.
- Hazer, B., Erdem, B., Lenz, R. W. (1994). Styrene polymerization with some new macro or macromer initiators having PEG units. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 32, 1739-1746.
- Iwamura, T., Ashizawa, K., Adachi, K., Takasaki, M. (2019). Anionic hydrogen-transfer polymerization of N-isopropyl acrylamide under microwave irradiation. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 57, 2415-2419.
- Macchione, M. A., Biglione, C., Strumia, M. (2018). Design, synthesis and architectures of hybrid nanomaterials for therapy and diagnosis applications. *Polymers (Basel)*, 10, 527.
- Martinez, M. R., Cong, Y., Sheiko, S. S., Matyjaszewski, K. (2020). A thermodynamic roadmap for the grafting-through polymerization of PDMS11MA. *ACS Macro Letters*, 9, 1303-1309. Öztürk, T.,

- Cavicchi, C. A. (2018). Synthesis and characterization of poly(epichlorohydrin-g- ϵ -caprolactone) graft copolymers by "click" chemistry. *Journal of Polymer Materials*, 35, 209-220.
- Neugebauer, D., Zhang, Y., Pakula, T. (2006). Gradient graft copolymers derived from PEO-based macromonomers *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 44, 1347-1356.
- Öztürk, T., Türkoğlu, H. (2022). Synthesis and characterization of the graft copolymer including poly β -butyrolactone and polyvinyl chloride by ring-opening polymerization and "click" chemistry. *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, 59, 871-878.
- Saegusa, T., Kobayashi, S., Kimura, Y. (1975). Hydrogen-transfer polymerization of hydroxyalkyl acrylates. *Macromolecules*, 8, 950-952.
- Savaş, B., Çatıker, E., Öztürk, T., Meyvacı, E. (2021a). Synthesis and characterization of poly(α -methyl β -alanine)-poly(ϵ -caprolactone) tri arm star polymer by hydrogen transfer polymerization, ring-opening polymerization and "click" chemistry. *Journal of Polymer Research*, 28, 30.
- Savaş, B., Çatıker, E., Öztürk, T., Meyvacı, E. (2021b). Synthesis and characterization of poly(methyl methacrylate-g- α -methyl- β -alanine) copolymer using "grafting through" method. *Journal of Polymer Research*, 28, 194.
- Savaş, B., Çatıker, E., Öztürk, T., Meyvacı, E. (2022). Introduction of 3-hydroxypropionate moieties to polystyrene by "graft through" strategy, *ChemistrySelect*, 7, e202104193.
- Savaş, B., Öztürk, T. (2020). Synthesis and characterization of poly(vinyl chloride-g-methyl methacrylate) graft copolymer by redox polymerization and Cu catalyzed azide-alkyne cycloaddition reaction. *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, 57, 819-825.
- Savaş, B., Öztürk, T. (2023). Synthesis and characterization of poly(epichlorohydrin-g-4-vinylbenzyl-g-methyl methacrylate) graft copolymer by combination of ROP, RAFT, and ATRP technics. *Journal of Polymer Research*, 30, 211.

Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyelinin PVSyst ile Analizi

Ömür AKYAZI¹, Şeymanur BAŞLIK², Kanan KHIDIRZADE³, Bora ÇAVDAR^{4*}

Öz

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan güneş enerjisinin önemi ve kullanımı git gide artmaktadır. Özellikle yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip olan Türkiye gibi ülkeler için, fotovoltaik sistemler aracılığıyla güneş enerjisinden elektrik üretimi oldukça kritik bir öneme sahiptir. Bu çalışmada Türkiye'nin yedi bölgesi içinden global radyasyon değerlerine göre seçilen illerde, 24 MW gücünde şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler modellenmiştir. Bu modeller PVSyst yazılımı aracılığıyla oluşturulmuş ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları sayesinde bölgelerin fotovoltaik sistemler için performans karşılaştırmaları yapılmıştır. En yüksek yıllık küresel radyasyon değeri Güneydoğu Anadolu bölgesinde, en yüksek performans, yani faydalı enerji üretimi ise İç Anadolu bölgesindedir. Bu durum sıcaklık faktörünün Güneydoğu Anadolu bölgesinde verim üzerindeki olumsuz etkisini göstermektedir. Sonuç olarak, elde edilen bulgular Türkiye'nin coğrafi bölgelerindeki fotovoltaik sistemlerin verimliliği üzerine detaylı analizi literatüre sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Güneş Enerjisi, Fotovoltaik Panel, PVSyst.

Analysis of Turkey's Solar Energy Potential with PVSyst

Abstract

The importance and utilization of solar energy, which is one of the renewable energy sources, is increasing day by day. Especially for countries like Turkey, which has a high solar energy potential, electricity generation from solar energy through photovoltaic systems is of critical importance. In this study, a 24 MW grid-connected photovoltaic systems model has been designed in provinces selected according to global radiation values from seven regions of Turkey. These models were installed and simulated using PVSyst software. Thanks to the simulation results obtained, performance comparisons of the regions for photovoltaic systems were made. The highest annual global radiation value is in the Southeastern Anatolia Region, while the highest performance, i.e. useful energy production, is in the Central Anatolia Region. This shows the negative effect of temperature factor on yield in the Southeastern Anatolia Region. As a result, the findings provide the literature with detailed results on the efficiency of photovoltaic systems in geographical regions of Turkey.

Keywords: Solar Energy, Photovoltaic Panel, PVSyst.

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, oakyazi@ktu.edu.tr

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, 412010@ogr.ktu.edu.tr

³Karadeniz Teknik Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, kenanhidirzade@hotmail.com

⁴Karadeniz Teknik Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, boracavdar@ktu.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Dünya genelinde artan elektrik enerjisi ihtiyacı ile insanlar yeni enerji kaynakları arayışına girmiştir. Bu arayışın sebepleri arasında; kullanılan fosil yakıt kaynaklarının sınırlı olması ve bu kaynakların çevreye olan zararları bulunmaktadır. Bu durum daha sürdürülebilir ve çevreci olan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeyi sağlamıştır. Bu enerji kaynakları arasında olan güneş, tartışılmaz olarak insanoğlu için sonsuz bir enerji kaynağıdır. Ülkemizin güneş enerjisi potansiyeli düşünüldüğünde bu potansiyel artan enerji ihtiyacını karşılayacak değerli bir katkı payına sahiptir (Öztürk ve ark., 2023).

Güneş enerjisi, daimî olarak hidrojenin helyuma dönüştüğü füzyon reaksiyonları sayesinde oluşan ışınım enerjisidir ve gerçekleşen kütle değişikliği ısı enerjisine çevrilerek uzay boşluğuna dağılmaktadır. Güneş enerjisinin ışınım şiddeti yaklaşık olarak 1370 W/m^2 değerindedir ancak yerküreye ulaşabilen miktarı atmosfer içindeki kayıplar nedeniyle $0-1100 \text{ W/m}^2$ değerleri arasında farklılık gösterebilmektedir. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin küçük bir kısmı bile insanlığın mevcut enerji tüketiminden çok daha fazladır. Güneş enerjisi fotovoltaik sistemler adı verilen ve fotovoltaik (PV) paneller aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılır (Akcan ve ark., 2020). Güneş enerjisi sistemlerinde kullanılan teknolojinin nispeten daha basit yapıda olması ve kullanılan bu teknolojinin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha ucuz olması bu kaynağa olan talebin artmasına sebep olmuştur (Küçükgoze, 2016).

Güneş enerjisi araştırmaları, 1970'lerden itibaren büyük bir ivme kazanmıştır. Özellikle fotovoltaik sistemler üzerinde yapılan çalışmalarda bilimsel olarak ilerleme kaydedilmiş ve maliyet açısından önemli düşüşler yaşanmıştır (Akcan ve ark., 2020; Tuğcu, 2023). Güneş enerjisinin doğal bir kaynak olması, temiz enerji kaynakları arasında önemli bir yer edinmesine katkıda bulunmuştur (Çanka ve ark., 2015). Son zamanlarda Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımıyla ilgili önemli adımlar atılmıştır. Özellikle güneş enerjisiyle elektrik üretimi üzerine yapılan araştırmaların sayısı artmıştır (Tuğcu, 2023). Güneş enerjisinden elde edilen elektrik miktarı ise sürekli olarak artmaktadır. Ülkemizde 2024 yılı ocak ayı itibariyle güneş enerjisi kurulu gücü 11.707 MW ' a yükselmiştir (URL-1). Türkiye'nin 81 ilinde güneş enerjisinden faydalanılarak elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilmektedir. Ülkemizde güneş enerjisinde en yüksek kurulu güce sahip il Konya olup onu, 694 MW ile Ankara, 595 MW ile Gaziantep, 555 MW ile Kayseri, 451 MW ile Şanlıurfa, 442 MW ile Niğde, 389 MW ile İzmir, 358 MW ile Kahramanmaraş, 335 MW ile Mersin ve 319 MW ile Manisa illeri izlemektedir (URL-2).

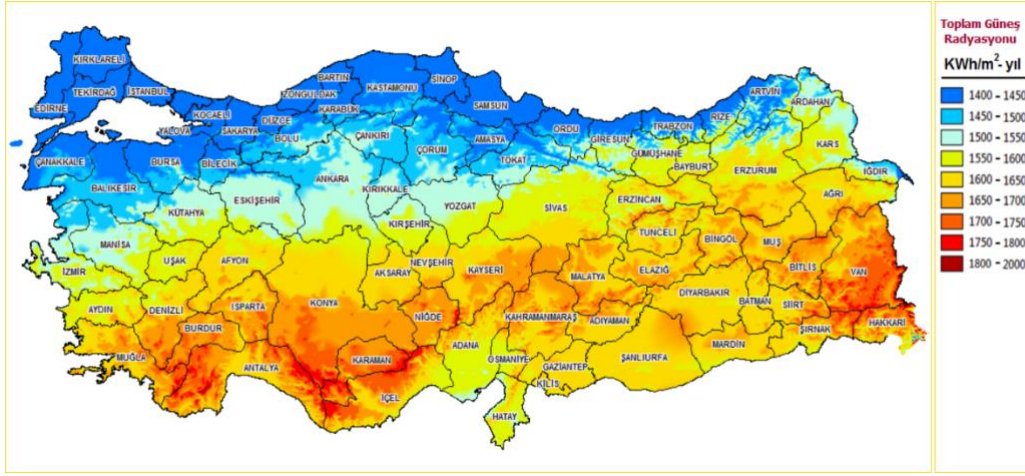
Güneş enerjisinden faydalanmak için kullanılan fotovoltaik panellerin verimleri maksimum %24 değerindedir. Bu da güneş enerjisinden tamamen faydalanılamadığı, ortalama olarak %80 oranında faydalı, kullanılabilir elektrik enerjisi elde edilemediği anlamına gelir (Karakaya ve Şen,

2019). Fotovoltaik panellerin verimini olumsuz etkileyen bazı faktörler vardır. Bunlar; panellerin aşırı ısınması, gölgeleme faktörü, tozlanma, panel açısı, güneş ışığı yoğunluğu ve geliş açısı olarak sıralanabilir (Kerem ve ark., 2020). Panel verimliliğini değerlendirmek için performans oranı parametresi kullanılır. Performans oranı ile güneş enerjisinden teorikte ve gerçekte elde edilen veriler arasında karşılaştırma yapılması sağlanır. Bu karşılaştırmada; invertör verimsizliği, kablo kayıpları, hücre uyumsuzluğu kayıpları, modül sıcaklık kayıpları vb. gibi farklı kayıplardan dolayı üretilen enerjiden hangi oranda kayıp olduğu sonucuna varılır (Kumar ve ark., 2020).

Literatürde Türkiye'nin farklı şehirleri için güneş enerjisinden elektrik üretiminin etkinliği araştırma konusu olmuştur. Literatürde ele alınan araştırmalar genellikle il bazlı sadece o il için elde edilen sonuçları içermektedir. Yapılan araştırmalarda ele alınan illerden bazıları Kahramanmaraş (Taşkın ve Korucu, 2014), Adıyaman (Behçet ve Oral, 2013), Burdur (Kırbaş ve ark., 2013), Amasya (Kaynar, 2020), Kayseri (Oğuz ve Akkurt, 2017), Karabük (Oral, 2020), Hatay (Kumruoğlu ve Ateş, 2022), Nevşehir (Bilhan ve Emikönel, 2021), Ankara (Varlı ve ark., 2022), Mardin (Doğanay, 2021), Denizli (Tanrıku ve Partigöç, 2024), Bilecik (Başkaya ve Kaya, 2023), Sinop (Alcan ve ark., 2018), Trabzon (Çakmak ve Altaş, 2016) ve Erzincan'dır (Çakmak ve Altaş, 2017). Bu çalışmada literatürden farklı olarak Türkiye'nin yedi coğrafi bölgesi için ayrı ayrı eşdeğer güçte şebeke ile bağlantılı fotovoltaik sistemlerin (santrallerin) analizi yapılmıştır. Çalışmanın amacı bölgelere göre fotovoltaik sistemlerin verimliliğini test etmek diğer bir deyişle bölgelerin güneş enerjisinden elektrik üretimindeki etkinliğini karşılaştırmaktır. Her bir bölge için fotovoltaik sistemlerin performansı PVSyst simülasyon programı aracılığı ile analiz edilip kıyaslanmaktadır.

1.1. Coğrafi Bölgelere Göre Güneş Enerjisi Potansiyeli

Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA)'na göre, ülkemizde yıllık ortalama güneşlenme süresi 2,741 saat olarak hesaplanmıştır, bu da günlük ortalama 7,5 saat demektir. Ayrıca gelen toplam güneş enerjisi ışınım miktarı 1,527 kWh/m²-yıl olarak hesaplanmıştır ve günlük ortalama 4,18 kWh/m²-gün değerindedir (URL-3).



Şekil 1. Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli (URL-4).

Şekil 1'de yer alan GEPA, Türkiye'nin şehir bazında detaylı bir güneş enerjisi potansiyeli analizini sunar. Genel bir bakışla, mavi veya mavi tonlarına yakın bölgelerin düşük potansiyele sahip olduğu, kırmızı veya kırmızı tonlarına yakın bölgelerin ise yüksek potansiyele işaret ettiği görülmektedir. Güneş enerjisinden en çok haziran ayında yararlanılırken, en az aralık ayında yararlanılır. Güneşlenme süresinden ise en çok temmuz ayında faydalanılırken en az aralık ayında faydalanılır. Bölgelere göre özelleştirilmiş güneş enerjisi potansiyeli hakkında Tablo 1'den daha net verilere ulaşılabilir.

Tablo 1. Bölgelere Göre Güneşlenme Süreleri (URL-5)

Bölgeler	Güneş Enerjisi		Güneşlenme Süresi	
	En Çok (kWh/m ² /ay)	En Az (kWh/m ² /ay)	En Çok (Saat)	En Az (Saat)
Güneydoğu Anadolu	202,5	54,56	372	129,58
Akdeniz	203,4	57,04	361,77	134,23
Doğu Anadolu	201	48,67	350,61	122,76
İç Anadolu	197,1	50,22	358,36	110,67
Ege	198	52,08	361,77	127,1
Marmara	184,2	40,3	347,67	100,6
Karadeniz	184,8	40	299,46	96,1

2. Materyal ve Metot

2.1. Bölgelerin Belirlenme Kriterleri

Fotovoltaik sistemin kurulacağı bölgelerin belirlenmesinde GEPA tarafından sağlanan yıllık global radyasyon değerleri kullanılmıştır. Bu değerler kullanılarak Türkiye'nin yedi bölgesi için ortalama yıllık global radyasyon değeri hesaplanır. Bu hesaplama bölgede bulunan illerin yıllık global

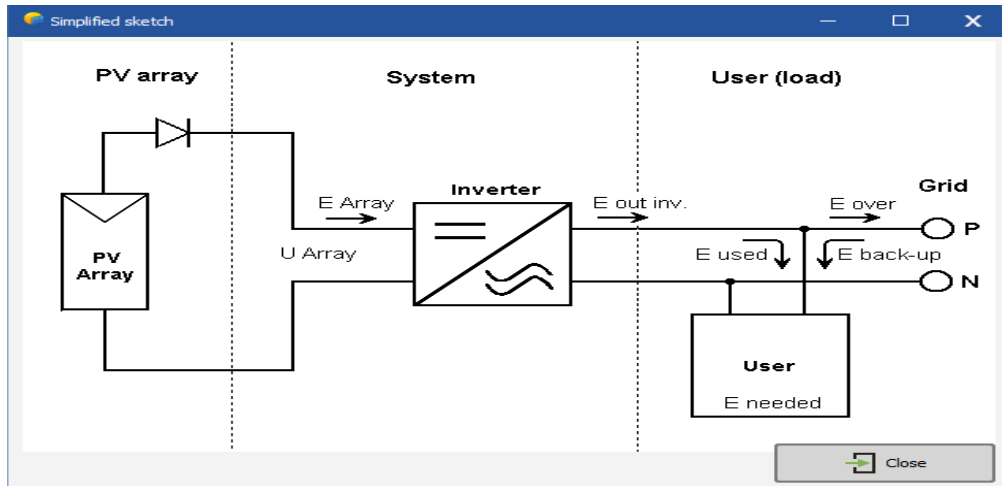
radyasyon değerlerinin ortalaması şeklinde elde edilmektedir. Bölgelerin yıllık global radyasyon değerleri elde edildikten sonra bu değere en yakın olan iller seçilerek bu illere fotovoltaik sistemlerin kurulumu simülasyon programı aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Tablo 2’de bölgelerin ve bu bölgeleri temsil eden illerin yıllık global radyasyon değerleri verilmektedir. Ayrıca bu illerde fotovoltaik sistemlerin kurulduğu enlem ve boylam bilgileri de Tablo 2’de verilmiştir. Ayrıca Tablo 2’de verilen illerde hali hazırdaki kurulu güç değerleri Batman için 28 MW, Kahramanmaraş için 358 MW, Erzincan için 58 MW, Uşak için 213 MW, Sivas 130 için MW, Çanakkale için 26 MW ve Amasya için 53 MW’tır.

Tablo 2. Bölgelerin Yıllık Global Radyasyon Değerleri ve Seçilen İllerin Bilgileri

Bölgeler	kWh/m ² -Yıl	Seçilen İl	kWh/m ² -Yıl	Seçilen Enlem	Seçilen Boylam
Güneydoğu Anadolu	1572,41	Batman	1576,19	37,54	41,33
Akdeniz	1597,03	Kahramanmaraş	1604,48	38,13	36,41
Doğu Anadolu	1557,77	Erzincan	1555,51	39,44	38,94
Ege	1542,96	Uşak	1540,91	38,51	29,76
İç Anadolu	1538,1	Sivas	1538,48	38,65	37,13
Marmara	1382,22	Çanakkale	1375,14	39,57	26,33
Karadeniz	1393,47	Amasya	1394,3	40,92	35,28

2.2. Şebeke Bağlantılı (On-Grid) Fotovoltaik Sistem

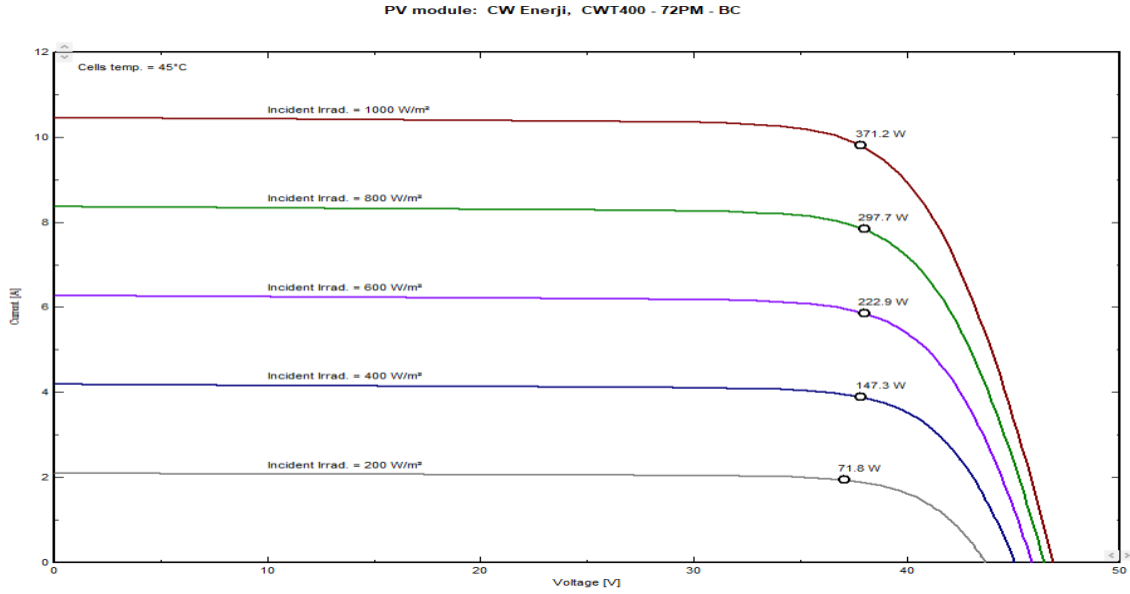
Çalışmanın amacına yönelik sistemler kurulacağı için şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem tercih edilmiştir. Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem; fotovoltaik paneller, inverterler, güç şartlandırma ünitesi ve şebeke bağlantı ekipmanlarının bütününden oluşmaktadır. Tavsiye edilen, şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem modeli Şekil 2’de PVSyst yazılımı ile gösterilmiştir (Saraswat ve Sathans, 2017).



Şekil 2. Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Sistem Modeli.

2.3. Fotovoltaik Panel Seçimi

Türkiye'nin 7 coğrafi bölgesinde kurulacak fotovoltaik sistemlerde ortak paneller kullanılacak olup CW Enerji markasına ait CWT-400-72PM-BC-V modeli 400 watt gücünde tercih edilmiştir. Şekil 3'te kullanılacak panel modelinin akım-gerilim grafiği verilmiştir.

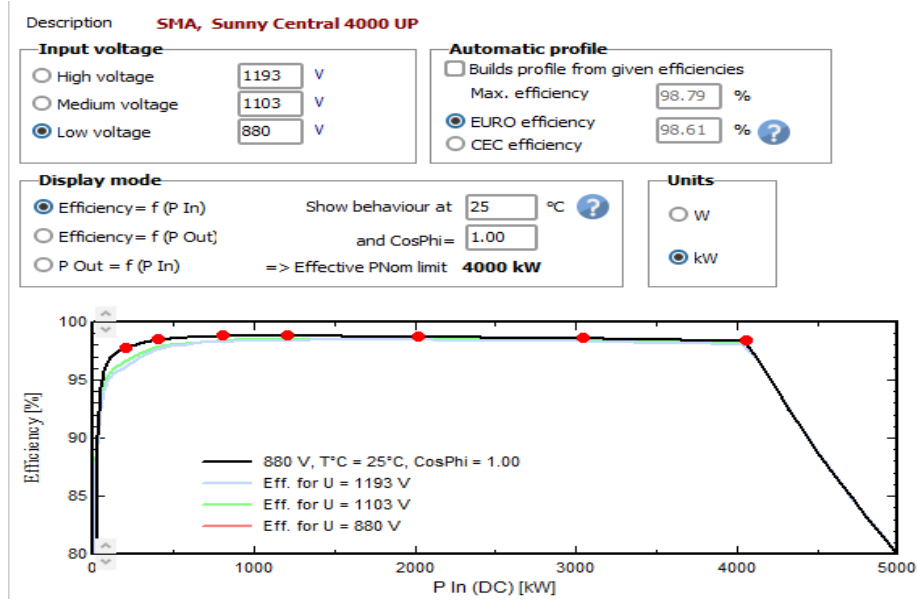


Şekil 3. Sistemlerde Ortak Kullanılan Fotovoltaik Panelin Akım-Gerilim Eğrisi.

Şekilde ideal test koşullarındaki ($1000\text{W/m}^2 - 25^\circ\text{C}$) akım gerilim eğrisinde fotovoltaik panelin maksimum güç noktası 371,2W olarak gözlemlenmiştir.

2.4. İnverter Seçimi

İnverter seçilirken başlıca dikkat edilmesi gereken hususlar; veriminin yüksek olması, kayıplarının düşük olması ve fotovoltaik panellerle uyumlu çalışmasıdır. Kurulacak tüm fotovoltaik sistemlerde ortak bir şekilde kullanılacak olan inverter "SMA" markasının 4000 kW'lık "Sunny Central 4000 UP" modeli seçilmiştir. Sistemde 6 adet Sunny Central 4000 UP modeli inverter kullanılmıştır. Şekil 4'te inverterlere ait verim bilgileri gösterilmiştir. İnvertörlerin düşük gerilim değeri 880 V, yüksek gerilim değeri ise 1193 V'tur. İnvertörden elde edilecek en yüksek verim ise %98,79'dur.



Şekil 4. Sistemlerde Ortak Kullanılan İnvörtöre Ait Verim Bilgileri

3. Tasarım ve Simülasyon Sonuçları

PVSyst programı aracılığıyla simülasyonu gerçekleştirilecek olan şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem tasarımının kurulum bölgeleri için Güneydoğu Anadolu'dan Batman, Akdeniz'den Kahramanmaraş, Doğu Anadolu'dan Erzincan, İç Anadolu'dan Sivas, Ege'den Uşak, Marmara'dan Çanakkale ve Karadeniz'den Amasya şehirleri seçilmiştir. Bu şehirler ait oldukları coğrafi bölgelerin içindeki diğer şehirler arasında, bölgenin ortalama yıllık global radyasyon değerine yakın olduğu için seçilmiştir. Yıllık global radyasyon değerleri GEPA verilerinden faydalanılarak elde edilmiştir.

Türkiye'ye ait 7 coğrafi bölgede PVSyst programı aracılığı ile kurulacak fotovoltaik sistemlerde kurulu güç 24 MWp olacak biçimde ayarlanmıştır. Bunun sonucunda 24 MWp fotovoltaik sistem ve kurulacak sisteme ait belirlenmiş elemanların 119873 m²'lik bir alana ihtiyacı olduğu hesaplanmıştır. Şekil 5'te PVSyst'de yapılan bu hesaplamaların ekranı yer almaktadır.

Şekil 5. Sistem Tasarımına Dair Ara Yüz Ekranı.

PVSyst programı, bütünleşmiş şekilde çalıştığı programlar ve yazılımlar aracılığı ile istenilen konuma sistemi kurmakta kolaylık sağlamaktadır. Harici bir şekilde tam konum girilmek istenirse enlem ve boylam koordinatları girilerek de konum belirlenebilir. Daha sonra kurulacak fotovoltaik panellerin oryantasyon ayarları yapılır. Kayıpları en aza indirmek amacı ile PVSyst programında panel açısı optimum kayıp en az olacak şekilde ayarlanmalıdır (Soualmia ve Chenni, 2017). Gerekli oryantasyon ayarları yapıp en uygun panel açısı da belirlenerek sistem tasarımı hazır hale getirilir. Bu bölümde tüm bölgelerde kurulan sistemler için optimum panel ayarları paylaşılmaktadır. Bu ayarlar ve sonucunda elde edilen yıllık meteorolojik verim bilgileri Tablo 3'te verilmektedir.

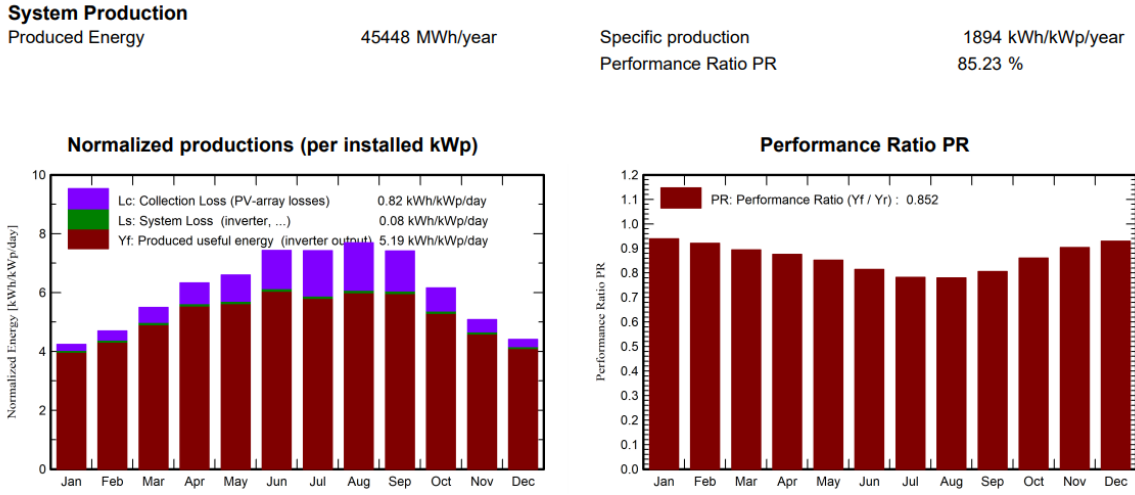
Tablo 3. Optimum Panel Ayarları ve Verimi

Bölgeler	Saha Parametreleri		Yıllık Meteorolojik Verim		
	Eğim	Azimet	FT	Kayıp (%)	kWh/m ²
Güneydoğu Anadolu (Batman)	35°	0°	1.18	0	2256
Doğu Anadolu (Erzincan)	35°	0°	1.20	0	2201
İç Anadolu (Sivas)	35°	0°	1.19	0	2222
Ege (Uşak)	35°	0°	1.18	0	2078
Akdeniz (Kahramanmaraş)	35°	0°	1.18	0	2106
Karadeniz (Amasya)	37°	0°	1.19	0	1822
Marmara (Çanakkale)	33°	0°	1.15	0	1946

3.1. Güneydoğu Anadolu Bölgesi (Batman) İçin Simülasyon ve Modelleme

Batman'da gölgelenme ve rüzgâr faktörlerini göz önünde bulundurarak net bir konum PVSyst programı ile belirlenmiştir. Sistemde inverter çıkışından elde edilen sağlıklı ve kullanışa hazır olan enerji, Şekil 6'da kırmızı taralı alanla (Yf) gösterilmiştir. Aylara göre günlük ortalama 5,19 kWh değerindedir. Sistemde inverterden kaynaklanan kayıplar yeşil taralı alanla (Ls) gösterilmiştir ve

aylara göre günlük ortalama 0,08 kWh değerindedir. Fotovoltaik dizilerden kaynaklı kayıplar ise mor taralı alanla (Lc) gösterilmiştir ve aylara göre günlük ortalama 0,82 kWh değerindedir. Performans oranı %85,23 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6. Batman'da Verimin Aylara Göre Değişimi ve Kayıp Faktörleri.

Kurulan sistemlerde yaşanan kayıpların başlıca sebepleri yansımaya, ışınım seviyesi, sıcaklık, modül ve diziler arasındaki uyumsuzluk, kablo direnci, invertör ve gece tüketimidir. Batman'da kurulan sistem için yıl içinde yüzdesel olarak meydana gelecek kayıplar %1,94 yansımadan, %0,34 ışınım seviyesinden, %8,52 sıcaklıktan, %2,1 modül ve diziler arasındaki uyumsuzluktan, %1,2 kablo direncinden, %2,13 invertörden ve %0,02 gece tüketiminden kaynaklanır.

3.2. Doğu Anadolu Bölgesi (Erzincan) İçin Simülasyon ve Modelleme

Doğu Anadolu bölgesine kurulacak 24 MWp fotovoltaik sistem için seçilen Erzincan şehrinde, kırsal bölgelere ve ovalara oranla yüksek rüzgârdan kaynaklanan kayıpları önleme amacı ile merkezi bir konum belirlenmiştir. Konum seçimi yapıldıktan sonra, konuma göre ayarlanması gereken en uygun panel açısı belirlenmiş ve panelin oryantasyon ayarları yapılmıştır.

Şekil 7'de sistemde üretilen kullanışa hazır olan invertör çıkışındaki enerji (Yf) aylara göre günlük ortalama 5,25 kWh değerinde olmaktadır. Sistemde invertörden kaynaklanan kayıp (Ls) aylara göre günlük ortalama 0,08 kWh değerindedir. Fotovoltaik dizilerden kaynaklı kayıplar (Lc) ise aylara göre günlük ortalama 0,52 kWh değerindedir. Sistemin performans oranı %89,69 olarak hesaplanmıştır.

System Production

Produced Energy

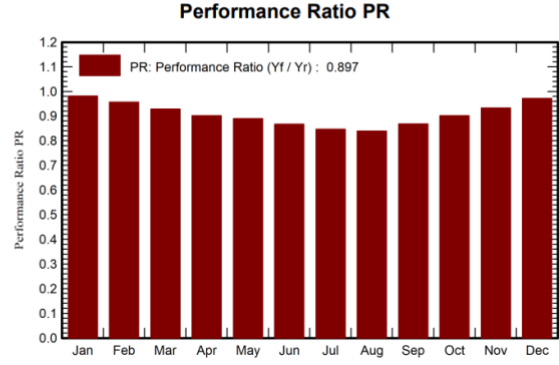
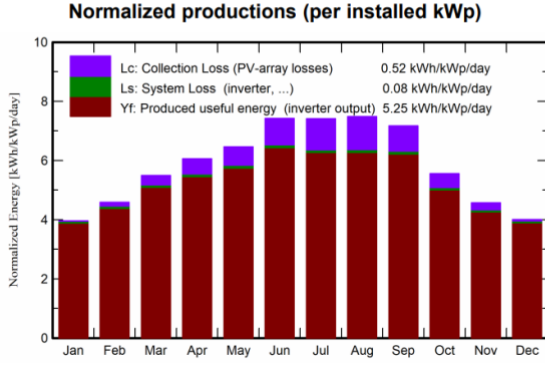
45993 MWh/year

Specific production

1916 kWh/kWp/year

Performance Ratio PR

89.69 %



Şekil 7. Erzincan'da Verimin Aylara Göre Değişimi ve Kayıp Faktörler.

Erzincan'da kurulan sistem için yıl içinde yüzdesel olarak meydana gelecek kayıplar %2,1 yansımadan, %0,5 ışınım seviyesinden, %3,82 sıcaklıktan, %2,1 modül ve diziler arasındaki uyumsuzluktan, %1,18 kablo direncinden, %1,75 invertörden ve %0,02 gece tüketiminden kaynaklanır.

3.3. İç Anadolu Bölgesi (Sivas) İçin Simülasyon ve Modelleme

Sivas şehri için konum belirlenirken yine diğer bölgelerde olduğu gibi gölgelenme ve rüzgâr faktörlerini göz önünde bulundurarak olabildiğince daha merkezi ve deniz seviyesine yakın bir lokasyon seçilmiştir. Fotovoltaik sistemin kurulacağı konum seçimi yapıldıktan sonra fotovoltaik paneller için en verimli panel açısı hesaplanır ve oryantasyon ayarı tamamlanmış olur.

System Production

Produced Energy

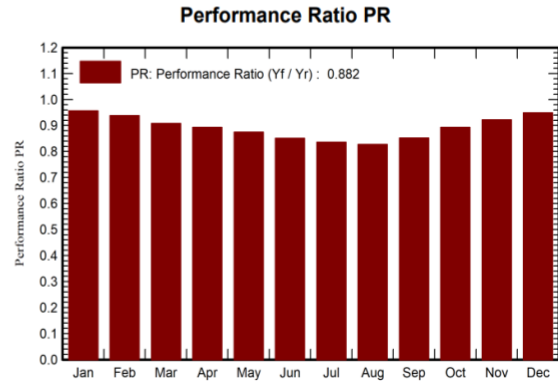
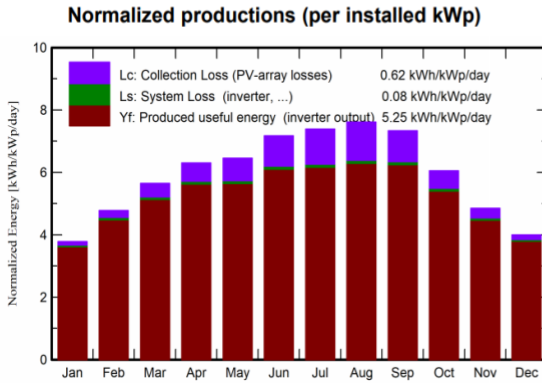
46015 MWh/year

Specific production

1917 kWh/kWp/year

Performance Ratio PR

88.24 %



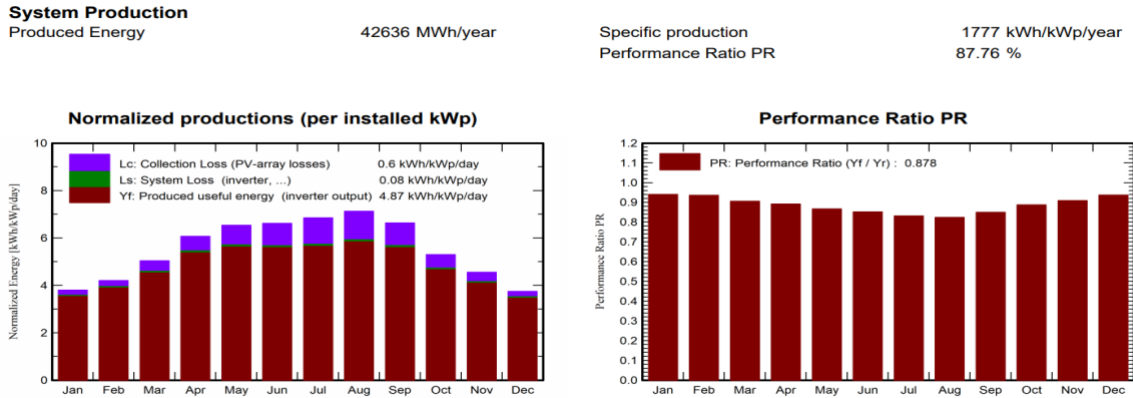
Şekil 8. Sivas'ta Verimin Aylara Göre Değişimi ve Kayıp Faktörler.

Şekil 8’de sistemde üretilen kullanışa hazır olan inverter çıkışındaki enerji (Yf) aylara göre günlük ortalama 5.25 kWh olmaktadır. Sistemde inverterden kaynaklanan kayıplar (Ls) aylara göre günlük ortalama 0.08 kWh şeklindedir. Fotovoltaik dizilerden kaynaklı kayıplar (Lc) aylara göre günlük ortalama 0,62 kWh değerindedir. Sistemdeki performans oranı %88,24 olarak elde edilmiştir.

Sivas’ta kurulan sistem için yıl içinde yüzdesel olarak meydana gelecek kayıplar %2,02 yansımadan, %0,43 ışıınım seviyesinden, %5,58 sıcaklıktan, %2,1 modül ve diziler arasındaki uyumsuzluktan, %1,18 kablo direncinden, %1,67 invertörden ve %0,02 gece tüketiminden kaynaklanır.

3.4. Ege Bölgesi (Uşak) İçin Simülasyon ve Modelleme

Ege bölgesi için seçilen il Uşak’ta kurulan fotovoltaik sistemin konumu seçildikten sonra kurulum için optimum ayarlar yapılır ve Şekil 9’daki veriler elde edilir. Sistemde üretilen kullanışa hazır olan inverter çıkışındaki enerji (Yf) aylara göre günlük ortalama 4,87 kWh değerindedir. Sistemde inverterden kaynaklanan kayıplar (Ls) aylara göre günlük ortalama 0,08 kWh iken fotovoltaik dizilerden kaynaklı kayıplar (Lc) aylara göre günlük ortalama 0,6 kWh değerindedir. Sistemin performans oranı %87,76 olarak elde edilir.

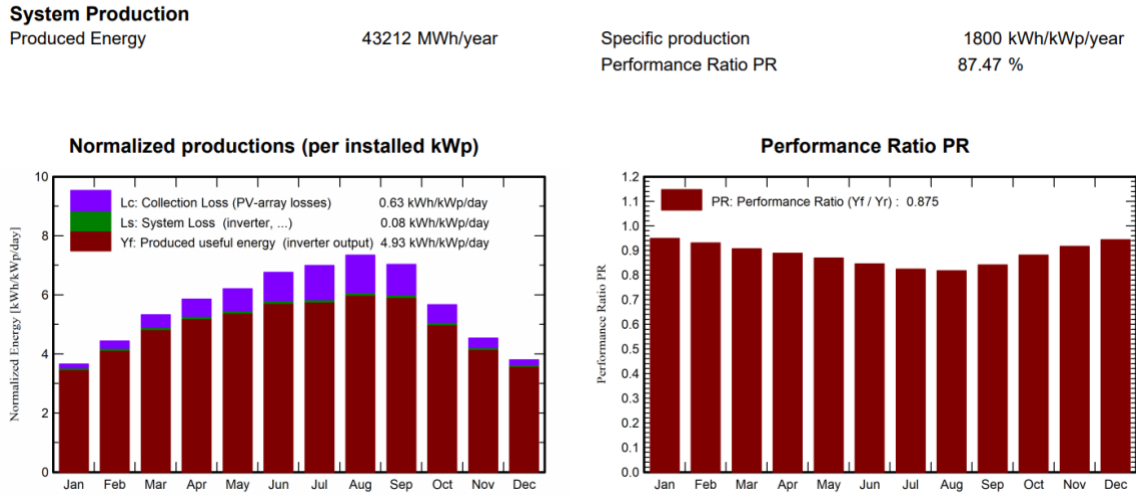


Şekil 9. Uşak’ta Verimin Aylara Göre Değişimi ve Kayıp Faktörleri.

Uşak’ta kurulan sistem için yıl içinde yüzdesel olarak meydana gelecek kayıplar %2,17 yansımadan, %0,48 ışıınım seviyesinden, %5,99 sıcaklıktan, %2,1 modül ve diziler arasındaki uyumsuzluktan, %1,13 kablo direncinden, %1,64 invertörden ve %0,02 gece tüketiminden kaynaklanır.

3.5. Akdeniz Bölgesi (Kahramanmaraş) İçin Simülasyon ve Modelleme

Kahramanmaraş şehrinde belirlenen konum için en verimli panel açısı ayarlanıp oryantasyon ayarları tamamlanır. Şekil 10’da sistemde üretilen kullanışa hazır olan inverter çıkışındaki enerji (Yf) aylara göre günlük ortalama 4,93 kWh değerindedir. Sistemde inverterden kaynaklanan kayıplar (Ls) aylara göre günlük ortalama 0,08 kWh iken fotovoltaiik dizilerden kaynaklı kayıplar (Lc) aylara göre günlük ortalama 0,63 kWh değerindedir. Performans oranı %87,47 olarak elde edilmektedir.



Şekil 1. Kahramanmaraş'ta Verimin Aylara Göre Değişimi ve Kayıp Faktörler.

Kahramanmaraş'ta kurulan sistem için yıl içinde yüzdesel olarak meydana gelecek kayıplar %2,06 yansımadan, %0,49 ışınım seviyesinden, %6,28 sıcaklıktan, %2,1 modül ve diziler arasındaki uyumsuzluktan, %1,15 kablo direncinden, %1,74 invertörden ve %0,02 gece tüketiminden kaynaklanır.

3.6. Karadeniz Bölgesi (Amasya) İçin Simülasyon ve Modelleme

Karadeniz bölgesinde seçilen şehir Amasya'dır. Amasya için elde edilen sistem performansı Şekil 11’de verilmektedir. Kullanışa hazır olan inverter çıkışındaki enerji (Yf) aylara göre günlük ortalama 4,2 kWh değerindedir. Sistemde inverterden kaynaklanan kayıplar (Ls) aylara göre günlük ortalama 0,06 kWh olarak elde edilir. Fotovoltaiik dizilerden kaynaklı kayıplar (Lc) aylara göre günlük ortalama 0,54 kWh değerindedir. Sistemin performans oranı ise %87,39 olarak elde edilir.

System Production

Produced Energy

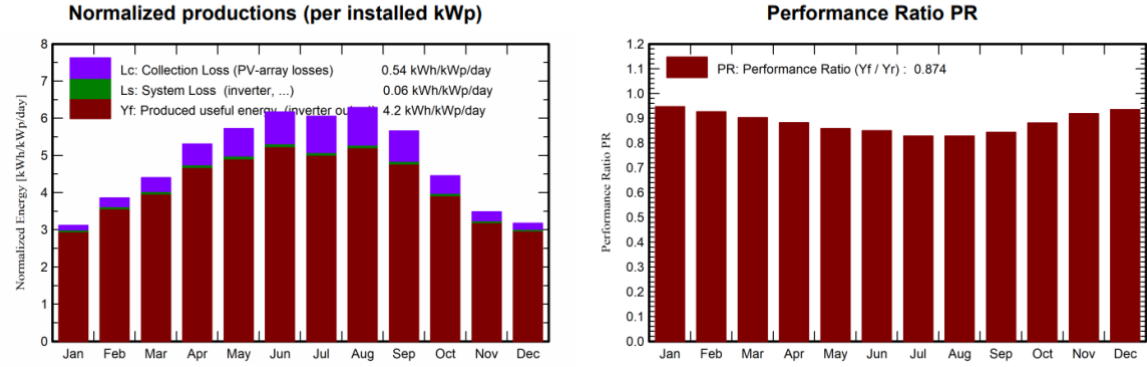
36835 MWh/year

Specific production

1535 kWh/kWp/year

Performance Ratio PR

87.39 %



Şekil 11. Amasya'da Verimin Aylara Göre Değişimi ve Kayıp Faktörleri.

Amasya'da kurulan sistem için yıl içinde yüzdesel olarak meydana gelecek kayıplar %2,12 yansımadan, %0,69 ışınım seviyesinden, %6,23 sıcaklıktan, %2,1 modül ve diziler arasındaki uyumsuzluktan, %1,07 kablo direncinden, %1,72 invertörden ve %0,03 gece tüketiminden kaynaklanır.

3.7. Marmara Bölgesi (Çanakkale) İçin Simülasyon ve Modelleme

Marmara bölgesinde belirlenen il Çanakkale için gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen sistem çıktıları Şekil 12'de verilmektedir.

System Production

Produced Energy

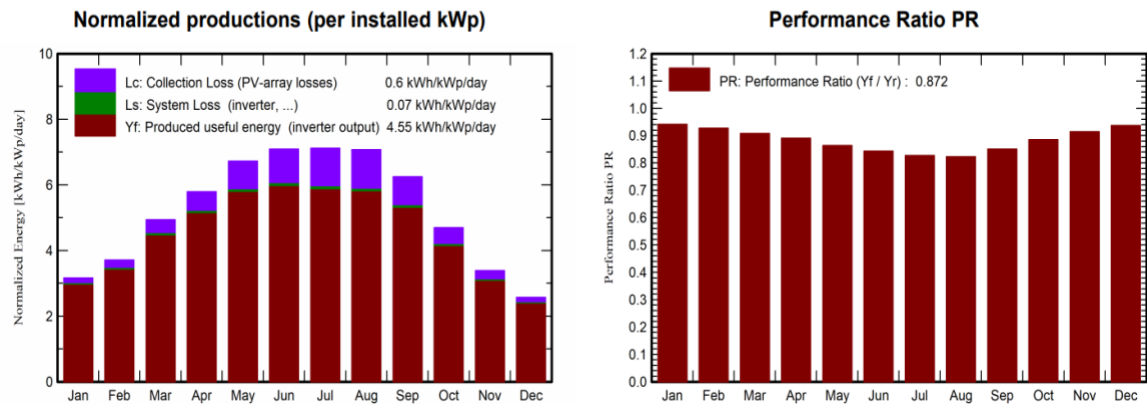
39863 MWh/year

Specific production

1661 kWh/kWp/year

Performance Ratio PR

87.23 %



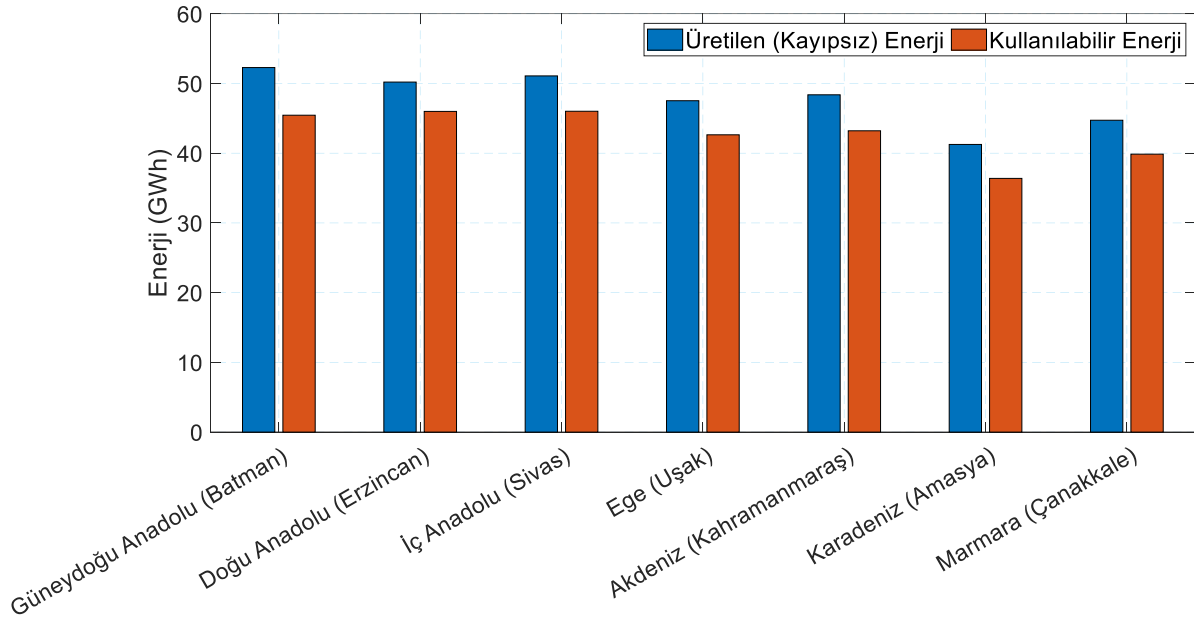
Şekil 12. Çanakkale'de Verimin Aylara Göre Değişimi ve Kayıp Faktörleri.

Kullanışa hazır olan inverter çıkışındaki enerji (Yf) aylara göre günlük ortalama 4,55 kWh değerindedir. Sistemde inverterden kaynaklanan kayıplar (Ls) aylara göre günlük ortalama 0,07 kWh şeklindedir. Fotovoltaik dizilerden kaynaklı kayıplar (Lc) ise aylara göre günlük ortalama 0,6 kWh olarak ortaya çıkar. Sistemin genel performans oranı ise %87,23 olarak elde edilir.

Çanakkale’de kurulan sistem için yıl içinde yüzdesel olarak meydana gelecek kayıplar %2,12 yansımadan, %0,54 ışıınım seviyesinden, %6,63 sıcaklıktan, %2,1 modül ve diziler arasındaki uyumsuzluktan, %1,08 kablo direncinden, %1,61 invertörden ve %0,03 gece tüketiminden kaynaklanır.

4. Sonuçlar

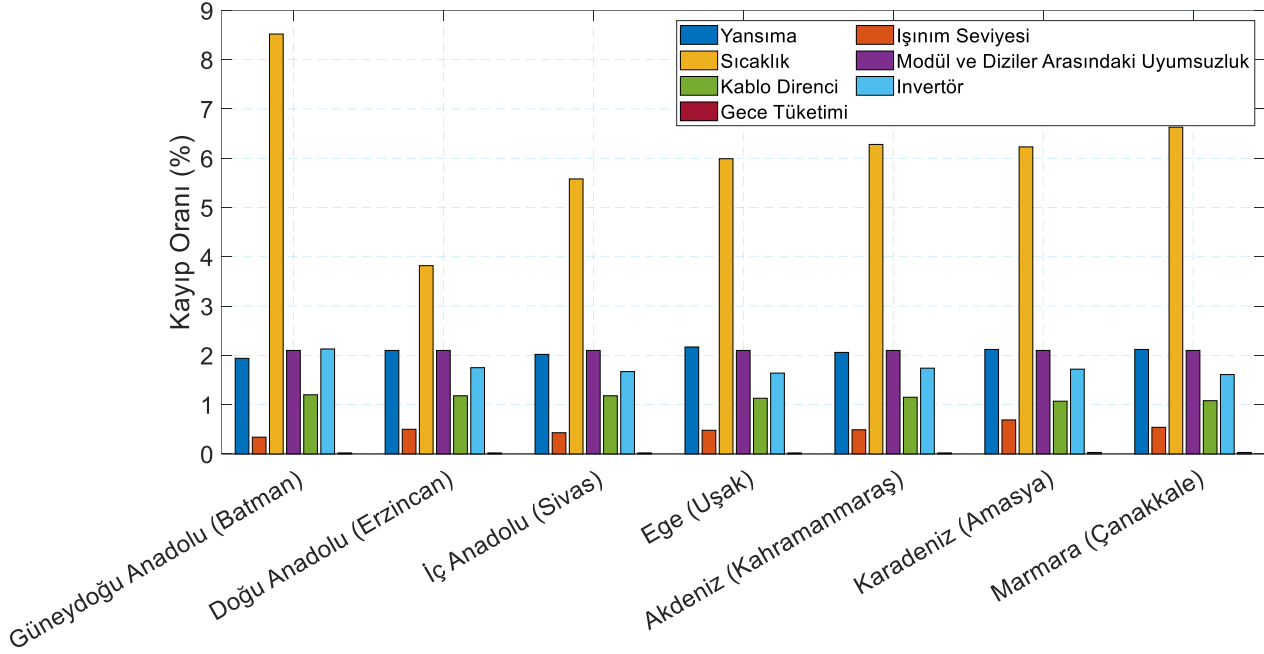
Yapılan araştırmalar sonucunda hazırlanan bu çalışmada, amaçlandığı üzere 24 MWp gücündeki fotovoltaik sistemin Türkiye’nin yedi farklı coğrafi bölgesinde PVSyst programı kullanılarak tasarlanmıştır. Simülasyon ve modellemesine ilişkin yıllık üretilen ve kullanılabilir enerji sonuçları Şekil 13’te verilmiştir.



Şekil 13. Üretilen ve Kullanılabilir Enerji

Sistemin ürettiği yıllık (kayıpsız) toplam enerji miktarı ve kayıplar çıktığında sistemin bir yılda ürettiği kullanılabilir faydalı enerji miktarı Şekil 13’te verilmektedir. GEPA verilerine göre en yüksek potansiyel Güneydoğu Anadolu bölgesinde olmasına rağmen kayıplar sebebiyle kullanılabilir faydalı enerjinin en fazla (46,015 GWh) üretildiği bölge İç Anadolu bölgesi (Sivas) olmuştur. En düşük (36,835 GWh) faydalı güç ise Karadeniz Bölgesi’nde (Amasya) kurulan sistemde üretilmiştir.

Enerji kayıplarına neden olan etmenler; yansımadan, ışınlım seviyesinden, sıcaklıktan, modül ve diziler arasındaki uyumsuzluktan, kablo direncinden, invertörden ve gece tüketiminden kaynaklanır. Çalışma sonucunda kayıplara neden olan etmenler için elde edilen yüzdesel yıllık kayıp oranları Şekil 14’te verilmektedir.



Şekil 14. Yıllık Kayıp Oranları

Şekil 13’te verilen bir yılda üretilen enerji ve kullanılabilir enerji arasındaki farkın sebepleri Şekil 14’teki kayıplardan kaynaklanmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre fotovoltaik sistemlerde yaşanan güç kayıplarının başlıca nedeni sıcaklıktır. Türkiye’nin yüksek sıcaklıklara sahip bölgelerinde oluşan kayıpların fazla olması sistem verimini ve kullanılabilir enerjisi azaltmaktadır. GEPA verilerine göre belirlenen ve yapılan tüm analizler sonucunda, Türkiye topraklarında kurulması hedeflenen bir fotovoltaik santral için, en mantıklı ve kârlı yer seçiminin İç Anadolu bölgesinde, ikinci tercih olarak da Doğu Anadolu bölgesinde olacağı söylenebilir. Öte yandan elde edilen çalışmalar sonucunda Marmara ve Karadeniz bölgesinde verimin diğer bölgelere göre çok düşük olduğu ortaya koyulmaktadır.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Akcan, E., Kuncan, M., & Minaz, M. R. (2020). PVsyst Yazılımı İle 30 Kw Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemin Modellenmesi ve Simülasyonu. *European Journal of Science and Technology*, 248–261.
- Alcan, Y., Demir, M., & Duman, S. (2018). Sinop ilinin güneş enerjisinden elektrik üretim potansiyelinin ülkemiz ve Almanya ile karşılaştırarak incelenmesi. *El-Cezeri*, 5(1), 35-44.
- Başkaya, Z., & Kaya, S. (2023). Güneş enerjisi potansiyeli ve güneş enerjisi santralleri: Bilecik ili örneği. *Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi*.
- Behçet, R., Oral, H., & Gül, H. (2013). Adıyaman ilinin güneş enerjisi potansiyeli ve kullanımı. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 3(2), 52-67.
- Bilhan, A., & Emikönel, S. (2021). Nevşehir ili güneş enerji potansiyelinin analizi ve kurulu güneş enerji santralleri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (24), 289-294.
- Çakmak, R., & Altaş, İ. A. (2016, December). Türkiye'nin doğu karadeniz bölgesi'nde güneş enerjisi potansiyeli: Trabzon ili örneği. In *Conference: 2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO)*, Bursa.
- Çakmak, R., & Altas, I. H. (2017). Erzincan'da Güneş enerjisinden elektrik üretimi potansiyeli: Almanya ile karşılaştırılması. *Uluslararası Erzincan Sempozyumu*, Erzincan, 407-419.
- Çanka, F. (2015). Solar Energy, its Recent Status in Turkey and Production Technologies. *Mühendis ve Makina*, 56(671), 28-40.
- Doğanay, M. M. (2021). Mardin bölgesi güneş (fotovoltaik) enerjisi potansiyel analizi. *Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 86-117.
- Karakaya, H., & Şen, İ. E. (2019). Fotovoltaik Panellerde Verim İyileştirme Yöntemleri. *Academic Perspective Procedia*, 2(3), 1179–1188.
- Kaynar, N. K. (2020). Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisinin Amasya ilindeki potansiyeli. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 4(2), 48-54.
- Kerem, A., Atik, M., & Bayram, A. (2020). Fotovoltaik (PV) Panel Sisteminde Yüzey Soğutma İşleminin Elektrik Üretimine Etkisinin Deneysel İncelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 12(2).
- Kırbaş, İ., Çifci, A., & İşyarlar, B. (2013). Burdur ili güneşlenme oranı ve güneş enerjisi potansiyeli. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4(2), 20-23.
- Kumar, R., Rajoria, C. S., Sharma, A., & Suhag, S. (2020). Design and simulation of standalone solar PV system using PVsyst Software: A case study. *Materials Today: Proceedings*, 46, 5322–5328.
- Kumruoğlu, L. C., & Ateş, S. B. (2022). Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli ve İskenderun için örnek üretim projeksiyonu. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(1), 293-305.
- Küçükgoze, O. M., (2016). Erzincan İlinde Güneş Enerjili Elektrik Üretim Sisteminin Ekonomik Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Erzincan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzincan.
- Oğuz, M., & Akkurt, Ş. (2017). Kayseri İlinin Yenilenebilir Enerji Potansiyeli. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2), 362-374.
- Oral, M. (2020). Solar energy potential of Turkey and evaluation of PV applications in local scale: Case of Karabük province. *International Journal of Geography and Geography Education (IGGE)*, 42(48), 2-503.

- Öztürk, B., Akyazı, Ö., Şahin, M., Yılmaz, G. (2023). Şebeke Bağlantılı Güneş Enerji Santrali'nin Modellenmesi ve Simülasyon Analizi: Ağrı/Çukurçayır Köyü 999 kW Güneş Enerjisi Santrali Örneği. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 13(4), 1623-1647.
- Saraswat, R., & Sathans. (2017). Comparative performance evaluation of solar PV modules from different manufacturers in India by using PVsyst. 1st IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, ICPEICES 2016.
- Soualmia, A., & Chenni, R. (2017). Modeling and simulation of 15MW grid-connected photovoltaic system using PVsyst software. Proceedings of 2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2016.
- Tanrıkulu, Y. S., & Partigöç, N. S. (2024). Güneş enerjisi santrallerinin (ges) coğrafi bilgi sistemleri (CBS) tabanlı analitik hiyerarşi süreci (ahs) yöntemi ile yer seçimi: Denizli ili örneği. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*.
- Taşkın, O., & Korucu, T. (2014). Kahramanmaraş ili güneş enerjisi potansiyeli ve kullanım olanakları. *Tarım ve Doğa Dergisi*, 17(4), 12.
- Tuğcu, A. (2023). PVSYST Simülasyon Aracı Kullanılarak Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Tavşanlı Yerleşkesi Şebeke Bağlantılı Güneş Enerjisi Santralinin Tasarımı ve Ekonomik Analizi. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 397-417.
- Varlı, H., Tuna, M., & Tombul, M. (2022). Bölgesel güneş enerji potansiyeli ve enerji santrali yatırımı değerlemesi: Sincan Örneği. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 34(2), 657-666.
- URL-1: <https://www.gensed.org/basin/tei%CC%87a%C5%9F-2024-ocak-ay%C4%B1-kurulu-g%C3%BC%C3%A7-raporunu-yay%C4%B1mlad%C4%B1>, (Erişim Tarihi: 29 Nisan 2024).
- URL-2: <https://www.enerjiatlası.com/gunes-enerjisi-haritasi/turkiye> (Erişim Tarihi: 23 Temmuz 2024)
- URL-3: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes#:~:text=%C3%9C%20k%C4%9Fraf%C4%B1%20konumu%20nedeniyle%20%C3%B6nemli,kWh%20olarak%20hesaplanm%C4%B1%C5%9F%C4%B1r.>, (Erişim Tarihi: 29 Nisan 2024).
- URL-4: <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/>, (Erişim Tarihi: 02 Mayıs 2024)
- URL-5: <https://tuba.gov.tr/yayınlar/suresiz-yayınlar/raporlar/tuba-gunes-enerjisi-teknolojileri-raporu-1>, (Erişim Tarihi: 02 Mayıs 2024)

Farklı Tiplerde Optik Fiber Kullanan DWDM-PON Sistem Mimarisi Üzerindeki Birleşik FWM ve SRS Etkisinin Karşılaştırmalı Analizi

Sait Eser KARLIK^{1*} 

Öz

Dalgaboyu bölmeli çoğullama tabanlı pasif optik ağlar (WDM-PON), 5G ağlarının ön bağlantı uygulamaları için önemli bir seçenek oluşturmaktadır. WDM tabanlı optik fiberli sistemlerin performansı üzerindeki baskın doğrusal olmayan etkiler, dört dalga karışımı (FWM) ile uyarılmış Raman saçılmasıdır (SRS). Önceki çalışmalarımızdan birinde, standart tek modlu fiberin (SSMF), 1310 nm ve 1550 nm dalgaboyu bölgelerinde çalışabilme özelliğinden yararlanılarak, hem yukarı yönlü hem aşağı yönlü iletimde yoğun WDM (DWDM) tekniğini kullanan bir PON mimarisi önerilmiştir. Mimarinin 2x15 ve 2x63 kanallı örneklerinde birleşik FWM ve SRS (FWM+SRS) etkisi benzetimlerle incelenmiş; önerilen mimarinin, bazı önemli noktalara dikkat edildiğinde, 23 dB'in üzerindeki işaret-çapraz karışım oranıyla (SXR) çift yönlü iletim potansiyeline sahip olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada, sıfır olmayan dispersiyonu kaydırılmış fiberlerin (NZDSF) erişim ağlarında yaygınlaşan kullanımları göz önünde bulundurularak, daha önce önerdiğimiz DWDM-PON mimarisinin SSMF ve NZDSF kullanan 2x31 kanallı örneklerinde FWM+SRS etkisi incelenmiştir. Benzetimlerde, kanallar arası boşluk değerleri, 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz, 100 GHz alınmıştır. Öncelikle 25 km uzunluklu ağ mimarilerinde, SXR-kanal giriş gücü benzetimleriyle FWM+SRS etkisi incelenmiştir. Daha sonra, literatürde belirtilen diğer iletim uzunlukları için karşılaştırmalı benzetim sonuçları sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, FWM+SRS etkisi altındaki DWDM-PON'larda, tek optik fiber üzerinden güvenilir çift yönlü iletim için NZDSF kullanımının önemine vurgu yapmaktadır.

Anahtar Kelimeler: FWM, SRS, DWDM-PON, SSMF, NZDSF, Optik fiber.

Comparative Analysis of Combined FWM and SRS Impact on DWDM-PON System Architecture Using Different Types of Optical Fiber

Abstract

Wavelength division multiplexing based passive optical networks (WDM-PONs) become an important choice for 5G fronthaul applications. Dominant nonlinear impacts on the performance of WDM-based optical fiber systems are four-wave mixing (FWM) and stimulated Raman scattering (SRS). In one of our previous works, making use of the ability of standard single mode fibers (SSMFs) about operating in 1310 nm and 1550 nm wavelength regions, a PON architecture using dense WDM (DWDM) technique for upstream and downstream transmission was proposed. Combined FWM and SRS (FWM+SRS) impact on 2x15- and 2x63-channel examples of proposed architecture was analyzed with simulations. It was determined that proposed architecture has a bidirectional transmission potential with a signal-to-crosstalk ratio (SXR) over 23 dB when some important points are taken into consideration. In this research, considering the raising usage of non-zero dispersion-shifted fibers (NZDSFs) in access networks, FWM+SRS impact on 2x31-channel examples of formerly proposed DWDM-PON architecture using SSMF and NZDSF is analyzed. Channel spacings are selected as 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz, 100 GHz. Firstly, FWM+SRS impact on network architectures with 25 km lengths is analyzed with SXR vs. channel input power simulations. Then, comparative results of simulations performed for other transmission lengths given in the literature are presented. Results emphasize the importance of usage of NZDSFs for reliable bidirectional transmission over single optical fiber in DWDM-PONs under FWM+SRS impact.

Keywords: FWM, SRS, DWDM-PON, SSMF, NZDSF, Optical fiber.

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bursa Türkiye, ekarlik@uludag.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 06.05.2024

Kabul/Accepted: 28.07.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Giriş

Dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM), kullanılabilir iletim kapasitesini artırma, ağ tasarımında esneklik sağlama gibi özellikleri nedeniyle, optik ağlar için önemli bir çoğullama yöntemidir (Brackett, 1990). WDM'in pasif optik ağlarda (PON) kullanımı, literatürde ilk defa önerildiği 1988 yılından (Wagner ve ark., 1988) itibaren araştırmacıların ilgisini çekmiştir (Monnard ve ark. 1997; Maier ve ark., 2000; Hann ve ark., 2004; Park ve ark., 2007; Iannone ve ark., 2008; Zhou ve ark., 2010; Kaur ve ark., 2014; Shahpari ve ark., 2015; Fazea, 2019; Guo ve ark., 2021). 2021 yılında WDM-PON standardı yayınlamıştır (ITU-T, 2021). Günümüzde, 5G ve ötesi ağları için ön bağlantı (fronthaul) mimarilerinde WDM-PON'un kullanıldığı saha testi sonuçlarını bildiren bazı çalışmalar mevcuttur (Song ve ark, 2021; Effenberger ve Zhang, 2022; Yücel ve Açıköz, 2023; Xin ve ark, 2023). Ayrıca hibrit optik fiberli/açık uzay optik haberleşme (FFSO) sistemlerinde de WDM-PON tercih edilmektedir (Elsayed ve ark., 2018; Elsayed ve ark., 2022a; Elsayed ve ark.; 2022b). Dolayısıyla yakın gelecekteki hem 5G ve ötesi ağ uygulamalarında hem de FFSO haberleşme sistem kurulumlarında WDM-PON'un önemli bir seçenek olma potansiyeli mevcuttur.

Yoğun WDM'in (DWDM) uzak mesafe ve erişim ağlarında kullanılmaya başlamasıyla birlikte WDM kanal aralıklarının daralması, optik Kerr ve saçılma etkileri kaynaklı doğrusal olmayan olayları güvenilir optik iletişim sistemlerinin tasarımında göz ardı edilmemesi gereken unsurlar haline getirmiştir (Kaur ve ark., 2010; Sabapathi ve Sundaravadivelu, 2011). Literatürde, doğrusal olmayan olayların WDM/DWDM-PON sistem performansı üzerindeki yalın ya da birleşik etkilerine odaklanan çeşitli çalışmalar mevcuttur (Acharya ve Raja, 2007; Reis ve ark., 2012; Bi ve ark., 2014; Manzoor ve ark., 2015; Vardanyan, 2017; Neto ve ark.; 2017; Ahmet ve Sahu, 2018; Song ve ark., 2021). Ancak, WDM temelli optik haberleşme sistemleri üzerindeki baskın doğrusal olmayan etkilerin dört dalga karışımı (FWM) ile uyarılmış Raman saçılması (SRS) olduğu kaynaklarda belirtilmesine rağmen (Schneider, 2004; Agrawal, 2019; Sabapathi ve Poovitha, 2019; Agrawal, 2021), yakın zamana kadar WDM-PON sistemlerin aşağı yönlü (downstream) ve yukarı yönlü (upstream) iletim kanalları üzerindeki birleşik FWM ve SRS (FWM+SRS) etkisini inceleyen bir çalışma, literatürde bildiğimiz kadarıyla mevcut değildi. Önceki yayınlarımızdan birinde, bu konuya yoğunlaşarak, G.652 standart tek modlu optik fiberin (SSMF) hem 1530 nm hem de 1550 nm dalgaboyu bölgelerinde çalışabilme yeteneğinden yararlanılıp yeni bir WDM-PON mimarisi önerilmiş; bu mimarinin, 2x15 ve 2x63 kanallı örneklerinin aşağı ve yukarı yönlü iletim kanalları üzerindeki FWM+SRS etkileri benzetimler yardımıyla incelenmiştir (Karlık, 2023).

Literatürde, çeşitli WDM-PON mimarilerinin sıfır olmayan dispersiyonu kaydırılmış fiber (NZDSF) kullanılarak gerçekleştirildiği bazı çalışmalar mevcuttur (Gebrewold ve ark., 2017; Aleksejeva ve ark., 2021). İlgili çalışmalardan ilham alınarak, bu makalede, daha önce önerilen WDM-PON

mimarisine sahip SSMF ve NZDSF kullanılan iki farklı sistem örneği üzerinde, FWM+SRS etkisi altındaki sistem performansının karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Bu amaçla, 2x31 kanallı DWDM-PON'ların aşağı ve yukarı yönlü iletim kanalları üzerindeki FWM+SRS etkisi benzetimler yardımıyla karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve yorumlanmıştır.

FWM ve SRS ile ilgili teorik altyapı ikinci bölümde verilmiştir. Benzetimlerde kullanılan sistem modeli ile SSMF ve NZDSF fiber parametreleri üçüncü bölümde açıklanmıştır. Benzetim sonuçları dördüncü bölümde verilmiş ve yorumlanmıştır.

2. Teorik Altyapı

FWM, optik Kerr etkisinin bir sonucu olarak ortaya çıkan, aynı optik ortamda ilerleyen üç dalga'nın birbiriyle etkileşerek yeni bir dalga ürettiği doğrusal olmayan olaydır. N kanallı WDM çoğullama ile iletimin yapıldığı optik fiberde, FWM nedeniyle üretilen yeni dalga'nın frekansı

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k \quad (1)$$

olacaktır (Schneider, 2004; Agrawal, 2019). f_{ijk} üretilen dalga'nın frekansı; f_i , f_j ve f_k ise, sırasıyla, N kanallı WDM sistemin i., j. ve k. kanallarlarında yayılan dalgaların frekanslarıdır. Yeni dalga üretiminin gerçekleşebilmesi için, Denklem (1)'de $f_k \neq f_i$ ve $f_k \neq f_j$ koşullarının sağlanması gerekir.

Denklem (1)'den kolayca anlaşılacağı üzere, WDM sistemindeki kanal sayısı arttıkça, FWM nedeniyle, yeni frekanslı daha fazla dalga üretilecektir. Üretilen bu yeni dalgaların herbirine FWM ürünü denir. N kanallı WDM sisteminde üretilen toplam FWM ürün sayısı M ile belirtilirse, M değeri, $M = N^2(N-1)/2$ ile hesaplanabilir. FWM ürünlerinden, frekansı iletilen WDM kanallarının frekanslarına eşit olanlara FWM çaprazkarışımı (FWM crosstalk) denir. FWM çaprazkarışimleri, WDM kanallarında iletilen işaretlerle girişim yaparak, bu işaretler üzerinde bozunmaya sebebiyet verirler. Üretilen FWM ürünlerinden, frekansı iletilen WDM kanallarının frekanslarına eşit olmayanlar ise WDM kanal aralıklarına düştüklerinden toplam sistem gürültüsüne eklenirler. Dolayısıyla, FWM çaprazkarışimleri, işaret üzerindeki bozucu etkileri nedeniyle, iletilen işaret analizinde en çok önem verilen parametrelerdendir. Kanal aralıklarının eşit seçildiği WDM sistemlerinde, FWM çaprazkarışımının oluşma olasılığı, kanal aralıklarının eşit seçilmediği sistemlerdekine göre çok daha yüksek olmaktadır. Ancak, toplam iletim kapasitesini mümkün olduğunca arttırmak ve en yüksek sayıdaki kanaldan veri iletişimini sağlayarak kullanıcı sayısını maksimize edebilmek amacıyla, uygulamada eşit kanal aralıkları daha fazla tercih edilmektedir. Dolayısıyla, WDM temelli sistemlerde, eşit kanal aralıkları nedeniyle artan FWM çaprazkarışım

sayısının sistem performansı üzerindeki bozucu etkileri dikkatle izlenmelidir (Schneider, 2004; Agrawal, 2019).

N kanallı WDM sistemin k. kanalında iletilen işaret ile girişim yapan bir FWM ürününün gücü

$$P_{FWM}(f_{ijk}) = \left(\frac{d_{ijk} \cdot \gamma \cdot L_{eff}}{3} \right)^2 P_i \cdot P_j \cdot P_k \cdot \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta_{ijk}^2} \cdot \left[1 + \frac{4e^{-\alpha L}}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \sin^2 \left(\frac{\Delta\beta_{ijk} \cdot L}{2} \right) \right] \quad (2)$$

ile hesaplanabilir (Schneider, 2004; Agrawal, 2019). Denklem (2)'de d_{ijk} dejenerasyon faktörü; γ doğrusalsızlık katsayısı; L_{eff} optik fiberin etkin uzunluğu; P_i , P_j ve P_k FWM ürününü oluşturan i., j. ve k. kanallardaki giriş işaret güçleri; α optik fiberin zayıflama katsayısı; L optik fiberin uzunluğu; $\Delta\beta_{ijk}$ birbirleriyle etkileşerek FWM ürününü oluşturan i., j. ve k. kanallar arasındaki faz uyumsuzluğu faktörüdür (Schneider, 2004; Agrawal, 2019).

γ ve $\Delta\beta_{ijk}$, sırasıyla,

$$\gamma = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_2}{\lambda \cdot A_{eff}} \quad (3)$$

ve

$$\Delta\beta_{ijk} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_k^2}{c} \cdot (|f_i - f_k| \cdot |f_j - f_k|) \cdot \left[D_c + \frac{\lambda_k^2}{2c} \cdot S \cdot (|f_i - f_k| + |f_j - f_k|) \right] \quad (4)$$

ile hesaplanır (Schneider, 2004; Agrawal, 2019). Denklem (3)'te n_2 optik fiberin doğrusal olmayan kırılma indisi; λ iletim kanalının dalgaboyu; A_{eff} optik fiberin etkin alanıdır. Denklem (4)'te λ_k k. kanalın dalgaboyu; D_c kromatik dispersiyon katsayısı; S dispersiyon eğimi ve c ışığın boşluktaki hızıdır (Schneider, 2004; Agrawal, 2019).

f_c frekanslı belirli bir WDM kanalındaki toplam FWM çaprazkarışım gücü, ilgili kanala düşen tüm FWM ürünlerinin güçlerinin toplamı olup Denklem (5) ile ifade edilebilir (Schneider, 2004; Agrawal, 2019).

$$P_{FWM}(f_c) = \sum_{f_k=f_i+f_j-f_c} \sum_{f_j} \sum_{f_i} P_{FWM}(f_i + f_j - f_k) \quad (5)$$

SRS, optik fiberde ilerleyen ışığın, malzemenin moleküler titreşimleriyle etkileşmesi nedeniyle meydana gelen bir elastik olmayan saçılmadır. SRS'nin bir sonucu olarak, düşük ve yüksek frekanslı yeni dalgalar oluşur. WDM temelli sistemlerde, SRS nedeniyle, yüksek frekanslı kanallarda iletilen işaret gücünün bir kısmı, düşük frekanslı kanallara aktarılır (Schneider, 2004; Agrawal, 2019).

N kanallı WDM sistemin tüm kanalları arasındaki SRS etkisi göz önüne alındığında, k. kanalda iletilen işaret gücü

$$P_M[k] = P_T[k] - P_T[k] \cdot \sum_{i=k+1}^N D[k, i] + \sum_{j=1}^{k-1} P_T[j] \cdot D[j, k] \quad , \quad k=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

ile bulunabilir (Singh ve Hudiara, 2004). Denklem (6)'da, $P_T[k]$ k. kanal girişindeki işaret gücünü; $P_T[k] \sum_{i=k+1}^N D[k, i]$ SRS etkisi nedeniyle k. kanaldan diğer tüm düşük frekanslı kanallara aktarılan toplam işaret gücünü; $\sum_{j=1}^{k-1} P_T[j] \cdot D[j, k]$ SRS etkisi nedeniyle k. kanala diğer tüm yüksek frekanslı kanallardan aktarılan toplam işaret gücünü göstermektedir. Denklem (6)'da, $i > N$ için $D[k, i] = 0$ ve $k = 1$ için $D[j, k] = 0$ olacaktır (Singh ve Hudiara, 2004).

$(f_i - f_j) \leq 1.5 \times 10^{13}$ Hz ve $j > i$ iken, i. kanaldan j. kanala aktarılan işaret gücü

$$D[i, j] = \left(\frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right) \cdot P_T[i] \cdot \left\{ \frac{(f_i - f_j)}{1.5 \times 10^{13}} \right\} \cdot g_{Rmax} \cdot \left\{ \frac{L_{eff} \cdot 10^5}{2 \cdot A_{eff}} \right\} \quad (7)$$

ile hesaplanabilir (Singh ve Hudiara, 2004). Denklem (7)'de λ_i ve λ_j , sırasıyla, i. ve j. kanalların dalga boyları; g_{Rmax} maksimum Raman kazanç katsayısıdır. $(f_i - f_j) > 1.5 \times 10^{13}$ Hz ve $j \leq i$ ise, $D[i, j] = 0$ olur (Singh ve Hudiara, 2004).

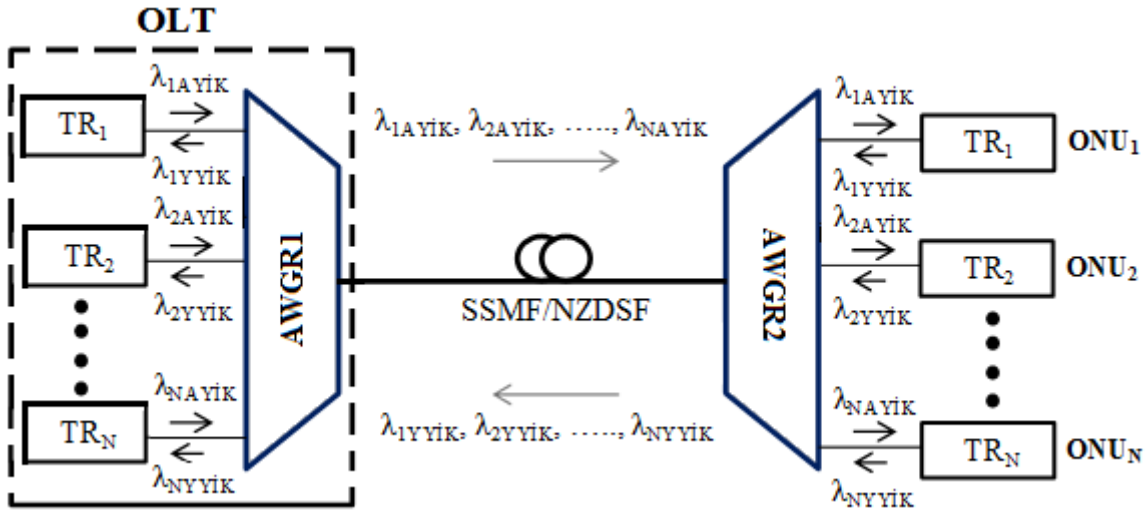
Bu çalışmada, DWDM-PON sistemlerinin performansı üzerindeki FWM+SRS etkisinin incelenmesi, işaret-çaprazkarışım oranı (SXR) değerleri yardımıyla gerçekleştirilmiştir. SXR değeri,

$$SXR = 10 \log_{10} \frac{P_{SRS}}{P_{FWM}} \quad (8)$$

ile hesaplanır. Denklem (8)'de P_{SRS} , incelenen kanaldaki SRS etkisi göz önüne alındığında iletilen güç; P_{FWM} , incelenen kanaldaki toplam FWM çaprazkarışım gücüdür. Dolayısıyla, P_{SRS} ve P_{FWM} , sırasıyla, Denklem (6) ve Denklem (5) ile bulunur.

3. Benzetimlerde Kullanılan Sistem Modeli ve Optik Fiber Parametreleri

Bu çalışmada, önceki çalışmalarımızdan birinde (Karlık, 2023) önerilen WDM-PON mimarisinin temel alındığı DWDM-PON sistem modeli üzerinde benzetimler gerçekleştirilmiştir. G.652 SSMF tipi optik fiberlerin (ITU-T, 2016) hem 1310 nm hem de 1550 nm dalgaboyu bölgesinde çalışabilme yeteneği temel alınarak, yukarı yönlü iletim kanallarının (YYİK) 1310 nm dalgaboyu bölgesinde, aşağı yönlü iletim kanallarının (AYİK) 1550 nm dalgaboyu bölgesinde çalıştığı sistem modelinde, iki dalgaboyu bölgesi arasında kullanılmayan geniş boşluğun AYİK ve YYİK arasında doğrusal olmayan etkileşimleri önleme özelliğinden de yararlanılmaktadır (Karlık, 2023). Çalışmada kullanılan 2xN kanallı DWDM-PON sisteminin blok şeması Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. 2xN kanallı DWDM-PON sistem modeli.

Şekil 1’deki AWGR1 ve AWGR2, dizili dalga kılavuzu ızgara yönlendiriciler olup çift yönlü iletimde bir yönde çoğullama ve diğer yönde yalınlama işlemlerini yapabilme özelliklerine sahiptir. Sistemin her iki ucundaki TR_x ’ler ($x=1, 2, \dots, N$), belirli dalgaboylarında çalışan AYİK ve YYİK’da iletilen işaretleri gönderen ve alan optik alıcı-vericilerdir. $\lambda_{iAYİK}$ ($i=1, 2, \dots, N$) ve $\lambda_{jYYİK}$ ($j=1, 2, \dots, N$), çift yönlü DWDM iletimde, sırasıyla, AYİK ve YYİK çalışma dalgaboylarıdır. Benzetimler, 2x31 kanallı ve 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz, 100 GHz kanallar arası boşluk değerli (Δf) DWDM-PON sistem modelleri göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 1’den görüldüğü üzere, benzetimlerde, optik hat sonlandırıcısı (OLT) ucundaki AWGR1 ile optik ağ birimlerinin (ONU_x) bağlı olduğu AWGR2 arasındaki G652 SSMF (ITU-T, 2016) veya G655 NZDSF (ITU-T, 2009) tipi ana optik fiber kablo üzerinden gerçekleştirilen çift yönlü DWDM iletişime odaklanılmıştır. Aşağı yönlü iletim merkez kanalı (AYİMK) dalgaboyu 1550 nm, yukarı yönlü iletim merkez kanalı (YYİMK) dalgaboyu 1310 nm olarak seçilmiştir. Benzetimlerde kullanılan SSMF ve NZDSF parametreleri, yaygın olarak

kullanılan ticari fiberlerden Corning®SMF-28e® (Corning®SMF-28e® Optical Fiber, 2007) ve Draka Teralight™ (Draka Teralight™ Optical Fiber, 2010) fiberlere ait olup Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Benzetimlerde kullanılan SSMF ve NZDSF parametreleri.

		Optik Fiber Tipi	Parametre		
			Kromatik dispersiyon katsayısı ps/(nm.km)	Doğrusalsızlık katsayısı (W.km) ⁻¹	Zayıflama katsayısı (dB/km)
Dalgaboyu (nm)	1310	SSMF	-0.26	1.64	0.35
		NZDSF	-6.00	2.10	0.40
	1550	SSMF	16.20	1.30	0.20
		NZDSF	8.00	1.73	0.25

SSMF ya da NZDSF kullanılan ve eşit kanal aralıklarına sahip DWDM temelli sistemlerde, FWM çaprazkarışımının büyük bir bölümü merkez iletim kanalına düşmektedir (Harboe ve ark., 2008; Karlık, 2016). Bu nedenle, FWM+SRS etkisi altındaki DWDM-PON’ların en kötü durumdaki performanslarını belirleyebilmek amacıyla, SXR benzetimleri AYİMK ve YYİMK’lerde gerçekleştirilmiştir.

31 kanallı WDM sistemde, üretilen toplam FWM ürün sayısı M , $M=N^2(N-1)/2$ formülü yardımıyla, 14415 olarak bulunur. Bu 14415 adet FWM ürününden 337 tanesi, eşit kanal aralıklarına sahip sistemlerde, merkez iletim kanalına düşmektedir. 2x31 kanallı DWDM-PON sistemlerinde AYİMK ve YYİMK’nın her birinde 337 adet FWM çaprazkarışımına sebebiyet veren kanal kombinasyonları Şekil 2’de verilmiştir. Örnek olarak Şekil 2’de turuncu boyalı hücre göz önüne alındığında; 5. ($i=5$), 23. ($j=23$) ve 12. ($k=12$) AYİK/YYİK etkileşerek, AYİMK/YYİMK’da bir adet FWM çaprazkarışımı oluştururlar.

Literatürde, doğrusal olmayan optik olayların DWDM temelli sistemlerin performansı üzerindeki etkileri incelenirken, referans değer olarak, 20 dB (Nakajima ve ark., 1997), 23 dB (Harboe ve ark., 2008) ve 25 dB (Bogoni ve Poti, 2004) gibi belirli minimum SXR değerleri alınmaktadır. Bu çalışmada, literatürdeki değerlerin ortalaması olan 23 dB, referans değer olarak kabul edilmiştir.

Literatürde, DWDM-PON sistemlerinin incelendiği yayınlarda, iletim uzunlukları olarak genellikle 20 km (Vardanyan, 2017; Garg ve ark., 2019), 25 km (Reis ve ark., 2012; Song ve ark., 2021), 60 km (Reis ve ark., 2012; Manzoor ve ark., 2020) ve 80 km (Bi ve ark., 2014; Shahpari ve ark., 2015) değerleri dikkate alınmıştır. Bu çalışmada yapılan benzetimlerde, öncelikle, ortalama bir erişim ağı mesafesi olarak 25 km’lik iletim uzunluğuna sahip sistemler için SXR-kanal giriş gücü grafikleri elde edilmiştir. Daha sonra, belirli bir kanal giriş gücü değeri için, 20 km, 25 km, 60 km ve

80 km iletim uzunluklarına sahip sistemlerde, FWM+SRS etkisi altındaki SXR değerleri elde edilerek sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır.

i/j/k	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1									2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2							1		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
3						1	2		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
4					1	2	3		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
5				1	2	3	4		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
6			1	2	3	4	5		7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
7		1	2	3	4	5	6		8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
8	1	2	3	4	5	6	7		9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
9	2	3	4	5	6	7	8		10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
10		4	5	6	7	8	9		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
11			6	7	8	9	10		12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
12				8	9	10	11		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
13					10	11	12		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
14						12	13		15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
15							14		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
16																							
17									18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
18										20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
19											22	23	24	25	26	27	28	29	30	31			
20												24	25	26	27	28	29	30	31				
21													26	27	28	29	30	31					
22														28	29	30	31						
23															30	31							

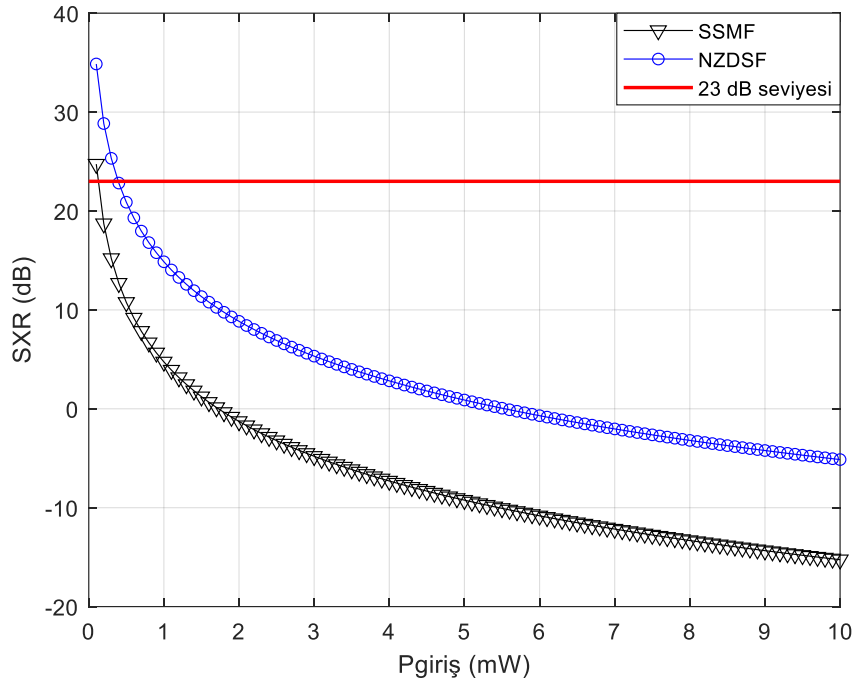
Şekil 2. 2x31 kanallı ve eşit kanal aralıklı DWDM-PON sisteminde AYİMK ve YYİMK'nın her birine düşen 337 adet FWM çaprazkarışımını oluşturan kanal kombinasyonları.

2x31 kanallı DWDM-PON sistem modeli üzerindeki benzetimler, MATLAB R2021a yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Benzetimler için gereken m-file yazımlarında, FWM+SRS etkisi altındaki SXR değerlerinin hesaplanabilmesi için, AYİMK ve YYİMK'da oluşan toplam 2x337 adet FWM çaprazkarışımının her biri için, Denklem (2) ve Denklem (4), katsayılarının değişmesi nedeniyle, ayrı ayrı yazılmak durumunda kalmıştır. İlave olarak, yine kanal dalgaboyu ve frekanslarının değişimi nedeniyle, Denklem (7) ile hesaplanan $D[i,j]$ için 2x31 adet denklem yazılmıştır. Dolayısıyla, modelleme karmaşıklığını daha da arttırmamak için, bu çalışmada, tüm kanalların giriş güçlerinin birbirine eşit alınmasının yanı sıra, iletilen işaretlerde modülasyon formatlarının değişiminin sistem performansı üzerindeki etkisi de incelenmemiş; kanal giriş güçleri olarak modüle edilmiş işaretin ortalama gücü göz önüne alınmıştır.

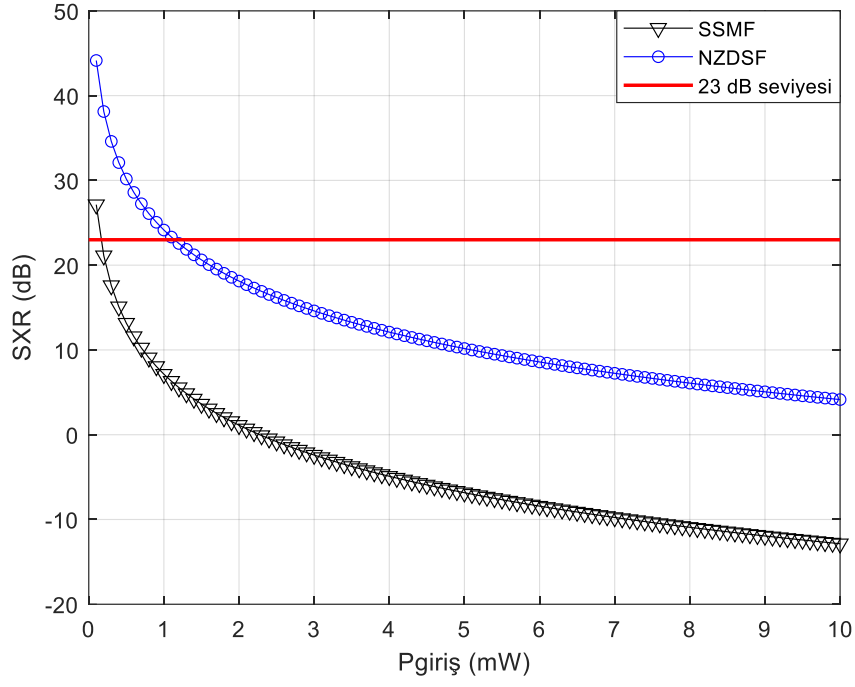
4. Benzetimler

Bölüm 2’de verilen teorik altyapı kullanılarak, Şekil 1’de gösterilen 2x31 kanallı DWDM-PON sistem modeli üzerinde gerçekleştirilen benzetimlerde, FWM+SRS etkisi altında AYİMK ve YYİMK’deki SXR’in değişen kanal giriş gücü değerleri ile değişimi incelenmiş ve yorumlanmıştır. Şekil 3-10’da, 23 dB SXR referans seviyesi, kırmızı renkteki çizgiyle gösterilmiştir.

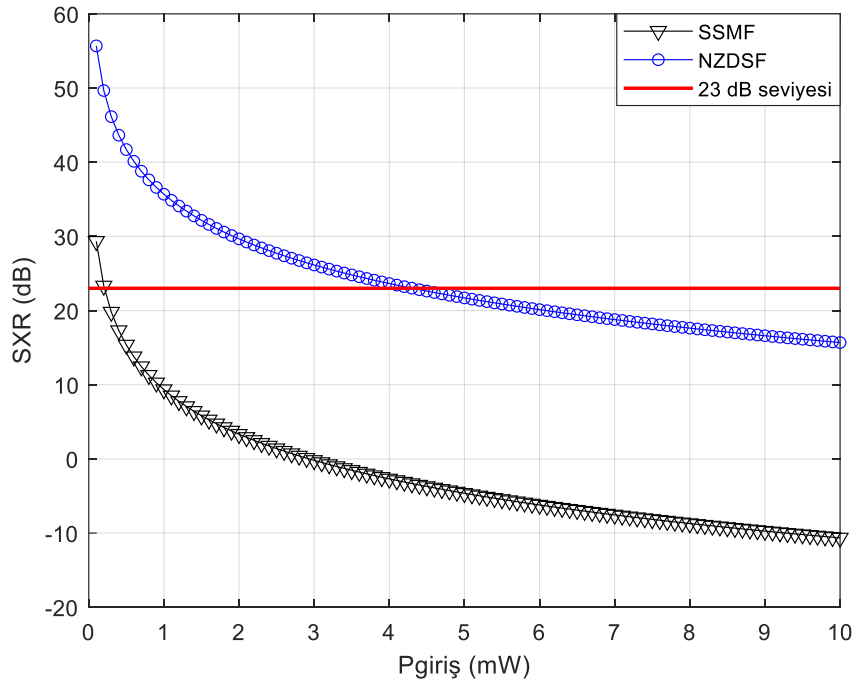
Kanal giriş güçlerinin birbirine eşit alınarak ve 0.1 mW ile 10 mW aralığında değiştirilerek, FWM+SRS etkisi altında SXR değişimlerinin incelendiği benzetim sonuçları, YYİMK için Şekil 3-6’da, AYİMK için Şekil 7-10’da verilmiştir. İlgili benzetimlerde kanal uzunlukları 25 km olarak alınmıştır.



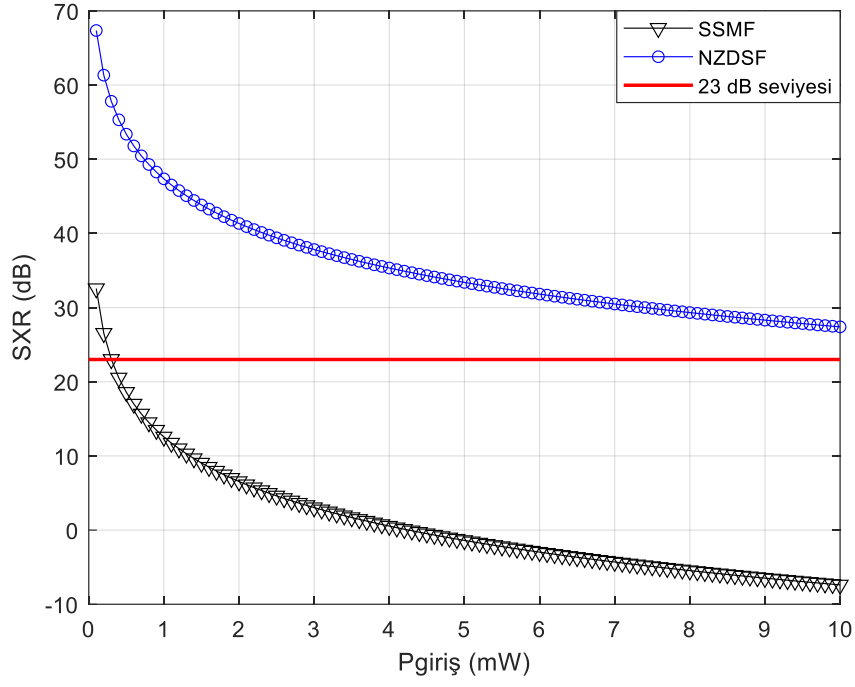
Şekil 3. $\Delta f= 12.5$ GHz iken FWM+SRS etkisi altında YYİMK’da SXR- $P_{giriş}$ değişimi.



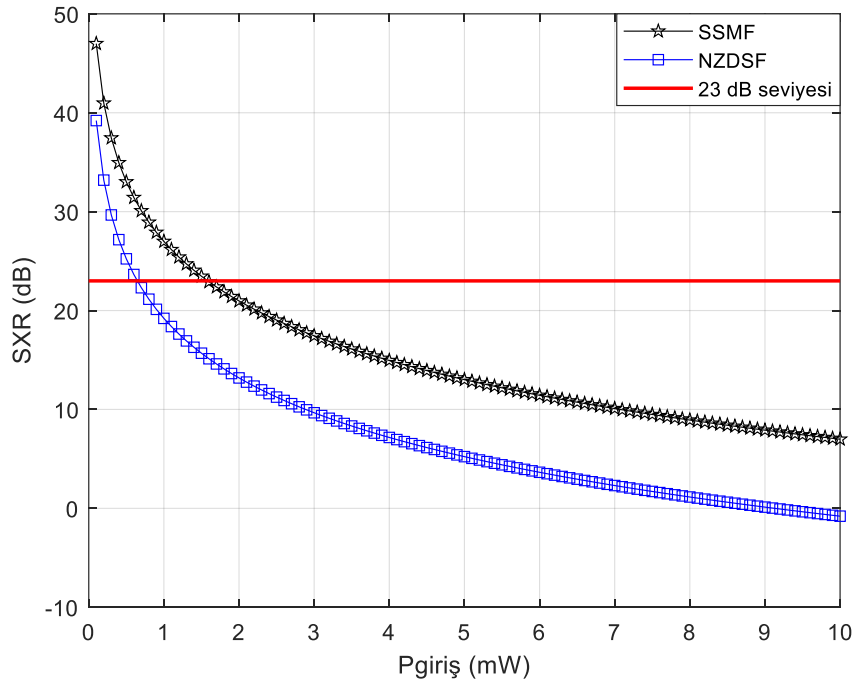
Şekil 4. $\Delta f = 25$ GHz iken FWM+SRS etkisi altında YYİM K'da SXR- $P_{giriş}$ değişimi.



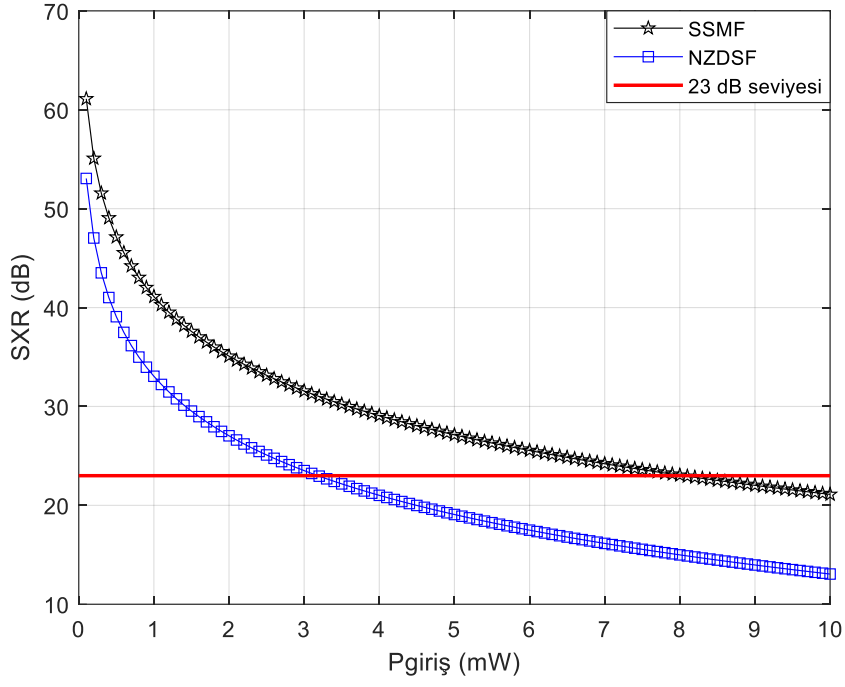
Şekil 5. $\Delta f = 50$ GHz iken FWM+SRS etkisi altında YYİM K'da SXR- $P_{giriş}$ değişimi.



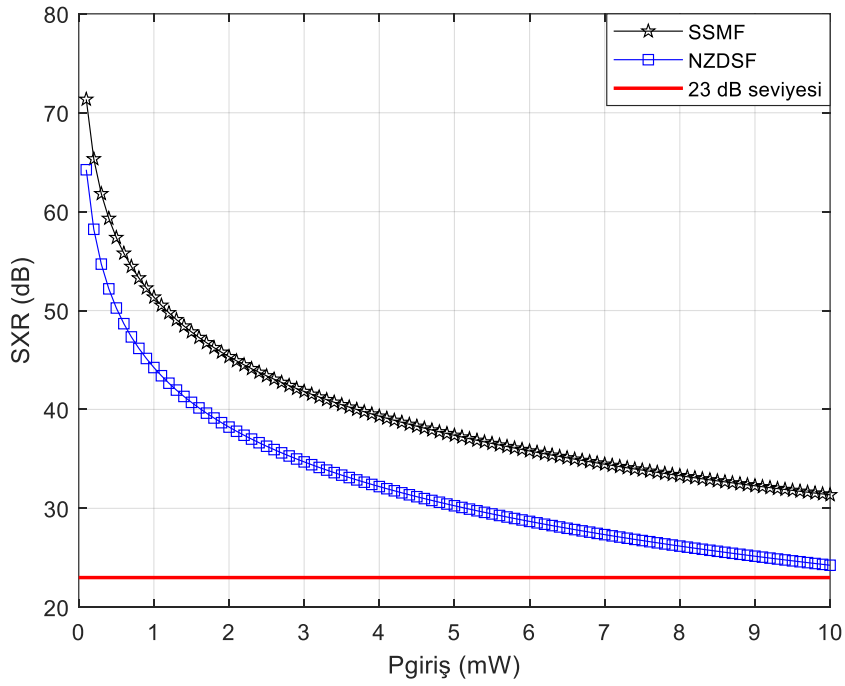
Şekil 6. $\Delta f = 100$ GHz iken FWM+SRS etkisi altında YYİMİK'da SXR- $P_{giriş}$ değişimi.



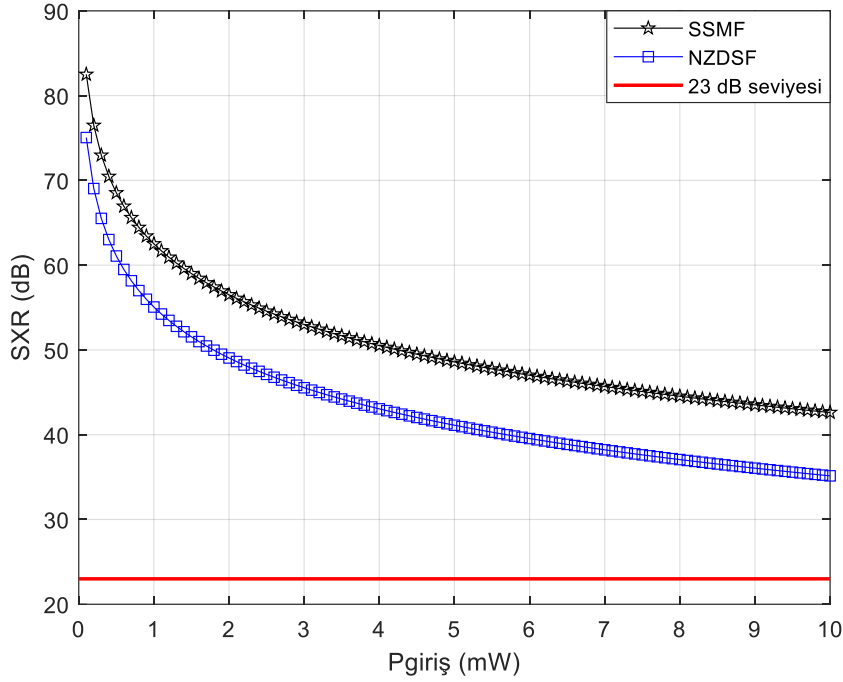
Şekil 7. $\Delta f = 12.5$ GHz iken FWM+SRS etkisi altında AYİMİK'da SXR- $P_{giriş}$ değişimi.



Şekil 8. $\Delta f = 25$ GHz iken FWM+SRS etkisi altında AYİMİK'da SXR- $P_{giriş}$ değişimi.



Şekil 9. $\Delta f = 50$ GHz iken FWM+SRS etkisi altında AYİMİK'da SXR- $P_{giriş}$ değişimi.



Şekil 10. $\Delta f= 100$ GHz iken FWM+SRS etkisi altında AYİMK'da SXR- $P_{giriş}$ değişimi.

Şekil 3-10'da verilen benzetim sonuçları toplu olarak değerlendirildiğine, hem NZDSF hem de SSMF kullanılan DWDM-PON sistemlerinde YYİMK ve AYİMK'da FWM+SRS etkisi altında SXR değerleri artan kanal giriş gücü ($P_{giriş}$) değerleri ile üstel olarak azalmaktadır. Kanal giriş güçlerinin eşit olduğu DWDM-PON sistemlerinde, Denklem (2)'den de görüleceği gibi, FWM ürün güçleri, $P_{giriş}^3$ ile orantılı bir şekilde artacağı için, Denklem (8) ile verilen SXR, FWM ürün güçlerindeki bu artış nedeniyle eksponansiyel olarak azalmaktadır.

Şekil 3-10'da verilen benzetim sonuçları toplu olarak değerlendirildiğine, hem NZDSF hem de SSMF kullanılan DWDM-PON sistemlerinde YYİMK ve AYİMK'da FWM+SRS etkisi altında SXR, artan kanallar arası boşluk (Δf) değerleri ile artmaktadır. Bu durumun nedeni Denklem (4) ile verilen faz uyumsuzluk faktörü $\Delta\beta_{ijk}$ 'nın, Δf 'teki artışla üstel olarak artmasıdır. $\Delta\beta_{ijk}$ 'daki artış, Denklem (2) ile verilen FWM ürün gücünün azalmasına ve dolayısıyla Denklem (8) ile verilen SXR değerinin artmasına neden olur.

Şekil 3-6 ile verilen benzetim sonuçları incelendiğinde, tüm Δf değerlerinde, 0.1 mW-10 mW aralığında tüm kanal giriş gücü değerleri için, NZDSF kullanılan DWDM-PON sistemlerinin YYİMK'sındaki SXR değerleri, SSMF kullanılan DWDM-PON sistemlerinin YYİMK'sındaki SXR değerlerinden daha büyüktür. Bu durumun nedeni, Tablo 1'den görüleceği gibi, YYİMK çalışma dalgaboyu olan 1310 nm'de kromatik dispersiyon katsayısının (D_c) mutlak değerinin, NZDSF'de SSMF'den daha büyük olmasıdır. Bu durum, Denklem (4) ile verilen $\Delta\beta_{ijk}$ 'nın NZDF'li sistemde SSMF'li sisteme göre mutlak değerce daha yüksek olmasına sebebiyet verir. $\Delta\beta_{ijk}$ 'nın mutlak değerce yüksek olması, Denklem (2) ile verilen FWM ürün gücünün azalmasına ve dolayısıyla Denklem (8)

ile verilen SXR değerinin artmasına neden olur. Şekil 3-6'da, 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz, 100 GHz Δf değerli NZDF'li DWDM-PON sistemleri ile SSMF'li DWDM-PON sistemlerinin YYİMK'larındaki aynı kanal giriş gücü değeri için SXR değerleri arasındaki fark, 0.1 mW-10 mW kanal giriş gücü değer aralığında ufak değişimler göstermekle birlikte yaklaşık olarak, sırasıyla, 10.13 dB, 17 dB, 26.33 dB ve 34.4 dB'dir. SXR değerleri arasındaki farkın artan Δf değerleri ile birlikte artmasının nedeni, $\Delta\beta_{ijk}$ 'nın Δf değerlerindeki artış ile birlikte üstel olarak artması ve müteakip olarak FWM ürün güçlerinin azalmasıdır.

Şekil 7-10 ile verilen benzetim sonuçları incelendiğinde, tüm Δf değerlerinde, 0.1 mW-10 mW aralığında tüm kanal giriş gücü değerleri için, SSMF kullanılan DWDM-PON sistemlerinin AYİMK'sındaki SXR değerleri, NZDSF kullanılan DWDM-PON sistemlerinin AYİMK'sındaki SXR değerlerinden daha büyüktür. Bu durumun nedeni, Tablo 1'den görüleceği gibi, AYİMK çalışma dalgaboyu olan 1550 nm'de D_c 'nin SSMF'de NZDSF'den daha büyük olmasıdır. Bu durum, Denklem (4) ile verilen $\Delta\beta_{ijk}$ 'nin SSMF'li sistemde NZDSF'li sisteme göre daha yüksek olmasına sebebiyet verir. $\Delta\beta_{ijk}$ 'nin yüksek olması, Denklem (2) ile verilen FWM ürün gücünün azalmasına ve dolayısıyla Denklem (8) ile verilen SXR değerinin artmasına neden olur. Şekil 7-10'da, 12.5 GHz, 25 GHz, 50 GHz, 100 GHz Δf değerli SSMF'li DWDM-PON sistemleri ile NZDSF'li DWDM-PON sistemlerinin AYİMK'larındaki aynı kanal giriş gücü değeri için SXR değerleri arasındaki fark, 0.1 mW-10 mW kanal giriş gücü değer aralığında ufak değişimler göstermekle birlikte yaklaşık olarak, sırasıyla, 7.78 dB, 8.06 dB, 7.12 dB ve 7.46 dB'dir. SXR değerleri arasındaki bu farklar, YYİMK'da elde edilen SXR farkları ile kıyaslandığında belirgin bir şekilde daha düşüktür. Bu durumun birincil nedeni, Tablo 1'den de görüleceği üzere, 1310 nm dalgaboyunda D_c parametresinin NZDSF'de SSMF'ye göre mutlak değerce yaklaşık 23 kat daha büyükken; 1550 nm dalgaboyunda D_c parametresinin SSMF'de NZDSF'ye göre yaklaşık 2.03 kat daha büyük olmasıdır. Bu durumun ikincil nedeninin 1550 nm dalgaboyu bölgesinde 1310 nm dalgaboyu bölgesine göre, Denklem (7)'deki dalgaboyu oranlarından görüleceği üzere, SRS etkisindeki artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, AYİMK'da artan Δf değerleri ile birlikte SXR değerleri arasındaki farklarda meydana gelen değişimin, YYİMK'dakine benzer bir yapı göstermemesi de, iletilen işaretler üzerindeki SRS etkisinin, 1550 nm dalgaboyu bölgesinde, 1310 nm dalgaboyu bölgesinden daha kuvvetli olduğunu belirtmektedir.

Şekil 3-6'da, güvenilir haberleşme için seçilen sınır referans değeri olan 23 dB'in üzerindeki SXR değerleri, 0.1 mW-10 mW kanal giriş gücü aralığının tamamında, sadece $\Delta f = 100$ GHz iken NZDSF'li DWDM-PON YYİMK'sında elde edilebilmiştir. Diğer tüm DWDM-PON mimarilerinin YYİMK'larında, belirli bir kanal giriş gücü değeri aşıldığında, SXR, 23 dB değerinin altına düşmüştür.

Şekil 7-10'da, güvenilir haberleşme için seçilen sınır referans değeri olan 23 dB'in üzerindeki SXR değerleri, 0.1 mW-10 mW kanal giriş gücü aralığının tamamında, Δf 'in 50 GHz ve 100 GHz olduğu SSMF'li ve NZDSF'li DWDM-PON AYİMK'lerinde elde edilebilmiştir. Diğer tüm DWDM-PON mimarilerinin AYİMK'lerinde, belirli bir kanal giriş gücü değeri aşıldığında, SXR, 23 dB değerinin altına düşmüştür.

SSMF'li ve NZDSF'li DWDM-PON sistemlerinde, FWM+SRS etkisi altındaki YYİMK ve AYİMK'da, SXR>23 dB şartının sağlandığı maksimum kanal giriş güçleri, Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2'deki verilerden de görülebileceği gibi, hem SSMF'li hem de NZDSF'li DWDM-PON'larda çift yönlü iletimin 23 dB sınır referans değerinin üzerinde bir SXR değerinde gerçekleşebilmesi için uygulanabilecek maksimum kanal giriş gücünü YYİMK belirlemektedir. Bu duruma göre, FWM+SRS etkisi altında, Δf değişim aralığının 12.5 GHz-100 GHz olduğu, 25 km kanal uzunluğuna sahip 2x31 kanallı DWDM-PON mimarilerinin hepsinde, 23 dB değerinden yüksek bir SXR ile çift yönlü güvenilir iletişim sağlayabilmek için, maksimum kanal giriş güçlerinin SSMF'li sistemlerde 0.13 mW'ı, NZDSF'li sistemlerde 0.39 mW'ı aşmaması gerekmektedir.

Tablo 2. SSMF ve NZDSF kullanılan DWDM-PON sistemlerinde, FWM+SRS etkisi altında YYİMK ve AYİMK'da SXR>23 dB şartının sağlandığı maksimum kanal giriş güçleri.

	Fiber Tipi	Δf (GHz)			
		12.5	25	50	100
YYİMK' da SXR≥23 dB için maksimum $P_{giriş}$ (mW)	SSMF	0.13	0.17	0.21	0.30
	NZDSF	0.39	1.14	4.31	>10
AYİMK' da SXR≥23 dB için maksimum $P_{giriş}$ (mW)	SSMF	1.58	8.04	>10	>10
	NZDSF	0.65	3.18	>10	>10

Tablo 3. $P_{\text{giriş}} = 0.1 \text{ mW}$ iken farklı fiber tiplerine ve uzunluklarına sahip DWDM-PON sistemlerinde FWM+SRS etkisi altındaki YYİMİK ve AYİMİK'daki SXR değerleri.

	Fiber ve Kanal Tipi	Fiber Uzunluğu (km)	Δf (GHz)			
			12.5	25	50	100
$P_{\text{giriş}}=0.1 \text{ mW}$ için SXR değerleri (dB)	SSMF'li YYİMİK	20	25.22	27.35	29.34	32.55
		25	24.74	27.14	29.35	32.56
		60	24.20	27.09	29.59	32.86
		80	24.19	27.10	29.57	32.87
	NZDSF'li YYİMİK	20	34.77	43.97	55.32	67.42
		25	34.87	44.15	55.68	67.35
		60	35.01	44.28	55.68	67.58
		80	35.02	44.29	55.68	67.59
	SSMF'li AYİMİK	20	46.36	58.15	70.46	84.66
		25	46.99	61.11	71.35	82.51
		60	47.47	59.44	71.35	83.70
		80	47.52	59.39	71.60	83.57
	NZDSF'li AYİMİK	20	39.01	50.21	62.16	75.65
		25	39.21	53.05	64.24	75.06
		60	39.73	50.83	62.81	74.88
		80	39.75	50.88	62.87	74.93

Bölüm 3'te, literatürdeki çalışmalarda DWDM-PON iletim uzunlukları olarak 20 km, 25 km, 60 km ve 80 km değerlerinin dikkate alındığı belirtilmiştir. Bölüm 4'te şu ana kadar 25 km iletim uzunluklu DWDM-PON sistemleri için elde edilen benzetim sonuçları verilmiş ve yorumlanmıştır. Çalışmada incelenen 2x31 kanallı DWDM-PON sistem modelinin, literatürde göz önüne alınan diğer iletim uzunluklarına sahip olması durumunda, FWM+SRS etkisi altındaki sistem performansını incelemek için de benzetimler yapılmıştır. Benzetimlerden elde edilen SXR değerleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3'te sonuçları verilen benzetimlerde, hem NZDSF'li hem de SSMF'li DWDM-PON sistemlerinde 23 dB sınırının altına düşmeyen güvenilir bir çift yönlü iletişim için kanal giriş güçleri 0.1 mW olarak seçilmiştir.

Tablo 3'te görüldüğü gibi, tüm kanal uzunlukları için, NZDSF'li ve SSMF'li DWDM-PON'ların hem YYİMİK hem de AYİMİK'lerinde sistemdeki kanal uzunlukları sabit tutulup Δf 12.5 GHz-100 GHz değişim aralığında arttırıldıkça, SXR değeri artmaktadır. SXR değerindeki maksimum

artış, fiber uzunluğuna bağlı olarak, SSMF'li YYİMK'da 7.33 dB-8.68 dB; NZDSF'li YYİMK'da 32.48 dB-32.57 dB; SSMF'li AYİMK'da 35.52 dB-38.30 dB; NZDSF'li AYİMK'da 35.15 dB-36.64 dB aralığındadır. SSMF'li YYİMK'daki SXR değerindeki maksimum artış miktarlarının, diğerlerindeki maksimum artış miktarlarına göre belirgin ölçüde daha düşük olmasının sebebi, 1310 nm dalgaboyunda SSMF'deki D_c parametresinin değerinin mutlak değerce sıfıra yakın olması sebebiyle, SXR üzerindeki FWM etkisinin maksimuma yakın değerlerde seyretmesinden kaynaklanmaktadır. Tablo 3'te görüldüğü üzere, NZDSF'li ve SSMF'li DWDM-PON'ların hem YYİMK hem de AYİMK'larında, sistemdeki Δf değeri sabit tutulup kanal uzunlukları arttırıldıkça, SXR değeri değişmektedir. Bu değişim, değişen kanal uzunluklarına bağlı olarak, SXR üzerindeki SRS'nin pozitif etkisi FWM'in negatif etkisini kompanze edecek durumda iken artış; SRS'nin pozitif etkisi FWM'in negatif etkisini kompanze edemeyecek durumda ise ya da SRS de işaret iletimini negatif yönde etkiliyorsa azalış şeklinde kendisini göstermektedir. Δf değerinin sabit tutulup kanal uzunluklarının 20 km-80 km aralığında değiştirildiği durumda, SXR'deki maksimum değişim, Δf değerine bağlı olarak, SSMF'li YYİMK'da 0.25 dB-1.03 dB; NZDSF'li YYİMK'da 0.24 dB-0.36 dB; SSMF'li AYİMK'da 1.14 dB-2.96 dB; NZDSF'li AYİMK'da 0.74 dB-2.84 dB aralığındadır. Dolayısıyla, 0.1 mW kanal giriş gücü değerleri için, FWM+SRS etkisi altındaki 2x31 kanallı DWDM-PON sistemlerindeki çift yönlü iletimde, kanal uzunluğunun 20 km-80 km aralığındaki değişiminin SXR oranı üzerindeki maksimum etkisinin 3 dB'in altında olduğu görülmektedir. Tablo 3'te verilen benzetim sonuçları toplu olarak değerlendirildiğinde; 2x31 kanallı DWDM-PON mimarilerindeki FWM ve SRS'nin sistem performansına birleşik etkisi üzerinde, Δf değerlerindeki değişimin kanal uzunluğundaki değişime kıyasla daha baskın bir role sahip olduğu söylenebilir.

5. Sonuç

Bu çalışmada, daha önce yazar tarafından önerilen tek optik fiber üzerinden çift yönlü DWDM iletişime imkân sağlayan PON mimarisini kullanan, 2x31 kanallı DWDM-PON sistem modeli üzerinde, SSMF ve NZDSF fiberlerin kullanıldığı durumda, FWM ve SRS'nin sistem performansına birleşik etkisi benzetimler yardımıyla incelenmiştir.

SSMF'li ve NZDSF'li DWDM-PON sistemlerindeki en kötü hal analiz sonuçlarını elde etmek için hem yukarı yönlü hem de aşağı yönlü iletimdeki merkez kanallara odaklanılan çalışmada, öncelikle 25 km uzunluklu DWDM-PON sistemlerinde kanal giriş güçlerinin 0.1 mW-10 mW aralığında değiştirildiği durumlarda, FWM+SRS etkisi altında SXR değerleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, tüm kanallar arası boşluk değerleri için, 23 dB'in üzerinde bir SXR değeriyle güvenilir çift yönlü iletişimin sağlandığı maksimum kanal giriş gücü değerlerinin, hem SSMF hem de NZDSF kullanan sistemlerde yukarı yönlü iletim merkez kanalı tarafından belirlendiğini

göstermektedir. İlgili değerler, benzetim sonuçlarına göre, SSMF'li sistemlerde 0.13 mW, NZDSF'li sistemlerde 0.39 mW olarak tespit edilmiştir.

Kanal uzunlukları literatürde göz önüne alınan diğer değerlere göre değiştirilerek gerçekleştirilen benzetimlerden elde edilen sonuçlar, FWM+SRS etkisi altındaki 2x31 kanallı DWDM-PON sistemlerinde, kanal uzunluğunun SXR oranı üzerindeki maksimum etkisinin 3 dB'in altında olduğunu göstermiştir.

Çalışmada elde edilen sonuçlar, tek optik fiber üzerinden çift yönlü DWDM çoğullamalı iletimin gerçekleştirildiği PON sistemlerinde, 1310 nm dalgaboyu bölgesinde çalışan yukarı yönlü iletim kanalları üzerindeki doğrusal olmayan olayların sistem performansı üzerindeki birleşik etkisinin, 1550 nm dalgaboyu bölgesinde çalışan aşağı yönlü iletim kanalları üzerindeki doğrusal olmayan olayların sistem performansı üzerindeki birleşik etkisine göre, güvenilir çift yönlü iletimin sağlanabilirliği açısından belirleyici role sahip olduğunu göstermesi açısından önemlidir. Bu bağlamda, yukarıda açıklanan kritik öneme sahip yukarı yönlü iletim kanallarında elde edilen SXR benzetim sonuçlarına göre, FWM+SRS etkisi altında, DWDM-PON sistemlerinde tek optik fiber üzerinden çift yönlü güvenilir iletişimin sağlanması için NZDSF kullanımı önemli bir seçenek olarak göz önünde bulundurulmalıdır.

Yazarların Katkısı

Sait Eser KARLIK, makalenin tek yazarı olarak, çalışmanın tüm aşamalarını kendisi gerçekleştirmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazar, makalenin değerlendirme sürecini etkileyebilecek herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkarı bulunmadığını onaylamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

Acharya, K., and Raja, M. Y. A., (2007, November). SRS crosstalk mitigation in WDM-PON using quadrature amplitude modulation. *International Symposium on High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies (HONET2007)*. Dubai, United Arab Emirates.
<https://doi.org/10.1109/HONET.2007.4600253>

- Agrawal, G.P., (2019). *Nonlinear fiber optics* (6th ed.). Academic Press.
- Agrawal, G.P., (2021). *Fiber-optic communication systems* (5th ed.). Wiley.
- Ahmed, M. T., Sahu, P. K., (2018, October). Performance improvement in BUCSA spaced UDWDM-PON system by differential input power scheme (DIPS). *International Conference on Applied Electromagnetics, Signal Processing and Communication (AESPC2018)*. Bhubaneswar, India. <https://doi.org/10.1109/AESPC44649.2018.9033306>
- Aleksejeva, M., Lyashuk, I., Kudojars, R., Prigunovs, D., Ortiz, D., Braunfelds, J., Salgals, T., Spolitis, S., Bobrovs, V., (2021, November). Research on Super-PON communication system with FWM-based comb source. *Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS2021)* (pp. 2940-2946). Hangzhou, China. <https://doi.org/10.1109/PIERS53385.2021.9694669>
- Bi, M., Xiao, S., Li, J., and He, H., (2014). A bandwidth-efficient channel allocation scheme for mitigating FWM in ultra-dense WDM-PON. *Optik*, 125, 1957–1961. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.11.004>
- Bogoni, A., and Poti, L., (2004). Effective channel allocation to reduce inband FWM crosstalk in DWDM transmission systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 10 (2), 387-392. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2004.825952>
- Brackett, C.A., (1990). Dense wavelength division multiplexing networks: principles and application. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 8 (6), 948-964.
- Corning® SMF-28e® Optical Fiber, (2007). *Product information*. Corning Inc. www.corning.com/opticalfiber
- Draka TeraLight™ Optical Fiber, (2010). Draka Communications. www.draka.com/communications
- Effenberger, F. J., and Zhang, D., (2022). WDM-PON for 5G wireless fronthaul. *IEEE Wireless Communications*, 29 (2), 94-99. <https://doi.org/10.1109/MWC.001.2100420>
- Elsayed, E. E., Yousif, B. B., and Alzalabani, M. M., (2018). Performance enhancement of the power penalty in DWDM FSO communication using DPPM and OOK modulation. *Optical and Quantum Electronics*, 50, 282. <https://doi.org/10.1007/s11082-018-1508-y>
- Elsayed, E. E., Yousif, B. B., and Singh, M., (2022). Performance enhancement of hybrid fiber wavelength division multiplexing passive optical network FSO systems using M-ary DPPM techniques under interchannel crosstalk and atmospheric turbulence. *Optical and Quantum Electronics*, 54, 116. <https://doi.org/10.1007/s11082-021-03485-8>
- Elsayed, E. E., Alharbi, A. G., Singh, M., and Grover, A., (2022). Investigations on wavelength-division multiplexed fiber/FSO PON system employing DPPM scheme. *Optical and Quantum Electronics*, 54, 358. <https://doi.org/10.1007/s11082-022-03717-5>
- Fazea, Y., (2019). Mode division multiplexing and dense WDM-PON for fiber-to-the-home. *Optik*, 183, 994-998. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.02.072>
- Garg, A.K., Janyani, V., Singh, G., Ismail, T., and Selmy, H., (2019). Dedicated and broadcasting downstream transmission with energy-efficient and latency-aware ONU interconnection in WDM-PON for smart cities. *Optical Fiber Technology*, 52, 101949. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2019.101949>
- Gebrewold, S. A., Bonjour, R., Brenot, R., Hillerkuss, D., and Leuthold, J., (2017). Bit- and power-loading – A comparative study on maximizing the capacity of RSOA based colorless DMT transmitters. *Applied Sciences-Basel*, 7 (10), 999. <https://doi.org/10.3390/app7100999>
- Guo, Y., Gan, C., and Zhan, N., (2021). Cost-effective WDM-PON for flexible ONU-communication featuring high wavelength utilization and low latency. *Optical Fiber Technology*, 67, 102709. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102709>
- Hann, S., Kim, D. H., and Park, C. S., (2004). Uni-lambda bidirectional 10/1.25GbE access service based on WDM-PON. *Electronics Letters*, 40 (3), 194-195. <https://doi.org/10.1049/el:20040121>
- Harboe, P. B., da Silva, E., and Souza, J. R., (2008). Analysis of FWM penalties in DWDM systems based on G.652, G.653, and G.655 optical fibers. *International Journal of Electronics and Communication Engineering*, 2 (12), 2674-2680. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1333622>
- Iannone, E., Franco, P., and Santoni, S., (2008). WDM-PON architecture for FTTx networks. *Fiber and Integrated Optics*, 27 (4), 176-182. <https://doi.org/10.1080/01468030802189498>
- ITU-T, (2009). *G.655 (11/2009): Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable*. ITU. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.655-200911-I/en>
- ITU-T, (2016). *G.652 (11/2016): Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*. ITU. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-201611-I/en>
- ITU-T, (2021). *G.9802.1 (08/2021): Wavelength division multiplexed passive optical networks (WDM PON): General requirements*. ITU. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9802.1/en>

- Karlık, S. E., (2016). Analysis of the four-wave mixing impact on the most heavily affected channels of dense and ultra-dense wavelength division multiplexing systems using non-zero dispersion shifted fibers. *Optik*, 127 (19), 7469–7486. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.05.077>
- Karlık, S. E., (2023). Modelling and numerical analysis of combined dual impact of SRS and FWM on the performance of upstream and downstream channels of a novel UDWDM/DWDM-PON. *Optical Fiber Technology*, 81, 103586. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2023.103586>
- Kaur, G., Singh, M. L., and Patterh, S. M., (2010). Impact of fiber nonlinearities in optical DWDM transmission systems at different data rates. *Optik*, 121 (23), 2166-2171. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2009.11.001>
- Kaur, K. P., Randhawa, R., and Kaler, R. S., (2014). Performance analysis of WDM-PON architecture using different receiver filters. *Optik*, 125, 4742-4744. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.04.070>
- Maier, G., Martinelli, M., Pattavina, A., and Salvadori, E., (2000). Design and cost performance of the multistage WDM-PON access networks, *Journal of Lightwave Technology*, 18 (2), 125-143. <https://doi.org/10.1109/50.822785>
- Manzoor, H. U., Hussain, A., Yu, C. X., and Manzoor, T., (2015). Complete suppression of FWM in ultra dense WDM-PON optical networks using centralized light source. *Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials*, 24 (4), 1550053-1 – 1550053-9. <https://doi.org/10.1142/S0218863515500538>
- Manzoor, H. U., Zafar, M., Manzoor, S. U., Khan, T., Liu, S. Z., Manzoor, T., Saleem, S., Kim, W. Y., and Ali, M., (2020). Improving FWM efficiency in bi-directional ultra DWDM-PON networking centered light source by using PMD emulator. *Results in Physics*, 16, 102922. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102922>
- Monnard, R., Zirngibl, M., Doerr, C. R., Joyner, C. H., and Stulz, L. W., (1997). Demonstration of a 12x155 Mb/s WDM PON under outside plant temperature conditions. *IEEE Photonics Technology Letters*, 9 (12), 1655-1657. <https://doi.org/10.1109/68.643302>
- Nakajima, K., Ohashi, M., Miyajima, Y., and Shiraki, K., (1997). Assessment of dispersion varying fibre in WDM system. *Electronics Letters*, 33 (12), 1059-1060. <https://doi.org/10.1049/el:19970699>
- Neto, B., Shahpari, A., Vujicic, Z., Barros, A., Pinho, J., Pavlovic, N., and Teixeira, A. L. J., (2017, September). Impairment assessment due to Raman crosstalk in coexistence of coherent UDWDM-PON with GPON Technologies. *European Conference on Optical Communication (ECOC2017)*. Gothenburg, Sweden. <https://doi.org/10.1109/ECOC.2017.8346022>
- Park, J., Baik, J., and Lee, C., (2007). Fault detection technique in a WDM-PON. *Optics Express*, 15 (4), 1461-1466. <https://doi.org/10.1364/OE.15.001461>
- Reis, J. D., Neves, D. M., and Teixeira, A. L., (2012). Analysis of nonlinearities on coherent ultradense WDM-PONs using Volterra series. *Journal of Lightwave Technology*, 30 (2), 234-241. <https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2180698>
- Sabapathi, T., and Sundaravadivelu, S., (2011). Analysis of bottlenecks in DWDM fiber optic communication system. *Optik*, 122 (16), 1453–1457. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2010.08.023>
- Sabapathi, T., and Poovitha, R., (2019). Mitigation of nonlinearities in fiber optic DWDM system. *Optik*, 185, 657-664. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.02.073>
- Schneider, T., (2004). *Nonlinear optics in telecommunications*. Springer.
- Shahpari, A., Ferreira, R., Riberio, V., Sousa, A., Ziaie, S., Tavares, A., Vujicic, Z., Guiomar, F. P., Reis, J. D., Pinto, A. N., and Teixeira, A., (2015). Coherent ultra dense wavelength division multiplexing passive optical networks. *Optical Fiber Technology*, 26, 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2015.07.001>
- Singh, M. L., and Hudiara, I. S., (2004). A piece wise linear solution for nonlinear SRS effect in DWDM fiber optic communication systems. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 3 (4), 29-37. <http://www.jmoe.org/index.php/jmoe/article/view/121>
- Song, Y., Yu, P., Xu, Y., and Li, Z., (2021). Simulation and experimental investigation of nonlinear effects in 5G fronthaul transmission system based on WDM-PON architecture. *Optical Fiber Technology*, 65, 102628. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102628>
- Vardanyan, V. A., (2017). Effect of four-wave mixing interference on spectrally separated channels in passive optical networks. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 53 (1), 51-58. <https://doi.org/10.3103/S8756699017010083>
- Wagner, S. S., Lemberg, H. L., Kobrinski, H., Smoot, L. S., and Robe, T. J., (1988 November). A passive photonic loop architecture employing wavelength-division multiplexing. *IEEE Global Telecommunications Conference and Exhibition (GLOCOM1988)* (pp.1569-1573). Hollywood, FL, USA. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.1988.26086>

- Xin, L., Xu, X., Du, L., Sun, C., Gao, F., and Zhao, J., (2023). Suppression of nonlinear optical effects in DWDM-PON by frequency modulation non-coherent detection. *Photonics*, 10 (3), 323. <https://doi.org/10.3390/photonics10030323>
- Yücel, M., and Açıkgöz, M., (2023). Optical communication infrastructure in new generation mobile networks. *Fiber and Integrated Optics*, 42 (2), 53-92. <https://doi.org/10.1080/01468030.2023.2186811>
- Zhou, Y., Gan, C., Chen, B., and Ma, X., (2010). An upgradeable WDM-PON for broadcast and LAN services. *Optical and Quantum Electronics*, 42, 157-163. <https://doi.org/10.1007/s11082-011-9441-3>

Bazı Ticari Şalgam Sularının Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi

Bilal AĞIRMAN^{1*} 

Öz

Ülkemizde üretimi ve tüketimi her yıl artarak önemli ölçeklere ulaşan ve dünyanın farklı bölgelerine ihraç edilmeye başlanan şalgam suyunun standardizasyon ve uygunluk değerlendirilmesi TS 11149 numaralı standarda göre belirlenmektedir. İlgili Şalgam Suyu Standardı son olarak 2016 yılında revize edilmiş olup, bu tarihten itibaren piyasada satışa sunulan şalgam sularının güncel mevzuata uygunluğunu gösteren çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada Türkiye genelinde tüketime sunulan beş farklı endüstriyel şalgam suyunun kalite özellikleri belirlenmiş ve bu şalgam sularının ilgili Şalgam Suyu Standardına (TS 11149) uygunlukları araştırılmıştır. İncelenen şalgam sularının tamamının veya bir kısmının kuru madde, tuz oranı, pH, toplam mezofilik aerobik bakteri sayısı bakımından standartta bildirilen değerleri karşılamadığı, kül, toplam asitlik ve laktik asit içeriği bakımından ise standarda uygun oldukları belirlenmiştir. Şalgam suları arasında; standartta herhangi bir limit değeri belirtilmeyen organik asit (asetik, sitrik), toplam fenolik madde, toplam monomerik antosiyanin ve renk özellikleri (L^* , a^* , b^* , C^* , h°) açısından önemli farklılıkların bulunduğu tespit edilmiştir. Piyasada bulunan şalgam sularının kalite ve bileşimlerinde tespit edilen bu önemli farklılıkların oluşmasında üretimde kullanılan hammaddelerin kalitesi ve kullanım oranlarının etkisi olduğu kadar, şalgam suyunun üretim öncesi/sırası/sonrası aşamalarında uygulanan yöntemlerin çeşitlilik göstermesi de etkilidir.

Anahtar Kelimeler: Şalgam suyu, Fermantasyon, Laktik asit, Siyah havuç.

Determination of Quality Characteristics of Some Commercial Shalgam Juices

Abstract

The standardization and compatibility assessment of shalgam juice, which has reached significant scales in production and consumption in Turkey and started to be exported to different parts of the world, is determined according to the standard numbered TS 11149. The related Shalgam Juice Standard was lastly revised in 2016. From this date, the number of studies demonstrating the compliance of the shalgam juices commercially available in the market with current legislation is quite limited. In this study, the quality characteristics of five different industrial shalgam juices consumed throughout the Turkey were determined and the compliance of these samples with the related Shalgam Juice Standard (TS 11149) was investigated. It was determined that all or some of the examined shalgam juices did not meet the values reported in the standard in terms of dry matter, salt content, pH, total mesophilic aerobic bacteria number, while they were compatible in terms of ash, total acidity and lactic acid content. Notable differences were determined among the shalgam juices in some characteristics, such as organic acids (acetic, citric), total phenolic content, total monomeric anthocyanin and color properties (L^* , a^* , b^* , C^* , h°), for which no value is specified in the standard. The quality and usage ratio of raw materials in the shalgam production are as effective factors as the diversity of the methods applied during the pre-/during/post-production stages for the formation of these significant differences in industrial shalgam juice.

Keywords: Shalgam juices, Fermentation, Lactic acid, Black carrot.

¹Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye, bagirman@cu.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 20.05.2024

Kabul/Accepted: 14.08.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Giriş

Türk Standartları Enstitüsü tarafından revize edilen TS 11149 Şalgam Suyu Standardına (Kabul: 2003, Revizyon: 2016) göre şalgam suyu “bulgur unu, ekşi hamur, içilebilir su ve yemeklik tuzun karıştırılıp laktik asit fermantasyonuna tâbi tutulduktan sonra elde edilen özütün, şalgam (*Brassica rapa*), mor havuç (*Daucus carota*), ve istenirse acı toz biber ilave edilerek hazırlanan karışımın tekrar laktik asit fermantasyonuna tâbi tutulması ile elde edilen ve istendiğinde ısıl işlem ile dayanıklı hale getirilen ürün” olarak tanımlanmıştır (TSE, 2016). Türkiye’ye özgü olan bu geleneksel içecek ismini üretimde düşük miktarda kullanılan şalgam turpundan alırken, rengini ise ana hammaddesi olan siyah (mor) havuçtan almaktadır. Laktik asit fermantasyonu (LAF) ürünü olan şalgam suyu mor-kırmızımsı renkte, bulanık, ekşi lezzete sahip keskin bir içecek olarak karakterize edilmektedir (Ozturk ve ark., 2024; Öztürk ve ark., 2024; Tangüler ve Ağırman, 2020).

Şalgam suyu üretiminin büyük bir çoğunluğu özellikle Çukurova Bölgesi olarak tarif edilen Adana, Mersin, Osmaniye ve Hatay illerinde gerçekleşmesine rağmen İstanbul, Ankara, İzmir ve Konya gibi büyükşehirlerde de üretim yapan endüstriyel işletmeler bulunmaktadır (Cirak ve ark., 2022). Şalgam suyu üretiminin büyük bir çoğunluğunu endüstriyel ölçekte üretim yapan fabrikalar oluşturmasına rağmen, bu içecek özellikle Çukurova Bölgesinde olmak üzere geleneksel olarak evlerde veya düşük miktarda üretim yapan çok sayıda küçük işletmede de üretilmeye devam etmektedir (Erten ve Tanguler, 2016; Öztürk ve ark., 2024). Şalgam suyunun yıllık üretim ve tüketim miktarı ile ilgili bilimsel bir veri bulunmamasına rağmen, Adana Şalgam Üreticileri Derneği (Şalgam-Der) 2020 yılı verilerine göre Türkiye genelinde toplam 60 milyon litre şalgam suyu üretiminin yapıldığı ve bunun 18 milyon litresinin dünya genelinde 46 ülkeye ihraç edildiği bildirilmiştir. İhracatın önemli bir bölümünün başta Almanya, Fransa, Belçika, İngiltere ve Hollanda olmak üzere Avrupa ülkelerine yapıldığı, ayrıca ABD, Kanada, Rusya, Çin ve Japonya gibi çeşitli ülkelere de ihracat yapıldığı bildirilmiştir (Şalgam-Der, 2020). Şalgam suyu, Adana Ticaret Odası (ATO) tarafından mahreç işareti coğrafi işaret türü altında Adana Şalgamı (Coğrafi İşaret Tescil Numarası: 489, Tescil Tarihi: 06.03.2020) adı ile tescil ettirilmiştir. Şalgam suyuna coğrafi işaret alınması ile tanıtımının ve ihracatının daha fazla artacağı düşünülmektedir.

İçerdiği fenolik bileşikler (antosiyantinler, fenolik asitler, ve flavonoller), mineraller (potasyum, demir, kalsiyum, fosfor), vitaminler ve serbest amino asitlerden dolayı şalgam suyu besleyici ve fonksiyonel bir içecektir (Öztürk ve ark., 2024). Günümüzde fonksiyonel gıda tüketimine olan artan tüketici isteği, sağlık açısından çok sayıda faydası bulunan şalgam suyunun popülaritesini artıran önemli bir faktördür. Son yıllarda şalgam suyu sektöründeki rekabetin artması sonucu üreticilerin ürün çeşitliliğini arttırmak istemesi ve şalgam suyu üzerine yapılan bilimsel çalışmaların artması sonucu bu içeceğin inovatif formları da ortaya çıkmakta ve farklı tüketici grupları tarafından da

tüketilmeye başlanacağı düşünülmektedir. Örneğin, yakın zamanda yapılan bir çalışmada; üretimde kullanılan hammaddelerden biri olan bulgur ununun gluten içermesinden dolayı gluten intoleransı bulunan bireyler için tüketimi uygun görülmeyen şalgam suyunun üretiminde pirinç ve mısır unu kullanılması sonucu glutensiz şalgam suyu üretilmiştir (Yanardağ Karabulut ve Bulut, 2024).

Şalgam suyu üretiminde henüz bir başlatıcı (starter) kültür geliştirilmediğinden ve standardize edilmiş bir şalgam suyu üretim metodu bulunmadığından üretim yöntemi işletmeden işletmeye göre değişmektedir (Ekici ve ark., 2021). Şalgam suyu üretiminde esas ham madde olan ve son ürün kalitesini doğrudan etkileyen siyah havucun (*Daucus carota* var. L.) kalitesi ve üretimdeki kullanım oranı her işletmede farklılık göstermektedir. Benzer şekilde geleneksel üretim yönteminde bulgur unu, kaya tuzu ve ticari ekmek mayası starter kültürü (*Saccharomyces cerevisiae*) içeren ekşitilmiş maya karışımından oluşan hamur 3-5 gün fermantasyona bırakılırken, doğrudan (direkt) üretim yönteminde ise hamur fermantasyonu gerçekleştirilmez (Ağırman ve Erten, 2018). Doğrudan yöntemde hamur yapımında kullanılan malzemeler fermantasyona uğratılmadan doğrudan üretimin yapılacağı tanka ilave edilir. Ayrıca şalgam turpunun (*Brassica rapa* var. *rapa* L.) yılın belli zamanlarında temin edilebilme probleminden dolayı içeceğe ismini veren bu bitki çoğu üretici tarafından kullanılmamaktadır. Şalgam suyu üretiminde yukarıda bahsedilen tüm farklılıklara ilaveten bazı işletmeciler tarafından sarımsak, kırmızı pancar ve acı toz biber ilavesi de yapılarak ürün bileşimi ve lezzeti etkilenmektedir (Tangüler ve Ağırman, 2020). Bunların dışında proseste kullanılan fermantasyon süresi ve sıcaklığı, durultma, filtrasyon, dinlendirme gibi aşamalarda uygulanan farklılıklar şalgam suyunun kalitesini etkileyen faktörler olarak görülmektedir. Sıralanan tüm bu nedenlerden dolayı ürün bileşimi ve kalitesi çok geniş bir aralıkta değişiklik göstermekte, hatta aynı işletmede üretilmesine rağmen üründe sabit bir kalite standardı yakalanamamaktadır. Bilimsel amaçlar kapsamında laboratuvar ortamında üretilen şalgam sularının bileşimi üzerine yapılan çalışmaların sayısında son yıllarda artış görülmekte, ancak endüstriyel şalgam sularının bileşimi ve standarda uygunluğu üzerine hâlihazırda sınırlı sayıda araştırma bulunmaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmada piyasada satışa sunulan beş farklı markaya ait endüstriyel şalgam sularının fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik kalitelerinin belirlenmesi ve TS 11149 Şalgam Suyu Standardına uygunluklarının araştırılarak bu konuda literatürde var olan eksikliğin giderilmesine katkı sağlanması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Çalışma kapsamında incelenmiş olan beş farklı markaya ait ambalajlanmış şalgam suları Adana piyasasında satış yapan marketlerden iki farklı zamanda satın alınarak temin edilmiştir. Markaların seçiminde üretim miktarı düşük, yöresel çapta faaliyet gösteren işletmeler yerine daha fazla tüketiciye hitap eden, Türkiye genelinde bulunabilir olan, ihracat yapan, üretim ve tüketim miktarı daha yüksek olan firmalar tercih edilmiştir. Toplanan örnekler en fazla iki saat içerisinde laboratuvara getirilmiş ve analizleri yapılmaya kadar 4°C’de muhafaza edilmiştir. Şalgam suyu örnekleri Ş1, Ş2, Ş3, Ş4 ve Ş5 olarak kodlanmıştır. Çalışmada kullanılan tüm şalgam suları acısız tip olup, geleneksel yöntem kullanılarak üretilmişlerdir. Çalışma kapsamında incelenen şalgam sularının bileşimlerindeki farklılıkların ve standarda uygunluklarının tutarlı bir şekilde karşılaştırılması ve tartışılması amacıyla hammaddeleri ve üretim yöntemleri aynı olan ve Şalgam Suyu Standardına göre aynı tip (acısız, acı biber ilavesiz) içerisinde değerlendirilen şalgam suları kullanılmıştır.

2.2. Kimyasal Analizler

Beş farklı şalgam suyu örneğinde pH, toplam asitlik, kuru madde, kül ve tuz tayinleri aşağıda belirtildiği şekilde gerçekleştirilmiştir. Tüm kimyasal analizler iki tekerrürlü olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

pH tayini: Örneklerin pH değerleri dijital pH metre (SevenCompact, pH/Ion S220, Mettler Toledo, Birleşik Krallık) kullanılarak doğrudan ölçülmüştür.

Toplam asitlik tayini: Örneklerin toplam asit seviyesi 0.1 N NaOH çözeltisi ile fenolftalein indikatörü varlığında pH 8.1 dönüm noktasına kadar titre edilmesi sonucu belirlenmiş ve sonuçlar laktik asit cinsinden g/L olarak ifade edilmiştir (Cemeroğlu, 2010).

Toplam kuru madde tayini: Kuru madde tayini gravimetrik olarak gerçekleştirilmiş ve örneklerin 105°C’de vakumlu etüvde (Venticell 222, MMM Medcenter, Almanya) sabit ağırlığa ulaşmaya kadar kurutulması sonucu belirlenmiştir. Sonuçlar % olarak ifade edilmiştir (Cemeroğlu, 2009).

Kül tayini: Örnekler sıcaklığı 550°C olarak ayarlanan kül fırınında (PLF 110/6, Protherm, Türkiye) karbon içermeyen beyaz-gri üniform kül rengi elde edilinceye kadar yakılmış ve sonuçlar % (g/100g) kül değeri olarak hesaplanmıştır (Cemeroğlu, 2010).

Tuz tayini: Şalgam sularının tuz içerikleri örneklerin AgNO₃ çözeltisi ile titre edilmesi ilkesine dayanan Mohr metodu kullanılarak belirlenmiştir (Nielsen, 2017).

2.3. Mikrobiyolojik Analizler

Piyasadan toplanan şalgam sularında laktik asit bakterisi (LAB), toplam maya (TM), toplam mezofilik aerobik bakterisi (TMAB) ve koliform bakterisi sayımı yapılmıştır. Şalgam örneklerinden 1 ml alınarak içerisinde serum fizyolojik (9 ml, %0.85 NaCl) bulunan tüplerde seri dilüsyon işlemi yapılmış ve bu seyreltmelerden 0.1 ml alınarak MRS (de Man, Ragosa ve Sharpe) Agar besiyerine dökme plak yöntemi ile ekim yapılmıştır. MRS Agar besiyerine, küf ve maya gelişimini engellemek amacıyla 100 mg/L konsantrasyonunda sikloheksimit (Sigma-Aldrich, Almanya) antibiyotigi ilave edilmiştir. Petriler, anaerobik ortam sağlamak amacıyla Anaerocult® A (Merck KGaA, Almanya) ilave edilmiş anaerobik jar içerisinde 30°C’de 48 saat boyunca inkübe edilmiştir (Jamnik ve ark., 2022). Maya sayımı için standart mikrobiyolojik analizlerde mayalar için seçici besiyeri olarak kullanılan Malt Extract Agar (MEA) üzerine yayma plak yöntemi ile ekim yapılmıştır. Bakteri gelişimini engellemek için besiyerine 100 mg/L konsantrasyonunda oksitetrasiklin (Sigma-Aldrich, Almanya) ilave edilmiş ve 25°C’de 72 saatlik aerobik inkübasyondan sonra maya kolonileri sayılmıştır (Agirman ve Erten, 2018). TMAB analizinde yayma plak yöntemi uygulanmış ve koloni sayımları aerobik olarak 30°C’de 72 saat boyunca inkübasyona bırakılan Plate Count Agar (PCA) içeren petriler üzerinde gerçekleştirilmiştir (Boyacı-Gunduz ve ark., 2022). *Enterobacteriaceae* üyeleri olan koliform grup bakterilerin sayısı Violet Red Bile Agar’da (VRBA) 37°C’de 24 saatlik inkübasyon sonrası pembe-kırmızımsı kolonilerin sayılması ile belirlenmiştir (Walusansa ve ark., 2022). Mikrobiyolojik analizler iki tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiştir.

2.4. Renk Değerleri Ölçümü (L^* , a^* , b^* , C^* , h°)

Renk değerleri ölçümünde Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE-Commission Internationale de l’éclairage) tarafından geliştirilen CIELAB renk uzayı sistemi kullanılmıştır. Bu renk uzayı, üç renk değeri (L^* , a^* , b^*) ölçümünü kullanarak görünür ışık tayfı dışındaki renkler de dâhil olmak üzere sonsuz sayıda rengi üç-boyutlu bir grafikte tek bir nokta ile temsil ederek tanımlar (Özdemir ve Acar Büyükpehlivan, 2022). Üç temel kromatik koordinattan L^* açıklık ($L^* = 0$ siyah, $L^* = 100$ beyaz), a^* kırmızı/yeşil ($+a^*$ kırmızıyı, $-a^*$ yeşili belirtir) ve b^* sarı/mavi ($+b^*$ sarıyı, $-b^*$ ise maviyi belirtir) koordinatlarını temsil eder. Bu çalışmada şalgam suyu örneklerinin L^* , a^* , b^* renk değerleri Color Quest XE (3A/SB, ABD) model renk ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Rengin doygunluğunu (düşük, orta, yüksek) ifade eden Kroma (C^*) değeri ve renk tonunu (algılanan renk) belirten Hue açısı (h°) yukarıda belirtilen 3 temel renk değeri kullanılarak aşağıdaki denklemler yardımı ile hesaplanmıştır (Hunter ve Harold, 1987). Renk analizleri üç tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiştir.

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (1)$$

$$h^\circ = \arctan(b^*/a^*) \quad (2)$$

2.5. Fenol Bileşikleri Tayini

Toplam fenolik madde (TFM) tayini: Örneklerde TFM değeri Folin-Ciocalteu metoduna göre belirlenmiştir. Santrifüj edilip berrak kısmı alınan örneklerin absorbans değerleri gerekli çözelti ilavelerinden sonra UV/VIS Spektrofotometrede (Perkin Elmer Lambda 25, USA) şahide karşı 765 nm'de okutularak belirlenmiştir. Örneklerin toplam fenolik madde miktarı gallik asit (GA) ile hazırlanan standart eğrinin denklemi kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar mg GA/L olarak ifade edilmiştir (Ainsworth ve Gillespie, 2007). TFM analizleri iki tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiştir

Toplam monomerik antosiyanin (TMA) tayini: Şalgam suyu örneklerinin TMA seviyesi pH diferansiyel yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Bu yöntem temel olarak, pH 1.0 ve 4.5 absorbans değerleri arasındaki farkın örneklerin antosiyanin miktarı ile doğru orantılı olarak değiştiği esasına dayanmaktadır. Ortam pH'ları 1.0 ve 4.5 değerlerine ayarlanmış örneklerin okumaları UV/VIS Spektrofotometre (Perkin Elmer Lambda 25, USA) cihazında 520 ve 700 nm dalga boylarında yapılmıştır. Ölçümler optik yolu 1 cm olan tek kullanımlık küvetlerde gerçekleştirilmiştir. Şalgam sularının TMA değerleri siyanidin-3-glikozit cinsinden mg/L olarak verilmiştir (Giusti ve Wrolstad, 2001). TMA analizleri iki tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiştir.

2.6. HPLC ile Organik Asit Tayini

Şalgam sularında baskın olan organik asitlerin (laktik, asetik ve sitrik) miktarı LC-20AT model (Shimadzu, Japonya) yüksek performanslı sıvı kromatografi (HPLC) cihazı ile belirlenmiştir. Kullanılan HPLC cihazı, dörtlü pompa ünitesi, kolon fırını (CTO-10AS), otomatik örnekleyici (SIL-20A), degaz modülü (DGU-20A5) ve fotodiyot dizisi dedektör (PDA, SPD-M20A) ünitelerinden oluşmaktadır. Organik asit analizleri Waters-X-Terra-MS, C18 (5µm, 4.6 x 250 mm, İrlanda) kolonu kullanılarak 210 nm dalga boyunda gerçekleştirilmiştir. HPLC çalışma koşulları olarak kolon sıcaklığı 50°C'ye ayarlanmış ve 0.5 ml/dk akış hızında 5 mM konsantrasyonunda H₂SO₄ çözeltisi mobil faz olarak kullanılmıştır (Agirman ve ark., 2021). Şalgam örnekleri kolon enjeksiyonu öncesinde 8000xg devirde 4°C'de 15 dk boyunca santrifüj edildikten sonra PTFE membran filtre kullanılarak iki aşamalı (ilk 0.45 µm, sonrasında 0.22µm, Millipore, Almanya) filtrasyondan geçirilmiştir (Tanguler ve Erten, 2012). Organik asit miktarlarının belirlenmesinde dış standart yöntemi uygulanmıştır. Kullanılan standartlar laktik asit (Sigma-Aldrich, St. Louis, ABD), asetik asit (Sigma-Aldrich, Taufkirchen, Almanya) ve sitrik asit (Sigma-Aldrich, Taufkirchen, Almanya)

şeklinde. Kromotogramlarda elde edilen organik asit pikleri, standartlarının alıkonma sürelerinin karşılaştırılmasıyla tanımlanmıştır. HPLC analizleri üç tekerrürlü olarak gerçekleştirilmiştir.

2.7. İstatistiksel analizler

Araştırmadan elde edilen veriler tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ile değerlendirilmiştir. Normal ve homojen dağılım gösterdiği belirlenen varyanslara Duncan çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır. Önem seviyesi olarak %5 kullanılmıştır. İstatistiksel analizlerde Windows SPSS 23.0 (IBM SPSS Statistics, Versiyon 23.0, Armonk, NY, IBM Corp.) paket programı kullanılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Şalgam sularının kimyasal bileşimi ve standarda uygunlukları

Çalışma kapsamında incelenen beş farklı ticari şalgam suyunun kimyasal bileşimi ve ilgili özelliğin güncel şalgam suyu standardında bildirilen limit değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Şalgam suyu üretiminde kullanımı gerekli olan tuz ’un lezzet verici özelliği dışında, fermantasyon sırasında bozucu ve patojenik mikroorganizmaları inhibe etme ve dolayısıyla laktik asit bakterilerinin gelişimi teşvik etmek gibi önemli fonksiyonları bulunmaktadır (Erten ve Tanguer, 2016). Bu çalışmada incelenen şalgam sularının tuz içerikleri %1.39 - %2.19 arasında değişmiş olup, analiz edilen beş şalgam suyundan dördünün standartta bildirilen limit değerini (≤ 1.7) aştığı belirlenmiştir. Literatürde ticari şalgam sularının tuz değerlerinin %1.12 - % 1.78 (Öztürk, 2009), %1.17 - %2.57 (Çakır, 2011) ve %1.1 - %2.2) (Özer ve Çoksöyler, 2015) arasında olduğu bildirilmiştir. Son yıllarda Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve diğer sağlık otoriteleri tarafından diyetle kullanılan sodyum tuzunun azaltılmasına yönelik ciddi sayıda çalışmalar yapılmaktadır. Sodyum tuzunun vücuda alımında artış sonucu kan basıncının artması (hipertansiyon) başta olmak üzere, mide kanseri ve kardiyovasküler problemler gibi çeşitli sağlık sorunları meydana gelebilmektedir (Agarwal ve ark., 2015). Ayrıca vücuda aşırı sodyum alımı sonucu plazmada meydana gelen anormal sodyum konsantrasyonu ve buna bağlı olarak vücudun su kaybetmesi ile birlikte birçok sağlık sorununa yol açabileceği bildirilmiştir (Agirman ve Erten, 2018). Ülkemizde de Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından bu doğrultuda çalışmalar yapılmakta; zeytin, pastırma, ekmek, peynir gibi tuz içeren ve günlük beslenmede önemli yer tutan gıdalarda tuz içerikleri azaltılmaktadır. Şalgam suyunun içerebileceği tuz değeri ise 2016 yılında revize edilen standart ile %2 seviyesinden %1.7 düzeyine indirilmiştir. İncelenen şalgam sularının kuru madde içeriklerinin %1.59 - %2.71 arasında değiştiği belirlenmiştir. İncelenen tüm şalgam sularının, kuru madde içeriği bakımından TS 1149 Şalgam Suyu Standardına uymadığı ve standartta

bildirilen minimum değerin (≥ 2.8) altında kaldığı tespit edilmiştir. Literatürde ticari olarak satışa sunulan şalgam sularının bileşimleri ile ilgili az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu ender çalışmalardan birinde Adana piyasasında satışa sunulan 20 farklı şalgam suyunun bileşimleri incelenmiş ve kuru madde içeriklerinin %2.07 ile %3.19 arasında değiştiği saptanmıştır (Öztürk, 2009). Özer ve Çoksöyler (2015) tarafından Adana ve Mersinde satışa sunulan 14 farklı şalgam suyu incelenmiş ve kuru madde içeriklerinin %2.0 ile %2.9 arasında değiştiği bildirilmiştir. Şalgam suyu kuru madde miktarının kullanılan siyah havuç ve tuz miktarı ile doğru orantılı olarak değiştiği bilinmektedir (Güven ve ark., 2019). Şalgam suyunun kuru madde içeriğini ise su ve uçucu maddeler uzaklaştırıldıktan sonra geriye kalan organik asit, tuz, protein, renk ve mineral maddeler oluşturmaktadır (Agirman ve ark., 2021). Bu çalışmada incelenen şalgam sularının kuru madde ve tuz sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, üreticilerin kullandıkları siyah havuç miktarının standartta belirlenen kuru madde değerini sağlamada yetersiz kaldığı ve esas hammadde olan siyah havucun miktarının artırılması gerektiği anlaşılmaktadır. Siyah havucun şalgam üretiminde en önemli maliyet bileşeni olduğu düşünüldüğünde, üreticilerin ekonomik endişelerden dolayı ve ürün fiyatını aşağıya çekmek amacıyla bu bileşenin miktarını azaltabilecekleri düşünülmektedir.

Tablo 1. Şalgam örneklerinin kimyasal bileşimi.

Analizler	Ş1	Ş2	Ş3	Ş4	Ş5	Standart*
Kuru madde (%)	2.39±0.01 ^b	2.34±0.01 ^{bc}	2.71±0.02 ^a	2.29±0.01 ^c	1.59±0.00 ^d	≥ 2.8
Kül (%)	1.58±0.00 ^b	1.70±0.01 ^a	1.65±0.02 ^a	1.48±0.01 ^c	0.96±0.00 ^d	≤ 2.0
Tuz (%)**	1.78±0.03 ^c	1.84±0.04 ^b	2.19±0.05 ^a	1.78±0.02 ^c	1.39±0.01 ^d	≤ 1.7
pH	3.76±0.00 ^b	3.73±0.02 ^b	3.67±0.01 ^c	3.69±0.00 ^c	3.88±0.02 ^a	≤ 3.8
Toplam asitlik (g/L)***	7.48±0.11 ^c	8.08±0.13 ^b	8.71±0.12 ^a	8.26±0.10 ^b	6.86±0.008 ^d	≥ 6.0

Aynı satırda farklı harflerle belirtilen değerler arasındaki farklar Duncan çoklu karşılaştırma testine göre istatistiksel olarak önemli ($P < 0.05$) bulunmuştur. *TS 11149 Şalgam Suyu Standardında belirtilen limit değerler, ** Sodyum klorit (NaCl) cinsinden, *** laktik asit cinsinden.

Bir laktik asit fermantasyonu ürünü olan şalgam suyunda baskın asit laktik asit olup (Erten ve Tanguler, 2016), şalgama kendine has ekşi lezzetini verirken aynı zamanda LAB dışındaki bakterilerin gelişimini kısıtlayarak ürünün muhafazasında da rol oynamaktadır (Tangüler ve Ağırman, 2020). Şalgam suyunun asitlik derecesi tüketicilerin ürün hakkındaki beğeni durumunu doğrudan etkileyen bir faktör olarak dikkat çekmektedir (Agirman ve ark., 2021). TS 11149 Şalgam Suyu Standardı'na göre şalgam suyunda toplam asitlik düzeyinin en az 6 g/L olması gerekirken, pH seviyesinin ise en yüksek 3.8 olması gerektiği belirtilmiştir. Bu çalışmada incelenen tüm şalgam sularının toplam asitlik (6.86 g/L – 8.71 g/L) değerleri standart ile uyumludur. Ş5 kodlu örneğin pH değeri (3.88) standartta belirtilenden yüksek iken, diğer şalgam sularının pH değerleri (3.67 – 3.76) standarda uygun çıkmıştır. pH ve toplam asitlik miktarları fermantasyon süresince üretilen laktik asit miktarı ile ilişkilidir (Ulu, 2019). Şalgam sularında beklendiği gibi pH ve toplam asitlik değerleri arasında ters orantı bulunmuş ve örneklerde pH değeri düştükçe toplam asitlik derecesinin arttığı

belirlenmiştir (Tablo 1). Özer ve Çoksöyler (2015) piyasadan temin ettikleri şalgam sularının toplam asitlik ve pH değerlerini sırasıyla 6.1 – 9.1 g/L ve 3.3 – 3.6 arasında belirlerken, laboratuvar koşullarında ürettikleri şalgam sularında aynı özelliklerin sırasıyla 6.3 – 8.7 g/L ve 3.4 - 3.5 arasında değiştiğini bildirmiştir.

İncelenen şalgam sularının % kül değerleri 0.96 -1.70 arasında değişmiş ve tüm örneklerin kül değeri bakımından standarda (≤ 2.0) uygun olduğu saptanmıştır. Kül tanım olarak inorganik yapıda olan anyonik ve katyonik iyonlar olup, yanmayan maddelerin toplamı olarak ifade edilmektedir (Ağırman, 2014). Cirak ve ark. (2022) tarafından laboratuvar ortamında üretilen şalgam sularının kül değerleri %1.55 - % 1.78 arasında değişirken, ticari şalgam sularının incelendiği çalışmada kül değerleri %1.32 - %1.97 arasında değişmiştir (Çakır, 2011).

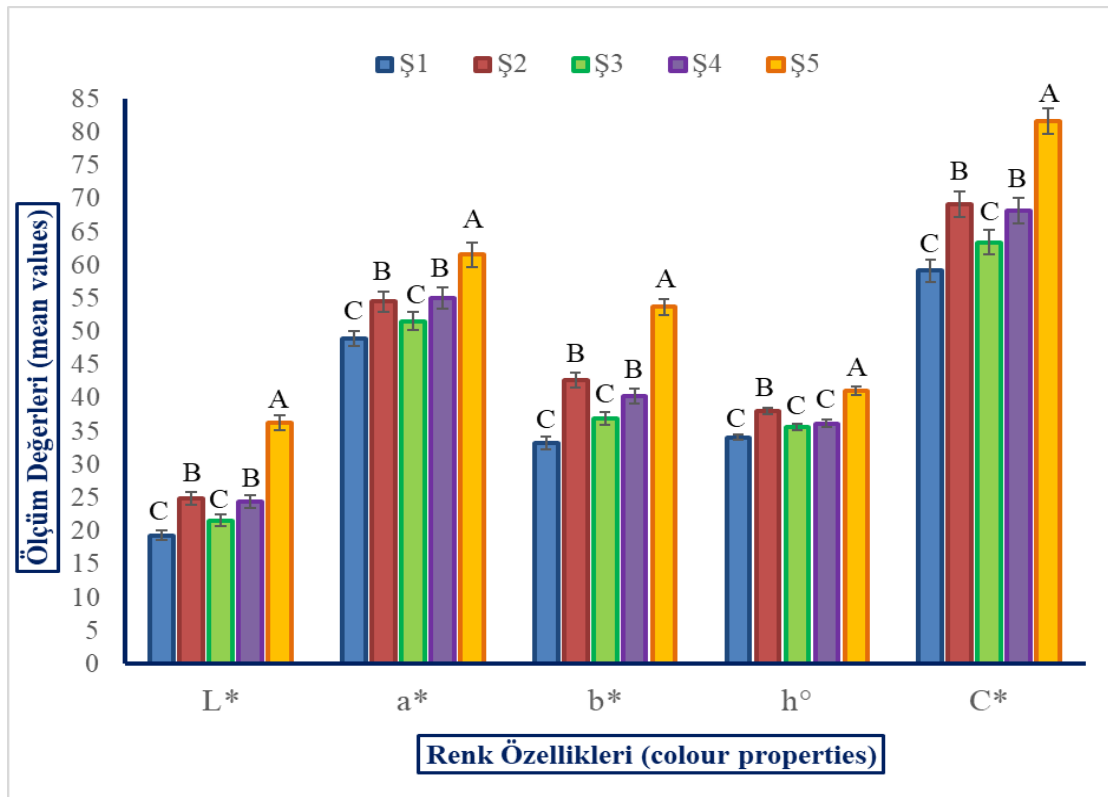
Çalışma kapsamında tüm kimyasal analiz sonuçları değerlendirildiğinde özellikle Ş5 kodlu örneğin en düşük kül, kuru madde, tuz ve toplam asitlik içeriğine ve en yüksek pH değerine sahip olması dikkat çekicidir. Bu örnekte özellikle asitlik, kuru madde ve kül değerinin diğer örneklerle göre düşük çıkması kullanılan siyah havuç miktarının oldukça az olduğunu ifade etmektedir. Diğer taraftan, tüm şalgam sularının incelenen tüm kimyasal bileşimleri arasındaki farklılıklar istatistiksel açıdan anlamlı ($P < 0.05$) bulunmuştur. Bu sonuç piyasada bulunan şalgam sularının üretiminde kullanılan bileşenlerin ve oranlarının önemli ölçüde farklı olduğunu yansıtmaktadır.

Bu bölümde çalışma sonucunda elde edilen bulgular verilmelidir. Elde edilen bulgular ile ilgili literatür çalışmaları yapılarak karşılaştırmalar yapılabilir.

3.2. Şalgam sularının renk özellikleri

Şalgam suyunun kendine özgü koyu kırmızı rengi siyah havuçta yüksek miktarda bulunan antosiyanin bileşenlerin fermantasyon sırasında suya geçişinden kaynaklanmaktadır (Bozdoğan ve Yaşar, 2019). Kimyasal açıdan antosiyanidinlerin glikozitleri olarak tanımlanan antosiyaninler (Çakır, 2011) suda çözülebilir nitelikte olup, en kuvvetli doğal gıda renklendiricilerinden biri olarak kabul edilmektedir (Tangüler, 2021). İncelenen şalgam sularının L^* değerleri 19.38 – 36.27, a^* değerleri 49.00 – 61.57 ve b^* değerleri 33.23 – 53.72 arasında değişmiştir (Şekil 1). Bu üç renk değerinin tümünün en düşük bulunduğu şalgam suyu Ş1 kodlu örnek olurken, en yüksek değerleri ise Ş5 kodlu örnekte tespit edilmiştir. Diğer örneklerde dikkate alındığında, koyu renkten açık renge gidecek şekilde şalgam sularının renkleri sıralandığında sırasıyla Ş1, Ş3, Ş4, Ş2 ve Ş5 dizilimi ortaya çıkmaktadır. $a^*(+)$ kırmızılık değeri incelendiğinde kırmızı renk özelliği en yüksek olan şalgamdan en az olan şalgama doğru sıralama ise Ş5, Ş2, Ş4, Ş3 ve Ş1 şeklindedir. Çalışma kapsamında incelenen şalgam sularının tamamının $b^*(+)$ değerlerine sahip olması şalgam sularının sarı renk içerdiğini ifade etmektedir. Sarı renge en fazla sahip olan şalgam suyundan en az sahip olana doğru

bir sıralama yapıldığında $a^*(+)$ değeri ile aynı şekilde Ş5, Ş2, Ş4, Ş3 ve Ş1 dizilimi elde edilmektedir (Şekil 1). Yukarıda bahsedilen verilerden anlaşıldığı üzere incelenen tüm şalgam sularında algılanan baskın renk kırmızı olmuştur. Ancak Ş5 kodlu örnek incelenen diğer örneklere ve literatürde bildirilen değerlere kıyasla oldukça yüksek L^* değerine sahip olduğundan, rengi açık/soluk kırmızı olmuştur. Bunun sebebinin ise siyah havuç miktarının yetersiz olmasından dolayı antosiyanin bileşiminin eksik kalmasıdır. Şalgam suyunun istenen rengi açık kırmızı değil, koyu kırmızı olmasıdır. Dolayısıyla yetersiz siyah havuç kullanımının şalgam suyunun renk kalitesini doğrudan olumsuz şekilde etkilediği söylenebilir. Literatürde şalgam suyu üzerine yapılan çalışmalarda karşılaştırılabilir değerler elde edilmiştir. Agirman ve ark. (2021) tarafından yapılan çalışmada L^* değerleri 18.75 – 20.94, a^* değerleri 50.38 – 53.15 ve b^* değerleri 32.06 – 35.84 arasında değişmiştir. Tanguler ve ark. (2021) geleneksel ve doğrudan yöntem ile şalgam suyu üretmiş ve geleneksel yöntemle üretilen şalgam sularında L^* (13.78 – 14.25), a^* (4.74 – 5.20) ve b^* değerleri (-0.12 – -0.35) arasında değişirken, doğrudan yöntemle üretilen şalgam sularında ise L^* (13.27 – 14.23), a^* (2.95 – 5.58) ve b^* değerleri (0.16 - 1.17) arasında belirlenmiştir. Bu çalışmada bildirilen renk değerlerinin literatüre göre oldukça düşük çıkmasının sebebinin uzayan fermantasyon süresinden kaynaklanabileceği bildirilmiştir (Tanguler ve ark., 2021).



Şekil 1. Ticari şalgam sularının renk özellikleri.

(Her bir renk koordinatında ifade edilen farklı harfler, farklı şalgam sularına ait incelenen bu renk koordinatının ortalama değerleri arasındaki farklılıkların Duncan çoklu karşılaştırma testine göre anlamlı ($P < 0.05$) olduğunu ifade etmektedir).

Rengin yoğunluğunu (doygunluğunu) veya bir başka deyişle saflığını ifade eden C^* değeri, incelenen şalgam örneklerinde 59.2 – 81.71 arasında değişirken, algılanan renk veya renk tonunu belirten h° değeri ise 34.14 – 41.10 arasında değişmiştir. Hue açısı ürünün baskın olduğu renge karşılık gelen açıyı temsil etmektedir (Alibaş ve ark., 2021) ve h° değeri 0'a yaklaştıkça renk kırmızı tonlarına, 90'dan sonra sarı tonlarına, 180 ve sonrası yeşil tonlarına, 270 derecede ise mavi tonlarına karşılık gelmektedir (Özçelik ve ark., 2022). Şalgam sularının Şekil 1'de sunulan h° değerleri kırmızı renk tonlarına karşılık gelmekte olup değer sayısal olarak arttıkça renk açık kırmızıdan koyu kırmızıya ve kahverengi tonlarına daha da ileride sarıya dönmektedir. Kroma (C^*) renkte hakim olan pastel ton veya canlı ton ile ilişkili olup, kromanın sayısal değerinin artması rengin canlılığının artmasına, azalması ise rengin donuklaşmasına işaret etmektedir (Alibaş ve ark., 2021). Bu verilere göre, kırmızı rengin baskınlığının en yüksek olduğu örnek Ş1 olurken en düşük olduğu örnek ise Ş5 olmuştur. Ş5 kodlu örneğin renk canlılığı en yüksek seviyede bulunurken, Ş1 kodlu örnekte diğer şalgam sularına kıyasla canlılık daha zayıf bulunmuştur. Literatürde şalgam suları üzerinde yapılan çalışmalarda C^* değeri (57.17 – 66.60) ve h° değeri (31.45 – 35.49) açısından bu çalışma ile benzer sonuçlar elde edilmiştir (Ağırman ve ark., 2021; Cirak ve ark., 2022).

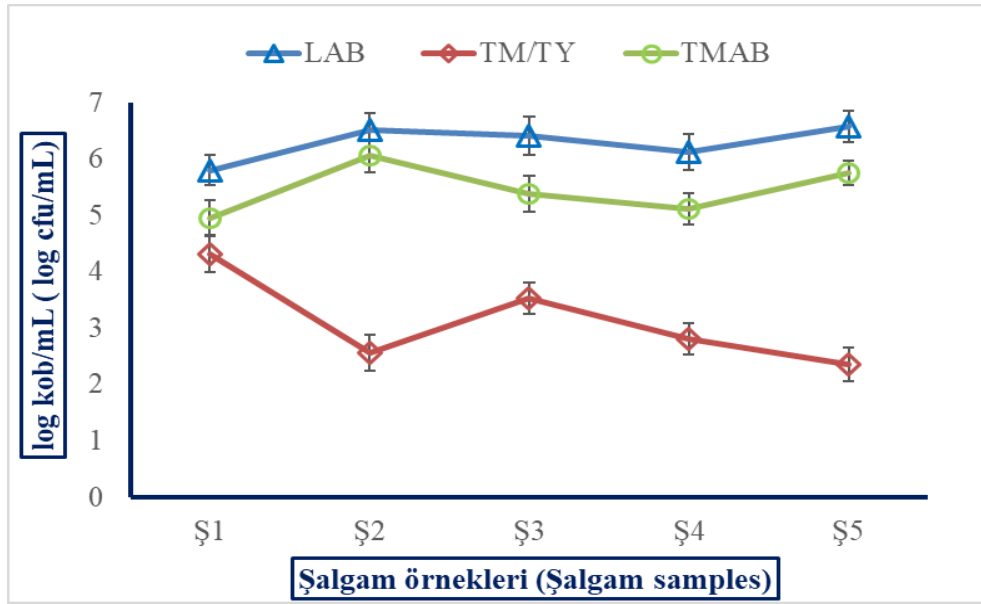
Şalgam sularının renk değerleri arasındaki farklılıkların istatistiksel olarak önemli bulunduğu ($P < 0.05$) ve şalgam sularının renk açısından üç gruba ayrıldığı görülmektedir (Şekil 1). Buna göre Ş5 kodlu örnek renk özellikleri açısından diğer şalgamlardan ayrılıp tek başına bir grubu oluştururken, Ş2 ve Ş4 renk özellikleri açısından yakın değerler alarak ikinci grubu, Ş1 ve Ş3 kodlu örnekler ise benzer renk özellikler sergileyerek üçüncü grubu oluşturmuştur.

3.3. Şalgam sularının mikrobiyolojik özellikleri

Şalgam suyunun tat ve aroma oluşumunda en önemli etkenlerden bir diğeri içerdiği mikroorganizmalardır (Coskun, 2017). *Lactiplantibacillus plantarum*, *Limosilactobacillus fermentum* ve *Lacticaseibacillus paracasei* subsp. *paracasei* türlerinin starter olarak kullanımını öneren çeşitli çalışmalar olsa da, bilindiği kadarıyla şalgam suyu üretiminde hâlihazırda starter kültür kullanımı bulunmamaktadır (Erten ve ark., 2016; Tangüler ve Ağırman 2020). Şalgam suyun fermantasyonunda esas olarak laktik asit bakterileri olmak üzere mayaların da rol aldığı bilinse de (Coskun, 2017), şalgam suyunun mikrobiyotası karmaşık bir yapıya sahiptir ve tam olarak bilinmemektedir (Kahve ve ark., 2022). Şalgam suyu üretiminde fermantasyon; ekşi hamur mikroflorasına, siyah havuç, şalgam turpu gibi hammaddelerin ve ayrıca üretim ve depolama sırasında kullanılan alet ve ekipmanların yüzeylerinde doğal olarak bulunan mikrofloraya bağlı olarak gerçekleşirken, üretimde genellikle kontrolsüz (spontan) bir fermantasyon uygulanmaktadır (Erten

ve ark., 2016; Erten ve Tanguler, 2016; Kahve vd., 2022). Bu nedenle son ürünlerin fiziksel, kimyasal, mikrobiyolojik ve duyuşsal kalitesi farklı olabilmektedir (Tangüler ve Ağırman, 2020).

Çalışma kapsamında yapılan mikrobiyolojik analiz sonuçlarına göre şalgam sularının LAB sayıları 5.80 – 6.57 log kob/mL, TM sayıları 2.36 – 4.32 log kob/mL ve TMAB sayıları ise 4.95 – 6.05 log kob/mL aralığında saptanmıştır. İncelenen şalgam suyu örneklerinde koliform bakteri varlığı tespit edilmemiştir. Literatürdeki çeşitli çalışmalarda da şalgam suyunun sahip olduğu düşük pH ve yüksek asitlik değerlerinden dolayı koliform bakterilerin ortamda canlı kalamadığı bildirilmiştir (Ağırman ve Erten, 2018; Çankaya ve Tangüler, 2018). İncelenen şalgam sularının tamamında fermantasyonu yürüten ve ortamda baskın olan mikroorganizma grubunun laktik asit bakterileri olduğu ve mayaların LAB'a kıyasla daha düşük sayıda bulunduğu belirlenmiştir (Şekil 2). Literatürde bu bulgu ile uyuşan sonuçlar elde edilmiştir. Kafkaskıray (2020) tarafından laboratuvar ortamında geleneksel yöntem ile üretilen şalgam sularının mikrobiyal profili üzerine yapılan çalışmada şalgam sularının LAB sayısı 7.68 – 7.81 log kob/mL, TM sayısı 5.84 log kob/mL, TMAB sayısı 7.71 – 7.92 log kob/mL olarak bildirilmiştir. Gök (2017) tarafından Adana piyasasından toplanan 12 adet ambalajlı şalgam suyu örneğinde LAB sayıları 2.17 – 4.79 log kob/mL, TM sayısı 1.47 – 4.04 log kob/mL ve TMAB sayısı 1.77 – 4.53 log kob/mL olarak bildirilmiştir. Bu çalışmada ve Gök (2017) tarafından yapılan çalışmada incelenen ticari şalgam sularında bulunan mikroorganizma yükünün laboratuvar ortamında üretilen şalgam sularına göre daha düşük çıkmasının sebebinin ticari şalgam sularında raf ömrünü uzatmak amacıyla koruyucu ilave edilmesi veya ısıl işlem (pastörizasyon) uygulamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çıkarımı destekleyen güncel bir çalışmada (Mujdeci ve ark., 2023) koruyucu kullanılmadan (kontrol) ve üç farklı koruyucu (sodyum benzoat, potasyum sorbat ve natamisin) kullanılarak üretilen şalgam sularında LAB ve maya sayılarının koruyucu kullanımı ile önemli düzeyde azaldığı ve bu azalmanın kullanılan koruyucu miktarının artması ile doğru orantılı olacak şekilde arttığı ortaya konmuştur. Kontrol grubu örneklerde LAB ve maya sayıları sırasıyla 6.58 ve 6.39 log kob/ml iken, aynı mikroorganizma grupları koruyucu kullanılan denemelerde sırasıyla 2.48 ve 1.31 log kob/ml seviyesine kadar gerilemiştir (Mujdeci ve ark., 2023).



Şekil 2. Farklı mikrobiyal grupların şalgam örneklerindeki sayıları.
(LAB: Laktik asit bakterisi, TM: Toplam maya, TMAB: Toplam mezofilik aerobik bakteri)

TS 11149 Şalgam Suyu Standardına göre şalgam suyu örneğinin mililitresinde bulunabilecek kabul edilebilir en fazla TMAB sayısı 1.0×10^5 kob/mL (5 log kob/mL) olarak belirtilmiştir. Standartta göre bu çalışmada incelenen beş farklı markaya ait şalgam sularından Ş1 kodlu örnek hariç diğer dört örneğin standarda uyum sağlamadığı belirlenmiştir. İlgili standartta LAB ve maya sayısı için herhangi bir değer belirtilmemiştir.

3.4. Şalgam sularının organik asit ve fenol bileşikleri bileşimi

Şalgam fermantasyonunda esas son ürün laktik asit olup şalgam suyunun toplam asitliğinin önemli bir bölümünü bu asit oluşturmaktadır. Şalgam suyunda laktik asit L(+) ve D(-) formlarında bulunmasına rağmen baskın olarak bulunan L(+) formudur (Ekinci ve ark., 2016). Laktik asit şalgam suyunu mikrobiyal bozulmalara karşı korumasının yanında ürünün lezzet ve aromasına katkı sağlar (Erten ve Tanguler, 2016). Bu özelliklerine ek olarak laktik asit şalgam suyuna ferahlatıcı bir özellik katmakta, sindirim sisteminin pH'sının düzenlenmesine ve vücudun bazı minerallerden daha fazla yararlanmasına yardımcı olmaktadır (Coskun, 2017; Tangüler ve Ağırman, 2020). Şalgam suyunda laktik asit dışında bulunan başlıca organik asitler asetik asit, sitrik asit, propiyonik asit ve süksinik asit olarak bildirilmiştir (Ağırman ve ark., 2021; Ekinci ve ark., 2016). Heterofermentatif laktik asit bakterileri ve mayaların aktivitesi sonucu oluşan asetik asit şalgam suyunda uçucu asitler arasında en baskın olanıdır (Coskun, 2017; Erten ve Tanguler, 2016).

HPLC analizi sonuçlarına göre bu çalışmada incelenen ticari şalgam sularının laktik asit içerikleri 5.68 – 7.21 g/L, asetik asit ve sitrik asit içerikleri ise sırasıyla 0.78 – 1.18 g/L ve 0.09 – 0.23 g/L arasında değişmiştir (Tablo 2). Laktik asit miktarları, şalgam sularının daha önce verilen toplam

asitlik değerleriyle uyumlu çıkmış ve en fazla laktik asit içeren en az doğru sıralama Ş3, Ş4, Ş2, Ş1, Ş5 şeklinde olmuştur. En düşük laktik asit miktarının birçok kalite özelliğinde düşük puan alan Ş5 kodlu örnekte bulunması dikkat çekicidir. Buna rağmen tüm örneklerin ilgili standartta belirtilen en düşük (≥ 4.5 g/L) laktik asit miktarını sağladıkları tespit edilmiştir. Çalışmada incelenen şalgam sularında uçucu asit olarak en baskın asidin asetik asit olduğu belirlenmiştir. Piyasadan toplanan bu şalgam sularının organik asit bileşimleri arasındaki farklılıkların önemli olduğu belirlenmiştir ($P < 0.05$). Bu çalışmadan elde edilen organik asit verileri literatür ile uyumludur. Ekinci ve ark. (2016) tarafından Adana’da satışa sunulan şalgam sularından üç yıl boyunca örnek alınmış ve ortalama laktik asit, asetik asit ve sitrik asit miktarları sırasıyla 8.90 g/L, 1.29 g/L ve 1.25 g/L olarak bildirilmiştir. Gök (2017) tarafından yapılan çalışmada 12’si etiketli (ambalajlı) ve 13’ü dökme olarak Adana’da tüketiciye sunulan 25 ticari şalgam suyu incelenmiş ve laktik asit içeriklerinin 3.05 – 8.38 g/L, asetik asit içeriklerinin ise 0.55 – 3.41 g/L arasında değiştiği belirlenmiştir.

Tablo 2. Şalgam örneklerinin organik asit ve fenol bileşikleri bileşimi.

Bileşim	Ş1	Ş2	Ş3	Ş4	Ş5
Organik asitler (g/L)					
Laktik asit	5.99±0.08 ^c	6.48±0.07 ^b	7.21±0.11 ^a	6.55±0.10 ^b	5.68±0.03 ^d
Asetik asit	0.78±0.09 ^c	1.00±0.08 ^{ab}	1.18±0.09 ^a	0.96±0.04 ^b	0.95±0.06 ^b
Sitrik asit	0.16±0.01 ^b	0.11±0.01 ^c	0.17±0.01 ^b	0.23±0.02 ^a	0.09±0.01 ^c
Fenol bileşikleri (mg/L)					
TFM	278.60±8.36 ^b	182.60±6.12 ^c	318.10±11.21 ^a	312.60±7.88 ^a	178.60±4.12 ^c
TMA	169.58±3.08 ^c	134.18±2.30 ^d	248.15±7.91 ^a	198.22±6.37 ^b	97.92±2.48 ^e

Aynı satırda farklı harflerle belirtilen değerler arasındaki farklar Duncan çoklu karşılaştırma testine göre istatistiksel olarak önemli ($P < 0.05$) bulunmuştur. TFM: Toplam fenolik madde (gallik asit eşdeğeri olarak), TMA: Toplam monomerik antosiyanin (siyanidin-3-glikozit eşdeğeri olarak).

Şalgam suyunun sağlık üzerine birçok olumlu etkisi olduğu bildirilmektedir. Özellikle şalgam suyu yapımında esas hammadde olarak kullanılan siyah havuçun fenolik bileşikler, C ve E vitamini başta olmak üzere çok sayıda biyoaktif bileşen (fitokimyasal) içerdiği ve yüksek antioksidan aktiviteye sahip olduğu bildirilmiştir (Öztürk ve ark., 2023). Fenolik bileşikler; fenolik asitler, tanenler ve antosiyaninler olarak alt gruplara ayrılırken, şalgam suyunun özellikle antosiyaninler açısından zengin olduğu bilinmektedir (Cirak ve ark., 2022; Ribéreau-Gayon ve ark., 2006). Şalgam suyunun kendine özgü koyu ve kırmızı rengi siyah havuçta bulunan antosiyaninlerden kaynaklanmaktadır (Coskun, 2017). Fenolik bileşiklerin yüksek antioksidan kapasiteye sahip oldukları bildirilirken (Tangüler ve Ağırman, 2020), siyah havuç antosiyaninlerinin ise sağlık açısından kardiyovasküler rahatsızlık ve kanser riskini azaltmak gibi birçok faydalarının olduğu bildirilmektedir (Ekinci ve ark., 2016). Antosiyaninlerin de içerisinde bulunduğu fenolikler, LAB ve diğer mikroorganizmaların canlılık ve gelişimlerini modüle etme özelliklerinden dolayı şalgam suyu fermantasyonu üzerine etki etmektedirler (Rodríguez ve ark., 2009). Bu nedenle fenolik maddeler ve

antosiyenin varlığı şalgam suyunun biyoaktif açıdan zengin bir içecek olduğunu göstermektedir (Ekinci ve ark., 2016).

Bu çalışmada incelenen şalgam sularında TFM içeriğinin artması ile TMA içeriğinin de arttığı belirlenmiştir (Tablo 2). Şalgam sularında TFM miktarı GA cinsinden 178.60 – 318.10 mg/L arasında iken, TMA miktarı ise siyanidin-3-glikozit cinsinden 97.92 – 248.15 mg/L arasında değişmiştir. Farklı markalara ait bu beş şalgam suyunun TFM ve TMA değerleri arasındaki farkların istatistiksel açıdan %5 önem düzeyinde anlamlı olduğu tespit edilmiştir. En düşük TFM ve TMA değerleri Ş5 kodlu örnekte belirlenirken, en yüksek değerler Ş3 kodlu şalgam suyunda saptanmıştır. Ticari şalgam sularının toplam TFM içeriği GA cinsinden 517 mg/L (Ekinci ve ark., 2016) olarak bildirilirken, laboratuvar şartlarında üretilen şalgam sularında bu değer 650 mg/L (Bozdoğan ve Yaşar, 2019) olarak belirlenmiştir. Tanguler ve ark. (2021) geleneksel yöntem ile ürettikleri şalgam sularında TFM (mg GA/L) ve TMA içeriğini sırasıyla 259.77 – 382.10, 124.91 – 176.24 mg/L olarak belirlerken doğrudan yöntem kullanılarak üretilen şalgam sularında her iki parametrede düşüş görülmüş ve TFM 185.93 – 257.10 (mg GA/L), TMA ise 88.68 – 99.16 mg/L olarak tespit edilmiştir. Yakın zamanda yapılan bir diğer çalışmada geleneksel yöntem kullanılarak üretilmiş şalgam suyunun TFM ve TMA içeriği sırasıyla 432.2 (mg GA/L) ve 132.7 mg/L olarak bildirilmiştir (Ozturk ve ark., 2024). Bu çalışmada saptanan TFM değerlerinin literatür de bildirilenlere göre düşük çıkmasının nedeni üretimde kullanılan siyah havucun oranı ve fenolik madde içeriği ile ilişkili olabileceği gibi, bu çalışmada incelenen ticari şalgam sularının fenolik bileşiklerinin depolama sırasında parçalanmasından kaynaklanabileceği de düşünülmektedir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada Türkiye genelinde satışa sunulan 5 farklı üreticiye ait şalgam sularının kalite özellikleri ve ilgili güncel şalgam suyu standardına (TSE, 2016) uygunlukları araştırılmıştır. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde bu çalışmada incelenen tüm şalgam suları kül, toplam asitlik ve laktik asit içeriği bakımından ilgili standarda uygun iken, hiçbir şalgam suyu kuru madde değeri açısından standartta belirtilen değeri sağlamamıştır. Tuz oranı olarak sadece Ş5 kodlu örneğin, TMAB sayısı açısından ise yalnızca Ş1 kodlu örneğin standarda uygun değerleri sağladığı belirlenmiştir. pH özelliği açısından ise Ş5 kodlu örnek dışında, analiz edilen diğer dört şalgam suyunun TS 11149 numaralı Şalgam Suyu Standardına uygun olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonucunda piyasada bulunan şalgam suları arasında organik asit, fenol bileşikleri, mikrobiyolojik bileşim, çeşitli fiziksel ve kimyasal özellikleri açısından önemli farklılıkların bulunduğu belirlenmiştir. Şalgam sularının birçok kalite özelliği bakımından standarda uymaması ve bileşimleri arasında büyük dalgalanmalar bulunması, üreticilerin şalgam suyu üretimi sırasında kullandıkları

hammadelerin (özellikle siyah havucun) kalitesi ve kullanım oranlarındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Ayrıca üretim tekniklerinin (geleneksel, doğrudan) firmadan firmaya değişiklik göstermesi, fermantasyon koşulları (sıcaklık, süre), üretim öncesi (hamur fermantasyonunda kullanılan formülasyon, hamurun ekstraksiyonu veya bez/tülbent içerisinde kullanımı, havuç boylama) ve sonrası (filtrasyon, durultma, dinlendirme, ısıtma işlemi uygulaması) işlemlerde uygulama farklılıkları şalgam suyunda standardizasyonu engellemekte ve bazen kalite sorunu oluşmasına neden olmaktadır. Sıralanan tüm bu farklılıklar şalgam suyunun ambalajlanmasından sonraki aşamada dahi bozulma sürecini doğrudan etkilemekte ve özellikle yaz aylarında şişme (bombaj) sorunu ile sıklıkla karşılaşılmaktadır. Bu nedenle şalgam suyu üretiminde, şalgam suyundan izole edilmiş, yerli starter kültür/ler'in kullanılması sabit kalitede üretim yapılması açısından çok önemli bir eksikliği gidermiş olacaktır. Ayrıca şalgam suyu standardında; üretimde kullanılması gereken minimum siyah havuç oranı, farklı koruyucu maddelerin kullanımı ve ısıtma işlemi uygulama normları ile ilgili konularda güncellemeler yapılmasının üründe standardizasyon sağlamada fayda sağlayacağı düşünülmektedir. İleriye dönük olarak ise kimyasal koruyuculardan ürünü tamamen arındırmak ve ısıtma işleminin lezzet ve renk üzerindeki olumsuz etkilerinden kaçınmak amacıyla şalgam suyunda ısıtılmayan yenilikçi teknolojilerin (yüksek basınç, ultraviyole ışık, vurgulu elektrik alan, ultrases, ohmic ısıtma vb.) kullanımı veya daha düşük maliyetli olarak avantaja sahip olan antimikrobiyal etkiye sahip doğal bileşenlerin (bitki ekstraktları vb.) şalgam sularında kullanımı üzerine yapılacak çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmanın tamamı Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazar bu araştırma makalesinde herhangi bir kişi ve/veya kurum ile çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Agarwal, S., Fulgoni, V.L., Spence, L., and Samuel, P. (2015). Sodium intake status in United States and potential reduction modeling: an NHANES 2007-2010 analysis. *Food Science & Nutrition*, 3(6), 577-585.
- Ağırman, B. (2014). *Şalgam suyu üretiminde farklı klorür tuzları kullanılarak sodyum klorür miktarının azaltılması*. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Agirman, B., and Erten, H. (2018). The influence of various chloride salts to reduce sodium content on the quality parameters of Şalgam (Shalgam): a traditional Turkish beverage based on black carrot. *Journal of Food Quality*, Article ID: 3292185.
- Agirman, B., Settanni, L., and Erten, H. (2021). Effect of different mineral salt mixtures and dough extraction procedure on the physical, chemical and microbiological composition of şalgam: a black carrot fermented beverage. *Food Chemistry*, 344, 128618.
- Ainsworth, E.A., and Gillespie, K.M. (2007). Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using Folin-Ciocalteu reagent. *Nature Protocols*, 2(4), 875-877.
- Alibaş, İ., Yılmaz, A., Günaydın, S., and Arkain, B. (2021). Influence of drying methods on drying kinetics and color parameters. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 9(5), 897-908.
- Boyacı-Gunduz, C.P., Agirman, B., Gaglio, R., Franciosi, E., Francesca, N., Settanni, L., and Erten, H. (2022). Evaluation of the variations in chemical and microbiological properties of the sourdoughs produced with selected lactic acid bacteria strains during fermentation. *Food Chemistry:X*, 14, 100357.
- Bozdoğan, A., and Yaşar, K. (2019). Degradation kinetics of anthocyanins in shalgam beverage. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 7(2), 282-285.
- Cemeroğlu, B. (2009). *Meyve ve Sebze İşleme Teknolojisi*, Cilt I, 3. Baskı. Ankara: Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları No:38, Bizim Grup Basımevi.
- Cemeroğlu, B. (2010). *Gıda Analizleri*, Genişletilmiş 2. Baskı. Ankara: Gıda Teknolojisi Derneği Yayınları No:34, Bizim Grup Basımevi.
- Cirak, M.A., Agirman, B., and Erten, H. (2022). The chemical, microbiological and sensory characteristics of şalgam during fermentation process. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(6), e15440.
- Coskun, F. (2017). A traditional Turkish fermented non-alcoholic beverage, "Şalgam". *Beverages*, 3, 49.
- Çakır, P. (2011). *Ülkemizde üretilen şalgam sularının bileşimleri ve gıda mevzuatına uygunlukları üzerine bir araştırma*. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Çankaya, A., ve Tangüler, H. (2018). Şalgam suyu üretiminde gerçekleştirilen havuç fermantasyonu sırasında mikrobiyal değişim üzerine sıcaklığın etkisi. *Türk Tarım – Gıda Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(6), 749-755.
- Ekici, H., Kadiroglu, P., and Ilgaz, C. (2021). Next-generation sequencing of shalgam flavor influencing microflora. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(6), e15982.
- Ekinci, F. Y., Baser, G. M., Özcan, E., Güçlü Üstündağ, Ö., Korachi, M., Sofu, A., Blumberg, J. B., and Oliver Chen C. Y. (2016). Characterization of chemical, biological, and antiproliferative properties of fermented black carrot juice, shalgam. *European Food Research and Technology*, 242, 1355-1368.
- Erten, H., Agirman, B., Boyacı-Gunduz, C.P., and Ben Ghorbal, A. (2016). Regional fermented vegetables and fruits in Europe. In S. Paramithiotis (Chief Ed.), *Lactic acid fermentation of fruits and vegetables* (pp. 205-235). Boca Raton: CRC Press.
- Erten, H., and Tanguler, H. (2016). Şalgam (Şalgam): a traditional Turkish lactic acid fermented beverage based on black carrot. In Y. H. Hui, E. Ö. Evranuz, G. Bingöl, H. Erten, M. E. J. Flores (Eds.), *Handbook of vegetable preservation and processing*, 2nd ed. (pp. 841-850). Boca Raton: CRC Press.
- Giusti, M.M., and Wrolstad, R.E. (2001). Characterization and measurement with UV-Visible spectroscopy. In R. E. Wrolstad, S. J. Schwartz (Eds.), *Current protocols in food analytical chemistry* (pp. 1-13). New York, NY: John Wiley and Sons.
- Gök, S. (2017). *Adana ilinde satışı sunulan şalgam sularının kalite özelliklerinin ve Türk Gıda Kodeksine uygunluğunun belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Güven, N., Yetim, H., ve Cankurt, H. (2019). Siyah havuç ve peyniraltı suyu kullanılarak üretilen tuzu azaltılmış şalgam suyunun fizikokimyasal ve duyuşal özellikleri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 15, 599-610.
- Hunter, R.S., and Harold, R.W. (1987). Scales for the measurement of color difference. In R. S. Hunter, R. W. Harold (Ed.), *The measurement of appearance*, 2nd ed. (pp. 162-195). Toronto: John Wiley and Sons.

- Jamnik, P., Mahnic, N., Mrak, A., Pogacnik, L., Jersek, B., Niccolai, A., Masten Rutar, J., Ogrinc, N., Dusak, L., Ferjancic, B., Korosec, M., Cerar, A., Lazar, B., Lovse, U., Pungert, T., Fabjan, P., and Poklar Ulrih, N. (2022). Fermented biomass of *Arthrospira platensis* as a potential food ingredient. *Antioxidants*, 11(2), 216.
- Kafkaskıray, E.S. (2020). *Şalgam suyu fermantasyon sürecinin mikrobiyal profilinin moleküler yöntemlerle belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kahve, H.I., Akbulut, M., and Coklar, H. (2022). Identification and technological characterization of endogenous yeast isolated from fermented carrot juice, shalgam. *LWT-Food Science and Technology*, 154, 112823.
- Mujdeci, G.N., Tanguler, H., Macit, H., and Kabak, B. (2023). Effect of three different preservatives on the microbiota of Shalgam, a traditional lactic acid fermented beverage. *Foods*, 12, 4075.
- Nielsen, S. S. (2017). Sodium determination using ion selective electrodes, Mohr titration and test strips. In S. S. Nielsen (Ed.), *Food analysis laboratory manual, 3rd ed.* (pp. 75-85). Switzerland: Springer Nature.
- Ozturk, E., Alpas, H., and Arici, M. (2024). Effect of the high hydrostatic pressure process on the microbial and physicochemical quality of shalgam. *ACS Omega*, 9, 10400-10414.
- Özçelik, M. M., Duman, B., ve Özkan, G. (2022). Organik pekmezlerden jeli şeker üretimi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(2), 371-379.
- Özdemir, L., ve Acar Büyükpehlivan, G. (2022). Dijital fotoğraflılıkta ISO değeri değişiminin renk evrenleri ve delta E (ΔE) değerleri üzerine etkisinin belirlenmesi. *Journal of History School*, 15(56), 685-703.
- Özer, N., ve Çoksöyler, F. N. (2015). Şalgam suyunun bazı kimyasal ve mikrobiyolojik özellikleri. *GIDA*, 40(1), 31-38.
- Öztürk, O. (2009). *Adana piyasasındaki şalgam sularının bileşimleri üzerine bir araştırma*. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Öztürk, H. İ., Buzrul, S., Bilge, G., and Yurdakul, M. (2024). Pulsed electric field for shalgam juice: effects on fermentation, shelf-life, and sensory quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104, 1784-1792.
- Öztürk, S., Bağder Elmacı, S., and Özçelik, F. (2023). Effect of fermentation processes on phenolic content and antioxidant activity during production of black carrot vinegar. *GIDA*, 48(1), 25-37.
- Ribéreau-Gayon, P., Glories, Y., Maujean, A., and Dubourdieu, D. (2006). *Handbook of enology, Volume 2: The chemistry of wine-stabilization and treatments* (2nd ed.). West Sussex, England: John Wiley and Sons Ltd.
- Rodríguez, H., Curiel, J.A., Landete, J.M., de las Rivas, B., de Felipe, F.L, Gómez-Cordovés, C., and Mañcheno, J.M., Muñoz, R. (2009). Food phenolics and lactic acid bacteria. *International Journal of Food Microbiology*, 132(2-3), 79-90.
- Şalgam-Der. (2020). Türkiye Tohumcular Birliği (TÜRKTÖB): <https://www.turktob.org.tr/en/tescillenen-adana-salgami-ihracati-artti/28075> (Erişim tarihi: 28.12.2022).
- Tangüler, H. (2021). The effect of using different size purple carrots and *Lactobacillus plantarum* on the properties of fermented shalgam (şalgam). *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 9(10), 1759-1766.
- Tangüler, H., ve Ağırman, B. (2020). Şalgam suyu üretimi. İç O. Erkmén, H. Erten, H. Sağlam (Editörler), *Fermente ürünler teknolojisi ve mikrobiyolojisi* (s. 511-530). Ankara, Nobel Akademik Yayıncılık.
- Tanguler, H., Cankaya, A., Agcam, E., and Uslu, H. (2021). Effect of temperature and production method on some quality parameters of fermented carrot juice (shalgam). *Food Bioscience*, 41, 100973.
- Tanguler, H., and Erten, H. (2012). Chemical and microbiological characteristics of shalgam (şalgam): a traditional Turkish lactic acid fermented beverage. *Journal of Food Quality*, 35(4), 298-306.
- TSE (2016). TS 11149: 2003, T3: Nisan 2016 Şalgam Suyu Standardı. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.
- Ulu, G. (2019). *Fermente şalgam içeceğinin pastörizasyonu ve raf ömrünün uzatılmasında ultraviyole teknolojisinin kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bolu.
- Walusansa, A., Nakavuma, J. L., Asiimwe, S., Ssenku, J. E., Aruhomukama, D., Sekulima, T., Kafeero, H. M., Anywar, G., Katuura, E., Nabatanzi, A., Musisi, N. L., Tugume, A. K., and Kakudidi, E. K. (2022). Medically important bacteria isolated from commercial herbal medicines in Kampala city indicate the need to enhance safety frameworks. *Scientific Reports*, 12(1), 16647.
- Yanardağ Karabulut, Ş., ve Bulut, S. (2024). Glutensiz şalgam suyu üretimi ve TS11149 Şalgam Suyu Standardına uygunluğunun araştırılması. *GIDA*, 49(2), 269-283.

Peyniraltı Suyunun Kompostlaştırmada Karbon/Azot Oranına Etkisinin İncelenmesi

Cem ŞAHİN¹, Nurdan Gamze TURAN^{2*}

Öz

Peyniraltı suyu, peynir üretiminden kaynaklanan ve süt endüstrisindeki en kontamine atıksudur. Son yıllarda, peyniraltı suyunun farklı kullanım amaçları üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada, kümes hayvanları atıklarının kompostlaştırılmasında peyniraltı suyunun karbon/azot (C/N) oranı üzerine etkisi incelenmiştir. Kümes hayvanı atıkları reaktör (in-vessel) kompostlaştırma sistemlerine yerleştirilmiş ve %1, %3 ve %5 oranlarında peyniraltı suyu ilave edilerek, peyniraltı suyu ilave edilmemiş kontrol reaktörü ile proses süresince toplam organik karbon (TOC) ve toplam azot (TN) içerikleri haftalık olarak izlenmiştir. Kompostlaştırma süreci başlangıcında, kontrol reaktöründe C/N oranı 14.82 olarak belirlenmiştir. Kümes hayvanı atıklarına peyniraltı suyu ilavesi C/N oranının artışı sağlanmış ve proses verimini artırmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kompostlaştırma, Kümes hayvanı atığı, Peyniraltı suyu, C/N oranı.

Investigation of the Effect of Whey on Carbon/Nitrogen Ratio in Composting

Abstract

Whey is the most contaminated wastewater in the dairy industry, originating from cheese production. In recent years, studies on different uses of whey have been concentrated. In this study, the effect of whey on the carbon/nitrogen (C/N) ratio in the composting of poultry waste was examined. Poultry wastes were placed in reactor (in-vessel) composting systems and whey was added at the rates of 1%, 3% and 5%, and the total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) contents were determined weekly during the process with the control reactor without added whey. was observed as. At the beginning of the composting process, the C/N ratio was determined as 14.82 in the control reactor. Addition of whey to poultry waste increased the C/N ratio and increased the process efficiency.

Keywords: Composting, Poultry waste, Whey, C/N ratio.

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, cemsahin1907@yahoo.com

²Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, gturan@omu.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 25.05.2024

Kabul/Accepted: 21.06.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Giriş

Organik atıklar genellikle anaerobik çürütme, kompostlama, termal yöntemler ve düzenli depolama ile bertaraf edilmektedir. Bunlar arasında kompostlaştırma, düşük yatırım ve işletme maliyetleri, sosyal ve çevresel faydaların fazla olması ve pazarlanabilir nihai ürün oluşturması nedeniyle tercih edilmektedir. Kompostlama, organik atıkları bitki büyümesi için substrat ve besin kaynağı olarak kullanılabilen stabil ve güvenli bir ürüne dönüştüren biyokimyasal bir işlemdir (Bayındır ve ark., 2022). Olgunlaşma süreci, yüksek kaliteli kompost üretmek için kritik öneme sahiptir. Olgunluk indeksi, hammaddelerin ayrışma derecesi ve kompostlama işleminin tamamlanması için kullanılan bir değerlendirme prosedürüdür (Wang ve ark., 2017). Üreticiye ve kullanıcıya en büyük güvenceyi sağlayan spesifik testleri içermektedir. Kompostun olgunlaşması için bu testlerden iki veya daha fazlasını sağlaması gerekmektedir. Bu test sonuçlarına göre kompostlar çok olgun, olgun ve olgunlaşmamış olarak sınıflandırılmaktadır. Olgun kompost bitkiler için faydalı iken, olgunlaşmamış kompost yüksek konsantrasyonlarda uçucu yağ asitleri, serbest amonyak veya diğer toksik bileşikler içermesi nedeniyle tohum çimlenmesini, kök ve fide büyümesini engelleyebilmekte ve koku yayabilmektedir. Ayrıca olgunlaşmamış kompost depolama, nakliye ve kullanım sırasında sorunlara neden olabilir (Lu ve ark., 2018; Shan ve ark., 2021)

Hammaddelerin karbon (C) ve azot (N) içerikleri kompostlama sürecini ve son kompostun kalitesini etkilemektedir. Kompostlama sürecinin ana aktörleri olan mikroorganizmalar, protein üretimi ve hücre üreme için azota, enerji ihtiyaçları ve büyüme için ise karbona ihtiyaç duyarlar (Wang ve ark., 2022). Genel olarak mikroorganizmalar ağırlıkça birim azot başına 10 ila 15 birim karbona sahiptir. Ancak mikroorganizmalar solunum yoluyla sürekli olarak karbon kaybederler. Mikroorganizmalar, CO₂ olarak kaybettikleri karbonu geri kazanmak için azottan yaklaşık 25 kat daha fazla karbon kaynağı tüketmek zorundadır. Bu nedenle kompostlama işleminin başlangıcında kompostlaştırılacak hammaddelerin seçimi ve karıştırılması sırasında karbon ve azotun uygun oranlarda tutulması önemlidir. Sürecin başında 20/1 ila 60/1 C/N oranıyla başarılı kompostlama yapılabileceği belirtilmektedir. Ancak, 20/1-40/1 arasındaki C/N oranı ideal olarak kabul edilmektedir (Rynk ve Schwarz, 2022). 20/1'in altındaki C/N değerlerinde sürecin başlangıcındaki toplam azot içeriğinin neredeyse yarısı kaybolmaktadır ve amonyak mikrobiyal aktiviteyi engelleyebilmektedir (Wang ve Zeng, 2018). Azot eksikliği nedeniyle C/N oranı 40/1'in üzerinde olduğunda hücre üreme yavaşlamaktadır. Proses başlangıcındaki yüksek C/N oranı kompostlama verimliliğini azaltmakta ve süreç yönetimini karmaşıktırmaktadır. Hemen hemen tüm hammaddelerdeki azot tamamen biyolojik olarak parçalanabilirken, lignin içeren karbon bileşikler düşük biyolojik olarak parçalanabilirliğe sahiptir (Sanchez-Monedero ve ark., 2018). Hammaddelerin C/N oranını ayarlamak için katkı maddeleri, hacim artırıcılar ve mikrobiyal eklemeler gibi

uygulamalar yapılmaktadır. Böylece proses verimliliği ve kompost kalitesi artırılmaktadır (Manu ve ark., 2021; Zhou ve ark., 2022).

Peyniraltı suyu, (PAS), peynir üretiminden kaynaklanan, besin açısından zengin yeşil/sarı renkte bir sıvıdır (Ferraz ve ark., 2021). Peyniraltı suyunun içeriği sütün kalitesine, dolayısıyla hayvanın türüne, laktasyon evresine ve sağlık durumuna, tükettiği yemin türüne göre değişmektedir (Soltani ve ark., 2022). Peynirin türü ne olursa olsun, peyniraltı suyu süt endüstrisindeki en kontamine atık olarak kabul edilmekte, önemli çevresel etkilere neden olabilmektedir (Yadav ve ark., 2015).

Bu çalışmada, kümes hayvanları atıklarının kompostlaştırılmasında katkı maddesi olarak peyniraltı suyu kullanımının C/N oranı üzerine etkisi araştırılmıştır. Farklı oranlarda peyniraltı suyu ilave edilen kompostlaştırma reaktörleri ile peyniraltı suyu içermeyen kontrol kompostlaştırma reaktörü oluşturulmuş ve proses süresince TOC ve TN içerikleri incelenmiştir. Elde edilen verilere göre, peyniraltı suyunun C/N oranının proses verimine ve kompost kalitesine etkisi değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada kullanılan kümes hayvanı atığı Ernur Tavukçuluk A.Ş. (Kavak/Samsun), peyniraltı suyu OTAT A.Ş. (Havza/Samsun), pirinç kabuğu ise Şahin Pirinç San. ve Tic. A.Ş. (Bafra/Samsun)'den temin edilmiştir. Peyniraltı suyunun karakteristiği Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Peyniraltı suyunun karakteristikleri

Parametreler	Değer
pH	5,34
Nem İçeriği (%)	92,90
Elektriksel İletkenlik (mS/cm)	8,71
TOC	27,62
TN	1,31
NH ₄ ⁺ -N	258,71
NO ₃ ⁻ -N	9,18
C/N	21,07

Kompostlaştırma denemeleri in-vessel olarak tasarlanan 4 adet 30 L'lik havalandırılmalı reaktörlerde gerçekleştirilmiştir. Tüm reaktörlerde hacim artırıcı ajan olarak %5 oranında pirinç kabuğu kullanılmıştır. Kontrol reaktörü peyniraltı suyu içermeyen kümes hayvanı atığından

oluşturulmuştur. Diğer reaktörlere %1, %3 ve %5 oranlarında peyniraltı suyu ilave edilmiştir. Reaktörlerin içeriği Tablo 2’de verilmiştir.

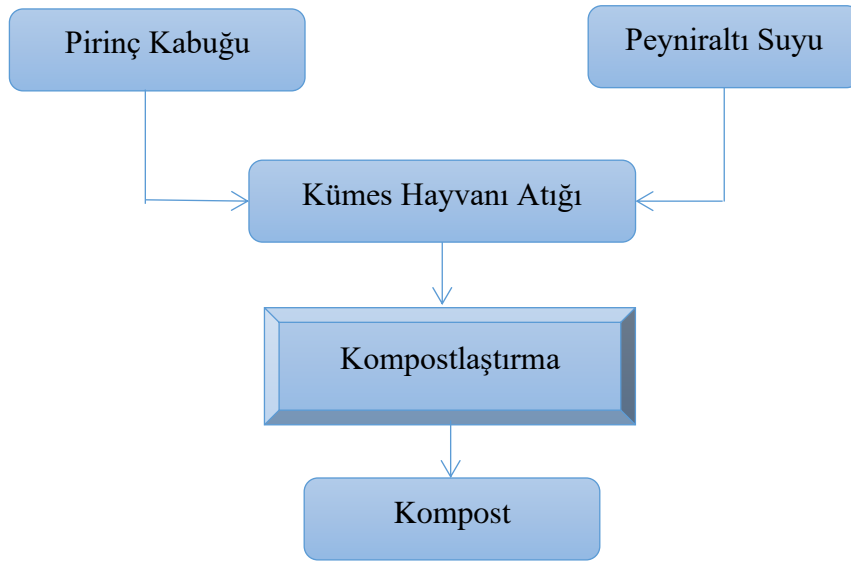
Tablo 2. Reaktörlerin içeriği

Reaktör Adı	Reaktör İçeriği
%0 PAS	%95 Kümes Hayvanı Atığı + %5 Pirinç Kabuğu
%1 PAS	%94 Kümes Hayvanı Atığı + %5 Pirinç Kabuğu + %1 Peyniraltı Suyu
%3 PAS	%92 Kümes Hayvanı Atığı + %5 Pirinç Kabuğu + %3 Peyniraltı Suyu
%5 PAS	%90 Kümes Hayvanı Atığı + %5 Pirinç Kabuğu + %5 Peyniraltı Suyu

Çalışmada kullanılan akış şeması Şekil 1’de sunulmuştur. Tüm reaktörlere proses süresince eşit şartlar uygulanmıştır. Reaktörlerden haftalık olarak numuneler alınarak, 15 hafta süresince TN ve TOC içerikleri analiz edilmiştir. TN analizi, kurutulmuş kompost numunesinin parçalanarak konsantre H₂SO₄ ile sindirime tabi tutulması sonucunda analitik test kitleri yardımıyla spektrofotometrik olarak ölçülmüştür. TOC analizi ise, kurutulmuş kompost numunesinin 550 °C’de 2 saat kül fırınında yakılması sonucu kül içeriğinden hesaplanmıştır. Kül içeriği ve TOC içeriği formülleri sırasıyla Denklem (1) ve (2)’de verilmiştir.

$$\text{Kül İçeriği (\%)} = (A-B)/(A) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{TOC İçeriği (\%)} = (100 - \% \text{ Kül İçeriği}) / 1.8 \quad (2)$$



Şekil 1. Çalışmada kullanılan akış şeması

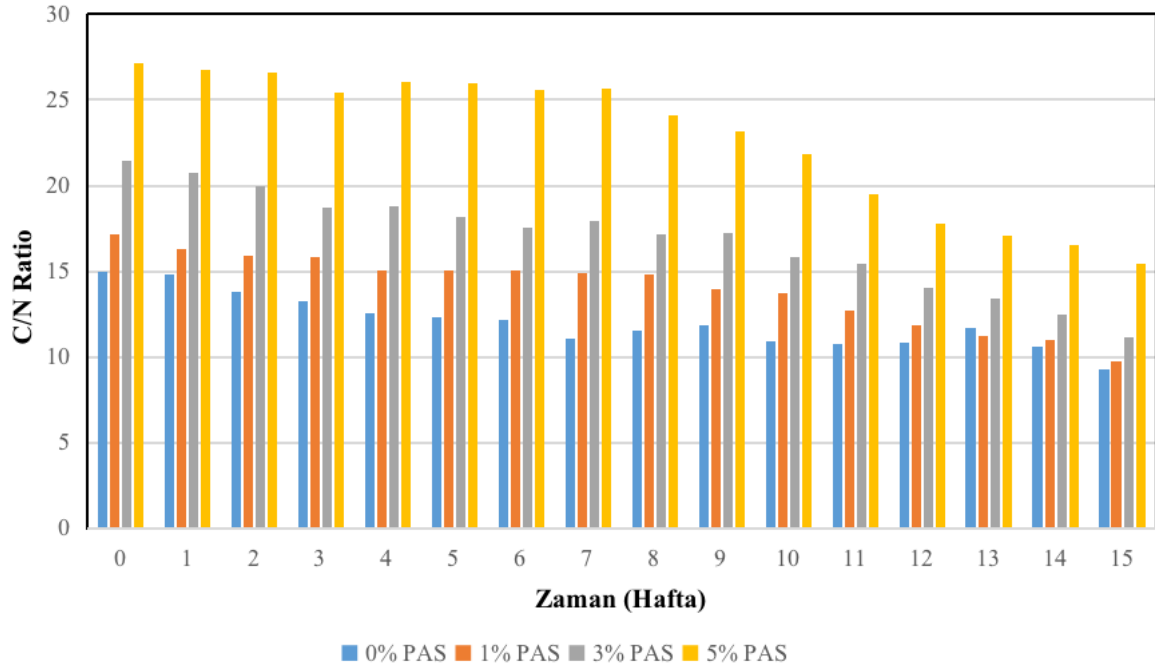
3. Bulgular ve Tartışma

Kompostlama prosesinde mikroorganizmalar için hammadde ve enerji kaynakları suda çözünebilir organik maddelerdir. Organik maddelerin sudaki çözünürlüğü, organik maddenin dönüşüm derecesine ve malzemelerin stabilitesine bağlıdır (Loow ve ark., 2017; Ravindran vd., 2022; Yu vd., 2019). Karbon, organik maddeyi oluşturan moleküllerin omurgasıdır (Stehouwer ve ark., 2021). Mikroorganizma hücresinin yapısı ve çeşitli organik moleküllerin sentezi için karbon gereklidir. Ayrıca karbon, mikroorganizmaların kuru kütlelerinin yaklaşık %50'sini oluşturmaktadır. Kompostlama işlemi sırasında metabolik aktivite azaldıkça karbon içeriği ve CO₂ oluşum hızı azalmaktadır (Epstein, 1997; Aydın Temel ve ark., 2023). Karbon içeren ayrışma gazları karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve karbon monoksittir (CO). Kompostlama sırasında karbon kaybı, oluşan gazlardan ve organik maddenin mineralizasyonundan kaynaklanmaktadır (Cui ve ark., 2016; Said-Pullicino ve ark., 2007). Çalışmada, tüm reaktörlerde işlem sırasında TOC değerleri düşmüştür. Proses sonunda TOC değeri kontrol reaktöründe %11,22 olarak belirlenmiştir. Peyniraltı suyu içeren reaktörlerde ise TOC değerleri %14,41-22,74 arasında gözlenmiştir. Peyniraltı suyu miktarının artmasıyla TOC değerinin arttığı görülmüştür. Olgun kompost için proses sonunda TOC değerinin %8-35 arasında olması önerilmektedir (Yılmaz ve ark., 2022). Tüm reaktörlerden elde edilen kompostların TOC değerleri önerilen aralıkta bulunmuştur. TOC kayıpları kontrol reaktörlerinde %75,95 olarak gerçekleşmiştir. Peyniraltı suyunun eklenmesiyle TOC kayıpları azalmıştır. En düşük TOC kayıpları %5 peyniraltı suyu içeren reaktörde %63,33 oranında elde edilmiştir. Farklı çalışmalarda, kompostlaştırma prosesindeki başlangıç değerine göre %34-77 oranında TOC kaybı gerçekleştiği rapor edilmiştir (Guo et al., 2012). Peyniraltı suyu ilavesi, kontrol reaktörü ile kıyaslandığında TOC kayıplarını az da olsa düşürmüştür.

Azot (N), biyokimyasal süreçlerde önemli bir besindir. Azot, organik maddede çoğunlukla organik azot, nitrat (NO₃⁻) ve amonyum (NH₄⁺) formlarında bulunmaktadır. Azotun nitrat ve amonyum formları suda çözünebildiği ve mikroorganizmalar ve bitkiler tarafından doğrudan kullanılabilirdiği için yararlı azot formları olarak değerlendirilmektedir. Kompostlama sırasında azotun dönüşümü sonucu oluşan gaz emisyonları nedeniyle büyük miktarlarda azot (TN) kaybı oluşmaktadır (Lu ve ark., 2018; Liu ve ark., 2021). Azot kaybı, koku kirliliğine, ekipman korozyonuna, asit yağmuruna ve atmosferik nitrojen artışına neden olur (Aydın Temel, 2023). Aynı zamanda nihai ürünün tarımsal kalitesini de düşürmektedir (Cáceres ve ark., 2018; ; Shan ve ark., 2021; Wang ve ark., 2017). Çalışmada, kümes hayvanları atıklarına peyniraltı suyu ilave edildiğinde toplam azot içeriği azalma göstermiştir. Peyniraltı suyunun ilavesi mikroorganizma faaliyetlerini arttırmış ve kompostlaştırma prosesi süresince amonyak (NH₃-N) oluşumunu önemli ölçüde önlemiştir. Azot kaybı, peyniraltı suyu içermeyen kontrol reaktöründe %61,59 olarak gerçekleşmiştir. Peyniraltı suyu

ilavesinin kompostlaştırma prosesinde azot kayıplarını azalttığı gözlenmiştir. Ayrıca peyniraltı suyu miktarının artmasıyla azot kayıpları da azalmıştır. En düşük azot kaybı %5 peyniraltı suyu içeren sistemden elde edilen kompostta elde edilmiştir. %5 peyniraltı suyu ilave edilen reaktörde azot kaybı, kontrol reaktörüne kıyasla %40,51 azalarak %36,64'e düşmüştür. Yapılan çalışmalar farklı materyallerle gerçekleştirilen kompostlaştırma prosesleri süresince %21-77% oranında azot kaybı gerçekleştiğini göstermiştir (Chan ve ark., 2016). Peynir altı suyu ilavesinin, literatürde kullanılan katkı materyallerine göre azot kaybını önemli miktarda gözlenmiştir.

Proses başlangıcında peyniraltı suyu içermeyen kontrol reaktöründe C/N oranı 14,82 olarak belirlenmiştir. C/N oranı proses başlangıcında %1 peyniraltı suyu ilave edilen reaktörde 16,32, %3 peyniraltı suyu ilave edilen reaktörde 20,77, %5 peyniraltı suyu ilave edilen reaktörde ise 26,73 olarak belirlenmiştir. C/N oranı 20'nin altında olduğunda, mikroorganizmalar hızla karbonu tüketmekte ve azot amonyak ve nitroz oksit gibi uçucu azot bileşiklerini oluşturan hücresel bileşiklere dönüşerek mikrobiyal aktivitenin engellenmesine ve komposttan azot kaybına neden olmaktadır (Cerde ve ark., 2018; Aycan Dümenci ve ark., 2021). Kompostlaştırma süreci süresince C/N oranı değişimi Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Peyniraltı suyunun kompostlaştırma süreci süresince değişimi

Kümes hayvanı atıklarına %3 ve %5 peynir altı suyu ilavesiyle başlangıç C/N oranının 20'yi aşabildiği görülmektedir. Bu reaktörlerde, C/N oranının proses başlangıcında optimum aralıkta olması, proses verimini arttırmış, TOC ve TN kayıplarının daha az gerçekleşmesini sağlamıştır. Tüm reaktörlerde proses sırasında C/N oranı azalma göstermiştir. Bununla birlikte, peyniraltı suyu ilavesinin artmasıyla nihai kompostların C/N oranlarının arttığı görülmektedir. Tarımda

kullanılabilmesi için nihai kompostun 20/1'den az olması tavsiye edilmektedir (O'Neill ve Rynk, 2021; Rynk ve Schwarz, 2022; Wang ve Zeng, 2018). Çalışmada tüm reaktörlerde nihai C/N değerleri 20'nin altında bulunmuştur.

Elde edilen kompostların karakteristikleri Tablo 3'te verilmiştir. 05.03.2015 tarih ve 29286 sayılı Kompost Tebliği'ne göre elde edilen kompostların pH değeri 5.5-8.5 arasında, nem içeriği ise %30'dan küçük olmalıdır. Peyniraltı suyu içermeyen kontrol reaktörünün pH ve nem içeriği değeri Kompost Tebliği'nde verilen limit değerlerin üzerinde bulunmuştur. Ayrıca, Kompost Tebliği uyarınca elde edilen nihai kompostun C/N oranının 10-30 arasında olması istenmektedir. Peyniraltı suyu içermeyen kontrol reaktöründen ve %1 oranında peyniraltı suyu içeren reaktörden elde edilen kompostların C/N oranı, proses sonunda 10'un altında bulunmuştur (Resmi Gazete, 2015).

Tablo 3. Elde edilen kompostların karakteristikleri

Parametre	Değer			
	%0 PAS	%1 PAS	%3 PAS	%5 PAS
pH	8,59	7,86	7,12	7,45
Nem içeriği (%)	33,11	25,83	23,64	26,82
Elektriksel iletkenlik (mS/cm)	3,44	2,27	1,46	1,96
TN (%)	1,21	1,48	1,64	1,47
TOC (%)	11,22	14,41	18,33	22,74
C/N	9,27	9,74	11,18	15,47

4. Sonuçlar ve Öneriler

C/N oranı kompostlaştırma prosesini etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. Gerek kompostlaştırma prosesinin verimi, gerekse nihai kompost kalitesi açısından C/N oranının proses başlangıcında optimum aralığa ayarlanmasında çeşitli materyalle kullanılmaktadır. Bu çalışmada, kümes hayvanları atıklarının kompostlaştırılmasında peyniraltı suyunun C/N oranına etkisi araştırılmıştır. Peyniraltı suyu, kümes hayvanları atıklarının düşük C/N oranını dengeleyerek proses başlangıcındaki C/N oranının optimum aralığa getirilmesini sağlamıştır. Ayrıca, proses süresince peyniraltı suyu ilave edilen reaktörlerde TN ve TOC kayıplarının daha az gerçekleştiği görülmüştür. Sonuç olarak, peyniraltı suyu kümes hayvanları atıklarının kompostlaştırılmasında kompost kalitesini ve proses verimini artırıcı bir etki göstermiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Ondokuz Mayıs Üniversitesi'nin PYO.MUH.1904.23.012 nolu Bilimsel Araştırma Projesi ile desteklenmiştir.

Yazarların Katkısı

Çalışma Prof. Dr. Nurdan Gamze TURAN'ın danışmanlığında Doktora öğrencisi Cem ŞAHİN tarafından gerçekleştirilmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Aycan Dümenci, N., Cagcag Yolcu, O., Aydın Temel, F., Turan, N.G., 2021. Identifying the maturity of co-compost of olive mill waste and natural mineral materials: Modelling via ANN and multi-objective optimization. *Bioresour. Technol.* 338. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125516>
- Aydın Temel, F., 2023. Evaluation of the influence of rice husk amendment on compost quality in the composting of sewage sludge. *Bioresour. Technol.* 373, 128748. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128748>
- Aydın Temel, F., Cagcag Yolcu, O., Turan, N.G., 2023. Artificial intelligence and machine learning approaches in composting process: A review. *Bioresour. Technol.* 370, 128539. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128539>
- Bayındır, Y., Cagcag Yolcu, O., Aydın Temel, F., Turan, N.G., 2022. Evaluation of a cascade artificial neural network for modeling and optimization of process parameters in co-composting of cattle manure and municipal solid waste. *J. Environ. Manage.* 318, 115496. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115496>
- Cáceres, R., Malińska, K., Marfà, O., 2018. Nitrification within composting: A review. *Waste Manag.* 72, 119–137. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.049>
- Cerda, A., Artola, A., Font, X., Barrena, R., Gea, T., Sánchez, A., 2018. Composting of food wastes: Status and challenges. *Bioresour. Technol.* 248, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.133>
- Chan, M.T., Selvam, A., Wong, J.W.C., 2016. Reducing nitrogen loss and salinity during “struvite” food waste composting by zeolite amendment. *Bioresour. Technol.* 200, 838–844. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.093>
- Cui, E., Wu, Y., Zuo, Y., Chen, H., 2016. Effect of different biochars on antibiotic resistance genes and bacterial community during chicken manure composting. *Bioresour. Technol.* 203, 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.030>
- Epstein, E., 1997. *The Science of Composting*. CRC Press, Florida.

- Ferraz, A.D.N., Fuentes, L., de la Sovera, V., Bovio-Winkler, P., Eng, F., García, M., Etchebehere, C., 2021. Potentialities of biotechnological recovery of hydrogen and short- and medium-chain organic acids from the co-fermentation of cheese whey and Yerba Mate (*Ilex paraguariensis*) waste. *Ind. Crops Prod.* 171. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113897>
- Guo, R., Li, G., Jiang, T., Schuchardt, F., Chen, T., Zhao, Y., Shen, Y., 2012. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. *Bioresour. Technol.* 112, 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.099>
- Liu, T., Awasthi, S.K., Qin, S., Liu, H., Awasthi, M.K., Zhou, Y., Jiao, M., Pandey, A., Varjani, S., Zhang, Z., 2021. Conversion food waste and sawdust into compost employing black soldier fly larvae (diptera: Stratiomyidae) under the optimized condition. *Chemosphere* 272, 129931. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129931>
- Loow, Y.L., New, E.K., Yang, G.H., Ang, L.Y., Foo, L.Y.W., Wu, T.Y., 2017. Potential use of deep eutectic solvents to facilitate lignocellulosic biomass utilization and conversion. *Cellulose* 24, 3591–3618. <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1358-y>
- Lu, Y., Gu, W., Xu, P., Xie, K., Li, X., Sun, L., Wu, H., Shi, C., Wang, D., 2018. Effects of sulphur and *Thiobacillus thioparus* 1904 on nitrogen cycle genes during chicken manure aerobic composting. *Waste Manag.* 80, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.050>
- Manu, M.K., Li, D., Liwen, L., Jun, Z., Varjani, S., Wong, J.W.C., 2021. A review on nitrogen dynamics and mitigation strategies of food waste digestate composting. *Bioresour. Technol.* 334, 125032. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125032>
- Ravindran, B., Awasthi, M.K., Karmegam, N., Chang, S.W., Chaudhary, D.K., Selvam, A., Nguyen, D.D., Rahman Milon, A., Munuswamy-Ramanujam, G., 2022. Co-composting of food waste and swine manure augmenting biochar and salts: Nutrient dynamics, gaseous emissions and microbial activity. *Bioresour. Technol.* 344, 126300. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126300>
- Resmi Gazete, 2015. Kompost Tebliği, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Sayı: 29286.
- Rynk, R., Schwarz, M., 2022. Compost feedstocks, in: *The Composting Handbook: A How-to and Why Manual for Farm, Municipal, Institutional and Commercial Composters*. Elsevier, p. 935.
- Said-Pullicino, D., Erriquens, F.G., Gigliotti, G., 2007. Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity. *Bioresour. Technol.* 98, 1822–1831. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.06.018>
- Sanchez-Monedero, M.A., Cayuela, M.L., Roig, A., Jindo, K., Mondini, C., Bolan, N., 2018. Role of biochar as an additive in organic waste composting. *Bioresour. Technol.* 247, 1155–1164. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.193>
- Shan, G., Li, W., Gao, Y., Tan, W., Xi, B., 2021. Additives for reducing nitrogen loss during composting: A review. *J. Clean. Prod.* 307, 127308. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127308>
- Soltani, M., Saremnezhad, S., Faraji, A.R., Hayaloglu, A.A., 2022. Perspectives and recent innovations on white cheese produced by conventional methods or ultrafiltration technique. *Int. Dairy J.* 125, 105232. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105232>
- Stehouwer, R., Cooperband, L., Rynk, R., 2021. Compost characteristics and quality soils, in: *The Composting Handbook*. pp. 737–775.
- Wang, M., Awasthi, M.K., Wang, Q., Chen, H., Ren, X., Zhao, J., Li, R., Zhang, Z., 2017. Comparison of additives amendment for mitigation of greenhouse gases and ammonia emission during sewage sludge co-composting based on correlation analysis. *Bioresour. Technol.* 243, 520–527. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.158>
- Wang, S., Zeng, Y., 2018. Ammonia emission mitigation in food waste composting: A review. *Bioresour. Technol.* 248, 13–19. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.050>
- Wang, N., Ren, L., Zhang, J., Kumar Awasthi, M., Yan, B., Zhang, L., Wan, F., Luo, L., Huang, H., Zhao, K., 2022. Activities of functional enzymes involved in C, N, and P conversion and their stoichiometry during agricultural waste composting with biochar and biogas residue amendments. *Bioresour. Technol.* 345, 126489. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126489>
- Yadav, J.S.S., Yan, S., Pilli, S., Kumar, L., Tyagi, R.D., Surampalli, R.Y., 2015. Cheese whey: A potential resource to transform into bioprotein, functional/nutritional proteins and bioactive peptides. *Biotechnol. Adv.* 33, 756–774. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.07.002>
- Yılmaz, E.C., Aydın Temel, F., Cagcag Yolcu, O., Turan, N.G., 2022. Modeling and optimization of process parameters in co-composting of tea waste and food waste : Radial basis function neural networks and genetic algorithm. *Bioresour. Technol.* 363, 127910. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127910>
- Yu, H., Xie, B., Khan, R., Shen, G., 2019. The changes in carbon, nitrogen components and humic substances

during organic-inorganic aerobic co-composting. *Bioresour. Technol.* 271, 228–235. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.088>

Zhou, Y., Xiao, R., Klammsteiner, T., Kong, X., Yan, B., Mihai, F.C., Liu, T., Zhang, Z., Kumar Awasthi, M., 2022. Recent trends and advances in composting and vermicomposting technologies: A review. *Bioresour. Technol.* 360, 127591. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127591>

Sürdürülebilir Kalkınma için Mevcut Hidrolik Altyapılardan Enerji Geri Kazanımına Genel Bir Bakış

Ümmükülsüm ÖZEL AKDEMİR^{1*} , Andaç AKDEMİR² 

Öz

Avrupa Birliğinin 2050 yılına kadar sera gazı emisyonlarının sıfırlanması ve iklim-nötr kıtası haline getirilmesi hedefi Türkiye için de yenilenebilir ve temiz enerji teknolojilerinin kullanımına yönelik tercihleri arttırmıştır. Hidroelektrik, enerji depolama kaynağı olarak dünyadaki en önemli düşük karbon ayak izine sahip enerji kaynağı olması sebebi ile mevcut su endüstrisi alt yapılarından enerji geri kazanım potansiyeli ile ilgili çok fazla yer seçimine yönelik saha çalışması ve vaka çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, dünya üzerinde hidroelektrik üretimine ve hidroelektrik sınıflandırmasına yönelik veriler özetlenerek, küçük hidroelektrik santraller ana başlığı ile mevcut alt yapı sistemlerinden enerji geri kazanımını, iklim değişikliği bağlamında sürdürülebilir enerji yönetimi açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca potansiyel enerji geri kazanım alanlarına küçük hidroelektrik santrallerinin kurulmasına yönelik genel bir değerlendirme yapılmış ve enerji üretimi yapan bu santrallere ait örnekler derlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atıksu Uzaklaştırma Sistemleri, Enerji Geri Kazanımı, Hidroelektrik, İçme Suyu Temin Sistemleri, Sulama Sistemleri.

Overview of Energy Recovery from Existing Hydraulic Infrastructures for Sustainable Development

Abstract

The European Council's climate neutrality objectives by eliminating greenhouse gas emissions by 2050 have also increased Turkey's preferences for the use of renewable and clean energy technologies. Since hydropower, as an energy storage source, is the most important energy source with a low carbon footprint in the world, many location assessments and case studies have been carried out on the energy recovery potential from existing water industry infrastructures. In this study, data on hydropower generation and hydropower classification in the world are summarized, and the energy recovery from existing infrastructure systems under the main heading of small hydroelectric power plants is evaluated in terms of sustainable energy management in the context of climate change.

Keywords: Wastewater Disposal Systems, Energy Recovery, Hydropower, Water Supply Systems, Irrigation Systems.

¹Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Giresun, Türkiye, ummukulsum.akdemir@giresun.edu.tr

²Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, aakdemir@omu.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 05.06.2024

Kabul/Accepted: 05.09.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Giriş

Nüfus artışının doğrudan bir sonucu olarak, enerjinin büyük ölçüde fosil yakıtlardan sağlandığı sanayi devriminden bu yana dünya çapında enerji tüketimi %600 kadar artmıştır (Perez-Sanchez, 2017). Yenilenemez olmaları, çıkarılmalarında ve enerji üretiminde yüksek karbon ayak izi nedeni ile temiz enerji kaynağı olmaması gibi sınırlandırıcı etkenler sebebi ile fosil yakıtların yerine kullanılabilir yenilenebilir ve temiz kaynaklardan enerji elde etmek ve yeni teknolojilerin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir (Abbas ve ark., 2019).

Yenilenebilir enerji dünya çapında giderek yaygınlaşmasına rağmen, toplam nihai enerji tüketimi içindeki payı yalnızca ılımlı bir artış göstermektedir. 2018 yılı verilerine göre dünyada tahmini olarak toplam nihai enerji tüketiminin %79,9' unu fosil yakıtlar, %11'ini ise modern yenilenebilir enerji kaynakları oluşturmaktadır. Modern yenilenebilir enerjinin ise sadece %3,6'sı hidroelektrikken %4,3'ü yenilenebilir ısı enerjisidir (REN21, 2020). Ülkemizde ise 2024 yılı Mart ayı sonu itibari ile kaynaklara göre kurulu gücün %29,6'sı hidrolik, %23,2'si doğal gaz, %20,2'si kömür, %11,2'si rüzgâr, %11,7'si güneş, %1,6'sı jeotermal ve %2,5'i ise diğer kaynaklara dayanmaktadır (URL-1, 2024).

Avrupa Parlamentosu ve Konseyi'nin (EU) 2018/2001 Direktifinde, "Merkezi olmayan yenilenebilir enerji teknolojilerinin ve depolamanın ayrımcı olmayan koşullar altında ve altyapı yatırımlarının finansmanını engellemeden geliştirilmesine izin verilmesinin küçük ölçekli kuruluşların, halkın kabulünü artırmak ve yenilenebilir enerji projelerinin özellikle yerel düzeyde yaygınlaştırılmasını sağlamak açısından büyük fayda sağlayacağı" ve "enerji arzının yerel güvenliğinin artması, taşıma mesafelerinin kısılması ve enerji iletim kayıplarının azalmasını sağlarken böyle bir özerk yönetimin aynı zamanda gelir kaynakları oluşturacağı ve yerel olarak istihdam yaratılması ile toplumsal kalkınmayı ve uyumu da destekleyeceği" belirtilmiştir.

Ayrıca, 2019 tarihinde Avrupa komisyonu tarafından açıklanan Avrupa Birliği'nin yeni büyüme stratejisine göre, Avrupa'nın 2050 yılına kadar sera gazı emisyonlarının sıfırlandığı ve iklim-nötr kıtası haline getirilmesi hedeflemiş ve kabul edilen Avrupa İklim Yasası (Regulation (EU) 2021/1119) ile net sera gazı emisyonlarında 2030 yılına kadar 1990'a kıyasla %55 azalma sağlanması ara hedefi de belirtilmiştir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), küresel sıcaklığın 1,5 °C'nin altında kalmasını sağlamak için küresel hidroelektrik kapasitesinin 2050 yılına kadar iki katına çıkarılması çağrısında bulunmuştur. Yani önümüzdeki 30 yılda, son 100 yılda olduğu kadar, 1300 GW'a denk gelen hidroelektrik santrallerin devreye alınması gerekiyor (Ebrahimi, 2023).

Doğrudan CO₂ emisyonu olmayan, ancak rakipsiz enerji kazancı veya yüksek teknik kullanım ömrü boyunca kendini geri ödeyen hidroelektrik yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Hidroelektrik santrallerinde esas olarak inşaat ve bakım için gerekli malzemelerin elde

edilmesinden kaynaklanan sera gazlarına ilişkin eşdeğer CO₂ emisyonunu diğer enerji üretim türleriyle karşılaştırıldığında çok küçüktür.

Bu çalışmada, hidroelektrik enerji üretimine yönelik santrallerin mevcut analizi yapılarak alt yapı tesislerinde entegre yardımcı yapılarla enerjinin geri kazanımını sağlayan uygun maliyetli ve güvenilir küçük hidroelektrik santrallerinin uygulama alanlarına dair teknik detaylar ve örnek uygulamalara yer verilmiştir. Yapılan literatür araştırmasında mevcut sistemlerin çok uzun yıllardır dünya üzerinde uygulanmakta ve küçük ölçekten büyük ölçeğe yapılan uygulamaların ciddi bir kazanım sağladığı görülmektedir. Son yıllarda yaşanan enerji ve su krizi nedeni ile yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılmasının yanı sıra enerji verimliliği üzerinde ayrıca durulmaktadır. Hali hazırda mevcut su yapıları üzerinde enerji kazanımı ile ilgili örnekler varken Türkiye’ de içme suyu tesisleri üzerinde de bu tür uygulamalara yeni yer vermeye başlanmıştır. Çalışma bu hali ile mevcut uygulamaları derlediği için su sektöründen enerji eldesinde ülkemizde olan eksikleri görmek açısından bir örnek olacaktır.

2. Hidroelektriğe Genel Bir Bakış

Birçok gelişmiş ekonomide hidroelektrik üretim ağının varlığı 1960’lardan 1980’lere kadar uzanan büyük inşaat dalgasına dayanmaktadır. Dünyanın en eski elektrik üretimi 19. yy. sonlarında Amerika Birleşik Devletleri ve Birleşik Krallık ile başlamıştır. Asya ve Latin Amerika’daki yükselen ve gelişmekte olan ekonomiler 1975-1990 yılları arasında küresel hidroelektrikte büyüme paylarını arttırmıştır. 1990’dan itibaren bu değişim devam etmiş ve son 15 yılda HES’lerin %5’ini geliştirmekte olan ülkeler inşa etmiştir (IEA, 2021).

Günümüzde küresel olarak hidroelektrik filonun neredeyse %40’ ı (476 GW) en az 40 yaşında olup ortalama 32 yaşındadır. Bu hidroelektrik ağın en eskisine Kuzey Amerika sahipken en gencine Çin sahiptir (IEA, 2021).

REN21 (2022)’ in Küresel Durum Raporuna göre, küresel hidroelektrik piyasasının, 2021 yılında en az 26 GW’ lık yeni kapasite ilaveleri ile uzun vadeli eğilimler doğrultusunda ilerlemiş ve toplam küresel kurulu hidroelektrik kapasitesini yaklaşık 1197 GW’ a çıkarmıştır. Uluslararası Hidroelektrik Birliğinin (IHA) durum raporuna göre ise 2021 yılı kurulu hidroelektrik gücü 1360 GW olarak açıklanmıştır.

Pompaj depolamalı dahil en büyük 20 hidroelektrik üreticisinin ve dünyanın geri kalanının 2021 yılına ait hidroelektrik kurulu gücü Tablo 1’ de verilmektedir (IHA, 2022). Bölgelere göre 2021 yılına ait yeni kurulu hidroelektrik kapasitesi, Doğu Asya ve Pasifik 21.897 MW, Güney ve Merkez Asya 1961 MW, Kuzey ve Merkez Amerika 1156 MW, Avrupa 1087 MW, Afrika 182 MW ve Güney Amerika 172 MW olarak verilmiştir (IHA, 2022).

Tablo 1. Hidroelektrik üreticilerinin kurulu gücü (IHA, 2022)

Sıra	Ülke	Kurulu Güç (GW)	Sıra	Ülke	Kurulu Güç (GW)
1	Çin	391	12	İspanya	20,4
2	Brezilya	109,4	13	Vietnam	17,3
3	Birleşik Devletler	101,9	14	İsviçre	16,8
4	Kanada	82,3	15	İsveç	16,5
5	Rusya	55,7	16	Venezuela	15,4
6	Hindistan	51,4	17	Avusturya	14,7
7	Japonya	49,6	18	Meksika	12,6
8	Norveç	33,4	19	İran	12,2
9	Türkiye	31,5	20	Kolombiya	11,9
10	Fransa	25,5	21	Dünyanın geri kalanı	268,1
11	İtalya	22,6			
Toplam					1360

Çin, 2021’de kapasite ilavelerinde liderliği korurken, onu Kanada, Hindistan, Nepal, Lao, Türkiye, Endonezya, Norveç, Vietnam ve Brezilya izlemiştir (IHA, 2022). Devam eden bu eklemelere rağmen, hidroelektrikten küresel üretimin 2021’de tahmini %3,5 düşerek 4.218 TWh’ e gerilemesi, hidrolojik koşullardaki değişikliklerle, özellikle Amerika’daki ve Asya’nın birçok bölgesindeki başlıca üreticileri etkileyen önemli ve sürekli kuraklıklarla açıklanmaktadır (REN21, 2022). REN21 (2022) raporunda 2021’de üretimde en önemli düşüşleri yaşayan büyük hidroelektrik üreticilerinin Türkiye (%28.7), Brezilya (%9.1) ve ABD (%8.8) olduğu belirtilmiştir.

Birçok bölgede yaşanan ortalamanın altında yağış, üretimdeki bu düşüşe sebep olmuştur. Hidroelektrik üretim, Avrupa Birliği’nin tüm elektrik tüketiminin yaklaşık 1,5 katına eşdeğer olup hidroelektrik enerjisinin dünya çapında düşük karbonlu üretime devam eden önemli katkısını yansıtmaktadır (IHA, 2022).

Yüksek kurulum kapasitesine sahip hidroelektrik santrallerin çok fazla yer kaplaması ve iklim değişikliği ile yağışlı gün sayısının ve su kaynaklarının azaldığı bir dönemde farklı kaynakların tüm üretim seviyeleri (makro ve mikro ölçekli) dikkate alınarak, genel karbon ayak izini artırmayan sürdürülebilir stratejiler kullanımı yaygınlaşmaktadır. Enerji geri kazanımı ile ilgili yeni stratejiler çevresel ve ekonomik avantajlar sağlamaktadır (Perez-Sanchez ve ark., 2017).

2.1. Hidroelektrik Enerji Sistemlerinin Sınıflandırması

Hidroelektrik santrallerin boyutlarındaki büyük çeşitlilik, bu teknolojinin hem büyük merkezi hem de küçük ölçekli kentsel dağıtımli enerji modeli ihtiyaçlarına uyum sağlamasına olanak tanır. Hidroelektrik santrallerde (HES) debi ve net düşü ve türbinin potansiyel yük çıkışını belirler (Klein

ve Fox, 2022). HES' ler kuruluş şekillerine göre nehir tipi (biriktirmesiz), baraj tipi (rezervuarlı) ve pompaj depolamalı olmak üzere üç ana kategoride sınıflandırılır ve havzanın hidrolojisine ve topografyasına bağlı olarak çok küçükten çok büyük ölçeğe kadar değişiklik gösterirler. Ayrıca, genç ve az gelişmiş bir teknoloji olarak tanımlanan, mevcut tesisleri kullanan akış içi teknoloji adı verilen 4. bir kategori daha bulunmaktadır (Kumar, 2011).

Üzerinde bir fikir birliği olmasa da hidroelektrik projeleri kurulu güce göre; büyük-hidro (100 MW ve üzeri), orta-hidro (20-100 MW), küçük-hidro (1-20 MW), mini-hidro (100 kW-1 MW) (bağımsız, mini şebeke veya şebekeye bağlı olabilir), mikro-hidro (5 kW-100 kW, şebekeden uzak uzak bölgelerde küçük bir topluluk veya kırsal endüstri için güç sağlar) ve piko-hidro (birkaç yüz W-5 kW, genellikle şebekeden uzak bölgelerde kullanılır) olarak sınıflandırılır (IRENA, 2012). Başka bir tanımlamaya göre hidrogüç büyük (>300 MW), orta (baraj ve rezervuarlı 100-300 MW, nehir tipi 10-100 MW) ve küçük (1-10 MW) konvansiyonel grupta yer almaktadır (Pedraza, 2022).

Alternatif olarak, fiziksel ve teknik olarak proje tasarım özelliklerine göre sınıflandırılabilirler. Ancak, "küçük" ve "büyük" hidroelektrik için üzerinde mutabık kalınan bir sınıflandırma yoktur ve küçük hidroelektrik sistemler ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir (IRENA, 2012). Farklı ülkelerin KHES' ler için yapmış oldukları güç tanımlaması Tablo 2' de verilmiştir.

Büyük hidroelektrik santraller, topografya, hidroloji ve klimatolojinin hidroelektrik geri kazanıma izin verdiği gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde (Çin, Brezilya ve Güney Afrika vb.) ana enerji kaynağıdır (Perez-Sanchez ve ark., 2017).

Büyük hidroelektrik projelerinde, özel sektörün getiri beklentileriyle örtüşmeyebilecek uzun geliştirme dönemleri ile birlikte yüz milyonlarca ila milyarlarca dolarlık yatırım gerektirmeleri, uzun ve karmaşık izin süreçleri gibi düzenleyici zorluklar, yerel muhalefet ve sosyal kabul endişeleri proje riskini önemli ölçüde arttıran hususlar olarak sıralanabilir.

Ancak, elektrik üretimi için büyük ölçekli HES'lerin inşasına alternatif bir çözüm, çevre ve nüfus üzerinde nispeten mütevazı ve yerel etkileri olan mini ve mikro hidroelektrik santrallerinin kWh maliyeti genellikle büyük ölçekli hidroelektrik santrallere göre daha yüksektir. Ayrıca, HES'lerin hizmet süresi boyunca bazı sera gazları (çoğunlukla rezervuarlarda biyoenerjinin bozunması ile üretilen metan) salmasına rağmen, çoğu durumda fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan CO₂ ve diğer sera gazı emisyonlarından daha az olduğu söylenebilir (Pedraza, 2022).

Enerji üretiminde, fotovoltaiik enerji 35 gCO₂eq/kWh, dalga ve gel-git enerjisi 25-50 gCO₂eq/kWh karbon ayak izine sahipken nükleer enerji yaklaşık 5 gCO₂eq/kWh ile çok düşük bir değere sahiptir. Bu enerji üretim yöntemleri ile kıyaslamak açısından depolamalı HES'ler yaklaşık 10-30 gCO₂eq/kWh, nehir tipi HES'ler 5 gCO₂eq/kWh den daha az karbon ayak izine sahip olması hidroelektrik enerjisinin önemini göstermektedir (POST, 2006).

Küçük hidroelektrik sistemlerin (KHES) yaygınlaşması hem sera gazlarının azaltılmasına hem de uzak kırsal alanlarda veya tedarik noktalarından uzakta bulunan tüketim noktalarında elektrik hizmetinin kurulmasına katkıda bulunan Francis türbininin (orta düşümler için) geliştirilmesi sayesinde olmuştur (Perez-Sanchez ve ark., 2017). Dünyanın birçok yerinde, yapım kolaylıkları ve yerel ortamlara entegrasyonları nedeniyle KHES kullanımı artmaktadır (Casini, 2015). Kapasitesi 10 MW' ın altında olan HES' lerin, küresel HES kapasitesinin yaklaşık %10' unu temsil ettiği tahmin edilmektedir (Casini, 2015).

Tablo 2. Farklı ülkelere göre küçük hidrogüç tanımlaması (Kumar ve ark., 2011; Casini, 2015; Klein ve Fox, 2022)

Ülke	Kapasite (MW)
Brezilya	≤ 30
Kanada	< 50
Çin	≤ 50
Avrupa Birliği	≤ 20
Hindistan	≤ 25
Norveç	≤ 10
İsveç	$\leq 1,5$
Amerika Birleşik Devletleri	3-60
Filipinler	≤ 50
Endonezya	≤ 50
Avustralya	≤ 20
Vietnam	≤ 25
Kolombiya	≤ 20
Yeni Zelanda	≤ 50
Almanya	≤ 1
İtalya	≤ 3
Birleşik Krallık	≤ 5
Fransa	≤ 8

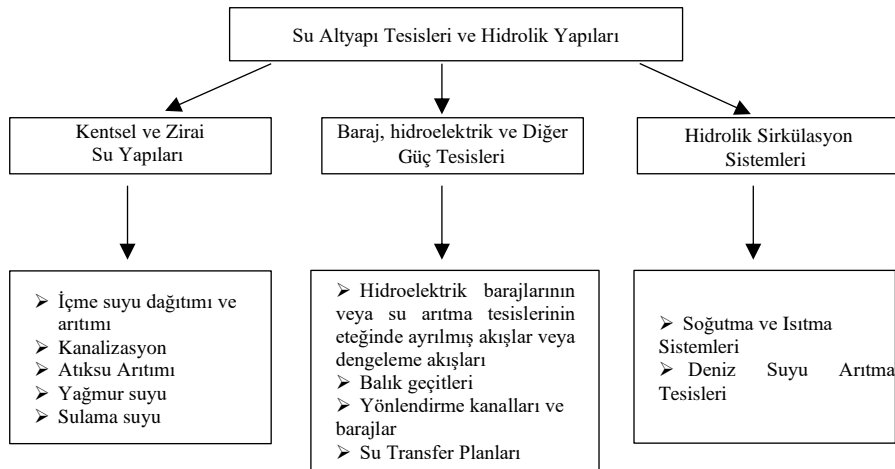
Dünya Küçük Hidroelektrik Kalkınma Raporu'na göre (UNIDO, ICSHP, 2022) kurulum kapasitesi 10 MW' ın altında olan KHES'lerin 2022 yılında 2019 yılına göre %1 arttığı, ayrıca KHES'e ilişkin veri eksikliğine bağlı olarak tahmini KHES potansiyelinin Norveç, Türkiye ve Filipinler'in de bulunduğu bazı ülkeler için elde edilen daha doğru veriler ile %3 oranında azaldığı belirtilmiştir.

2.2. Su Endüstrisinde Enerji Geri Kazanım Alanları

Hidroelektrik kapasitesini artırmaya yönelik daha düşük maliyetli fırsatlar arasında, işletmedeki HES'lerdeki teçhizatların yenilenmesi ve iyileştirilmesi, üretimin olmadığı barajlara enerji üretiminin eklenmesi ve inşa edilmiş su yollarının (kanallar) kullanımı, su tedarik ve arıtma sistemlerinin ve endüstriyel atık akışlarının güç kaynakları olarak kullanılması sıralanabilir. Choulot ve ark. (2012), mevcut altyapılarda enerji geri kazanımını sağlayan hidroelektrik santraller sayesinde, çok amaçlı su planları, iç denizcilik, atık su arıtma veya içme suyu temini gibi sektörlerde kaynağın sürdürülebilir yönetimi söz konusu olduğunda, su politikası üzerinde tartışılan birçok potansiyel soruna çözüm sunduğunu ve bu "uyuyan (gizli)" su potansiyelinin önemli bir pazar payına sahip olduğunu bildirmiştir.

Birleşik Devletler Federal Enerji Düzenleme Komisyonunun (FERC) 2013 tarihli Hidroelektrik Düzenleyici Verimlilik Yasası, iletim hattını öncelikli olarak elektrik üretimi için değil, "tarımsal, kentsel veya endüstriyel tüketim amacıyla suyun dağıtımını için çalıştırılan herhangi bir tünel, kanal, boru hattı, su kemeri, su kanalı, hendek veya benzeri insan yapımı su taşıma sistemi" olarak tanımlamaktadır (Johnson ve ark., 2017). Elektrik üretiminin öncelikli değil ikinci öncelik olduğu bu potansiyellere çok amaçlı planlar adı verilmektedir.

Vanalar (basınçlı akışta) veya hidrolik sıçramalar (açık kanallarda) tarafından dağıtılan gücü kullanmak amacıyla enerji geri kazanımı, su dağıtım şebekelerinde ve atıksu arıtma sistemlerinde büyük önem kazanmaktadır. Su sektörü ile ilgili bir altyapıda aşırı basınç yükünün olduğu yerlerde elektrik üretmek için iyi bir fırsat olabilir (Choulot ve ark., 2012; Perez-Sanchez ve ark., 2017). Su yapılarından enerji geri kazanımı yapılan hidrolik elemanların potansiyel yerleri Şekil 1' deki gibi analiz edilmiştir (Choulot ve ark. 2012; Purece ve Panaitescu, 2023).



Şekil 1. Yardımcı kurulum olarak çalışabilen küçük hidroelektrik santraller için su endüstri bileşenleri (Choulot ve ark. 2012; Purece ve Panaitescu, 2023)

2.2.1. İçme Suyu İletim Hatları ve Şebekeleri

Bir içme suyu şebekesi yüksekte bir su kaynağı, yükleme havuzu, cebri boru, rezervuar ve su temini şebekesi olmak üzere beş temel bileşenden oluşmaktadır (Choulot, 2012). Kaynağın konumu itibari ile iletim hatlarında basıncın 12,5 atm yi, şebeke borularında ise kat sayısı göz önünde bulundurulduğunda basıncın 8 atm yi geçmesi istenmeyeceği için basınç fazlası olması kaçınılmazdır.

Su kayıplarının önlenmesi için topografik yapının uygun olduğu yerlerde en yüksek statik basıncın 80 m'den 60 m düzeyine indirilmesi İçme Suyu Temin ve Dağıtım Sistemlerindeki Su Kayıplarının Kontrolü Yönetmeliği'nde alınacak önlemler arasında yer almaktadır (28994 sayılı Resmi Gazete). İletim hatlarında ve şebekelerde basıncı kırmak amacı ile kullanılan basınç kırıcı yapılar (maslaklar, basınç kırıcı ya da düzenleyici vanalar, hazneler vs.) yerine elektrik üretecek türbinlerin yapımı enerjinin geri kazanımını sağlamaktadır.

Su dağıtımı için dünya enerji tüketimi, küresel enerjinin yaklaşık %7' sini oluşturduğu düşünüldüğünde (Coelho ve Andrade-Campos, 2014), basınçlı hatlardan enerji eldesi sistemin kendi içerisindeki enerji ihtiyacını karşılamada kullanılabilir ve enerji verimliliği sağlanacaktır.

İçme suyu hidroelektrik sistemleri, barajlarda, savaklarda ve akarsu yatağı planlarında bulunan çok daha büyük hidroelektrik tesisleriyle karşılaştırıldığında, yüksek su kalitesi (uzun ömür ve az bakım gerektiren işleme olanak sağlar), çevresel etkilerinin asgari düzeyde ya da hiç olmaması ve nispeten iyi ekonomik sürdürülebilirlik gibi üstünlüklere sahiptir. Teknolojik ilerleme sayesinde, içme suyu hidroelektrik potansiyelinden yararlanmak, kapasite çeşitliliğinin en altında, yani mevcut hidrolik gücün 10 kW'ın altında bile ekonomik olarak giderek daha uygulanabilir hale gelmektedir (VOLTZ ve GRIZCHEK; 2019). Boru hatlarından hidroelektriği yakalayan türbinler, basınç tahliye vanalarının yerine veya basınç tahliye vanalarına paralel olarak yerleştirilebilir (PURECE ve PANAITESCU, 2023).

İçme suyu iletim hatlarında enerji geri kazanımı yapan farklı ülkelere ait santrallere ait örnekler Tablo 3' de yer almaktadır. Atina Su Temini ve Kanalizasyon Şirketi (EYDAP), Kirfi (760 kW-11,0 m³/s), Elikona (650 kW-11,0 m³/s), Kartala Kihairona (1200 kW-10,5 m³/s), Mandra (630 kW-10,0 m³/s), Evinos (820 kW-1,0 m³/s), Klidi (590kW-4,2 m³/s) olmak üzere altı adet KHES' den elektrik üretimi yapmaktadır (EYDAP, 2024). Ayrıca Lihtenştayn'da Schlosswald (Vaduz), Steia (Eschen), Maree (Vaduz), Stieg (Vaduz) Wissa Stä (Planken), Schaaner Quellen (Schaan), Wasserchöpfquellen (Triesenberg), Meierhof (Triesen) ve Kopfquellen (Balzers) içme suyu enerji santralleri olmak üzere dokuz adet tesis yılda toplam 2571 MWh elektrik üretmek 575 hanenin elektrik ihtiyacını karşılamaktadır (URL-2). Cape Town' da (Güney Afrika) bulunan tesisler içme suyu amaçlı artırılmamış su iletimi ya da arıtma tesisi üzerinde kurulu tesisler olup, ürettikleri enerjiyi şebekeye vermeyerek sadece kendi tesisleri için kullanmaktadır (GILKES, 2024).

Tablo 3. İçme suyu iletim hatları üzerinde elektrik üretimi yapan tesisler

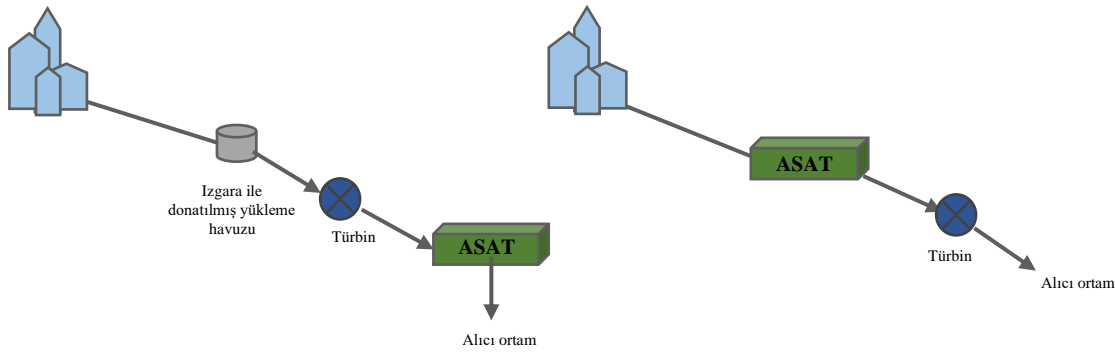
Tesis Adı	Ülke	Tasarım debisi (m ³ /s)	Net düşü (m)	Çıkış gücü (kW)	Kaynak
Mühlau	Avusturya	1,6	445	5750	SHAPES, 2007
Vienna Mauer	Avusturya	2,0	34	500	SHAPES, 2007
La Zour	İsviçre	0,3	217	465	SHAPES, 2007
Shreyerbach	Avusturya	0,02	391	63	SHAPES, 2007
Poggio Cuculo	İtalya	0,38	28	44	SHAPES, 2007
Ain Leghwaibe	Lübnan	0,9	30	168	Al Achkar R., 2019
Riein	İsviçre	15,3	545	15,3	Alpiq, 2024
Esterberg Gde. Garmisch-Partenkirchen	Almanya	44 -154	502	636 kW	ACPWMA, 2011
Troistorrents-Valais	İsviçre	35	242	75	ACPWMA, 2011
Steenbrass, Cape Town	Güney Afrika	0,656	34	358	GILKES, 2024
Blackheath, Cape Town,	Güney Afrika	1,52	56	711	GILKES, 2024
Faure, Cape Town,	Güney Afrika	1,458	130	1475	GILKES, 2024
SiBo, Lake Victoria	Kenya	0,4	27	360	GILKES, 2024

Ülkemizde de son 10 yılda içme suyu isale hatlarında enerji eldesine yönelik projeler ve yatırımlar (Tahiroğlu ve Diş, 2022; URL-3) Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği (30772 sayılı Resmî Gazete) ile hız kazanmış ve belediyelerce işletilen içme suyu ve atıksu iletim hatlarının üzerinde üretim yapacak tesisler önlisans ve lisans alma ile şirket kurma yükümlülüğünden muaf tutulmuştur. Bursa'da İçme ve Kanalizasyon İdaresi (BUSKİ) tarafından isale hatları üzerine D0 (2014 yılı), D13(2016 yılı) ve D12 su depolarına 3 adet Francis türbin, Erzurum' da isale hattı üzerine Cross Flow türbin (Tahiroğlu ve Diş, 2022; TEMSAN, 2023), İzmit Yuvacık içme suyu arıtma tesis girişi Francis türbin (TEMSAN, 2023) ile ülkemizde KHES'den elektrik üretimi yapan tesislerden bazılarıdır.

2.2.2. Atık Su İletim Hatları ve Arıtma Tesisleri

Temel amacı alıcı su kütlelerine güvenli bir şekilde deşarj edilebilecek bir atık su elde etmek olan Atık Su Arıtma Tesisleri (ASAT), bunu çevreyi korumak için mevcut en iyi teknolojilerle sürdürülebilir bir şekilde yapmak için uygun fiyatlı çözümlerle sağlarken, bu hedefler doğrultusunda yüksek enerji talebi için kaynak kullanımını optimize etmek verimliliğin artmasını ve yenilenebilir enerji üretimini sağlayacaktır (Llacer-Iglesias ve ark., 2021). Küçük tesisler bir ülkede arıtılan atık su hacminin çok yüksek bir yüzdesini temsil etmese de enerji tüketimindeki payları hayli yüksektir. Su temin ve atıksu arıtma sistemlerinde elektrik tüketiminin azaltılması son yıllarda artan ilgi konusu olmuştur. ASAT'larda hidroelektrik üretimi, sera gazı emisyonu oluşturmayan ve inşaat işlerini azaltan mevcut altyapıyla sinerji sunan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır (Bousquet ve ark., 2017).

Avrupa Küçük Hidroelektrik Birliği (ESHA) göre ASAT'ın deşarj noktasına yakın müsait en düşük kota inşası neticesinde elektrik üretimi için ASAT tesis girişinde ve endüstriyel tesislerin çıkışında olmak üzere iki olasılık söz konusudur. ASAT öncesi yerleşim alanının atık su şebekesi, ince bir ızgara ve ızgara temizleyici ile donatılmış bir yükleme havuzu dahil edilmeli ve hidro santral arıtma tesisine mümkün olduğunca yakın yerleştirilmelidir (Purece ve Panaitescu, 2023). ASAT sonrası ikinci olasılık ise, ASAT' dan çıkan arıtılmış su alıcı ortama deşarj edilmeden önce bir cebri boru aracılığıyla düşüyü maksimuma çıkarmak için ASAT'a yakın seçilen türbine (Şekil 2) yönlendirilir (Choulot, 2012). Farklı ülkelerde bu uygulamalara ait örnekler Tablo 4' de yer almaktadır.



Şekil 2. Atık su arıtma tesisi öncesi ve sonrası türbin yerleşimi

Atık su arıtma çıkışı, yeterli ve sabit su akışı nedeniyle genellikle türbin kurulumu için uygundur. Hidro türbinlerin seçimi için gerekli olan düşü ve akış gibi parametreler, ASAT sürecinin bir parçası olarak sürekli olarak izlendiği için türbin performansının izlenmesi nispeten kolay olabilir (Punys ve Jurevicius, 2022).

Tablo 4. Atık su sistemleri üzerinde geliştirilen örnek hidroelektrik santraller

Tesis Adı	Ülke	Türbin yeri	Türbin tipi	Kurulu güç (kW)	Düşü (m)	Tasarım debisi (m ³ /s)	Cebri boru uzunluğu (m)/ Çapı (mm)	Kaynak
Le Châble Profray	İsviçre	MEA	Pelton	350	449	0,1	2290/300	Bousquet ve ark., 2017; Llacer-Iglesias ve ark., 2021;
Chaux-de-Fonds	İsviçre	MAA	Pelton	1532	393	0,5	VY	Llacer-Iglesias ve ark., 2021;
Morgental, St. Gallen	İsviçre	MAA	Pelton	1350	190	0,84	4800/800	Bousquet ve ark., 2017
Grächen	İsviçre	MAA	Pelton	262	365	0,09	830/300	Bousquet ve ark., 2017

Tablo 4 (Devam)

Elsholt	İngiltere	MEA	Arşimet Burgu Türbini	2 × 110	8,2	2,6	2600	URL-4; Bousquet ve ark., 2017
Emmerich, Emmerich am Rhein	Almanya	MAA	Arşimet Burgu Türbini	13	3,8	0,4	1200	Bousquet ve ark., 2017; Llacer-Iglesias ve ark., 2021
Brussels-North, Brussels	Belçika	MAA	VY	640	VY	VY	VY	Llacer-Iglesias ve ark., 2021
La Asse, Nyon	İsviçre	MAA	TP	215	94,25	0,293	3515/600	Bousquet ve ark., 2017; Llacer-Iglesias ve ark., 2021; Choulot ve ark., 2012
Chartres Métropole, Mainvilliers	Fransa	MAA	VY	200	VY	0,8	VY	Llacer-Iglesias ve ark., 2021
As Samra I-Amman	Ürdün	MEA	Pelton	2 × 830	104	2 × 1,25	VY/1500	SHAPES, 2007; Bousquet ve ark., 2017; Llacer-Iglesias ve ark., 2021
As Samra II-Amman	Ürdün	MAA	Francis	2 × 807	42	2 × 2,3	2000/2000	SHAPES, 2007; Bousquet ve ark., 2017; Llacer-Iglesias ve ark., 2021
Ebswien-Vienna	Avusturya	MAA	Burgu türbin + Kaplan	400	5	6,5	VY	Llacer-Iglesias ve ark., 2021
Plobb-Seeefeld, Seefeld Zirl	Avusturya	MAA	VY	1192	625	0,25	VY	Llacer-Iglesias ve ark., 2021; Choulot ve ark., 2012
North Head, Sydney	Avustralya	MAA	Kaplan	4500	60	3,5	VY	Bousquet ve ark., 2017; Llacer-Iglesias ve ark., 2021; Choulot ve ark., 2012
Deer Island-Boston	US	MAA	Kaplan	2 × 1000	8,8	2 × 13,1	VY	Bousquet ve ark., 2017; Llacer-Iglesias ve ark., 2021;
Point Loma-San Diego	US	MAA	Francis	1350	27,4	7,6	7200/VY	Bousquet ve ark., 2017; Llacer-Iglesias ve ark., 2021;
Clarkson-Mississauga	Kanada	MAA	VY	225	5	VY	VY/VY	Llacer-Iglesias ve ark., 2021; Clarkson WWTP Annuall report, 2022

*Membra yönlü atık su, MEA- Mansap yönlü artılmış atık su, MAA, Türbin olarak pompa- TP, VY-Veri Yok

2.2.3. Açık Kanal Ağları ve Sulama Kanalları

Akarsular ve vadilerdeki küçük barajlarda, açık sulama kanallarında ve drenaj sistemlerinde farklı hidrolik yükleri veya yönlendirme planlarını kullanarak mikro hidroelektrik üretimi sağlanabilir (Perez-Sanchez ve ark., 2017). Bu tür hidroelektrik üretiminin gelişimi yakın zamana dayanıyor gibi görünmesine rağmen, Sanayi Devriminde makinaların çalıştırılmasına esas teşkil eden su çarklarının yıllar öncesinde tüm kıtalarda mevcut olması ve hala birçok ülkede çalışır halde (Birleşik Krallık, Fransa, İspanya, ABD, Afrika ve Asya'nın bir kısmı) bulunmaktadır (Perez-Sanchez ve ark., 2017). Gelişmekte olan ülkelerde bu projeler, şebeke genişletmenin olmadığı veya sürdürülemez olduğu düşünülen uzak bölgelerdeki insanların sosyo-ekonomik kalkınmasına halihazırda büyük katkı sağlamaktadır (Kumar ve Katoch, 2015).

Su döngüsünde enerji verimliliğinin artırılması için su temin sistemlerinin yanı sıra sulama ağları da oldukça önemlidir. Dünya çapında 3925 km³/yıl su tüketiminin, %69,53' ü sulamada, %18,70'i sanayide ve %11,77'si ise içme suyu sistemlerinde kullanılacak şekilde dağıtılırken (Perez-Sanchez ve ark., 2017), tarım sektöründeki yaklaşık %70 değerindeki bu su tüketimi bazı gelişmekte olan ülkelerde ortalama %95' e kadar çıkmaktadır (Barbon ve ark., 2023). Dolayısıyla sulama için tüketilen su miktarı kentsel sistemlere göre daha yüksek olduğundan, sulamanın modernizasyonu sadece yüksek teknoloji ve otomasyonla değil, aynı zamanda bu altyapının sürdürülebilirliğini sağlayacak su yönetimiyle de ilişkilendirilmelidir (Perez-Sanchez ve ark., 2017).

Sulanan yüzey alanının çok büyük olması nedeniyle (dünyada sulama tesisleri ile sulanması sağlanan yaklaşık 324×10⁶ ha alan mikro ve piko hidroelektrik kurulumunun incelenmesi, gereklidir. Türkiye'de sulama ile ilgili büyük su yatırımlarının 2022 yılı verilerine göre yıllık yaklaşık % 58,99'unu sulama için harcandığı (DSİ, 2022) İspanya' da ise tüm su temin sisteminin maliyetinin % 20'sini oluşturduğu (Perez-Sanchez ve ark., 2017) düşünüldüğünde enerji tüketimini azaltacak sistemlerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Yenilenebilir enerji üretiminin artırılması amacı ile Avrupa Birliği tarafından Akıllı Enerji Avrupa Programı aracılığıyla ortaklaşa finanse edilen RESTOR Hydro projesi (2012–2015), su değirmenlerini, çalışmayan hidroelektrik santrallerini, barajları ve sulama yapılarını tespit edip restore ederek oluşturduğu RESTOR Hydro haritasında 65.000 olası mikro-mini hidroelektrik santralının konumunu ve özelliklerini göstermiştir (Barbón ve ark., 2023).

Bazı ülkelere ait sulama ağları üzerinde geliştirilen küçük hidroelektrik santrallerine ait veriler Tablo 5' de verilmektedir.

Tablo 5. Mevcut sulama ağlarında geliştirilen bazı küçük hidroelektrik projeleri örnekleri ve özellikleri

Tesis Adı	Ülke	Türbin tipi	Kurulu güç (kW)	Düşü (m)	Tasarım debisi (m ³ /s)	Kanal (Tünel ya da boru) uzunluğu (m)	Kaynak
Armary	İsviçre	Pelton	68	105	0,08	VY	SHAPES, 2007, Kucukali, 2021
Marchafeldkanal	Avusturya	2 Kaplan	2	70	6,00	VY	SHAPES, 2007, Kucukali, 2021
Petiva	İtalya	3 Kaplan	6	875	18,50	VY	SHAPES, 2007, Kucukali, 2021
Esanta	İtalya	Kaplan	24	860	4,50	VY	SHAPES, 2007, Kucukali, 2021
Rino	İtalya	Pelton	2800	446	0,78		SHAPES, 2007, Kucukali, 2021
Astuwatt, Astudillo (Palencia)	İspanya	2 Kaplan	2x200	2,9	9,00	640	Alonso-Tristán ve ark., 2011
Rebolluelo, Rincón de Soto	İspanya	2 Kaplan	60,6	4,80	1,495	VY	Barbón ve ark., 2023
Gojou	Japonya	Francis	1100	24,0	5,40	670	Ueda, 2013
Asaka-soui	Japonya	Francis	2260	87,3	3,20	VY	Ueda, 2013
Nishime	Japonya	Francis	740	116,0	0,80	820	Ueda, 2013
Yasukawa	Japonya	Francis	640	21	4,00	400	Ueda, 2013
Kamigo	Japonya	Boru içi Türbin	640	12,7	6,50	1570	Ueda, 2013
Kawakoda	Japonya	Francis	720	19,0	5,00	160	Ueda, 2013
Shichika-yosui	Japonya	Boru içi Türbin	640	5,5	15,00	450	Ueda, 2013
Konomata	Japonya	Francis	960	60,3	2,00	2580	Ueda, 2013

Hidro türbinler sulama kanallarında derivasyon yapısı duvarına uygulanabileceği gibi yapının hemen yanına da inşa edilebilir. Ayrıca sifon türbinleri veya vidalı türbinler de mevcut birçok yapıda yer alabilir (Purece ve Panaitescu, 2023).

2.2.4. Yağmur Suyu Altyapı Sistemleri

Bir yüzeysel akış toplama sisteminin potansiyeli içme suyu şebekesinin potansiyeline benzerdir ancak su yoluyla türbine taşınan partiküller ve akış dalgalanmaları sorun teşkil etmektedir (Choulot, 2012). Yağmur suyu kalitesi sahanın topografyasına bağlı olarak değişen sediment boyutların kaba danelerden siltlere kadar sonsuz çeşitliliği ve birikme özellikleri, bir tutma çıkışının tasarımını zorlaştırmaktadır. Enerji üretim performansını azaltabilecek türbin erozyonu sorununu önlemek için enerji üretimi yapılacak yağmur sularının ve yüzey sularının temiz olması için elek girişi gibi işlemlerle büyük parçacıkların filtrelenerek türbin ve jeneratör bileşenlerine girmesi önlenmelidir (Kamal ve ark., 2017).

Yağmur suyu altyapısında bir mikro hidroelektrik sistemini doğru şekilde tasarlaması için düşük yüklü hidro, fırtına olayları sırasında yağış miktarı ve artırılmış suyun yağmur suyu bekletme

yerlerinde depolanması gibi önemli parametrelerin üzerinde durulması gerekmektedir (Kamal ve ark., 2014). Kamal ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada, fırtına olaylarından kaynaklanan akan su ile ilgili olarak küçük ölçekli hidroelektrik üretimini ve yağmur suyu tutma çıkışında düşük düşü uygulamasının olasılığını incelemiştir. Yağmur suyunun kalite ve miktar bakımından yakından yönetilmesi durumunda, yağmur suyu altyapısında küçük ölçekli kentsel hidroelektrik enerjinin uygulanması teknik olarak mümkün olduğunu, menfez türü ve tutma çıkışı gibi tasarım hususlarının yağmur suyu akışından üretilen enerjinin optimize edilmesi gerekliliklerini karşılaması gerektiğini vurgulamış ve dolayısıyla Malezya gibi bol yağış alan ülkelerde yeni bir yenilenebilir enerji kaynağı olabileceği belirtilmiştir.

2.2.5. Deniz Suyu Arıtma Tesisleri

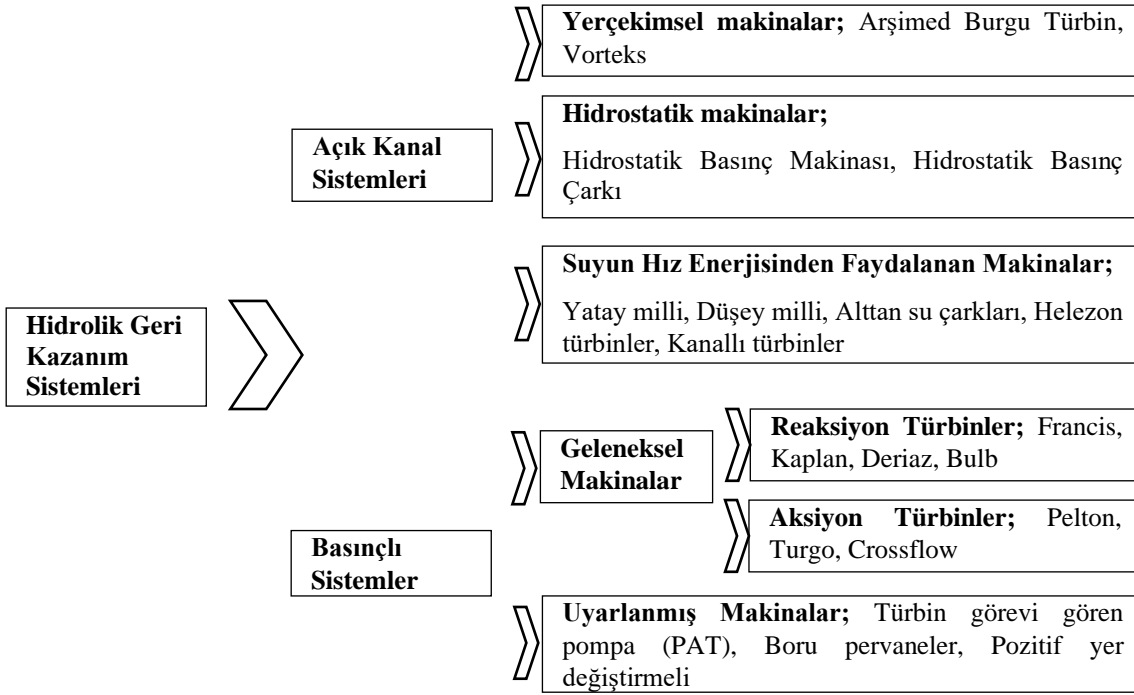
Basınç geciktirmeli osmoz veya osmotik güç prosesi, tuz konsantrasyonundaki farklılık nedeniyle tatlı suyun deniz suyuyla karışma eğiliminin neden olduğu bir hidrolik basınç potansiyeli olan doğal olarak oluşan osmoz kavramını kullanır (Kumar ve ark., 2011). Deniz suyu arıtma tesisleri yüksek basınç altında (40-80 bar) yarı geçirgen membranlar yoluyla çözünmüş tuzu sudan ayıran ters osmoz kullanır. Hala yüksek basınçta olan tuz içeren sıvı su kalıntısı, ilk sıkıştırma için kullanılan enerjinin bir kısmının geri kazanılması amacıyla bir türbinden geçirilebilir (Choulot ve ark., 2012). İspanya Blanes' de Tordera Deniz suyu arıtma tesisi ile içme suyu temini ve yeraltı suyu geri kazanımı esnasında 685 m net düşü, 0.107 m³/s debi ve 720x4 kW çıkış gücü ile elektrik üretimi yapılmaktadır (SHAPES ,2020).

2.2.6. Termal Güç Santralleri

Termal güç santrallerinde denizden santralin kondenser ünitesine pompalanan soğutma suyu potansiyel kaynaktır. Kondenser ünitesinden çıkan soğutma suyu, santralin özelliğine göre çapı 1 m'den fazla olan su çıkış borusu ile deniz seviyesinin üzerinde olan boşaltma kanalına yönlendirilir. Bu boşaltma kanalına bir türbin kurularak suyun denize geri gönderilmesi sağlanabilmektedir. Hidroelektrik üretimi, termik santraldeki fosil yakıt tüketiminin anında azalmasına yol açtığından, teorik olarak, hidroelektriğin hesaplanan spesifik maliyetleri, buhar türbininden elde edilen elektriğin nispeten yüksek spesifik üretim maliyetleriyle doğrudan karşılaştırılabilir (CEDRO, 2013). Polonya Skawina' da kurulu termal güç santrali buhar bloğu kondenserlerinin soğutulmasını ile deşarj edilen soğutma suyundan mekanik enerji geri kazanımı ile yılda 6,390,000 kWh elektrik üretim, kurulu gücü 1560 kW, net düşüsü 7.9 m ve tasarım debisi 23.3 m³/s santral ile sağlanmaktadır (SHAPES, 2020).

2.3. Kullanılan Türbinler

Bir türbin düşen sudan gelen enerjiyi dönen şaft gücüne dönüştürür ve güç çıkışı su basıncına bağlı olarak impuls ve reaksiyon/aksiyon (kinetik) olarak sınıflandırılabilir. İmpuls tipi genellikle su jetlerinden gelen kinetik enerjinin türbinde mekanik dönüş enerjisine dönüştürüldüğü kuyruk kanallarında çalışır. Reaksiyon türbinleri suyun momentumunun yönünü değiştirerek basıncı ve kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürür. Bu türbinler, enerjinin yerçekimi kinetiğinin aksine tamamen kinetik olduğu sıfır su basıncında çalışabilir (Thyer ve White, 2023).



Şekil 3. Enerji elde etmek için kullanılan hidrolik makinelerin sınıflandırılması (Perez-Sanchez ve ark., 2017)

100 kW'a (mikro hidro) kadar güce sahip sistemler arasında, kentsel ve bina ölçeğinde entegrasyon potansiyeli açısından özellikle cazip olan, boru içi hidroelektrik sistemleridir. Yerçekimi beslemeli ve basınçlı iletim ve dağıtım hatları ile atık su tahlieleri ve diğer boru taşıma sistemleri için tasarlanan bu özel mikro hidro sistemler, belediye su veya atık su sistemleri, endüstriyel su sistemleri veya sulama sistemlerine yerleştirilebilir (Casini, 2015).

Tablo 6. Türbin tipleri ve işletme aralığı (Coelho ve Andrade-Campos, 2014; Quaranta ve Revelli, 2015; Quaranta ve Revelli, 2016; Thyer ve White, 2023)

Türbin Tipi	Yük Aralığı		Verim (%)
	Düşük Yük (<10 m)	Orta Yük (10-50 m)	
İmpuls	Crossflow	Crossflow, Pelton, Turgo	80 70-90 87-91
Reaksiyon	Francis (radyal akış), Kaplan (eksenel akış, pervane)	Francis (radyal akış)	70-74 70
Su çarkı	Aşırı Vuruş (overshot) Göğüs Vuruşu (breastshot) Akarsu Çarkı (Undershot)		80-90 75
Diğerleri	Arşimet PAT hidrostatik split boru vortex	PAT Çapraz Borulu -CPT	86 (Düşük Yük) 85

PAT' lar kolayca bulunabildikleri, basit ve uygun maliyetli oldukları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, PAT' ların akış hızı sabit olmadığında orta ve yüksek debi değişimlerine izin vermez. Geleneksel türbinlere kıyasla en yüksek performansı daha düşüktür. Ancak maliyeti daha düşük olduğu için geri ödeme süresi daha kısadır.

3. Sonuçlar

Hidrolik enerji üretiminin yönetimine ilişkin ulusal ve uluslararası düzeyde yerel veya bölgesel ölçekte birçok örnekte elde edilen deneyimler sayesinde mevcut bir altyapıya entegre hidrolik santraller ile enerji geri kazanımı yöneticiler ve yatırımcılar için cazip hale gelmiştir. Bu küçük hidroelektrik potansiyel, ulusal enerji sistemine katkı açısından çok önemli olmasa da tüketicilerin elektrik talebindeki potansiyeli azaltma açısından önemlidir.

KHES ler mevcut alt yapıya entegre edildiği için gelişmeye açık çevre dostu bir pazar olduğunu söylemek mümkündür. Bu çok amaçlı programlar büyük arazi kullanımını azaltmakla birlikte hidrolojik dalgalanmalardan etkilenmeden enerji üretim maliyetini ve su sektörleri ile ilişkili çevresel etkileri azaltarak bir yeşil enerji girdisi sağlamada mükemmel bir fırsat sunar.

Su sektöründe mevcut enerji verimliliği ve enerji kazanımı sağlamaya yönelik olan bu temiz, yenilenebilir ve uygun fiyatlı sürdürülebilir enerji teknolojisi projeler ile Birleşmiş Milletler' in (UN) belirlediği 17 sürdürülebilir kalkınma hedefine (SDH) ulaşmada SDG 6 (temiz su ve sıhhi koşullar), Erişilebilir Temiz Enerji (SDG7), Sürdürülebilir Şehir ve Yaşam Alanları (SDH11) ve İklim Eylemi (SDG13) hedeflerinin kazanımı sağlanacaktır.

Bu bağlamda, yerel su sektörleri ve şebekeden sağlanacak enerji ile bireylerin enerji ayak izinin azaltılmasına katkı sağlanabileceği gibi minimum iletim ve işletim maliyetine sahip olan kentsel su temin sistemlerinde enerji geri kazanımı ile de pompaların enerji ihtiyaçları karşılanabilecektir. Borularda müsaade edilecek yük kayıplarının ve gelir getirmeyen su (kayıp-kaçak) oranının düşürülmesi, su tedarik çalışmasının enerji optimizasyonu sağlanacaktır.

Kentsel su ve çeşitli su alt yapı hizmetlerinden enerji eldesini kolaylaştıran yapıların iklim değişimi ile mücadelede etkili olacağı ve sürdürülebilir enerji yönetimi sayesinde su ve enerji tasarrufunu sağlayacağı unutulmamalıdır. Sonuçta var olan fakat kullanılmayan bir enerji geri kazanılmış olacaktır.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Abbas A.I., Qandil M.D., Al-Haddad M.R., Saravani M.S. ve Amano R.S. (2019). Utilization of Hydro-turbines in water treatment plants, *Journal of Energy Resources Technology*, 141 (6), 062011
- ACPWMA (2011). Common Guidelines for the Use of Small Hydropower in the Alpine Region,, Alpine Convention Platform Water Management in the Alps, AC11/B8/2
- Al Achkar R. (2019). Renewable Energy For Advancing Water-Energy Interlinkages For Sustainable Development *Lebanon Case Studies*, Expert Group Meeting on “Enhancing capacity building addressing Water and Energy interlinkages for Sustainable Development in the Arab Region, ESCWA-UNDESA, Beirut.
- Alonso-Tristán C., González-Pena D., Díez-Mediavilla M., Rodríguez-Amigo M., García-Calderón T.,(2011). Small hydropower plants in Spain: A case study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2729-2735
- Alpiq (2024). Swiss energy services provider and electricity producer in Europe, <https://www.alpiq.com/power-generation/new-renewable-energy-sources/small-scale-hydropower-plants/riein>
- Barbón A., González-González F., Bayón L., Georgious R., (2023). Variable-Speed Operation of Micro-Hydropower Plants in Irrigation Infrastructure: An Energy and Cost Analysis, *Applied Science*,13, 13096.

- Bousquet C., Samora I., Manso P., Rossi L., Heller P., Schleiss A.J. (2017). Assessment of hydropower potential in wastewater systems and application to Switzerland, *Renewable Energy*, 113, 64-73
- Casini, M. (2015). Harvesting energy from in-pipe hydro systems at urban and building scale, *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 4, 4, 316-327
- CEDRO (2013). Hydropower from Non-River Sources; the potential in LEBANON, Country Energy Efficiency and Renewable Energy Demonstration Project for the Recovery of Lebanon, <https://www.undp.org/lebanon/publications/hydropower-non-river-sources-potential-lebanon>
- Choulot A., Denis V. ve Punys P. (2012). Integration of Small Hydro Turbines into Existing Water Infrastructures, *Hydropower - Practice and Application*, Edt Hossein Samadi- Boroujeni, Intech Open, 334.
- Clarkson Waste Water Treatment Plant Annual Report, (2022). <https://www.peelregion.ca/wastewater/media/clarkson-WWTP-report-2022.pdf>
- Coelho B. ve Andrade-Campos A., (2014). Efficiency achievement in water supply systems—A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 59–84.
- DSİ, (2022). DSİ 2022 Faaliyet Raporu, Tarım ve Orman Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara
- Ebrahimi M., 2023. Power Generation Technologies Foundations, Design and Advances, Academic press- Elsevier, 649pp.
- EU 2018/2001, (2018). Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of The Council of 11 December 2018 on The Promotion of the Use Of Energy From Renewable Sources (recast).
- IEA, (2021). Hydropower Special Market Report Analysis and Forecast to 2030, International Energy Agency, https://iea.blob.core.windows.net/assets/4d2d4365-08c6-4171-9ea2-8549fabd1c8d/HydropowerSpecialMarketReport_corr.pdf
- IHA, (2022). Hydropower Status Report Sector Trends and Insights, https://assets-global.website-files.com/5f749e4b9399c80b5e421384/63a1d6be6c0c9d38e6ab0594_IHA202212-status-report-02.pdf
- IRENA, (2012). Hydropower, *Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series*, 1, 3/5,
- Johnson K., Levince A. ve Curtis T. (2017). Energy Recovery Hydropower: Prospects for Off-Setting Electricity Costs for Agricultural, Municipal, and Industrial Water Providers and Users, National Renewable Energy Laboratory Technical Report, NREL/TP-6A20-70483
- Llácer-Iglessias R.M., López-Jiménez P.A. ve Pérez-Sánchez,M., (2021). Hydropower Technology for Sustainable Energy Generation in Wastewater Systems: Learning from the Experience, *Water*, 13, 3259.
- Kamal N.A., Park H. ve Shin S. (2014). Assessing the viability of microhydropower generation from the stormwater flow of the detention outlet in an urban area, *Water Science and technology water supply*, 14.4, 664-671
- Kamal N.A., Lee G., Shin S. ve Park H. (2017). Design of Stormwater Particle Removal System for Small-Scale Urban Hydropower based on the Vortex and Coandă Effects, *International Journal of Engineering and Technology*, 9(2), 395-403.
- Kucukali S., Al Bayati, O. ve Maras, H. (2021). Finding the most suitable existing irrigation dams for small hydropower development in Turkey: A GIS-Fuzzy logic tool *Renewable Energy*, 172, 633-650
- Kumar, A., Shei, T., Ahenkora, A., Caceres Rodriguez, R., Devernay, J.M., Freitas, M., Hall, D., Killingtveit, A. ve Liu, Z. (2011). Hydropower, IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Edenhofer, O., Pichs-Mdruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Stechow, C. (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, New York.
- Kumar D., Katoch S.S. (2015). Small hydropower development in western Himalayas: Strategy for faster implementation, *Renewable Energy*, 71, 571-578
- EYDAP (2024). <https://www.eydap.gr/en/TheCompany/Energy/HydroProjects/>
- Paschalis E., Alamanis N., Papageorgiou G., Tselios D., Zahidou A., Boufikos I., 2022. Holistic management of drinking water and sewerage network in terms of energy production. The case of Larissa city, Greece, *Energy Nexus*, 7, 100120
- Pedraza J.M. (2022). *Non-Conventional Energy in North America Current and Future Perspectives for Electricity Generation*, Elsevier, India.
- Pérez-Sánchez M., Sánchez-Romero F.J., Ramos H.M. ve López-Jiménez P.A. (2017). Energy Recovery in Existing Water Networks: Towards Greater Sustainability, *Water*, 9 (97), 1-20
- POST (2006). Carbon footprint of electricity generation Parliamentary Office of Science and Technology, Number 268, <https://www.parliament.uk/globalassets/documents/post/postpn268.pdf>
- Punys P. ve Jurevicius L. (2022). Assessment of Hydropower Potential in Wastewater Systems and Application in a Lowland Country, Lithuania, *Energies*, 15, 5173

- Purece C. ve Panaitescu V. (2023). Technologies for Using Hidden Hydropower Potential, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 20, 3 (III), 1-11
- Quaranta E. ve Revelli R., (2015). Output power and power losses estimation for an overshoot water Wheel Renewable Energy, 83, 979-987
- Quaranta E. ve Revelli R., (2016). Optimization of breastshot water wheels performance using different inflow configurations, Renewable Energy, 97, 243-251
- REN21 (2020). Renewables 2020 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, ISBN 978-3-948393-00-7
- REN21 (2022). Renewables 2020 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, ISBN 978-3-948393-04-5
- Resmi Gazete, (2014). İçme Suyu Temin ve Dağıtım Sistemlerindeki Su Kayıplarının Kontrolü Yönetmeliği, 28994
- Resmi Gazete, (2019). Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği, 30772.
- SHAPES (2020). Energy Recovery in Existing Infrastructures with Small Hydro Turbine, Multi Purpose Schemes-Overview and Examples, FP6, Small Hydro Action for the Promotion of Efficient Solutions Project partially funded by the European Directorate for Transport and Energy.
- Shiji C., Dhakal S. ve Ou C. (2021). Greening small hydropower: A brief review, Energy Strategy Reviews , 36, 100676
- Tahiroğlu A.F. ve Diş M.Ö. (2022). İçme Suyu İsale Hatlarındaki Basınç Kırıcı Yapılarda Enerji Üretiminin Yapısal Tasarımı ve Analizi: Kahramanmaraş Örneği, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 34 (1), 61-73.
- Thyer S. ve White T. (2023). Energy recovery in a commercial building using pico-hydropower turbines: An Australian case study, Heliyon, 9, e16709
- UNIDO, ICSHP (2022). World Small Hydropower Development Report 2022. United Nations Industrial Development Organization, Vienna, Austria; International Center on Small Hydro Power, Hangzhou, China. Available at www.unido.org/WSHPDR2022.
- URL-1: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik#:~:text=2022%20y%C4%B1%C4%B1%20Kas%C4%B1m%20ay%C4%B1%20sonu,%C3%BC%20ise%20di%C4%9Fer%20kaynaklar%20%C5%9Feklindedir>. (Erişim tarihi: 24.04.2024)
- URL-2: <https://www.lkw.li/unternehmen/kraftwerke.html>, (Erişim tarihi: 22.02.2024)
- URL-3: <https://www.tems.gov.tr/prjd/4/yuvacik-hes>, Temsan Milli Enerji Teknolojileri, Yuvacık HES, (Erişim Tarihi: 21.01.2023)
- URL-4 https://cms.esi.info/Media/documents/54053_1Yorkshire316689157666.pdf, Spaans Babcock Ltd., (Erişim Tarihi: 08.02.2024)
- Ueda T., Goto M., Namihira A. ve Hirose Y. (2013). Perspectives of small-scale Hydropower Generation Using Irrigation Water in Japan, The Japan International Research Center for Agricultural Sciences, 47(2), 135-140.
- Voltz T.J. ve Grischek T. (2019). Microturbines at Drinking Water Tanks Fed by Gravity Pipelines: A Method and Excel Tool for Maximizing Annual Energy Generation Based on Historical Tank Outflow Data, Water, 11, 1403

Investigation of Building Automation Systems in Terms of Lighting Efficiency

Fikret KAYA¹ , Onur AKAR^{2*} , Nazmi EKREN³ 

Abstract

Considering that energy consumption is constantly increasing along with a gradual decrease in energy resource reserves, energy is the most current and pending issue in today's world. Several academic studies have been conducted on the efficient use of energy resources. For this purpose, the idea of "smart building" has been proposed to use energy more efficiently in buildings. With building automation systems, which are indispensable elements of these smart buildings, the energy consumption of buildings can be greatly reduced. In this study, the lighting efficiency of a building automation system built at a training point in the Marmara University Mehmet Genç campus, Vocational School of Technical Sciences, was examined. The Sauter Vision Center software program was used at the observation center of the system. The results were analyzed in terms of efficiency by comparing the energy values in certain time periods obtained from the program with the energy values calculated in full use. The analysis yielded a lighting efficiency value of 54%, which was found to exceed the values reported in the literature.

Keywords: Energy Saving, Smart Building, Lighting Efficiency, Sauter Vision Center.

Bina Otomasyon Sistemlerinin Aydınlatma Verimliliği Açısından İncelenmesi

Öz

Enerji kaynak rezervlerinin giderek azalmasına ile birlikte enerji tüketiminin de sürekli arttığı düşünülürse günümüz dünyanın en güncel ve çözüm bekleyen konusu enerjidir. Enerji kaynaklarının etkin kullanılması ile ilgili çeşitli akademik çalışmalar yapılmaktadır. Bu amaçla, binalarda enerjiyi daha verimli kullanabilmek adına "akıllı bina" fikri ortaya konmuştur. Bu akıllı binaların vazgeçilmez bir unsuru olan bina otomasyon sistemleri ile binanın enerji tüketimi büyük oranda azaltılabilmektedir. Bu çalışmada Marmara Üniversitesi Mehmet Genç kampüsü Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulunda bir eğitim noktasında yapılan bina otomasyon sisteminin aydınlatma verimliliği incelenmiştir. Sistemin gözlem merkezinde Sauter Vision Center isimli yazılım programı kullanılmıştır. Programdan alınan belirli zaman dilimlerindeki enerji değerleri ile tam kullanımda hesaplanan enerji değerleri arasındaki karşılaştırılarak sonuçlar verimlilik açısından analiz edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen %54 aydınlatma verimliliği değerinin literatürde verilmiş olan değerlerin üzerinde görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Enerji Tasarrufu, Akıllı Bina, Aydınlatma Verimliliği, Sauter Vision Center.

¹Marmara University, Department of Electrical and Electronic Engineering, Istanbul, Türkiye, fikretkaya@marun.edu.tr

²Marmara University, Department of Electronic and Automation, Istanbul, Türkiye, onur.akar@marmara.edu.tr

³Marmara University, Department of Electrical and Electronic Engineering, Istanbul, Türkiye, nazmiekre@marmara.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Introduction

Buildings are responsible for almost 40% of the world's energy consumption, including 65% of electrical energy (Ozadowicz, 2017). Lighting accounts for a large part of the electrical energy consumption of non-residential and commercial buildings, especially those that are not fully equipped with LED lighting (Martirano and Senior, 2014). Therefore, one of the main strategies for this sector in recent years has been to increase energy efficiency by reducing the energy used for lighting. Various concepts, approaches, and technologies have been proposed for achieving these goals (Zhou et al. 2015). Many studies have shown that proper lighting control can significantly reduce annual energy consumption. However, this depends on many factors, such as the climatic conditions of the country and the north-south orientation of the building and its surroundings, that is, the shade of trees or reflections from neighboring buildings (Kaminska and Ożadowicz, 2018). Much attention has been paid to building construction, such as the shape of the building, the shape of the rooms, and the size of the windows and doors (Katafygiotou et al., 2014). One of the most important issues to consider when designing lighting in buildings is the efficient use of energy. In a lighting design proposal where natural lighting is maximized, providing space illumination by spending minimum energy will ensure optimum efficiency of lighting today. In addition, certain issues should be considered in terms of the energy efficiency when designing lighting. If these are taken into consideration, it will be ensured that both lighting is done in an optimum manner without harming the eyes of the person, and maximum efficiency will be obtained from energy (Fabiani et al., 2021). To date, many scientific studies have been conducted on lighting and energy efficiency. Because the issue of energy efficiency in lighting in smart buildings is a multidisciplinary issue, studies on this subject have been carried out in many fields besides electrical engineering, lighting engineering, and energy fields.

A review of the literature shows that remote control systems for offices and homes have been designed and implemented via telephone. The function of the remote control is to control the power supplied to a remote location via a telephone cable. The system is based on a DTMF telephone system. In the implemented system, a telephone keypad was used as an input device, where data and comments were entered (Coskun and Ardam, 1998). Smart homes and the elements of smart home research projects, smart home networks, and smart home devices were defined. In this research, we worked with MIT, Siemens, Cisco, IBM, Xerox, and Microsoft. These groups have placed laboratories in nearly 20 homes, and in these laboratories, nearly 30 devices and 3 artificial intelligence techniques over 5 networks have been used. Neural networks and fuzzy logic were not mentioned because the artificial intelligence technique is a multiagent system (Jiang et al., 2004). They realized the study and application of a smart home control system by combining it with basic knowledge. Here, information is controlled and collected using Internet input. The network inside the

house is connected to radio waves via Bluetooth, and the user requests are calculated with fuzzy logic and sent to the device unit inside the house. Then, it is sent to the surrounding devices (Zhang et al., 2008). He emphasized the importance of daylighting in buildings and underlined the physical and psychological effects of natural light on people and their contribution to the performance of employees (Barrett, 2009). Considering the consumption of the electrical energy used for lighting in office buildings, he developed strategies to reduce this consumption. He also mentioned daylighting in these buildings and emphasized the necessity of using artificial lighting (Dubois and Blomsterberg, 2011). They calculated the amount of energy consumed and CO₂ emissions for the lighting system of a university building for four different cases and developed recommendations for less electrical energy consumption (Stefano, 1999). He discussed the choice of lamps and the quality of illumination in artificial lighting and expressed the necessary conditions and suggestions for energy efficiency. He also emphasized the importance of lighting control systems in energy saving (Küçükdoğu, 2003). Regarding lighting simulation programs, he examined many lighting programs, including the Dialux lighting program, and applied these programs to sample buildings (Ochoa et al., 2011). In their study, they controlled a system created in a home environment using a microcontroller, and the devices connected to this system using a cell phone. Before designing the system, a circuit that decodes the key codes, that is, dual-tone multi-frequency (DTMF) tones from the person's cell phone, was designed. After decoding the DTMF tones coming to the mobile phone connected to the system, the decoded code was processed using a programmed PIC 16F84 microcontroller. This system is open for improvement. In addition, the number of controlled devices connected to the system can be increased depending on the development (Işık and Altun, 2005). In his doctoral dissertation, he studied Profibus-DP network-based building automation. In this study, a unique Profibus-DP network-based building automation design was developed and the elimination of time delays in the network using mathematical methods was emphasized. Within the scope of the project, the lighting automation was controlled within the same network. Lighting automation is performed using devices controlled by software and connected to a network. The software can control the light sources through the network. Sensors measure the light level in the environment, and light sources illuminate the environment based on this light level (Yılmaz, 2007). A 7.7% performance increase in production volume was found by improving the illuminance level (Juslen, 2007). The effect of lighting automation on energy efficiency was analyzed by Işık. In this study, 36% energy savings were achieved with lighting control using daylight and presence sensors. In the same study, it was also calculated that 42% energy savings could be achieved by placing combined sensors and controlling the illuminance level using a special algorithm (Erhan, 2018). They specifically noted that KNOX-based automation systems intended for controlling building lighting and air conditioning units are difficult to integrate and maintain in existing buildings (Butzin et al., 2014). In the study conducted

in 2022, he analyzed the smart campus system utilizing ZigBee sensor network technology, developed a functional network system structure, and reported that the system yielded positive results consistent with the analysis (Gao, 2022). In this study, energy-saving calculations were conducted using actual data from the initial smart university application equipped with KNX-based automation technologies from the installation phase onwards, while assessing usage based on time.

2. Materials and Methods

2.1. System Information

A study was conducted on the lighting system data in lecture hall 4302 located on the 3rd floor of the 4th Block 3 of the 7th building of Marmara University Mehmet Genç Complex Vocational School of Technical Sciences located in the Dragos region of Kartal district of Istanbul province. Since the installation phase of the facility in Figure 1, lighting, heating, cooling, and ventilation systems have been implemented within the scope of smart building automation. The system continues to operate through generators and UPSs that provide energy in the range of 8-12 seconds in the case of power outages. In the 80-seat lecture hall 4302, 30 1-meter-long strip LED lighting fixtures were used as the lighting elements.

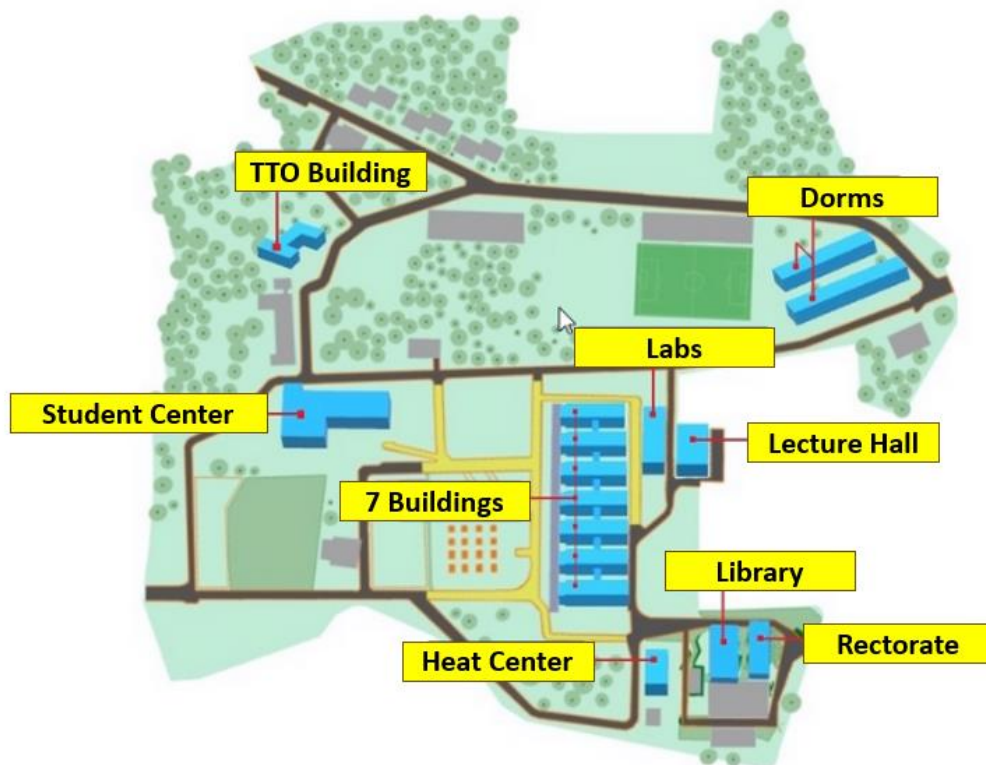


Figure 1. Campus map

Considering the weekly class hours in the fall and spring semesters, lighting times were determined and controlled, and uncontrolled energy consumption was calculated. In the lecture hall, approximately 14 hours of educational activities can be carried out between 08.30 am and 22.50 pm during the day because of the course program. The lecture hall was used for 35 class hours in the fall semester and 36 in the spring semester. Table 1 shows the usage of lecture hall 4302 throughout the year.

Table 1. Annual Usage of the lecture hall

Time	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday
08:30 09:20	No Course	No Course	Only Spring	Only Fall	Only Fall
09:30 10:20			Only Spring	Only Fall	Only Fall
10:30 11:20	Only Fall	No Course	Only Spring	Only Fall	Only Fall
11:30 12:20	Only Fall		Only Spring	Only Fall	No Course
13:00 13:50	Only Spring	Only Spring	Only Spring	Only Fall	No Course
14:00 14:50	Only Fall	Only Spring	No Course	Only Fall	No Course
15:00 15:50	Only Fall	Only Spring	Only Fall	Only Fall	Only Fall
16:00 16:50	Only Fall	Only Spring	Only Fall	Only Spring	Only Fall
17:00 17:50	Only Fall	No Course	Only Fall	Only Fall	Only Fall
18:00 18:50	Only Fall	Only Fall	Only Fall	Only Fall	Only Fall
19:00 19:50	Only Fall	Only Fall	Only Fall	Only Fall	Only Fall
20:00 20:50	No Course	Only Fall	No Course	No Course	Only Fall
21:00 21:50	No Course	Only Fall			Only Spring
22:00 22:50	No Course	No Course			Only Spring

Only Fall

Only Spring

Both Spring
Both Fall

No Course

2.2. System Components

2.2.1. Software

The Sauter Vision Center, a software program, provides a solution for operating and visualizing building operations. This program brings together all the data needed for the entire building and energy management, making it accessible to users anywhere and at any time. In addition, this software uses the open BACnet standard, which allows systems from all the manufacturers to be included. The OPC-UA client maintains the connection with various OPC servers, thus ensuring full connectivity with the widest range of protocols in building automation (including KNX, M-Bus, Modbus, and

DALI). SAUTER Vision Center is a web-based building-management solution for the HTML5 standard. It enables platform-independent operation on smartphones, tablets, or desktops without the need to install complex plug-ins. Thus, the staff can access individually configurable and new dashboards from anywhere and at any time as the central information interface for the installation process, energy consumption, and related alarms and key figures. Additional detailed information and reports such as alarm reports, interactive object lists, and diagrams can be accessed directly. With the interface of this program shown in Figure 2, it is possible to perform the following operations (URL-1, 2024).

- Alarm management
- Data point management
- Management of measurement data
- Collection (compression) of measurement data
- Prediction and reference module
- Comprehensive formula module
- Manual and automatic correction of measurement data
- Presentation of measured values
- Benchmarking
- Standard reporting (daily/weekly/monthly/annual energy report)
- Generation and automatic export of reports
- User management
- Data export and import

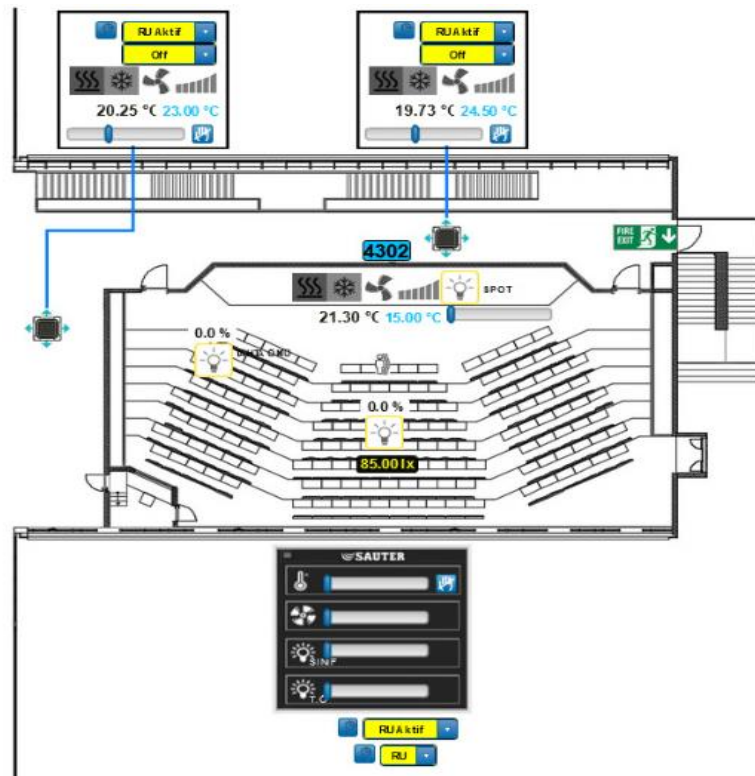


Figure 2. Program interface

Energy-efficient management of a building and its rooms relies on the optimal integration of various systems, including air conditioning, lighting, and sun protection (such as blinds and glare protection units). This integration ensures that these systems work together harmoniously to minimize energy consumption while maintaining comfort and functionality within the space. By coordinating these elements, it is possible to enhance energy efficiency, reduce operational costs, and create a more sustainable environment. Lighting control is carried out in light of the parameters in Figure 3.

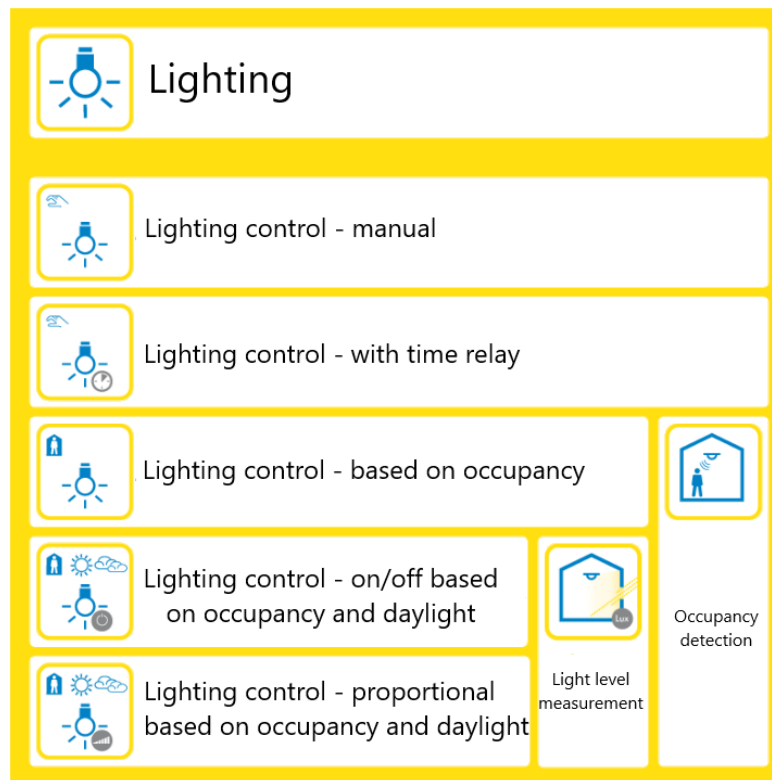


Figure 3. Lighting Control Parameters

2.2.2. Lighting Armature

The OSRAM brand linear-type luminaire in Figure 4, which is 1 m long, rod-shaped with three strip LEDs, and operates at 24 V, was used as the lighting fixture. Thirty luminaires were used in the lecture hall 4302. Several luminaires are connected to a single fuse. In the selected lecture hall, four fuses were used to protect the luminaires. 1 meter LED luminaire draws an average power between 45-54 W.



Figure 4. Lighting Armature

2.2.3. Drivers

The OSRAM brand driver was selected for compatibility with the luminaire. This driver has many features, such as being programmable, flexible current adjustment, low power consumption in standby mode, and easy control with sensors. Figure 5 shows a photograph of the LED driver used.



Figure 5. LED Driver

2.2.4. Control Components

The control element is realized through the control panel in Figure 6, both manually with switches inside the amplifier and remotely with technical personnel through the software interface. Here, the settings of the light amount of the luminaires and the on and off operations were also performed. In addition, the temperature and fan settings can be manually set from the control panel.

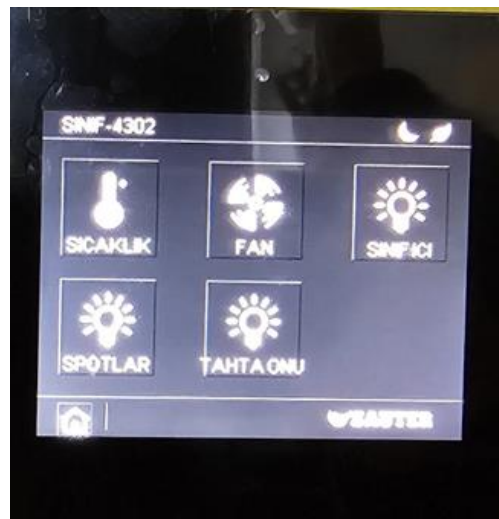


Figure 6. Program Control Panel

2.2.5. Sensors

For continuous control of the light intensity in the environment, there is a 1 lux sensor with high sensitivity on the ceiling 50 cm away from the presence sensor in Figure 7 and 1 presence sensor in Figure 8 in the center of the lecture hall ceiling for automatic switching on and off of the lighting

system. The lux sensor setting was set to 100 lx. The set setting can be changed according to the season with the software interface from the control panel or control room.



Figure 7. The Lux Sensor



Figure 8. Presence Sensor

2.3. System Operation

The value of the luminous flux in the environment changes according to whether the instructor uses a projector during the lecture, the amount of daylight coming from the windows, and the demands of students. At this point, the luminaires flash automatically to provide the luminous flux set by the automation. The lighting automation of the lecture hall is activated by the presence sensor; however, it can also be operated manually. In addition, remote control was provided by technical personnel using the program interface. In this study, the ambient light intensity set in the software was 100 lx to operate the system with energy savings. Figures 9 and 10 show the dark and light conditions of amplifier 4302. The energy monitoring module integrates energy meters and other data from buildings to create a comprehensive energy consumption display. Daily, weekly, monthly and annual consumption can then be automatically calculated and displayed in diagrams.



Figure 9. Dark state of lecture hall 4302

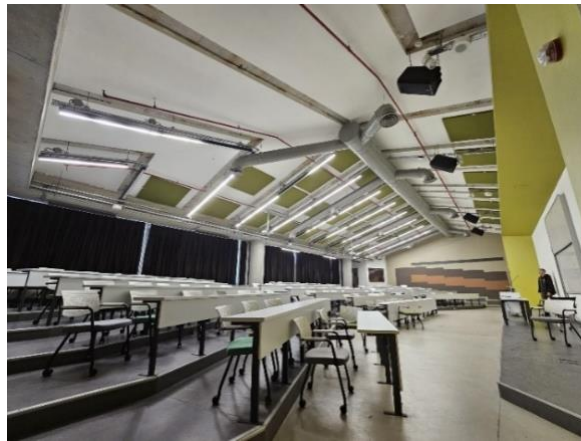


Figure 10. Lighting state of lecture hall 4302

3. Findings and Discussion

The amount of energy consumed in the lecture hall 4302 in the fall and spring semesters was calculated by considering the hours of use in the lecture hall 4302 and the amount of energy consumed in uncontrolled continuous use and controlled use where the automation system is active. The data obtained for both cases were compared, and the energy-saving rate due to the use of the automation system was calculated.

3.1. Uncontrolled Usage

In the case where the lighting automation system does not work, that is, in the absence of sensors and remote control, if it is assumed that all luminaires are manually turned on at 08.30 in the morning and turned off at 22.30 in the evening in lecture hall 4302, there is a continuous use of 14 hours. When each of the 30 linear-type luminaires draws 45 W of power, their energy consumption is calculated, as shown in Table 2.

Table 2. Energy Consumption in Uncontrolled Usage

Time Periods	Energy Consumptions (kWh)
Hourly	$30 \times 45 \times 1 = 1350 \text{Wh} = 1.35 \text{ kWh}$
Daily	$1.35 \times 14 = 18.9 \text{ kWh}$
Weekly	$18.9 \times 5 = 94.5 \text{ kWh}$
Monthly	$94.5 \times 4 = 381.6 \text{ kWh}$
Periodic	$381.6 \times 4 = 1526.4 \text{ kWh}$
Annual	$1526.4 \times 2 = 3052.8 \text{ kWh}$

3.2. Controlled Usage

When entering lecture hall 4302, the presence sensor activates the lighting automation system, and the brightness intensity is controlled by the lux sensor. During the fall and spring semesters, usage follows weekly class hours, resulting in an average of 6.5 hours of daily use when considering the weekly course schedules. The energy consumption of the 30 linear type luminaries, each drawing 45 W power, is calculated in Table 3.

Table 3. Energy Consumption in Controlled Usage

Time Periods	Energy Consumptions (kWh)
Hourly	$30 \times 45 \times 1 = 1350 \text{Wh} = 1.35 \text{ kWh}$
Daily	$1.35 \times 6.5 = 8.775 \text{ kWh}$
Weekly	$8.775 \times 5 = 43.875 \text{ kWh}$
Monthly	$43.875 \times 4 = 175.5 \text{ kWh}$
Periodic	$175.5 \times 4 = 702 \text{ kWh}$
Annual	$702 \times 2 = 1404 \text{ kWh}$

3.3. Energy Savings Calculations

In controlled settings, lighting is not used continuously, whereas in uncontrolled settings, lighting is manually operated from early morning until late at night. When comparing the values shown in Figure 11, the savings achieved from the installed automation system are calculated as follows.

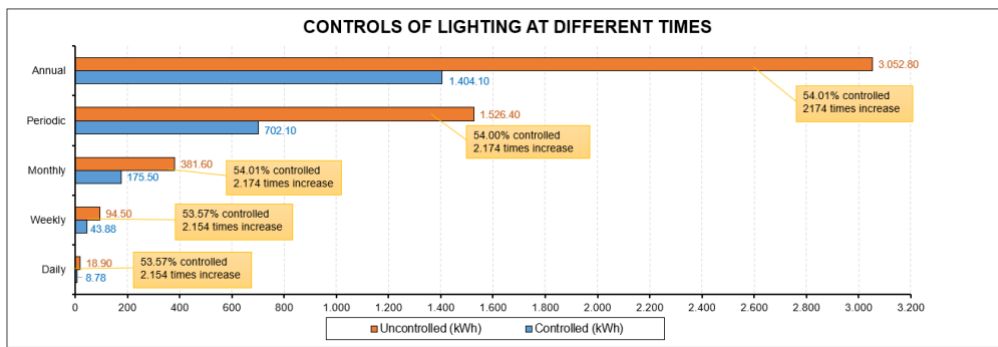


Figure 11. Controls of lighting at different times

Annual energy saving rate (ESR),

$$\% ESR = \frac{Uncontrolled\ ES - Controlled\ ES}{Uncontrolled\ ES} \times 100 \tag{1}$$

$$\% ESR = \frac{3052.8 - 1404}{3052.8} = \frac{1648.8}{3052.8} = \%54$$

4. Conclusions and Recommendations

In this research, the energy saving achieved through the lighting automation application at Marmara University Mehmet Genc campus, School of Technical Sciences, lecture hall 4302, was calculated to be 54%. The implementation of this application in a single classroom and its extension to the entire university highlighted the significance of the established automation system in terms of both size and cost of energy savings. The Energy Efficiency Strategy Document targets a minimum 20% reduction in energy consumption by 2024 to mitigate energy losses. Furthermore, the fact that our achieved savings rate exceeds the success benchmarks of 20% to 40% found in the literature is significant for the system's efficiency. Surpassing this target with our achieved energy saving percentage is crucial for the university's and the national economy's well-being. Consequently, it is foreseeable that all public institutions and organizations in our country will adopt automation systems in the future.

Authors' Contributions

All authors contributed equally to the study.

Statement of Conflicts of Interest

There is no conflict of interest between the authors.

Statement of Research and Publication Ethics

The author declares that this study complies with Research and Publication Ethics.

References

- Barrett, R., (2009). The Case For Daylighting in Architecture. *Archnet-IJAR*, Volume 3, Issue 2.
- Butzin, B., Golatowski, F., Niedermeier, C., Vicari, N., & Wuchner, E. (2014). A model based development approach for Building Automation Systems. Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), 1, 1–6. <https://doi.org/10.1109/etfa.2014.7005365>
- Chen, Y., Liu, J., Pei, J., Cao, X., Chen, Q., & Jiang, Y. (2014). Experimental and simulation study on the performance of daylighting in an industrial building and its energy saving potential. *Energy and Buildings*, 73, 184–191. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.030>
- Coskun, I., & Ardam, H., (1998). A remote controller for home and office appliances by telephone. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 44(4), 1291–1297. <https://doi.org/10.1109/30.735829>
- Di Stefano, J. (2000). Energy efficiency and the environment: The potential for energy efficient lighting to save energy and reduce carbon dioxide emissions at Melbourne University, Australia. *Energy*, 25(9), 823–839. [https://doi.org/10.1016/s0360-5442\(00\)00015-3](https://doi.org/10.1016/s0360-5442(00)00015-3)
- Dubois, M.C., & Blomsterberg, Å. (2011). Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low Energy Office Buildings: A Literature Review. *Energy and Buildings*, 43(10), 2572–2582. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.001>
- Erhan, I. T. (2018). *Investigation of the Contribution of Lighting Automation to Energy Efficiency in Intelligent Buildings*. Master's thesis, Istanbul University, Institute of Graduate Studies In Science and Engineering, Istanbul.
- Fabiani, C., Chiatti, C., & Pisello, A. L. (2021). Development of photoluminescent composites for energy efficiency in smart outdoor lighting applications: An experimental and numerical investigation. *Renewable Energy*, 172, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.071>
- Gao, M. (2022). Smart campus teaching system based on ZigBee wireless sensor network, *Alexandria Engineering Journal*, 61, 2625-2635.
- Işık, H., Altun, A.A. (2005). Mobile Phone Controlled Smart Home Application Using Microcontroller. Selçuk University Vocational School of Technical Sciences, Technical-Online Journal, 4(1):1-8
- Juslen, H. (2007). *Lighting, productivity and preferred illuminances – field studies in the industrial environment*. (Unpublished doctoral dissertation). Helsinki University of Technology, Finland
- Kaminska, A., & Ożadowicz, A. (2018). Lighting control including daylight and energy efficiency improvements analysis. *Energies*, 11(8), 2166. <https://doi:10.3390/en11082166>
- Katafygiotou, M. C., & Serghides, D. K. (2014). Analysis of structural elements and energy consumption of school building stock in cyprus: Energy simulations and upgrade scenarios of a typical school. *Energy and Buildings*, 72, 8–16. <https://doi:10.1016/j.enbuild.2013.12.024>
- Küçükdoğu M, Ş., (2003). Effective Energy Use in Lighting, II. *National Lighting Symposium*, Diyarbakır.
- Li, J., Liu, D.Y. & Bo, Y. (2004). Smart Home Research. *Proceedings of 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (IEEE Cat. No.04EX826)*. <https://doi.org/10.1109/icmlc.2004.1382266>
- Martirano, L. (2014). A sample case of an advanced lighting system in a educational building. *2014 14th International Conference on Environment and Electrical Engineering*. <https://doi:10.1109/eeeic.2014.6835834>

- Ochoa, C. E., Aries, M. B. C., & Hensen, J. L. M. (2012). State of the art in lighting simulation for building science: A literature review. *Journal of Building Performance Simulation*, 5(4), 209–233. <https://doi.org/10.1080/19401493.2011.558211>
- Ożadowicz, A., (2017). A new concept of active demand side management for energy efficient prosumer microgrids with Smart Building Technologies. *Energies*, 10(11), 1771. <https://doi:10.3390/en10111771>
- Pellegrino, A., & Blaso, L. (2014). Lighting Control Strategies and Energy Efficiency Benefits. *Sustainable Indoor Lighting*, 303–334. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6633-7_16
- URL-1: <https://www.tanotomasyon.com/urun/sauter-ems-ve-ems-mobil-ems-100-200/>, (Erişim Tarihi: 20 April 2024).
- Yılmaz C., (2007). *Profibus-dp Network Based Building Automation*. Doctoral Thesis, Gazi University, Institute of Science and Technology, Ankara.
- Zhang, L., Leung, H., & Chan, K. (2008). Information fusion based Smart Home Control System and its Application. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 54(3), 1157–1165. <https://doi.org/10.1109/tce.2008.4637601>
- Zhou, X., Yan, D., Hong, T., & Ren, X. (2015). Data Analysis and stochastic modeling of lighting energy use in large office buildings in China. *Energy and Buildings*, 86, 275–287. <https://doi:10.1016/j.enbuild.2014.09.071>

Zorlanmış Hava Soğutma Esaslı Lityum Bazlı Silindirik bir Batarya Hücresinin Isı Dağılım Performansının Nümerik İncelenmesi

Seyda ÖZBEKTAŞ¹, Bilal SUNGUR^{2*}, Alirıza KALELİ³

Öz

Batarya modülünden çekilen güç miktarının artmasıyla batarya hücrelerinin ve dolayısıyla batarya modülünün sıcaklıkları da artmaktadır. Bu durum batarya hücresinde kapasite ve performans kaybına sebep olmaktadır. Bu amaçla, bu çalışmada giriş kısmına fan yerleştirilen bir kanal içerisinde konumlandırılmış silindirik bir LiFeS₂ batarya hücresinin 1000 rpm, 2000 rpm ve 3000 rpm olmak üzere üç farklı fan devrinde ve 0.2C, 0.4C, 0.6C ve 0.8C olmak üzere dört farklı deşarj oranında sergilediği termal ve elektriksel performans nümerik olarak incelenmiştir. Nümerik modelleme için ANSYS Fluent paket programı içerisinde yer alan İkili Potansiyel Çok Ölçekli Çok Alanlı (MSMD) batarya modülü kullanılmıştır. Lityum bataryanın termal ve elektriksel karakteristiğinin modellenmesinde Eşdeğer Devre Modeli (ECM) kullanılmıştır. Sonuçlar deşarj oranları açısından değerlendirildiğinde, artan deşarj oranlarıyla batarya sıcaklıklarının da arttığı ve verebildikleri gerilim değerlerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, deşarj oranının artmasıyla batarya hücresinin stabil olarak sağladığı gerilim süresi de azalmıştır. Bu bağlamda 0.2C deşarj oranında gerilim değeri 1.42 V seviyelerinde stabil bir seyir izlerken, 0.8C’de 0.8V ve 1V arasında değişkenlik göstermiştir. Fan devrinin etkisi incelendiğinde, 0.8C deşarj oranında hesaplama süresi sonunda batarya hücresi üzerinde meydana gelen ortalama sıcaklıklar 1000 rpm durumuna göre karşılaştırıldığında fan devrinin iki katına çıkmasıyla %20.35, üç katına çıkmasıyla %28.56 oranında azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Lityum Batarya, Deşarj Hızı, Batarya Modelleme, Fanlı Soğutma.

Numerical Modelling of a Heat Dissipation Performance of a Lithium-Based Cylindrical Battery Based on Forced Air Cooling

Abstract

As the amount of power drawn from the battery module increases, the temperatures of the battery cells and therefore the battery module also increase. This causes loss of capacity and performance in the battery cell. For this purpose, in this study, the thermal and electrical performance of a cylindrical LiFeS₂ battery cell located in a duct with a fan at the entrance is numerically investigated at three different fan revolutions 1000 rpm, 2000 rpm and 3000 rpm and four different discharge rates 0.2C, 0.4C, 0.6C and 0.8C. The Dual Potential Multi-Scale Multi-Domain (MSMD) battery module in the ANSYS Fluent package was used for numerical modelling. Equivalent Circuit Model (ECM) was used to model the thermal and electrical characteristics of the lithium battery. When the results were evaluated in terms of discharge rates, it was observed that battery temperatures increased and voltage values decreased with increasing discharge rates. In addition, the duration of the stable voltage provided by the battery cell decreased with increasing discharge rate. In this context, while the voltage value at 0.2C discharge rate was stable at 1.42 V, it varied between 0.8V and 1V at 0.8C. When the effect of fan revolution was examined, the average temperatures on the battery cell at the end of the calculation duration at 0.8C discharge rate decreased by 20.35% with doubling the fan revolution and 28.56% with tripling the fan revolution compared to 1000 rpm.

Keywords: Lithium Battery, Discharge Rate, Battery Modelling, Fan Cooling.

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, seyda.ozbektas@omu.edu.tr

²Samsun Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, bilal.sungur@samsun.edu.tr

³Samsun Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, aliriza.kaleli@samsun.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Çoğunlukla taşıtlardan oluşan ulaştırma sektörü, dünya çapında toplam enerji talebinin ve toplam insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının yaklaşık beşte birini oluşturmaktadır (Bilgen, 2014). Bu durum sınırlı fosil yakıt kaynaklarının hızla tükenmesine ve bu yakıt türlerinin kullanımından dolayı çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bu dezavantajların aşılabilmesi için son yıllarda temiz enerjiye dayalı ulaşım sistemleri üzerine araştırmalar yoğunlaşmıştır. Bu bağlamda elektrikli ve hibrit elektrikli araçlara yönelik eğilim tüm dünyada hızla artmakta ve bu araç türleri fosil yakıt kullanan içten yanmalı motora dayalı araçların yerini almaktadır.

Elektrik enerjisinin depolanmasını ve kullanımını sağlayan bataryalar, elektrikli ve hibrit elektrikli araçların performansını belirleyen en kritik faktördür. Bataryaların çalışma performansı sıcaklığa bağlıdır. Bataryaların şarj ve deşarj kapasiteleri sıcaklıktan oldukça etkilenir. Elektrikli ve hibrit elektrikli araçların hızlanma performansı özellikle deşarj oranına göre belirlenmektedir. Ayrıca batarya ömrü açısından optimum batarya sıcaklığı da çok önemlidir.

Lityum-iyon bataryalar, düşük kendi kendine deşarj oranı, uzun çevrim ömrü, hafıza etkisinin olmaması, daha yüksek verimlilik ve enerji yoğunluğu gibi öne çıkan özellikleri nedeniyle EV ve HEV'lerde genellikle gelişmiş enerji kaynakları olarak tercih edilmektedir (Deng, 2015). Lityum iyon bataryalar için en uygun çalışma aralığı 20°C ila 40°C'dir. Ayrıca batarya paketindeki hücreler arasındaki maksimum sıcaklık farkının 5°C'yi geçmemesi istenmektedir (Greco ve ark., 2015). Aksi takdirde deşarj oranında dengesizlik meydana gelir ve performansın bozulmasına neden olur (Shahid ve Agelin-Chaab, 2017). Bu sorunlara çözüm olarak bataryanın termal durumunu kontrol etmek ve optimum sıcaklık aralığında tutmak için Batarya Termal Yönetim Sistemleri (BTYS) geliştirilmiştir. BTYS'de hava soğutma, sıvı soğutma ve faz değiştiren malzeme bazlı soğutma gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır (Rao ve ark., 2017).

Son yıllarda Batarya Termal Yönetim Sistemleri üzerine birçok çalışma yapılmıştır. (Lyu ve ark., 2021) sıvı soğutucu ile entegre edilmiş bir termoelektrik soğutucu kullanarak akrilik bir kutuya yerleştirilmiş altı batarya hücresini soğutmaya çalışmıştır. BTYS ile batarya takımının sıcaklığı normal duruma kıyasla yaklaşık 20°C azalmıştır. (Li ve ark., 2019) sekiz lityum iyon bataryadan oluşan bir batarya modülü için en uygun soğutma yöntemini araştırmıştır. Farklı deşarj oranlarında termoelektrik soğutucu, doğal ve zorlanmış konveksiyon yöntemlerini karşılaştırmışlar ve termoelektrik soğutucunun diğer yöntemlere göre daha iyi soğutma performansı sergilediğini tespit etmişlerdir. (Li ve ark., 2022) yirmi lityum-iyon bataryadan oluşan bir batarya modülünün soğutma performansına mini kanal soğutma plakalarının etkisini sayısal olarak incelemiştir. Giriş hızı 0,05 m/s olan soğutma plakalı model ile 4C deşarj oranında bataryaların en yüksek sıcaklığını 303,26 K ile, bataryalar arasındaki en yüksek sıcaklık farkını ise 1,98 K ile sınırlamayı başarmışlardır. (Jiang

ve ark., 2017) doğal ve zorlamalı hava soğutması kullanarak alüminyum tüp kabuklu batarya takımının soğutulması üzerinde çalışmıştır. Bataryalardaki sıcaklık artışını ve bataryalar arasındaki sıcaklık farkını azaltmak için her batarya hücresi kompozit faz değiştirici malzeme ile kaplanmıştır. Kompozit malzeme, 5C deşarj hızında batarya sıcaklıklarını büyük ölçüde azaltmıştır. (Rao ve ark., 2017) akış hızını ve alüminyum blok uzunluğunu değiştirerek termal yönetim sistemine dayalı lityum iyon bataryalardan oluşan sıvı soğutmalı bir batarya modülü üzerine çalışmıştır. Uzunluk ve akış hızının artmasıyla birlikte batarya modülündeki en yüksek sıcaklık ve bataryalar arasındaki en yüksek sıcaklık farkının azaldığını tespit etmişlerdir.

BTYS için batarya hücrelerinin elektrokimyasal karakteristiklerinin de bilinmesi gerekmektedir. Bu bağlamda literatürde batarya karakteristiğinin modellenmesi üzerine birçok çalışma mevcuttur. (Hatchard ve ark., 2001) 18650 lityum iyon batarya hücresi için tek boyutlu bir tahmin modeli geliştirmiştir. (Guo ve ark., 2010) yüksek kapasiteli lityum iyon bataryaların termal açıdan zayıf çalışma koşulları altında performansını tahmin etmek için üç boyutlu bir model önermiş ve bu koşullar altında sıcaklık dağılımını analiz etmiştir. (Chen ve ark., 2005) lityum iyon bataryanın termal davranışını incelemek için hücre yığınlarının katmanlı yapısını, batarya modülünün durumunu ve her iki öge arasındaki boşluğu hesaba katarak ayrıntılı bir üç boyutlu termal model geliştirmiştir. (Kök ve Alkaya, 2020) NTGK modeli kullanarak farklı deşarj oranlarında plaka tipi bir lityum iyon bataryanın termal davranışını modellemiştir. (Alsharif ve ark., 2022) bir lityum bataryanın Hibrit Güç Darbesi Karakterizasyonu (HPPC) testinden elde edilen sonuçlarla MATLAB Simulink'te bir eşdeğer devre modeli kurmuş ve bu modele ait parametreleri kullanarak ANSYS Fluent paket programı içerisinde yer alan MSMD modeliyle bataryanın termal davranışını incelemişlerdir. (Alsabari ve ark., 2021) bir lityum iyon bataryanın elektriksel davranışını şarj durumu (SOC) ve uç gerilimi parametrelerine göre Matlab programında İkinci Derece Eşdeğer Devre Modeli kullanarak modellemiştir. (Madani ve ark., 2019) ikinci derece elektriksel eşdeğer devre modeliyle kapasitesi 13 Ah olan lityum titanat oksit batarya hücresinin elektrokimyasal karakteristiğini modellemiştir. (Yao ve ark., 2013) MATLAB Simulink ile lityum ferro fosfat batarya hücresinin akım-gerilim performansını tespit eden bir model ortaya koymuştur. (Chaoui ve Gualous, 2017) lityum iyon bataryalar için literatürde mevcut birçok tahmin algoritmasıyla kullanılacak evrensel bir telafi stratejisi öneren hibrit bir tahmin yöntemi sunmuştur. (Liu ve ark., 2013) batarya hücresinin şarj durumunu (SOC) daha iyi tahmin edebilen doğrusal olmayan bir gözlemci tasarımı ortaya koymuştur. (Gao ve ark., 2017) konvektif termal modelini eşdeğer devre modeliyle birleştirerek LiFePO₄ batarya hücresinin gerçek bir ortamdaki sıcaklığını ve şarj durumunu tahmin eden yeni bir model geliştirmiştir.

Bu çalışmada da elektrokimyasal davranışı eşdeğer devre modeliyle karakterize edilen bir lityum batarya hücresinin kare kesitli bir kanal içerisinde farklı fan devirlerinde ve farklı deşarj

oranlarında sergilediği termal ve elektriksel davranış nümerik olarak incelenmiştir. Bu bağlamda lityum batarya hücresinin termal karakteristiği Alsharif ve ark.'larının (Alsharif ve ark., 2022) deneysel çalışmasıyla doğrulanmıştır. Literatürden farklı olarak bu çalışmada batarya hücresi gerçek durumlarda olduğu gibi bir fan ile zorlamalı taşınımına maruz bırakılmış ve farklı deşarj oranlarında sergilediği termal davranışın yanısıra elektriksel davranışta incelenmiştir. Bu çalışmayla hava ile soğutulan ve çok sayıda batarya hücresinden oluşan bir batarya modülü tasarımı için farklı deşarj oranlarında ihtiyaç duyulan soğutma performansı hakkında bir fikir vermesi amaçlanmıştır. Bu duruma ek olarak batarya hücresinin farklı deşarj oranlarında verebileceği gerilim değerleri açısından da bir değerlendirme yapılmış olup ne tür uygulamalarda kullanılabileceği üzerine literatüre katkı sağlaması hedeflenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Matematiksel Model

Lityum bataryalarda, anot ve katot, metal folyoların yüzeyine kaplanmış aktif malzemelerden oluşmaktadır. Bu bataryalarda zıt kutuplu folyolar arasına polimer bir ayırıcı yerleştirilerek elektronların geçişi engellenir. Bir bataryadaki kimyasal, termal ve elektriksel süreçlerin gelişimini tahmin etmek için Tek Potansiyel Ampirik Batarya Modeli ve İkili Potansiyel Çok Ölçekli Çok Alanlı (MSMD) Batarya Modeli olmak üzere iki model kullanılmaktadır. Tek Potansiyel Ampirik Batarya Modeli, akım toplayıcısı, elektrotlar ve ayırıcının geometrisi tamamen çözüldüğünde kullanışlı bir modeldir. Bu model, tek bir batarya hücresinde elektrot ölçeği tahminler için uygundur. Diğer taraftan, özellikle karmaşık geometri sistemlerindeki tüm elektrokimyasal olayları incelemek için sınırlıdır. Hatta tek bir batarya hücresi için bile tüm katmanları açıkça çözmek maliyetli olabilmektedir. Ayrıca, birçok endüstriyel uygulama, seri veya paralel bağlanmış bir dizi hücreden oluşan bir batarya modülü kullanılmaktadır (Kök ve Alkaya, 2020).

MSMD batarya modeli, bu sınırlamaları aşmak için çok ölçekli çok boyutlu bir yaklaşıma dayanan homojen bir model kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda, tüm batarya, ortotropik bir sürekli olarak düşünülür ve dolayısıyla ağ, bataryanın mikroyapısı tarafından artık sınırlanmaz. Bu modelde batarya termal ve elektrik alanları, Denklem 1-3'deki diferansiyel denklemler kullanılarak batarya hücresi ölçeğinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) alanında çözülür.

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = \sigma_+ |\nabla \varphi_+|^2 + \sigma_- |\nabla \varphi_-|^2 + \dot{q}_{ECh} + \dot{q}_{short} + \dot{q}_{abuse} \quad (1)$$

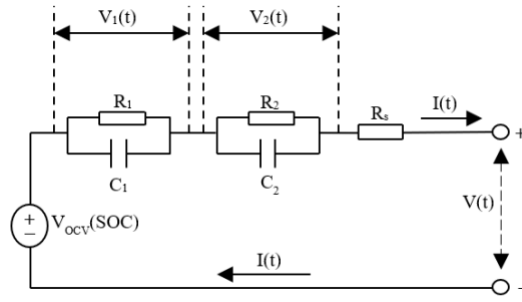
$$\nabla \cdot (\sigma_+ \nabla \varphi_+) = -(j_{ECh} - j_{short}) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\sigma_- \nabla \varphi_-) = j_{ECh} - j_{short} \quad ((3))$$

Bu denklemlerde σ_+ ve σ_- sırasıyla pozitif ve negatif elektrotlar için etkili elektrik iletkenlikleridir. φ_+ ve φ_- sırasıyla pozitif ve negatif elektrotlar için faz potansiyelleridir. j_{ECh} ve \dot{q}_{ECh} sırasıyla hacimsel akım aktarım hızı ve elektrokimyasal reaksiyonlardan kaynaklanan elektrokimyasal reaksiyon ısısıdır. j_{short} ve \dot{q}_{short} sırasıyla bataryanın dahili kısa devresinden kaynaklanan akım aktarım hızı ve ısı üretim hızıdır. \dot{q}_{abuse} , termal olarak kötü çalışma koşulu altında termal kaçak reaksiyonlarından kaynaklanan ısı üretimidir. Bu modelde j_{ECh} ve \dot{q}_{ECh} kaynak terimleri bir elektrokimyasal alt model kullanılarak elde edilmektedir. Çeşitli analiz gereksinimlerine uygun olarak MSMD modelde Newman, Tiedemann, Gu ve Kim (NTGK) ampirik modeli, Eşdeğer Devre Modeli (ECM) ve Newman alt Pseudo 2D (P2D) modeli olmak üzere üç elektrokimyasal alt model bulunmaktadır. Bu modeller, farklı düzenlemelere sahip batarya sistemlerinde çeşitli uzunluk ölçeklerine yayılan fiziksel ve elektrokimyasal olayları inceleme esnekliği sunmaktadır (ANSYS Fluent Battery Module Manual (2015)).

Bu çalışmada yarı ampirik bir model olan Eşdeğer Devre Modeli kullanılmıştır. Bu model, karmaşık bir sistemdeki elemanları basit elektrik devre elemanları ile temsil etmektedir. Eşdeğer Devre Modeli, bataryanın iç yapısını temsil eden direnç, kapasitans ve indüktans gibi elektrik devre elemanlarını içerir ve her bir eleman, bataryanın belirli bir özelliğini temsil eder. Eşdeğer Devre Modeli, bataryanın performansını anlamak, optimize etmek ve kontrol etmek için tasarım sürecinde ve gerçek kullanım sırasında öne çıkan bir modeldir (Tran ve ark., 2021).

Bu çalışmada nümerik modelleme Ansys Fluent paket program kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ansys Fluent, Chen'in çalışmalarını takip ederek altı parametrelili Eşdeğer Devre Modelini (ECM) benimsemiştir. Üç direnç ve iki kapasitörden oluşan bu devre modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Devredeki voltaj kaynağı, hücre yüksüz ve tam dengede olduğunda batarya terminallerinden geçen voltajı tanımlayan açık devre voltajını (V_{OCV}) temsil eder. Seri bağlı direnç (R_s), bataryanın ısı enerjisi olarak harcadığı gücü açıklayan Ohmik dirençtir (Plett, 2015). İki direnç-kapasitör alt devreleri (R_1, C_1, R_2 ve C_2), bataryanın difüzyon dinamiklerini açıklayan devredeki zaman sabitlerini temsil etmektedir. $V(t)$, bataryanın kayıplarını elde etmek için açık devre geriliminden çıkarılan devrenin pasif bileşenleri boyunca ölçülen gerilim düşüşüdür. $I(t)$, devrenin girişi olan ve deneysel olarak elde edilen akım ölçümleridir (Alsharif ve ark., 2022).



Şekil 1. Eşdeğer devre modeli

Şekilde gerilim-akım ilişkisi aşağıdaki elektrik devre denklemlerinin çözülmesiyle elde edilmektedir.

$$V = V_{ocv}(SOC) - V_1 - V_2 - R_s(SOC)I(t) \quad (4)$$

$$\frac{dV_1}{dt} = -\frac{1}{R_1(SOC)C_1(SOC)}V_1 - \frac{1}{C_1(SOC)}I(t) \quad (5)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = -\frac{1}{R_2(SOC)C_2(SOC)}V_2 - \frac{1}{C_2(SOC)}I(t) \quad (6)$$

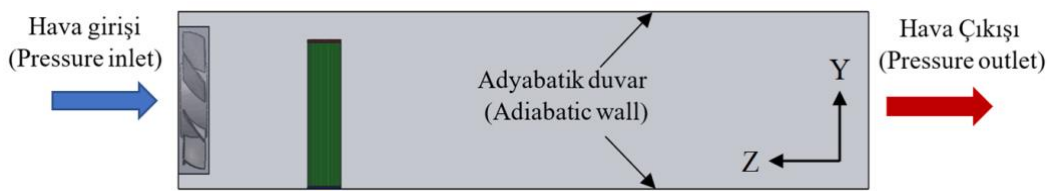
$$\frac{d(SOC)}{dt} = \frac{I(t)}{3600Q_{ref}} \quad (7)$$

Denklem 4'te V, Devre Ağı çözüm yönteminde doğrudan devre çözümünden elde edilebilen veya MSMD çözüm yönteminden φ_+ - φ_- olarak hesaplanabilen batarya hücresi voltajıdır. Belirli bir batarya için açık devre voltajı, rezistör dirençlerinin, kapasitör kapasitanslarının, bataryanın şarj durumunun (SOC) ve sıcaklığın fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonlar Ansys Fluent'te iki boyutlu tablo, polinom ve Chen'in sunduğu biçim olmak üzere üç farklı şekilde ifade edilebilmektedir. Diğer iki yöntemden farklı olarak tablo yönteminde polinom ve Chen biçiminde dikkate alınmayan sıcaklık etkisi hesaplamaya dahil edilebilmektedir. Ancak, Alsharif ve ark.'larının (Alsharif ve ark., 2022) çalışmasında sıcaklık sabit tutulduğu için bu çalışmada da sabit olarak benimsenmiştir. Bu bağlamda bu çalışmada tablo yöntemi benimsenmiş ve ECM parametrelerinin sabit sıcaklıkta SOC değerine bağlı değişimi literatürdeki Alsharif ve ark.'larının (Alsharif ve ark., 2022) çalışmasından bir boyutlu tablo olarak alınmıştır.

2.2. Sınır Koşulları

Çalışma kapsamında kare kesitli bir kanal içerisine yerleştirilmiş ve fan ile soğutulan bir lityum bataryanın farklı deşarj oranlarında ve farklı fan devirlerinde sergilemiş olduğu termal davranış nümerik olarak incelenmiştir. Termal davranışa ek olarak bataryanın farklı deşarj oranlarında

sergilediği elektriksel davranışı da çalışma içerisinde verilmiştir. Bataryanın termal ve elektriksel davranışı ANSYS Fluent paket programı içerisinde yer alan MSMD batarya modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Batarya içerisinde meydana gelen kimyasal reaksiyonların modellenmesinde Eşdeğer Devre Modeli (ECM) kullanılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan lityum bataryaya ait özellikler Tablo 1’de verilmiştir. Lityum bataryaya ait ECM parametreleri Alsharif ve ark.’larının (Alsharif ve ark., 2022) çalışmasından alınmıştır. Bu bağlamda batarya 0.2C, 0.4C, 0.6C ve 0.8C olmak üzere dört farklı oranda deşarj edilmiştir. Fan devri 1000 rpm, 2000 rpm ve 3000 rpm olarak seçilmiş ve fanın dönme hareketi için ağ hareketi (mesh motion) seçeneği aktif edilmiştir. Hava akışının modellenmesinde Standart k-ε model seçilmiş olup, yakın duvar davranışı olarak gelişmiş duvar (enhanced wall treatment) seçilmiştir. Fan tarafından havanın çekilebilmesi için kare kesitli kanalın giriş kısmında basınç girişi (pressure inlet), çıkış kısmında ise basınç çıkışı (pressure outlet) sınır koşulları kullanılmıştır. Kanalın yan yüzeylerinde ise adyabatik duvar (adiabatic wall) sınır şartı tanımlanmıştır. Modele ait sınır koşulları Şekil 2’de gösterilmiştir. Hava giriş sıcaklığı bataryanın literatürdeki çalışmada HPPC testinin gerçekleştirildiği sıcaklığa göre seçilmiş olup 26.85°C olarak tanımlanmıştır (Alsharif ve ark., 2022). Hesaplamalar zamana bağlı olarak üç boyutlu koşullarda gerçekleştirilmiştir. Toplam hesaplama zamanı literatürdeki çalışmayla aynı ve 3000 s olarak belirlenmiş, zaman adımı ise 30 s seçilmiştir (Alsharif ve ark., 2022). Bu şartlar altında hesaplamalara fanın dönme hareketiyle sürüklenen havanın kararlı hale getirilmesiyle başlanmıştır. Bu amaçla batarya modeli aktif edilmeden akış analizi 350 adım ve toplamda 10500 s boyunca gerçekleştirilmiştir. Kanal içerisindeki akış kararlı hale geldikten sonra batarya modeli aktif edilmiş ve farklı deşarj oranlarında hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

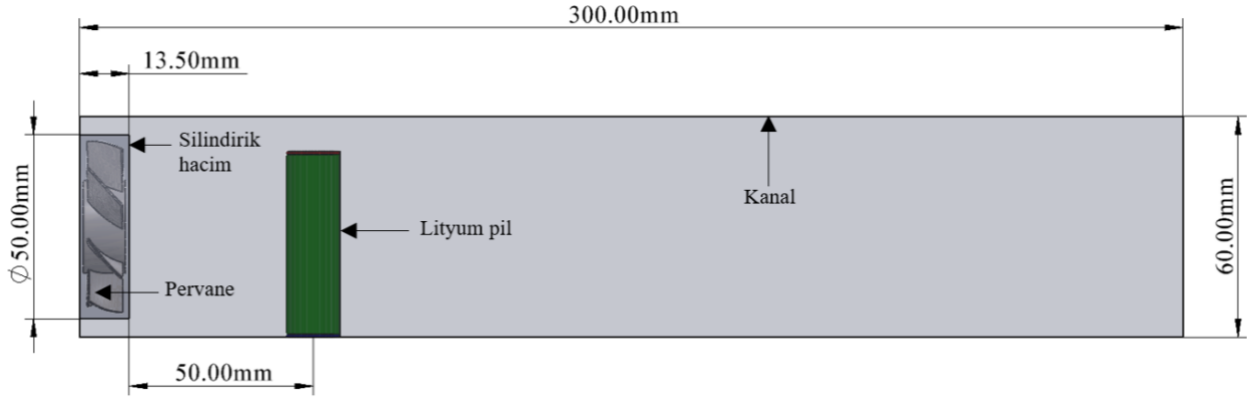


Şekil 2. Modele ait sınır koşulları

2.3. Geometri

Nümerik modele ait geometri lityum batarya, pervane, silindirik hacim ve kare kesitli bir kanaldan oluşmaktadır. Modele ait geometri ve boyutlar Şekil 3’de gösterilmiştir. Pervane, 50 mm çapında ve 13.50 mm genişliğinde silindirik bir hacmin içerisinde merkezlenmiş ve bu hacim kanal girişine sıfır bir şekilde ve merkezlenmiş olarak yerleştirilmiştir. Fan ile silindirik hacim yüzeyleri arasında 1 mm mesafe bırakılmıştır. Batarya hücresi silindirik hacme çok yakın konulduğunda pervane merkezinde hava akışı açısından ölü bölge oluşması nedeniyle iyi soğutulamayacaktır. Diğer

tarafından batarya hücresi çok uzağa konulduğunda hava hızı düşük olacağından yine kötü bir soğutma performansı elde edilecektir. Bu nedenle hava hızının yüksek olduğu ve hava akışında ölü bölgenin az olduğu bir mesafe olarak lityum batarya silindirik hacimden 50 mm mesafede ve kanalı merkezleyecek şekilde XZ düzleminde konumlandırılmıştır. Hava akışının gerçekleştiği kanalın kesiti 60 mm x 60 mm boyutunda ve uzunluğu 300 mm'dir. Lityum batarya, pozitif, negatif ve aktif olmak üzere üç bölgeden oluşmaktadır. Pozitif ve negatif bölgelerin yüksekliği 0.8 mm, aktif bölgenin yüksekliği ise 48.9 mm'dir.



Şekil 3. Modele ait geometri ve boyutlar

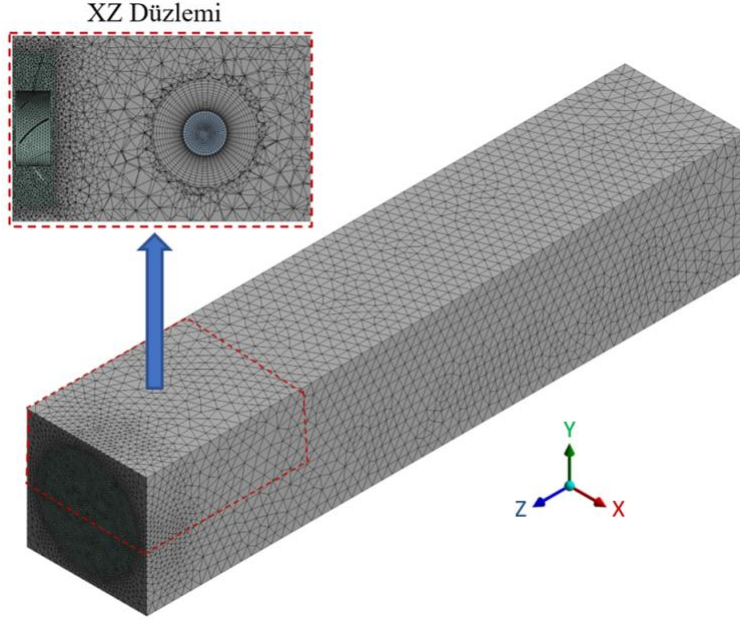
Tablo 1. LiFeS₂ batarya hücresi özellikleri (Alsharif ve ark., 2022)

Parametre	Değer
Nominal Kapasite [mAh]	3000
Nominal Gerilim [V]	1.5
Durdurma Gerilimi [V]	0.8
Boyutlar [mm]	Ø14.5 x 50.5

2.4. Ağ Yapısı

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği programlarında hesaplamaların yapılabilmesi için modellenen geometrinin ağ yapısıyla örülmesi gerekmektedir. Hesaplamaların yapıldığı ağ yapısı Şekil 4'te gösterilmiştir. Elde edilen sonuçların tutarlılığı ve doğruluğu, ağ yapısının kalitesi ile doğrudan ilişkilidir. Bu amaçla ağ yapılarının çarpıklık ve ortogonal kalitesinin sırasıyla 0-0,25 ve 0,75-1 aralığında olması istenmektedir (Ozbektas ve ark., 2023). Ayrıca ağ yapısında eleman tipi ve boyutu da önemlidir. Geometri ile ağ yapısı arasında iyi bir uyum sağlamak için geometriye uygun eleman tipi seçilmelidir. Bu bağlamda bu çalışmada batarya üzerinde ve yakın çevresinde altı yüzlü (hexahedral) eleman tipi kullanılırken, geri kalan alanlarda dört yüzlü (tetrahedral) eleman tipi kullanılmıştır. Eleman boyutu küçüldükçe genellikle daha iyi bir ağ yapısı elde edilmektedir ancak bu durum çözüm için gereken süreyi arttırmakta ve bilgisayar işlemcilerine ağır bir yük

bindirmektedir. Bu durumda, zamandan tasarruf etmek ve ağ yapısının hesaplamalar sonucunda elde edilen parametreler üzerindeki etkisini en aza indirmek için ağ yapısının optimize edilmesi gerekmektedir.

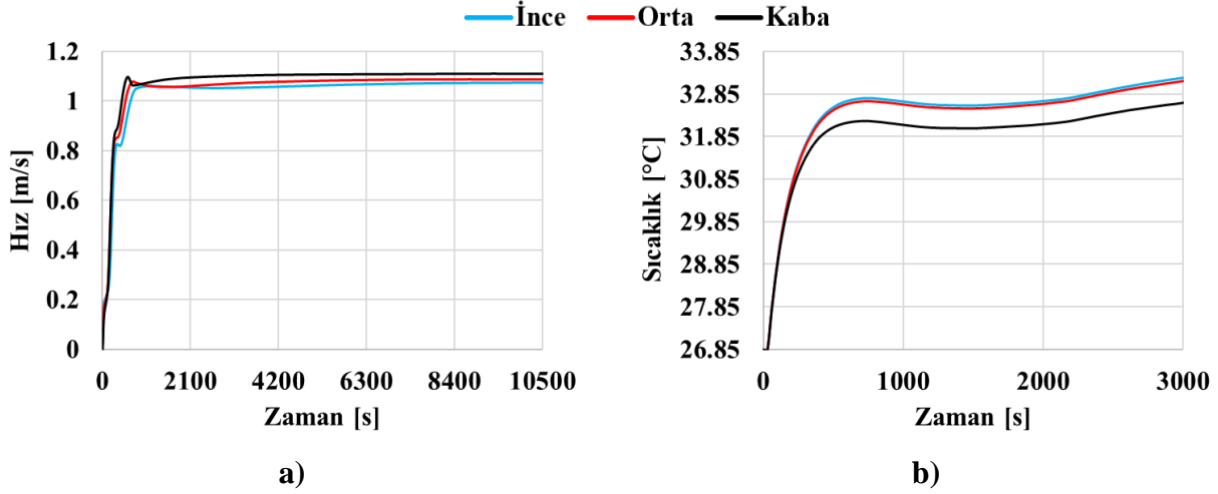


Şekil 4. Modele ait ağ yapısı

Bu çalışmada da ağdan bağımsızlık testi gerçekleştirilerek optimum ağ yapısı belirlenmiştir. Ağdan bağımsızlık testi hava hızının ve batarya sıcaklığının zamana bağlı değişimi göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiş ve Tablo 2'de verilmiştir. Tabloya göre hava hızındaki bir önceki ağ yapısına göre değişimler göz önüne alındığında %1.15'lik ve batarya sıcaklığındaki %0.21'lik değişimle orta ağ boyutu optimal ağ yapısı olarak seçilmiştir. Bu bağlamda hava hızının ağdan bağımsızlık testi 2000 rpm fan devrinde ve fandan 30 mm uzaklıktaki düzlem üzerinde meydana gelen ortalama hıza göre gerçekleştirilmiştir. Batarya sıcaklığının ağdan bağımsızlık testi ise 26.85°C hava sıcaklığında ve 0.5C deşarj oranında batarya üzerinde meydana gelen ortalama sıcaklığa göre gerçekleştirilmiştir. Hava hızının ve batarya sıcaklığının farklı ağ boyutlarında zamana bağlı değişimi Şekil 5'te gösterilmiştir.

Tablo 2. Ağdan bağımsızlık testi

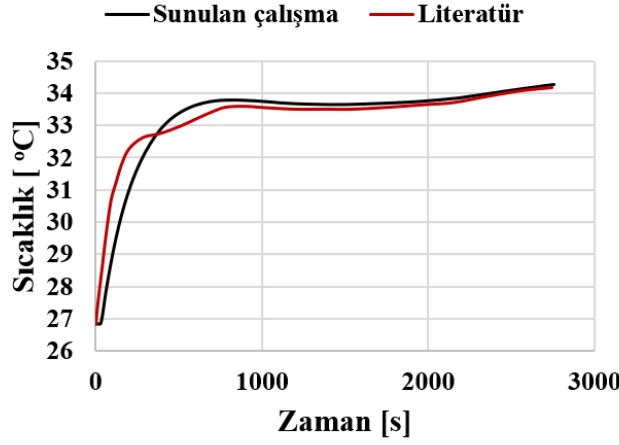
Ağ boyutu	Eleman Sayısı	Hız (m/s)	Hızdaki değişim (%)	Batarya sıcaklığı (°C)	Batarya sıcaklığındaki değişim (%)
Kaba	408898	1.109291	-	32.6402	-
Orta	463229	1.087518	1.96	33.1600	1.59
İnce	697564	1.074922	1.15	33.2313	0.21



Şekil 5. a) Hava hızının ve b) batarya sıcaklığının farklı ağ boyutlarında zamana bağlı değişimi

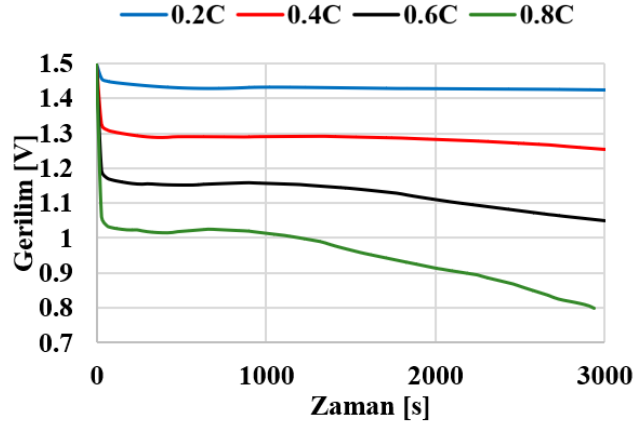
3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada 0.2C, 0.4C, 0.6C ve 0.8C olmak üzere farklı oranlarda deşarj edilen ve fan ile soğutulan silindirik bir lityum bataryanın farklı fan devirlerinde sergilediği termal ve elektriksel davranış nümerik olarak incelenmiştir. Lityum bataryaya ait karakteristik özellikleri tanımlayan ECM parametreleri Alsharif ve ark.'larının (Alsharif ve ark., 2022) çalışmasından alınmış olup, 0.5C deşarj oranında tek batarya hücresi için termal davranış zamana bağlı olarak doğrulanmıştır. 0.5C deşarj oranı için lityum bataryanın zamana bağlı termal davranışının literatürdeki çalışmayla karşılaştırması Şekil 6'da verilmiştir. Literatürdeki çalışmada 0.5C deşarj oranında bataryanın yaklaşık 2800 s boyunca sergilediği elektriksel davranış verilmiştir. Bu nedenle bu çalışmada da doğrulama işlemi 2800 s'ye göre gerçekleştirilmiş, geri kalan durumlar ise 3000 s'ye değerlendirilmiştir. Batarya sıcaklığının zamana bağlı değişim grafiği değerlendirildiğinde literatürdeki çalışma ve sunulan çalışma arasında iyi bir uyum sağlanmıştır. Model doğrulamasından sonra batarya hücresi, girişine fan yerleştirilen kare kesitli bir kanal içerisinde konumlandırılmış ve kanal içerisinde bataryanın farklı fan devirlerinde ve deşarj oranlarında sergilediği termal davranışını incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar batarya sıcaklığının zamana ve fan devrine bağlı değişimi, batarya hücresi geriliminin zamana bağlı değişimi, kanal içerisinde meydana gelen sıcaklık dağılımı ve hız vektörleri açısından değerlendirilmiştir.



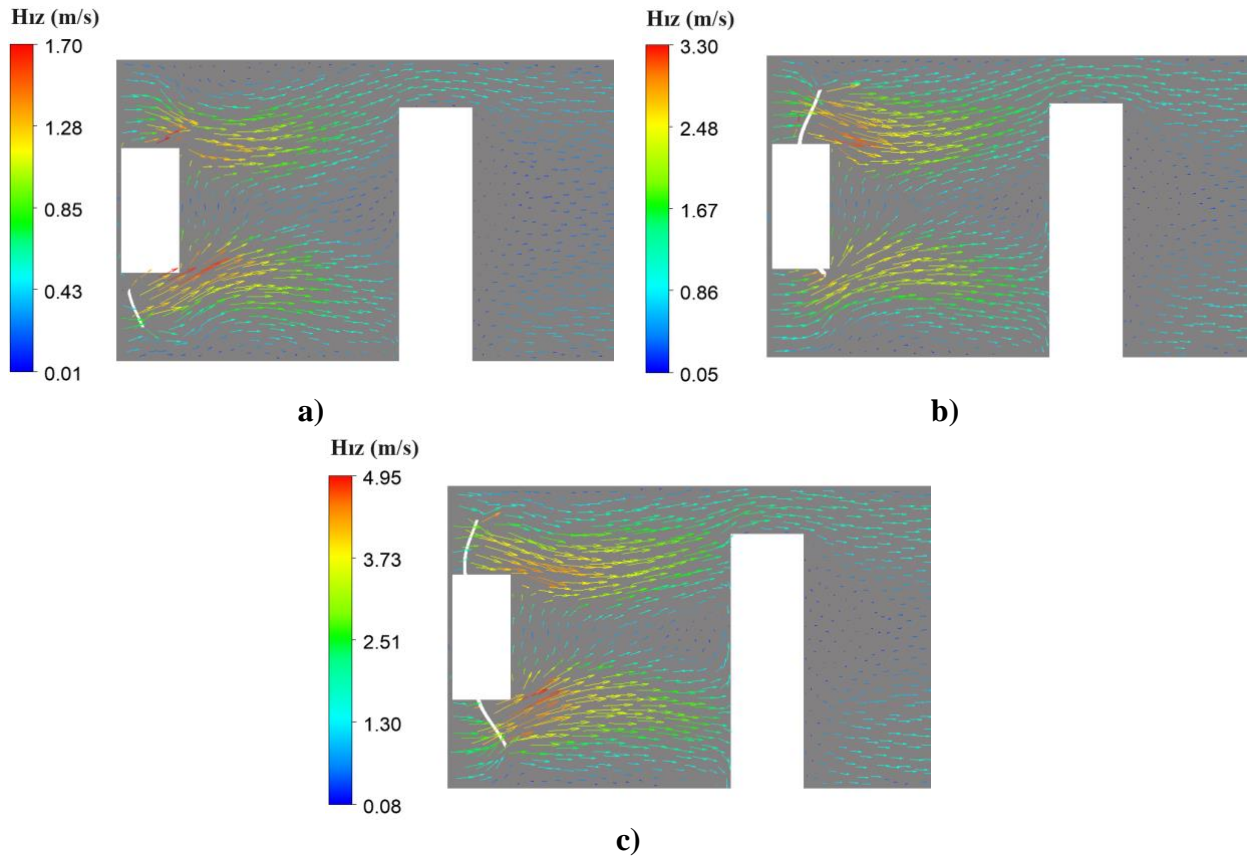
Şekil 6. 0.5C deşarj oranı için lityum bataryanın zamana bağlı termal davranışının literatürdeki çalışmayla karşılaştırması

Lityum bataryanın farklı deşarj oranlarında sergilediği elektriksel davranış Şekil 7’de gösterilmiştir. Genel olarak bakıldığında, başlangıçta batarya hücrelerine yük binmesiyle gerilim değerlerinde ani düşüşler gözlemlenmiştir. Deşarj oranı arttıkça düşüş miktarları da artmıştır. Buna bağlı olarak bataryanın farklı deşarj oranlarında verebildiği gerilim değerleri de farklı olmuştur. Batarya hücresi daha düşük deşarj oranında daha yüksek gerilim verebilirken, yüksek deşarj oranında daha düşük gerilim sağlamıştır. Ayrıca, batarya düşük deşarj oranında stabil bir gerilim değeri sağlayabilirken, deşarj oranı arttıkça verebileceği gerilim değeri belli bir zaman sonra düşüşe geçmiştir. Deşarj oranının artmasıyla birlikte bu düşüş miktarı artmış ve stabil olarak verebildiği gerilim süresi azalmıştır. Bu bağlamda 0.2C deşarj oranında batarya tüm süre boyunca stabil olarak kabaca 1.42 V gerilim verebilmiştir. 0.4C deşarj oranında batarya hücresi yaklaşık olarak 2000 s boyunca 1.29 V gerilim sağlayabilmiş ve sonrasında 1.25 V civarlarına düşmüştür. 0.6C deşarj oranında batarya hücresi yaklaşık olarak 1500 s boyunca 1.15 V gerilim sağladıktan sonra 1.05 V seviyelerine düşmüştür. 0.8C deşarj oranında ise batarya hücresi 1000 s boyunca kabaca 1 V gerilim değeri vermiş ve sonrasında diğer deşarj oranlarına göre daha hızlı bir şekilde ve daha yüksek bir düşüşle 0.8 V seviyelerine gerilemiştir. Ayrıca, 0.8C deşarj oranında batarya hücresi 3000 s’yi tamamlayamadan durma voltajına gelmiştir.



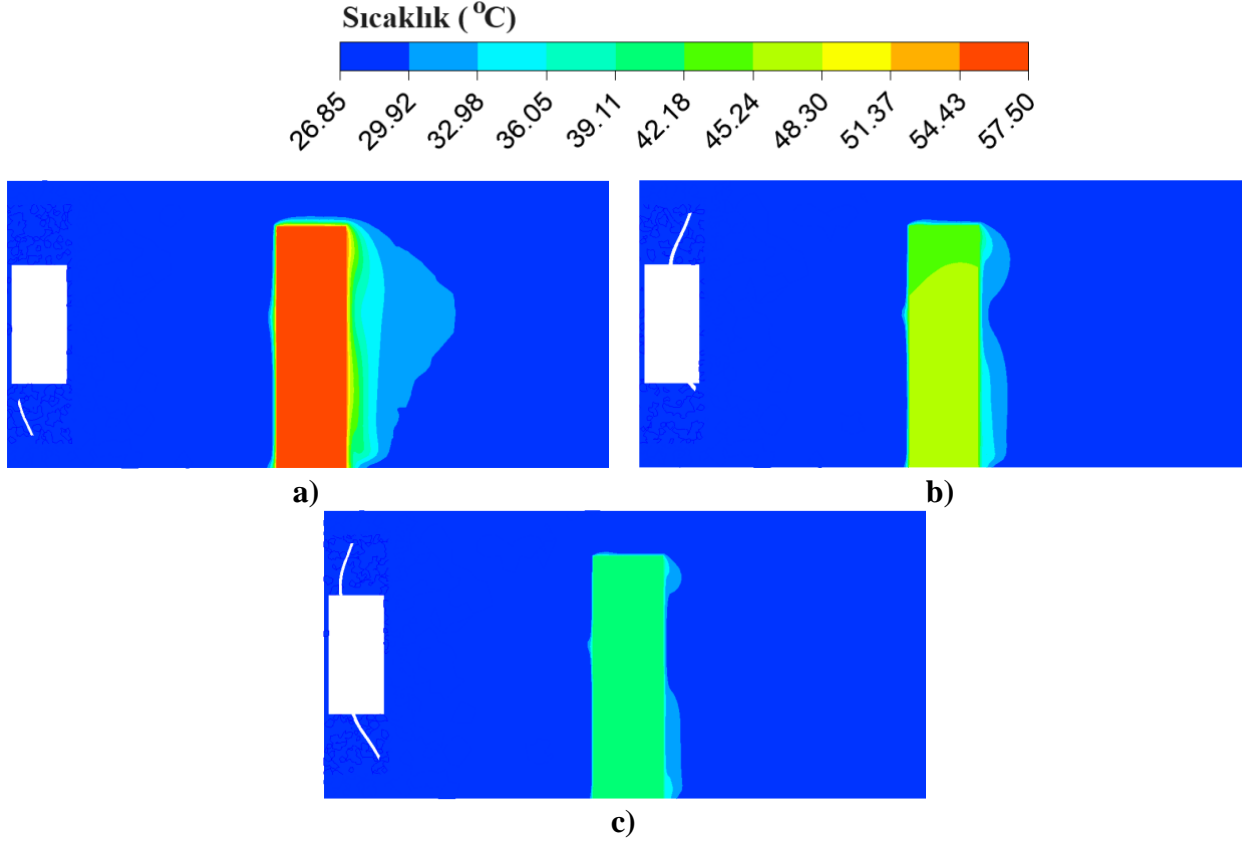
Şekil 7. Farklı deşarj oranlarında batarya hücresi geriliminin zamana bağlı değişimi

Şekil 8’de hava akışının kararlı hale geldikten sonraki durum için kanalın ortasında YZ düzlemi üzerinde farklı fan devirlerindeki hız vektörü dağılımı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde fanın dönme hareketiyle hava akışı merkeze doğru yönelmiş ve sonrasında yayılarak dağılmıştır. Beklenildiği üzere fan devrinin artmasıyla birlikte hava hızları da artmıştır. Bu bağlamda verilen düzlem üzerinde en yüksek hızlar 1000 rpm için 1.70 m/s, 2000 rpm için 3.30 m/s, 3000 rpm için 4.95 m/s seviyelerinde meydana gelmiştir.



Şekil 8. Kararlı haldeki hava akışına ait hız vektörlerinin fan devrine bağlı değişimi. a) 1000 rpm, b) 2000 rpm ve c) 3000 rpm

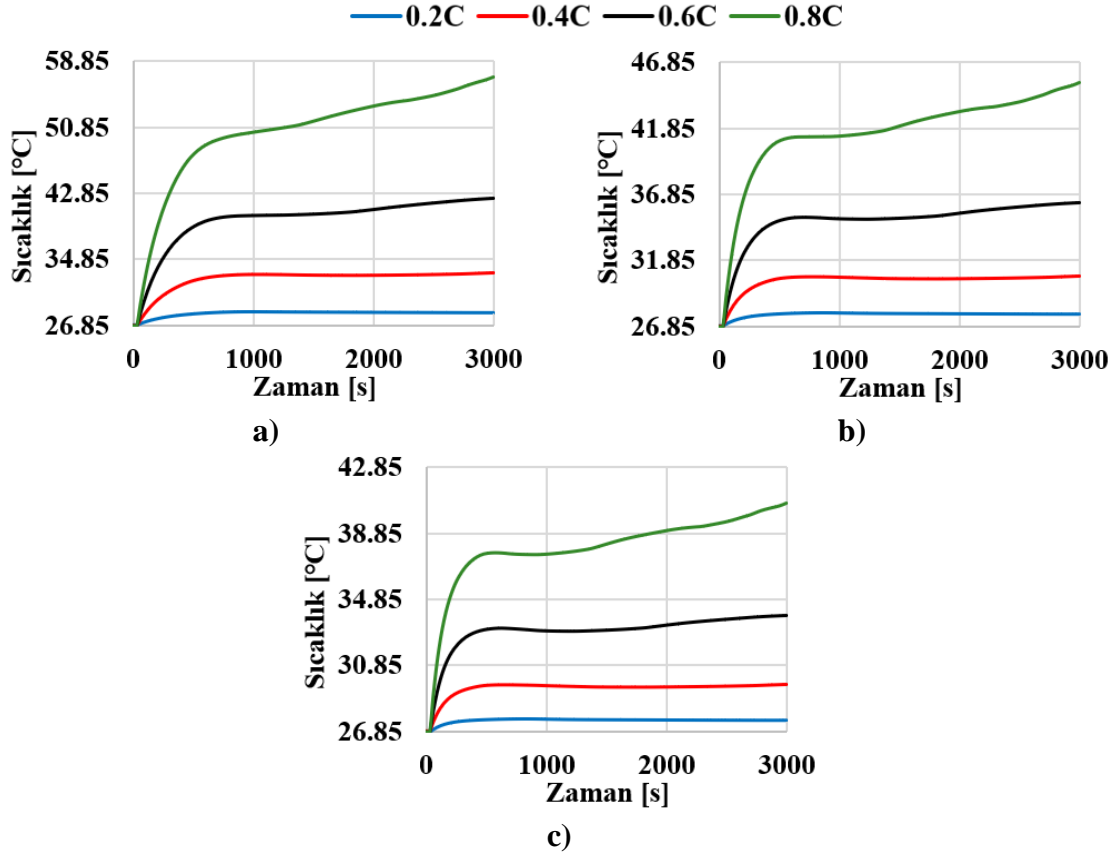
Hesaplama süresi sonunda 0.8C deşarj oranı için farklı fan devirlerinde kanalın ortasında YZ düzlemi üzerinde meydana gelen sıcaklık dağılımı Şekil 9’da gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde fan devrinin ve dolayısıyla hava hızının artmasıyla batarya hücresi sıcaklıkları azalmıştır. Bu bağlamda ortalama batarya sıcaklıkları 1000 rpm için 57.0°C, 2000 rpm için 45.4°C ve 3000 rpm için 40.7°C civarlarına ulaşmıştır.



Şekil 9. 3000 saniye ve 0.8C deşarj oranında farklı fan devirlerinde YZ düzlemi üzerindeki sıcaklık dağılımları. **a)** 1000 rpm, **b)** 2000 rpm ve **c)** 3000 rpm

Farklı fan devirlerinde ve deşarj oranlarında batarya hücresi üzerinde meydana gelen sıcaklıkların zamana bağlı değişimi Şekil 10’da verilmiştir. Batarya sıcaklıkları genel olarak zamanla artış göstermiştir. Özellikle başlangıç kısmında batarya sıcaklıklarındaki artış çok daha hızlı gerçekleşmiştir. Ancak, 0.2C ve 0.4C gibi düşük deşarj oranlarında bu sıcaklık artışı belli bir süreden sonra durmuş ve batarya sıcaklığı sabit kalmıştır. 0.6C ve 0.8C oranlarında ise batarya sıcaklıkları incelenen süre boyunca artmaya devam etmiştir. Deşarj oranının artması batarya hücresi sıcaklıklarını arttırırken fan devrinin artmasıyla batarya sıcaklıklarında düşüş meydana gelmiştir. Ancak, 0.2C deşarj oranında üç fan devrinde de batarya sıcaklıkları hemen hemen birbiriyle ve ortam sıcaklığıyla aynı kalmıştır. Bu durum 0.2C deşarj oranında yüksek fan devri kullanımının gereksiz olduğunu ortaya koymuştur. Diğer taraftan 0.8C deşarj oranında ve 1000 rpm fan devrinde batarya hücresi

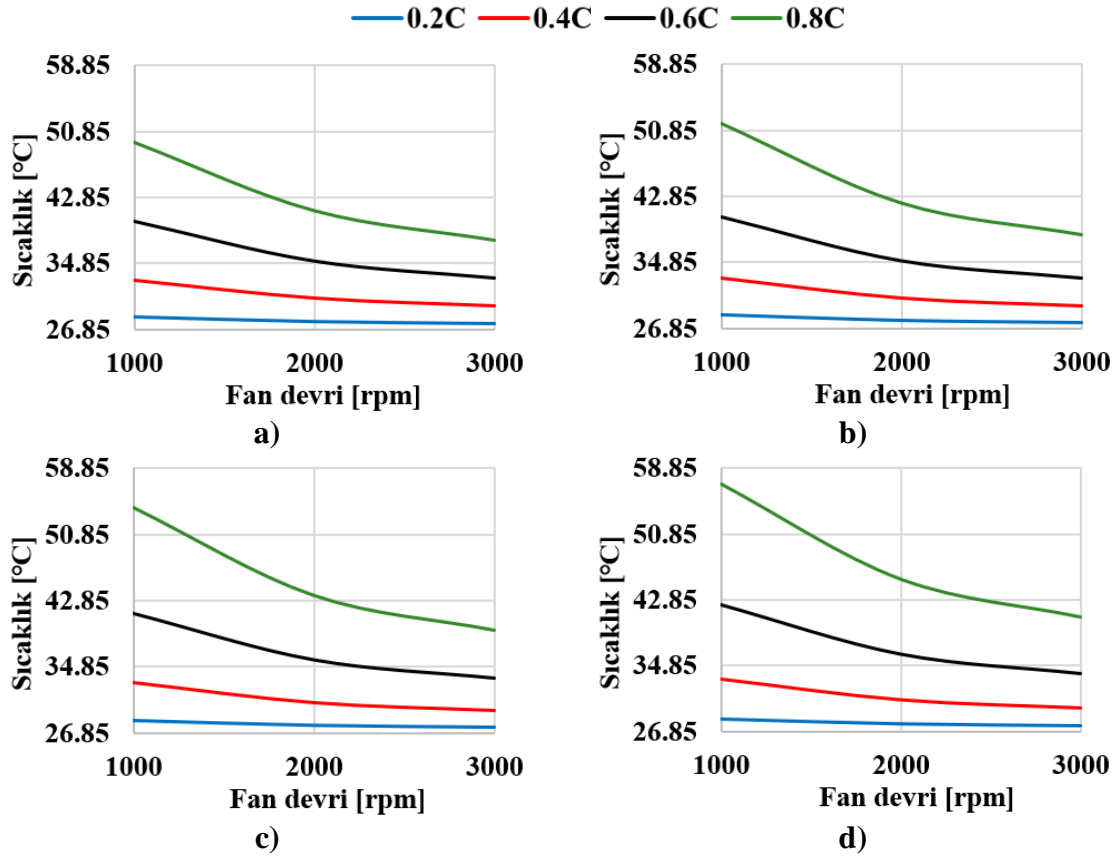
çalışma sıcaklığı aralığının neredeyse dışına çıkmış ve bu fan devrinin bu deşarj oranı için yetersiz olduğunu göstermiştir.



Şekil 10. Farklı fan devirlerinde ve deşarj oranlarında batarya hücresi üzerinde meydana gelen sıcaklıkların zamana bağlı değişimi. a) 1000 rpm, b) 2000 rpm ve c) 3000 rpm

Farklı zamanlarda ve deşarj oranlarında batarya hücresi üzerinde meydana gelen sıcaklıkların fan devrine bağlı değişimi Şekil 11’de verilmiştir. Fan devrinin artması tüm deşarj oranlarında batarya hücresi sıcaklığını düşürmüştür. Farklı deşarj oranları için batarya hücresinde meydana gelen sıcaklıklar arasındaki fark fan devrinin artmasıyla azalmıştır. Diğer taraftan geçen sürenin artmasıyla farklı deşarj oranları için batarya hücresinde meydana gelen sıcaklıklar arasındaki fark artmıştır. 0.2C deşarj oranında batarya hücresi sıcaklığı şekilde incelenen dört farklı zamanda ve üç farklı fan devrinde de hemen hemen aynı kalmıştır. Bu bağlamda 0.2C deşarj oranında batarya hücresi sıcaklığı 1000 rpm, 2000 rpm ve 3000 rpm fan devirlerinde yaklaşık olarak 28°C’de sabit kalmıştır. 0.4C deşarj oranında batarya hücresi sıcaklığı fan devriyle azalmış ancak farklı zamanlarda çok az bir değişim meydana gelmiştir. 0.4C deşarj oranında batarya hücresi sıcaklıkları şekilde incelenen dört zaman için kabaca 1000 rpm fan devrinde 33°C, 2000 rpm’de 30.5°C, 3000 rpm’de 29.6°C’dir. 0.6C deşarj oranında fan devrinin artmasıyla sıcaklıklar düşerken, özellikle 2250 s’den sonra sıcaklıklarda gözle görülür bir artış gerçekleşmiştir. Bu bağlamda fan devrinin 1000 rpm’den 3000 rpm’e çıkmasıyla batarya hücresi sıcaklığında kabaca 8°C düşüş meydana gelmiştir. 750 s ve 3000 s arasında sıcaklıklar kabaca 1000 rpm için 2°C, 2000 rpm için 1°C, 3000 rpm için 0.8°C artmıştır. 0.8C deşarj oranı için

1000 rpm ve 3000 rpm fan devri arasında batarya hücresi sıcaklığındaki düşüş miktarı diğer durumlara göre daha büyük olmuştur. Bu fark zamanla giderek artmıştır. Ayrıca, 750 s'den 3000 s'ye kadar batarya hücresi sıcaklıklarında diğer durumlara göre daha büyük artışlar meydana gelmiştir. Bu bağlamda fan devrinin üç katına çıkmasıyla batarya hücrelerindeki sıcaklık düşüşü 750 s için 11.9°C, 1500 s için 13.4°C, 2250 s için 14.8°C ve 3000 s için 16.2°C seviyelerinde gerçekleşmiştir. Diğer taraftan, 750 s'den 3000 s'ye sıcaklık artışları fan devri 1000 rpm'de 7.4°C, 2000 rpm'de 4.1°C, 3000 rpm'de 3.1°C olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 11. Farklı zamanlarda ve deşarj oranlarında batarya hücresi üzerinde meydana gelen sıcaklıkların fan devrine bağlı değişimi. a) 750 s, b) 1500 s, c) 2250 s ve d) 3000 s

4. Sonuçlar ve Öneriler

Çalışma kapsamında silindirik bir lityum bataryanın farklı deşarj oranlarında zorlanmış hava soğutma etkisinde sergilediği elektriksel ve termal performans nümerik olarak incelenmiştir. Bu bağlamda, batarya hücresi, girişinde fan bulunan kare kesitli bir kanalda konumlandırılmış ve farklı fan devirleri için termal davranışı değerlendirilmiştir. Batarya hücresinin elektrokimyasal karakteristiğinin modellenmesinde Eşdeğer Devre Modeli kullanılmış olup, model parametreleri Alsharif ve ark.'larının (Alsharif ve ark., 2022) çalışmasından alınmıştır. Elde edilen sonuçlar batarya

sıcaklığının zamana ve fan devrine bağlı değişimi, batarya hücresi geriliminin zaman bağlı değişimi, kanal içerisinde meydana gelen sıcaklık dağılımı ve hız vektörleri açısından değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

- Deşarj oranındaki artışla birlikte batarya hücresi sıcaklığı artmış ve batarya hücresinin verebildiği gerilim değeri azalmıştır. Bu bağlamda en yüksek sıcaklık ve en düşük gerilim değerleri 0.8C deşarj oranında, en düşük sıcaklık ve en yüksek gerilim değerleri 0.2C deşarj oranında elde edilmiştir.
- Deşarj oranı arttıkça batarya hücresindeki anlık gerilim düşüş miktarı da artmış ve stabil olarak verebildiği gerilim süresi azalmıştır. 0.2C, 0.4C, 0.6C ve 0.8C deşarj oranlarında batarya hücresi gerilimindeki anlık düşüşler sırasıyla 0.05V, 0.18V, 0.31V ve 0.44V seviyelerindedir. Ayrıca, 0.2C deşarj oranında batarya hücresi 3000 s boyunca 1.43 V, 0.4C'de yaklaşık 1500 s boyunca 1.29 V, 0.6C'de yaklaşık 1000 s boyunca 1.15 V ve 0.8C'de yaklaşık 750 s boyunca 1.02 V gerilimi değerini stabil olarak verebilmiştir.
- Fan devrinin artmasıyla batarya hücrelerinin sıcaklıkları düşmüştür. Bu düşüş 0.2C deşarj oranında ihmal edilebilir düzeyde gerçekleşmiştir. Çalışma kapsamında incelenen süre sonunda sıcaklık düşüşleri fan devrinin iki katına çıkmasıyla 0.4C için %7.45, 0.6C için %14.30 ve 0.8C için %20.43 oranında gerçekleşmiştir. Fan devrinin üç katına çıkmasıyla 0.4C için %10.34, 0.6C için %19.91 ve 0.8C için %28.54 oranında sıcaklık düşüşleri meydana gelmiştir.
- En yüksek batarya hücresi sıcaklığı 1000 rpm fan devrinde 0.8C deşarj oranında yaklaşık olarak 57°C'dir. Sonuç olarak batarya hücresi, çalışma sıcaklığı aralığının neredeyse dışına çıkmıştır ve fan devri 0.8C deşarj oranı için yetersiz kalmıştır. 0.2C deşarj oranında ise tüm fan devirlerinde batarya hücresi sıcaklığı en düşük ve hemen hemen aynı kalmıştır. Bu durumda yüksek fan devrinin gereksiz olduğu ortaya çıkmıştır.
- Fan devrinin artmasıyla hava hızı da artmıştır. Bu bağlamda çalışmada ele alınan düzlem üzerinde meydana gelen en yüksek hız değerleri yaklaşık olarak fan devrindeki artış oranı kadar artmıştır.

Bu çalışmada kullanılan batarya modeli kullanılarak gelecekteki çalışmalarda çok sayıda batarya hücresinin seri ve paralel bağlı olduğu bir batarya modülünün farklı soğutma koşullarında ve farklı batarya modelleri için sergilemiş olduğu termal ve elektriksel performanslar incelenebilir.

Tesekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK, proje no 123M582) tarafından desteklenmiştir.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Alsabari, A., Hassan, M. K., che soh, A., & Zafira, R. (2021). Modeling and validation of lithium-ion battery with initial state of charge estimation. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 21, 1317. doi:10.11591/ijeecs.v21.i3.pp1317-1331
- Alsharif, K. I., Pesch, A., Borra, V., Cortes, P., MacDonald, E., Li, F. X., & Choo, K. (2022). Transient Thermal and Electrical Characteristics of a Cylindrical LiFeS₂ Cell with Equivalent Circuit Model. *ArXiv*, abs/2311.02095.
- ANSYS *Fluent Battery Module Manual* (2015). ANSYS®, Inc. Canonsburg, PA: SAS IP Inc.
- Bilgen, S. (2014). Structure and environmental impact of global energy consumption. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 38, 890-902. doi:10.1016/j.rser.2014.07.004
- Chaoui, H., & Gualous, H. (2017). Online parameter and state estimation of lithium-ion batteries under temperature effects. *Electric Power Systems Research*, 145, 73-82. doi:https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.12.029
- Chen, S. C., Wan, C. C., & Wang, Y. Y. (2005). Thermal analysis of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 140(1), 111-124. doi:10.1016/j.jpowsour.2004.05.064
- Deng, D. (2015). Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. *Energy Science & Engineering*, 3(5), 385-418. doi:10.1002/ese3.95
- Gao, Z., Chin, C. S., Woo, W. L., & Jia, J. (2017). Integrated Equivalent Circuit and Thermal Model for Simulation of Temperature-Dependent LiFePO₄ Battery in Actual Embedded Application. *Energies*, 10(1). doi:10.3390/en10010085
- Greco, A., Jiang, X., & Cao, D. P. (2015). An investigation of lithium-ion battery thermal management using paraffin/porous-graphite-matrix composite. *Journal of Power Sources*, 278, 50-68. doi:10.1016/j.jpowsour.2014.12.027
- Guo, G. F., Long, B., Cheng, B., Zhou, S. Q., Xu, P., & Cao, B. G. (2010). Three-dimensional thermal finite element modeling of lithium-ion battery in thermal abuse application. *Journal of Power Sources*, 195(8), 2393-2398. doi:10.1016/j.jpowsour.2009.10.090
- Hatchard, T. D., MacNeil, D. D., Basu, A., & Dahn, J. R. (2001). Thermal model of cylindrical and prismatic lithium-ion cells. *Journal of the Electrochemical Society*, 148(7), A755-A761. doi:10.1149/1.1377592

- Jiang, G. W., Huang, J. H., Liu, M. C., & Cao, M. (2017). Experiment and simulation of thermal management for a tube-shell Li-ion battery pack with composite phase change material. *Applied Thermal Engineering*, 120, 1-9. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.03.107
- KÖK, C., & Alkaya, A. (2020). Investigation of Thermal Behavior of Lithium-Ion Batteries under Different Loads. *European Mechanical Science*, 4(3), 96-102. doi:10.26701/ems.635707
- Li, W., Garg, A., Wang, N., Gao, L., Le Phung, M. L., & Tran, V. M. (2022). Computational Fluid Dynamics-Based Numerical Analysis for Studying the Effect of Mini-Channel Cooling Plate, Flow Characteristics, and Battery Arrangement for Cylindrical Lithium-Ion Battery Pack. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 19(4). doi:10.1115/1.4054648
- Li, X. X., Zhong, Z. D., Luo, J. H., Wang, Z. Y., Yuan, W. Z., Zhang, G. Q., . . . Yang, C. X. (2019). Experimental Investigation on a Thermoelectric Cooler for Thermal Management of a Lithium-Ion Battery Module. *International Journal of Photoenergy*, 2019. doi:10.1155/2019/3725364
- Liu, L., Wang, L. Y., Chen, Z., Wang, C., Lin, F., & Wang, H. (2013). Integrated System Identification and State-of-Charge Estimation of Battery Systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 28(1), 12-23. doi:10.1109/TEC.2012.2223700
- Lyu, Y., Siddique, A. M., Gadsden, S. A., & Mahmud, S. (2021). Experimental investigation of thermoelectric cooling for a new battery pack design in a copper holder. *Results in Engineering*, 10. doi:10.1016/j.rineng.2021.100214
- Madani, S. S., Schaltz, E., & Knudsen Kær, S. (2019). An Electrical Equivalent Circuit Model of a Lithium Titanate Oxide Battery. *Batteries*, 5(1). doi:10.3390/batteries5010031
- Ozbektas, S., Sungur, B., & Topaloglu, B. (2023). Numerical Investigation of the Effect of Heat Sinks With Various Fin Geometries on the Performance of a Thermoelectric Generator. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 15(3). doi:10.1115/1.4056245
- Plett, G. L. (2015). *Battery Management Systems* (Vol. 1). Norwood, Massachusetts: Artech House.
- Rao, Z. H., Qian, Z., Kuang, Y., & Li, Y. M. (2017). Thermal performance of liquid cooling based thermal management system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface. *Applied Thermal Engineering*, 123, 1514-1522. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.06.059
- Shahid, S., & Agelin-Chaab, M. (2017). Analysis of Cooling Effectiveness and Temperature Uniformity in a Battery Pack for Cylindrical Batteries. *Energies*, 10(8). doi:10.3390/en10081157
- Tran, M. K., Mathew, M., Janhunen, S., Panchal, S., Raahemifar, K., Fraser, R., & Fowler, M. (2021). A comprehensive equivalent circuit model for lithium-ion batteries, incorporating the effects of state of health, state of charge, and temperature on model parameters. *Journal of Energy Storage*, 43. doi:10.1016/j.est.2021.103252
- Yao, L. W., Aziz, J. A., Kong, P. Y., & Idris, N. R. N. (2013, 10-13 Nov. 2013). *Modeling of lithium-ion battery using MATLAB/simulink*. Paper presented at the IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.

Arazi ve Arsa Düzenlemesi Uygulamalarında Bedele Dönüştürme Miktarının Tespiti

Bayram UZUN^{1,7}, Volkan YILDIRIM^{2,6,7}, Fatih TERZİ^{3,7*}, Bura Adem ATASOY^{4,7}, Semih UZUN^{5,7}

Öz

2019 yılında 3194 sayılı İmar Kanunu'nda yapılan değişiklikler ile birlikte, imar planları için esas ve öncelikli olan uygulama yöntemi Arazi ve Arsa Düzenlemesi (AAD) olarak belirlenmiştir. Nitekim Türk mevzuatında AAD, imar planlarının uygulanmasındaki en etkin ve en adil yöntem olarak öne çıkmaktadır. Ancak bu yöntemin uygulanmasında bazı temel zorluklar bulunmaktadır. Üzerinde yasalara uygun olarak yapılaşmış ruhsatlı binaların bulunduğu parsellerin AAD uygulamalarında değerlendirilmesi bu zorlukların en önemlilerindedir. Bu çalışmada; Kanunda 2019 yılında yapılan değişiklikte re'sen uygulanabilir hale gelen düzenleme ortaklık payının bedele dönüştürülmesi yöntemi incelenmiştir. Çalışma kapsamında, Arazi ve Arsa Düzenlemesi (AAD) uygulamalarında düzenleme ortaklık payının bedele dönüştürülmesi örnek bir alan üzerinden incelenmiştir. Ayrıca aynı uygulama esas alınarak düzenleme ortaklık payının bedele dönüştürülmesi uygulamasının nasıl yapılacağı anlatılmış ve bedele dönüştürülecek miktara ilişkin hesaplar yapılmıştır. Yöntem için uygulayıcıların ihtiyaç duyacağı klişe örnekleri üzerinden bedele dönüştürmeye ilişkin işlemler açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Arazi ve Arsa Düzenlemesi (AAD), İlave terk, Bedele dönüştürme, Ruhsatlı yapı.

Determining Amount of the Additional Development Readjustment Share to be Converted into Price in Land Readjustment

Abstract

With the amendments made to the Zoning Law No. 3194 in 2019, the main implementation method for zoning plans has now been determined as Land Readjustment (LR). As a matter of fact, in Turkish legislation, LR stands out as the most effective and fair method in the implementation of zoning plans. However, there are some fundamental difficulties in implementation of this method. One of the most important of these is the evaluation of parcels on which legally licensed structures are located, in LR implementation. In this study; the method of converting the development readjustment share into price, which became ex officio applicable with the amendment made to the law in 2019, is being examined. Within the scope of the study, the conversion the development readjustment share into price in Land Readjustment (LR) implementations were examined through a sample study area. In addition, based on the same implementation, how to convert development readjustment share into a price is explained and calculations are made regarding the amount to be converted into a price. The work and procedures related to conversion the development readjustment share into price are explained through examples of clichés that practitioners will need for the method.

Keywords: Land Readjustment, Development readjustment share, Conversion to price, Licensed structure.

^{1,2,4}Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, buzun@ktu.edu.tr, yvolkan@ktu.edu.tr, bugratasoy@ktu.edu.tr

^{3,5}Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği ABD, Trabzon, Türkiye, fatihterzi@ktu.edu.tr, semihuzun8@gmail.com

²GISLand Bilişim Ticaret Ltd. Şti., Trabzon Teknoloji Geliştirme Bölgesi, Trabzon Teknokent, Trabzon, Türkiye

^{1,2,3,4,5}Karadeniz Teknik Üniversitesi, Coğrafi Bilgi Sistemleri Ar-Ge Lab., Arazi ve Arsa Düzenlemesi Çalışma Grubu, Trabzon, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 11.07.2024

Kabul/Accepted: 03.09.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Giriş

Geçmişten günümüze artan nüfus ve sanayileşme, kentleşmeyi de beraberinde getirmiştir. Kentleşmenin beraberinde getirdiği en önemli yüklerden birisi de imar faaliyetleridir. İmar faaliyetlerinin dengeli bir şekilde yürütülmesi ve bir plan dâhilinde yönetilebilmesi için imar planları geliştirilmiştir.

İmar planları yapısı gereği üst ölçekten alt ölçeğe hiyerarşik bir ilişkiye sahiptir. Bu hiyerarşik düzende en alt kademede 1/1000 ölçekli Uygulama İmar Planları (UİP) yer almaktadır. İmar planlarının kademeli birlikteliği ilkesi gereğince alt ölçekli planların üst ölçekli planlara uyumlu olması gerekir. Bu sebeple 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 5. ve 6. maddeleri gereğince 1/1000 ölçekli UİP, 1/5000 ölçekli Nazım İmar Planı (NİP) ve daha üst ölçekli planlarla uyumlu olmalıdır (T.C. Resmî Gazete, 1985a; Danıştay Altıncı Dairesi, E:2002/853, K:2003/3482). 1/1000 ölçekli UİP, uygulamaya esas plandır ve bu planda parsel ölçeğinde kararlar verilir. UİP'ler mülkiyet dokusu ve imar planları arasındaki ilişkinin kurulmasını sağlar (Çoruhlu ve ark., 2020).

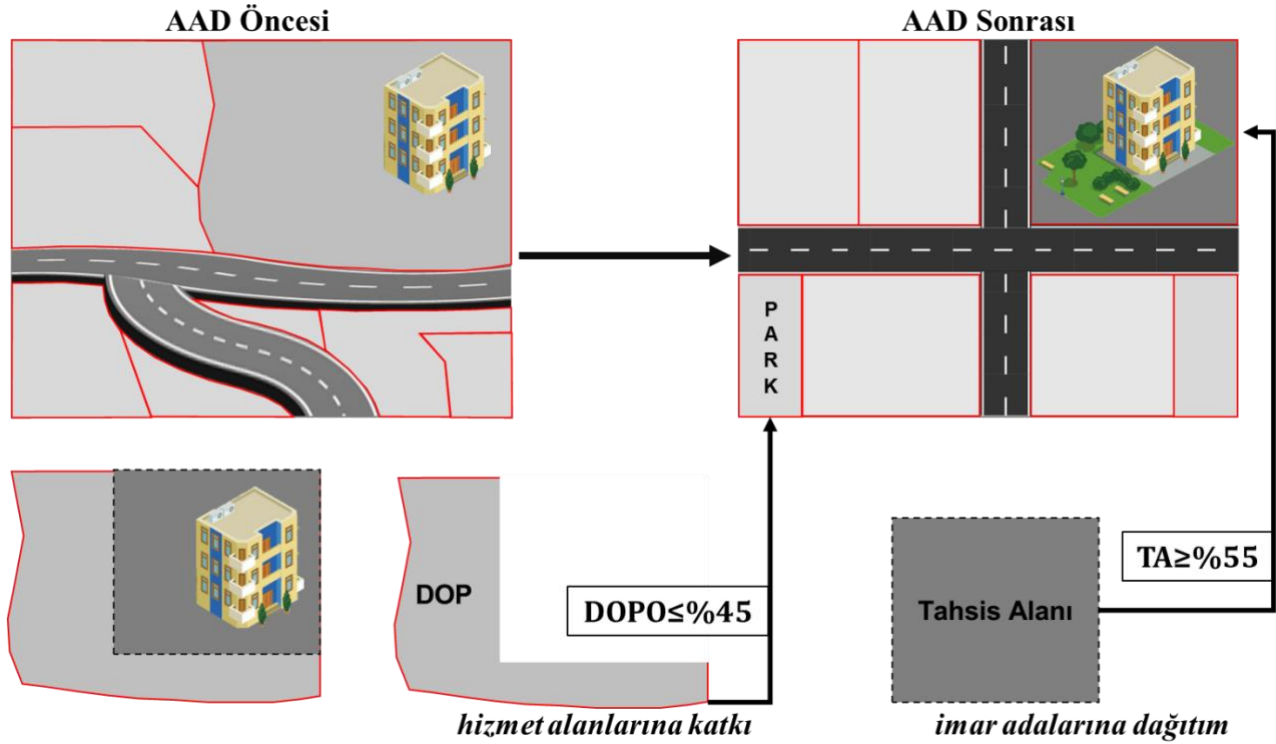
Türk mevzuatına göre mülkiyet dokusunun UİP'ler ile uyumlu hale getirilmesi imar uygulamalarıyla sağlanır. Bahse konu imar uygulamaları, parçacıl ve bütüncül yöntemler olarak iki sınıfa ayrılabilir. Parçacıl yöntemler ifraz, tevhid, yola terk ve sınır düzeltmesi gibi taşınmaz sahiplerinin isteği ile gerçekleştirilen uygulamalardır. Bu yöntemler isteğe bağlı imar uygulamaları olarak da adlandırılabilir. UİP'lerin isteğe bağlı imar uygulamalarıyla uygulanması, bu planın gerçekleştirilmesi noktasında oldukça zaman alan bir süreçtir. Ayrıca bu uygulamalar, büyük bir bölümü hizmet alanlarına isabet eden parsellerin ekonomik anlamda kaybına yol açmaktadır. Dahası isteğe bağlı imar uygulamaları şehirlerin dağınık büyümesine yol açmaktadır (Uzun, 2009).

Bütüncül yöntemler ise kamulaştırma ve Arazi ve Arsa Düzenlemesi (AAD)'dir (Uzun, 1992). Kamulaştırma yöntemi, bir parselin hizmet alanına isabet eden kısımlarının bedeli peşin ödenmek kaydıyla kamu yararına zorla alınmasıdır. Ancak bu yöntem, parsel sahiplerini mülksüz bırakması ve kamuya ciddi bir mali yük getirmesi sebebiyle eleştirilmektedir (Uzun, 2000; Çoruhlu ve ark., 2020). AAD ise, imar faaliyetleri açısından kullanımı güç olan kadastral dokunun kullanılabilir bir yapıya dönüşmesini sağlamaktadır (Çoruhlu ve Demir, 2013; Küçükmehtetoğlu ve Geymen, 2016; Doebele, 1986). AAD, bir düzenleme bölgesinde yer alan kadastral parsellerin, o bölgede yer alan hizmet alanlarına eşit oranda katkı yapmasını amaçlayan bir yöntemdir (Başer ve ark., 2017).

Türkiye'de imar planlarının uygulanması, planların hazırlanmasından uzun süreler sonra gerçekleşmektedir. Burada en temel sebep geçmişte imar uygulamaları için parçacıl yöntemlerin daha fazla tercih edilmesidir. Planlama ve plan uygulama faaliyetlerinin hızının, kentleşmenin ivmesini yakalayamaması sebebiyle kentlerin önemli bir bölümünde çarpık kentleşme söz konusu olmuştur.

Bu noktada AAD, planın adil, etkin ve hızlı bir şekilde uygulanmasını sağlayabilecek bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

Türk mevzuatında 3194 sayılı İmar Kanunu'nda 2019 yılında yapılan değişikliklere göre AAD, UİP'in uygulanmasında kullanılacak öncelikli yöntemdir. Diğer yöntemler ise zorunlu hallerde ve istisnai durumlarda tercih edilmelidir. Türk mevzuatında AAD, uygulamaya giren parsellerden alanları oranınca kesinti yapmak, parsellerin geriye kalan kısımlarını imar adalarında ve yapılaşmaya uygun koşullarda tahsis etmek ilkesine dayanmaktadır (Şekil 1). Böylelikle planın nimet ve külfetlerinin parsellere adil bir şekilde dağıtılması amaçlanmaktadır (Akyol ve Uzun, 1997; Uzun, 1992). Türkiye'de AAD uygulamalarının geçmişi Cumhuriyet öncesine dayanmaktadır. Ancak yöntemin etkin bir şekilde kullanımı, 1985 yılında yürürlüğe giren ve AAD uygulamalarının yasal dayanağı olan 3194 sayılı İmar Kanunu ile başlamıştır (Uzun ve Şimşek, 2018).



Şekil 1. Türk Arsa ve Arazi Düzenleme (AAD) sisteminin genel işleyişi

İyi uygulanan bir AAD ile kente ait altyapının tesis edilebilmesi için gerekli kazanımlar sağlanabilir, kamusal hizmet alanları elde edilebilir ve düzenli yapılaşma teşvik edilebilir. Ancak Türkiye'de gerçekleştirilen AAD uygulamalarının sorunları çözmek bir yana, daha büyük sorunlara yol açtığı durumlara da rastlanmaktadır (Uzun ve ark., 2022). Uygulama sırasında yapılan küçük hatalar sebebiyle yıllar sonra açılan davalar uygulamaların iptaliyle sonuçlanabilmektedir (Atasoy ve ark., 2002). Bu sebeple AAD uygulamalarında, düzenleme sınırının geçirilmesi, katkı oranlarının hesaplanması, dağıtım ve hisselendirme usulleri gibi hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir.

AAD'de en önemli süreçlerden birisi dağıtım aşamasıdır. Çünkü bu aşamada mevzuat hükümlerine göre her parselin eşdeğer yerden tahsis edilmesi gerekmektedir. Bir parsel için en eşdeğer yerin, imar planında isabet ettiği alan olduğu yadsınamaz bir gerçektir. O halde AAD uygulamalarında her parsel mümkün olduğunca mevcut konumundan ve başka parseller ile hisselendirilmeden tahsis edilmelidir (T.C. Resmî Gazete, 1985a; 2020). Ancak bazı durumlarda parsellerin tahsis alanları, tek başına yapılaşmaya uygun bir imar parseli oluşturmak için yeterli olmayabilir. Bu durumda da sözü edilen parseller farklı maliklerin mülkiyetindeki parsellerle hisselendirilebilmektedir. Ham durumda bulunan ve kentleşmenin etkilerinin henüz hissedilmediği bölgelerde yapılan AAD uygulamaları için bu durum hoş görülebilir. Ancak yapılaşmış bir parselin AAD'ye girmesi durumunda bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Dağıtım aşamasında bu tür yapılaşmış parsellerde bulunan ruhsatlı yapılar mümkün olduğunca korunmalıdır. Ancak bunun için ilgili yapıların imar planı ile de korunmuş olması gerekmektedir. Parselasyon planları, korunacak yapıların olabildiğince tek bir imar parselinde kalacağı şekilde tasarlanmalıdır. Ancak üzerinde korunacak yapı bulunan kadastral parselde tahsis edilecek alanın yapıyı korumaya yetmediği durumlarda, imar parseline farklı malikler hissedar olabilmektedir.

Bu soruna genellikle belediye/valilik veya hazine taşınmazlarını imar parseline hisselendirmek suretiyle çözüm üretilebilmektedir. Ancak düzenleme bölgesinde belediye/valilik veya hazine taşınmazının olmadığı durumlar için mülga *İmar Kanununun 18 inci Maddesi Uyarınca Yapılacak Arazi ve Arsa Düzenlemesi ile İlgili Esaslar Hakkında Yönetmelik*'inde farklı bir çözüm sunulmuştur. Yönetmelik'in 4. maddesinin c bendinde düzenleme ortaklık payının tanımı için "*düzenlemeden önceki yüzölçümlerinden % 35'e kadar düşülebilen miktar ve/veya zorunlu hallerde malikin muvafakati ile tesbit edilen karşılığı bedeldir*" ibaresi yer almaktadır. "...malikin muvafakati ile tesbit edilen karşılığı bedeldir" ibaresi ile düzenleme ortaklık payının malikin muvafakati ile bedele dönüştürülebileceği anlaşılmaktadır. Yine aynı Yönetmelik'in 10. maddesinin c bendinde yer alan "*Düzenlemeye tabi tutulan parselin zemin durumu ve üzerindeki yapının özelliği itibariyle düzenleme ortaklık payının alınmadığı hallerde, ilgisinin muvafakati ile düzenleme ortaklık payı miktarı bedele dönüştürülebilir.*" hükmü uyarınca, mülga mevzuata göre muvafakat şartıyla bedele dönüştürme işleminin yapılabileceği anlaşılmaktadır (T.C. Resmi Gazete, 1985b). Ancak mülga mevzuatta bedele dönüştürmenin nasıl yapılacağına ilişkin detaylara yer verilmemiştir.

Kanun koyucu, 2019 yılında 3194 sayılı İmar Kanunu'nda değişikliğe gitmiştir. Yapılan değişiklikle daha önce malikin muvafakati şartına bağlı olan, düzenleme ortaklık payının bedele dönüştürülmesi işlemi, artık ilgili yerel yönetimlerin takdirine bağlı olarak re'sen yapılabilmektedir. Buna göre 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 18. maddesinin 11. fıkrası uyarınca üzerindeki yasalara uygun ruhsatlı yapı sebebiyle parsellerin düzenleme ortaklık payının bir kısmı ya da tamamı re'sen bedele dönüştürülebilmektedir (T.C. Resmî Gazete, 1985a). Böylelikle tahsis alanı, üzerindeki

ruhsatlı yapıyı korumak için yeterli olmayan parsellerin ihtiyaç duyduğu alan, düzenleme ortaklık payının bedele dönüştürülmesi ile sağlanabilmektedir.

Türk mevzuatında bedele dönüştürme uygulamalarının yasal dayanağı 3194 sayılı İmar Kanunu ve 2020 yılında çıkarılan Arazi ve Arsa Düzenlemeleri Hakkında Yönetmelik (AADHY)'tir. 3194 sayılı İmar Kanunu'nda bedele dönüştürmeye ilişkin hükümler 11. ve 12. fıkralarda yer almaktadır. Bedele dönüştürmeye ilişkin AADHY'de yer alan hükümler ise 16. maddede "Düzenleme ortaklık payının alınmadığı durumlar" başlığı altında sunulmaktadır (T.C. Resmî Gazete, 1985a; 2020).

AAD yöntemi, doğrudan mülkiyeti yeniden düzenlemekle ilgili olduğu için adeta ikinci kadastro olarak adlandırılabilir. AAD'yi etkin bir şekilde uygulayan ülkelerde, AAD uygulamalarının başarısı; tarafların uygulamaya katılımı ile doğrudan ilişkilidir. Bu sebeple, AAD'ye ilişkin süreçlerin şeffaf bir şekilde yürütülmesi gerekir. AAD'de herhangi bir hata istenmeyen sonuçlara yol açacaktır. AAD sürecinde gerçekleştirilen işlemlerin şeffaf bir şekilde gerçekleştirilmemesi, uygulama sürecinde tarafların detaylara yeteri kadar hâkim olamaması, gerekli düzeltmelerin uygulama sürecinde gerçekleştirilememesi sebebiyle; günümüzde AAD'ye ilişkin davaların önemli bir kısmı uygulamanın iptali ile sonuçlanmaktadır (Çelik Şimşek ve Uzun, 2018). Dolayısıyla uygulamanın; bedele dönüştürme işleminin gerekçelerinin, bedele dönüştürülecek alanın miktarının ve bedele dönüştürmeye ilişkin işlemlerin ayrıca raporlanarak ve klişelerde belirtilerek encümen kararına bağlanması gerekmektedir. Bu durum, yapılan ilave kesinti miktarının ve bu miktara ilişkin bedelin sorgulayabilmesi ve bunların dava süreçlerinde denetlenebilmesi için oldukça önemlidir.

Mevzuatta yapılan irdelemelerde bedele dönüştürme işlemlerine ilişkin birçok hüküm bulunmasına karşın bedele dönüştürme miktarının nasıl belirleneceğinin açıklanmadığı görülmektedir. Öte yandan parsellerden yapılacak ilave kesintilere ilişkin hesaplarda da net bir belirtmeye rastlanmamıştır. Kanun ve Yönetmelik irdelendiğinde farklı parsel tipleri için farklı prosedürlerin uygulandığı, sürecin anlaşılabilir olmaktan uzak olduğu, Kanun'da ve Yönetmelik'te yer alan bazı ibarelerin birbiriyle çeliştiği görülmektedir. Mevzuatta bedele dönüştürme işleminin nasıl yapılacağına ilişkin bir klişe örneği de sunulmamaktadır.

Öte yandan bedele dönüştürme işleminin yapıldığı AAD uygulama örneği de oldukça azdır. Literatürde bedele dönüştürmenin hukuki olarak uygulanabilirliği üzerine yapılan çalışmalar bulunmaktadır (Sarı, 2008). Ancak literatürde bedele dönüştürmeye ilişkin karar verme sürecini ve hesaplarda kullanılacak olan matematiksel modeli ortaya koyan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Literatürde bedele dönüştürme konusu genellikle örnek uygulamalar üzerinden ya da kavramsal olarak irdelenmiş, bedele dönüştürmeye ilişkin hesapların nasıl gerçekleştirileceğine ilişkin formüllere ve klişe örneklerine yer verilmemiştir.

Çalışmamız kapsamında bedele dönüştürme uygulamalarında kullanılacak olan matematiksel modeller oluşturulmuştur. Ayrıca bedele dönüştürme uygulamalarında takip edilecek iş akışı

modellenerek sunulmuştur. Uygulamaların şeffaflığını arttırmak ve denetlenebilirliğini sağlamak amacıyla bedele dönüştürme miktarına ilişkin klişelerde hangi bilgilerin yer alması gerektiği örnek bir uygulama üzerinden gösterilmiştir. Örnek bir uygulama ile klişe örnekleri sunulmuş ve sonuçlar ortaya koyulmuştur.

2. Materyal ve Metot

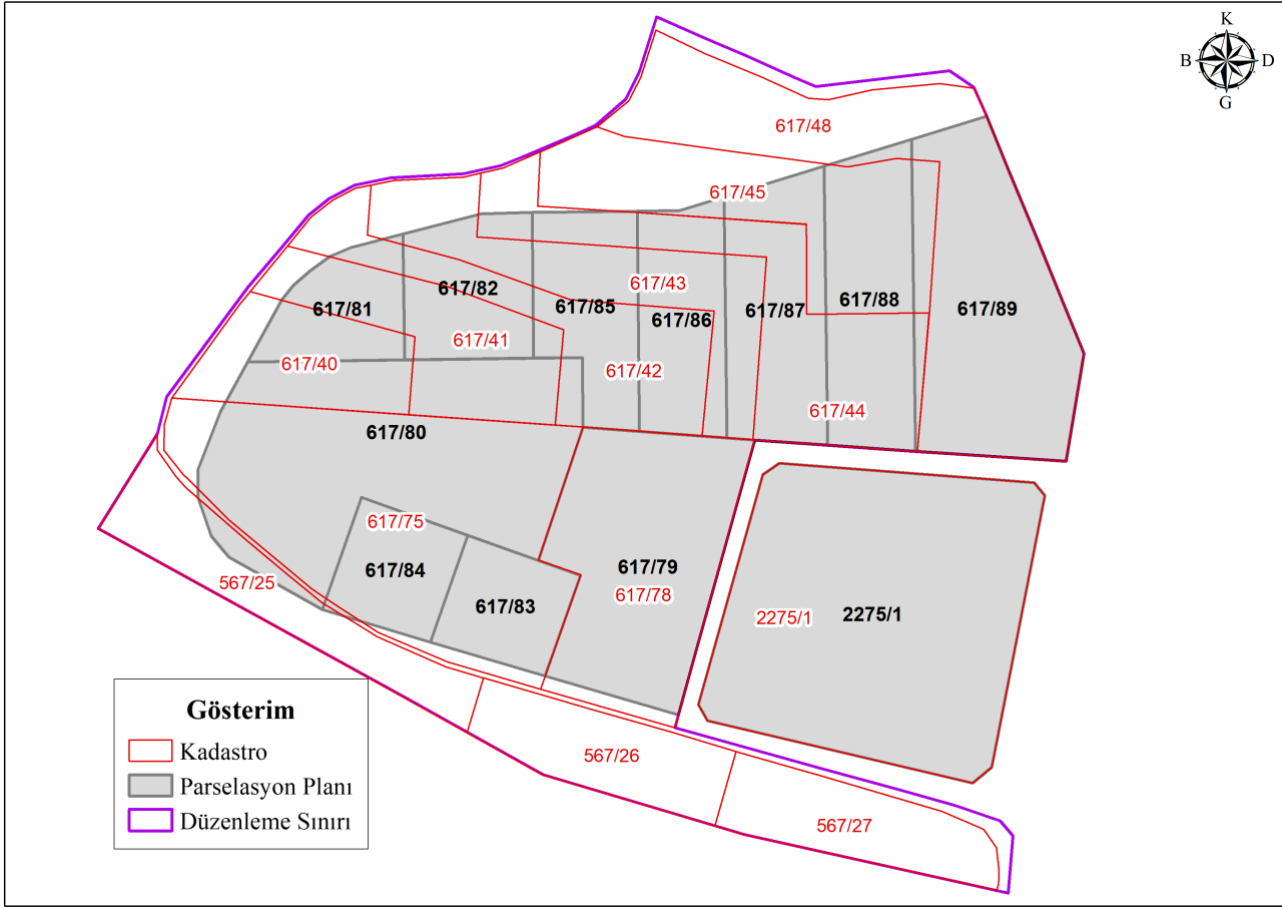
2.1. Çalışma Alanı

Çalışma, kurgusal bir alanda test edilmiştir. Öncelikle bir bölge oluşturulmuş ve bölgenin kadastral haritası hazırlanmıştır. Daha sonra 1/1000 ölçekli UİP hazırlanmıştır. (Şekil 2). Yapılan kurguya göre bölgede yer alan 617/78 numaralı parsel daha önce isteğe bağlı imar uygulaması ile yola ilişkin kısımlarını terk ederek imar adası içerisinde yapılaşmıştır. Bölgede yer alan kadastral parsellere ilişkin bilgiler Tablo 1’de sunulmuştur.

Bölge için düzenleme sınırı geçirilmiştir. Uygulama görmeyen kadastral parseller ile birlikte 617/78 numaralı parsel de uygulamaya dâhil edilmiştir. Tablo 1’de yer alan 2 numaralı sütunda parsellerin uygulamaya giren alanları, 4 numaralı sütunda ise parsellere ilişkin eski terkler gösterilmektedir. 8 numaralı sütun, Düzenleme Ortaklık Payı Oranı (DOPO) hesabının gerçekleştirilebilmesi için oluşturulmuştur. Uygulama kapsamında, encümen kararının alındığı kabulünden hareketle 617/78 numaralı parsel için bedele dönüştürme işlemi yapılmıştır.

Tablo 1. Örnek uygulama bölgesinde oluşturulan kadastral parsellere ve imar planına ilişkin bilgiler

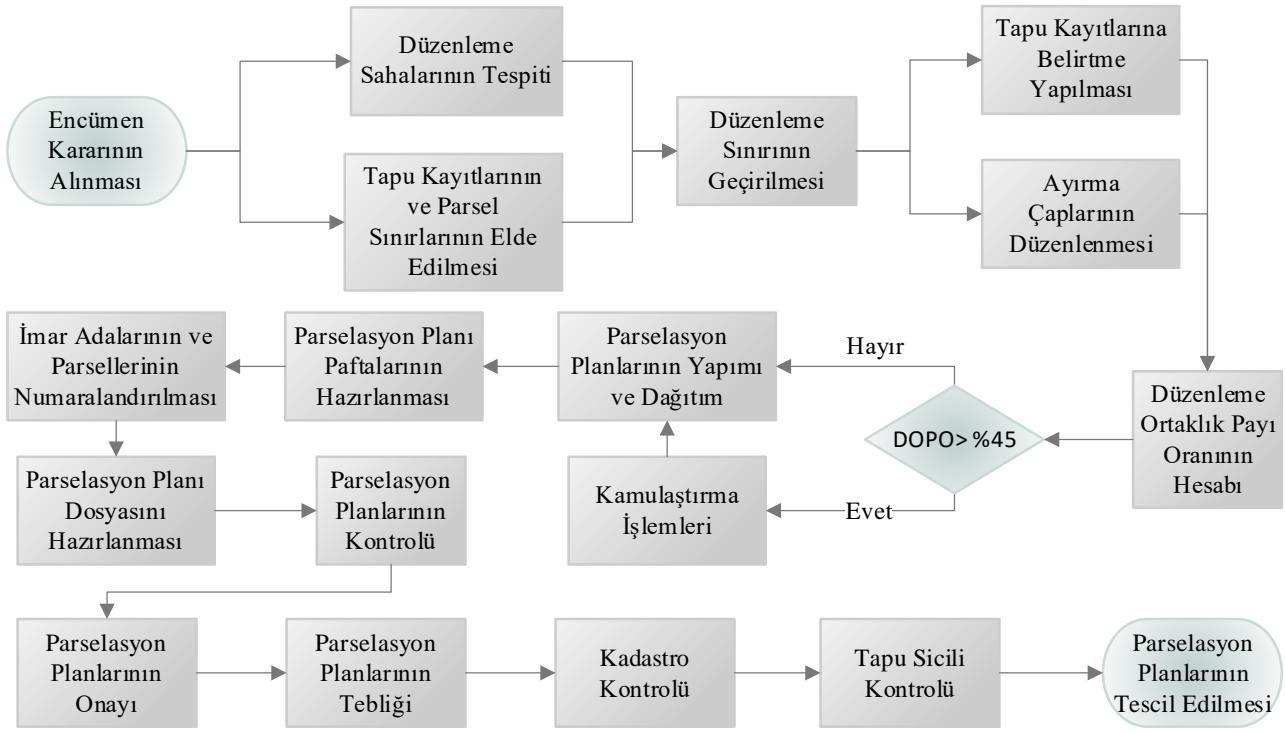
Ada/Par	Kadastro Parseli					İmar Planı	
	Alan	EskiDOP	EskiDOPMik	DOPal	DOPalma	AdaNo	Alan
1	2	3	4	8	9	5	6
567/25	17,571.75	-	-	17,571.75	-	617	240,023.4
567/26	14,771.76	-	-	14,771.76	-		
567/27	14,771.76	-	-	14,771.76	-		
617/40	15,400	-	-	15,400	-		
617/41	20,090	-	-	20,090	-		
617/42	21,730	-	-	21,730	-		
617/43	22,300	-	-	22,300	-		
617/44	29,230	-	-	29,230	-		
617/45	28,960	-	-	28,960	-		
617/48	50,576	-	-	50,576	-		
617/75	58,282.07	-	-	58,282.07	-		
617/78	32,076.74	4.280139	1,434.32	33,511.06	-		
	325,760.08						



Şekil 2. Çalışma alanı

2.2. Bedele Dönüştürme Uygulaması

Bir AAD uygulaması bünyesinde teknik ve hukuki birçok aşamayı barındırmaktadır. AAD uygulamaları öncelikle düzenlemeye girecek parsellerin cinslerinin ve parsellerin takyidatlı ve tedavüllü tapu kayıtlarının irdelenmesiyle başlamalıdır. Bu husus, uygulamaya giren parsellerin önceki terklerinin, bu terkleri yaparken görmüş oldukları uygulamanın türünün, parsellerin üzerindeki şerhlerin ve ipoteklerin belirlenebilmesi için oldukça önemlidir. Tapu kayıtlarının incelenmesinin ardından mülkiyet raporu hazırlanır ve onaylanır. AAD'deki işlem adımlarına ilişkin genel iş akışı Şekil 3'te izlendiği gibidir.



Şekil 3. Türk AAD sistemi iş akış süreci

2.2.1. DOPO ve İlk Tahsis Alanlarının Hesaplanması

Düzenleme Ortaklık Payı (DOP), AAD uygulamasına giren parsellerden düzenleme bölgesindeki umumi ve kamu hizmet alanlarının edinilmesi amacıyla kesilecek olan miktardır. DOPO ise, DOP için parsellerden kesilecek olan alanı gösteren orandır. DOPO, (1) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanır. Eşitlikte, $\sum KPA$ 'nın belirlenmesi sırasında parsellerin eski terk miktarları da dikkate alınmalıdır.

$$DOPO = \frac{\sum KPA - \sum IAA}{\sum KPA} \quad (1)$$

Formülde;

- $\sum KPA$, uygulamaya giren kadastral parsellerin düzenlemeye giren alanlarının toplamını,
- $\sum IAA$, düzenleme bölgesinde yer alan parsellenecek yapı adalarının alanları toplamını ifade etmektedir.

Parsellerden yapılacak kesintinin miktarı (2) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanır. Kesinti sonrasında kalan alan tahsis alanı olarak adlandırılır. Tahsis alanı, parsellere uygulama sonrasında tahsis edilecek olan alanın miktarıdır ve (3) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$DOP = KPA \times DOPO \quad (2)$$

$$TA = KPA \times (1 - DOPO) \quad (3)$$

Formülde;

- KPA , uygulamaya giren kadastral parselin düzenlemeye giren alanını,
- TA , parselde uygulama sonrasında tahsis edilecek alanı ifade etmektedir.

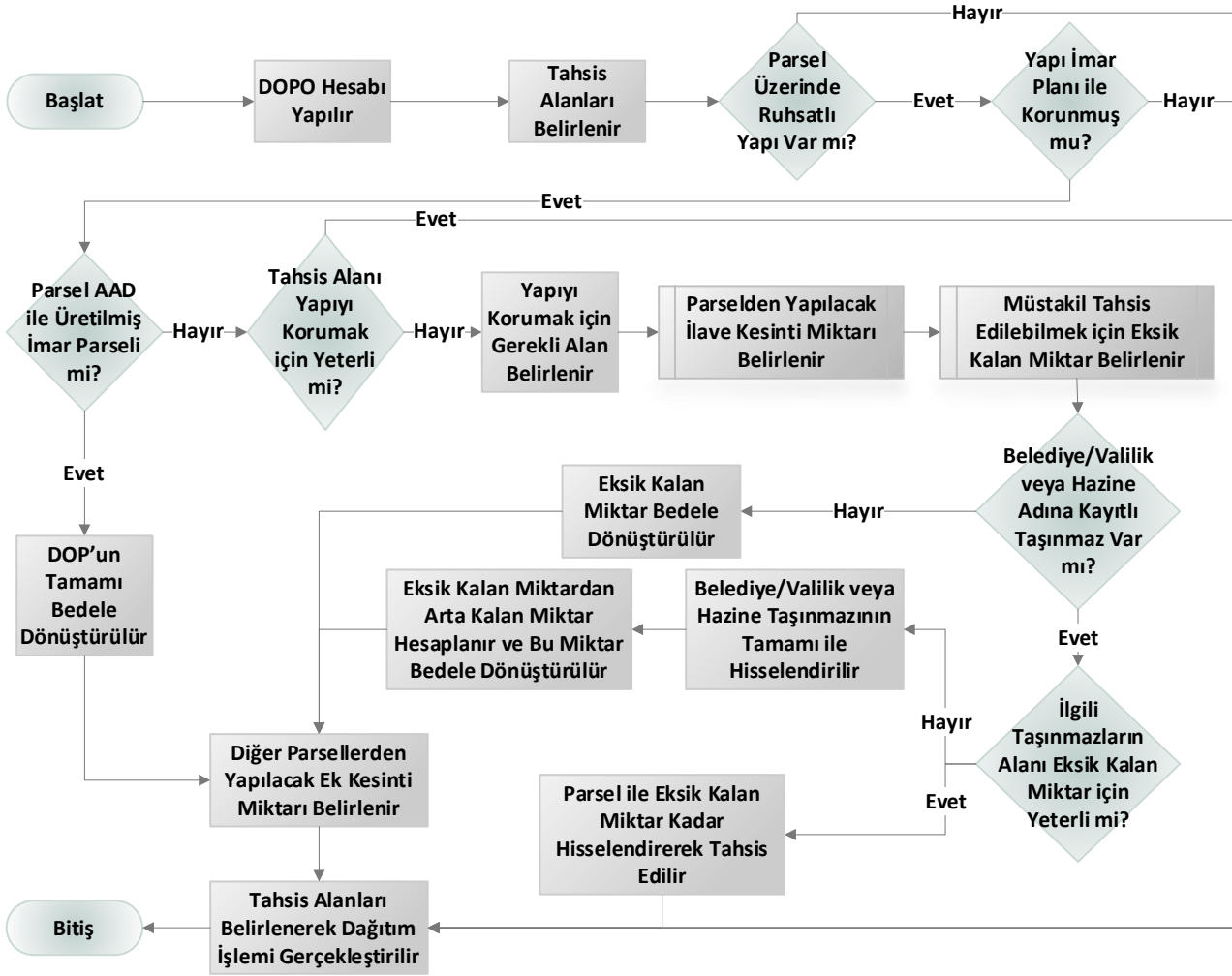
2.2.2. Bedele Dönüştürülecek Miktarın Belirlenmesi

Mevzuat hükümlerine göre düzenleme ortaklık payının bedele dönüştürülmesi, parselin üzerinde korunacak bir yapının bulunması durumunda mümkündür. Başka bir amaçla bedele dönüştürme işlemi mevzuat hükümlerine aykırı olacaktır. Bu sebeple öncelikle diğer seçeneklerin değerlendirilmesi, ancak zorunlu durumlarda bedele dönüştürme işlemine karar verilmesi gerekmektedir. İlgili karar verme süreci Şekil 4 ile sunulmuştur. Bedele dönüştürme uygulamalarında öncelikle bedele dönüştürülecek miktarın hesaplanması gerekir. AADHY'nin 16. maddesinde yer alan hükümlere göre bu miktar, parselden kesilecek olan düzenleme ortaklık payının tamamı ya da bir kısmıdır (T.C. Resmî Gazete, 2020).

Üzerinde korunacak yapı bulunması sebebiyle düzenleme ortaklık payı bedele dönüştürülecek parselin oluşma şekli, uygulamada nasıl değerlendirileceğine karar vermek için önemlidir. AAD uygulamasına giren parseller oluşma şekline göre üç sınıfta değerlendirilebilir:

1. UİP ile planlanmış alanda bulunmakla birlikte uygulama görmemiş ham parseller
2. UİP'e göre isteğe bağlı imar uygulamalarıyla oluşmuş imar parselleri
3. UİP'e göre AAD uygulaması ile oluşmuş imar parselleri

Evvelce AAD uygulamaları ile oluşmuş parsellerin yeniden AAD uygulamalarına alınması durumunda, ilave düzenleme ortaklık payı alınabilmesi için 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 18. maddesinin 7. fıkrasındaki şartları sağlıyor olması gerekir. Ancak evvelce AAD uygulamaları ile oluşmuş parsel üzerinde korunacak yapı bulunuyorsa, gerekli şartlar sağlanıyor olsa bile, parselden AADHY'nin 16. maddesinin 6. fıkrası gereğince ilave düzenleme ortaklık payı alınmaz. İlave pay doğrudan bedele dönüştürülür (T.C. Resmî Gazete, 2020).



Şekil 4. Bedele dönüştürme sürecine ilişkin iş akışı

Öte yandan üzerinde yasalara uygun ruhsatlı yapı bulunan parsel, evvelce AAD ile oluşmamış ise öncelikle parselde tahsis edilecek alanın üzerindeki yapıyı koruyup koruyamadığı irdelenir. Şayet parselde tahsis edilecek alan üzerindeki yapıyı korumak için yeterliyse, parsel ilgili tahsis alanı ile tahsis edilir. Ancak parselde tahsis edilecek alan üzerindeki yapıyı korumaya yetmiyorsa, AADHY'nin 16. maddesinin 1. fıkrasında yer alan hükümler uygulanır. Bu hükmün uygulanabilmesi için parselden alınabilecek düzenleme ortaklık payının miktarının belirlenmesi gerekir. Çünkü AADHY'nin 16. maddesinin 1. fıkrasında yer alan "...düzenleme ortaklık payının tamamının ya da bir kısmının alınmadığı..." ibaresine göre düzenleme ortaklık payının gerekli olan miktarı bedele dönüştürülmelidir (T.C. Resmî Gazete, 2020). Parselden alınabilecek olan düzenleme ortaklık payının miktarının belirlenmesi için parselin üzerindeki yapıyı koruyabilecek olan asgari parsel boyutu belirlenmelidir. Bu aşamadan sonra ise parselden yapılabilecek toplam kesinti ve eksik kalan alanın miktarı (4) ve (5) numaralı eşitlikler kullanılarak belirlenir. Parselden yapılabilecek toplam kesinti parselin daha önceki terkleri veya önceden alınmış düzenleme ortaklık payı da dikkate alınarak

belirlenir. Yani esasen toplam kesinti, parselin kök parsel alanı üzerinden yapılabilecek kesintiyi ifade etmektedir. Bu durum hesaplamada kolaylık sağlaması için tercih edilmiştir.

$$YTK = KPA - GA \quad (4)$$

$$EA = DOP - YTK \quad (5)$$

$$0 \leq YTK \leq DOP \quad (6)$$

$$0 \leq EA \leq DOP_M \quad (7)$$

Formülde;

- *YTK*, uygulamaya giren parselden yapılabilecek toplam kesintinin miktarını (eski terk miktarları dâhil),
- *KPA*, uygulamaya giren parselin düzenlemeye giren (eski terk miktarları dâhil) alanını,
- *GA*, uygulamaya giren parselin üstündeki yapıyı koruyacak asgari parsel alanını,
- *EA*, uygulamaya giren parselden yapılamayan kesintinin miktarını (eksik kalan alan miktarını),
- *DOP*, uygulamaya giren parselden umumi ve kamu hizmet donatıları için alınacak düzenleme ortaklık payının toplamını (eski terk miktarları dâhil),
- *DOP_M*, uygulamaya giren parselden umumi ve kamu hizmet donatıları için mevcut AAD uygulaması sebebiyle alınacak düzenleme ortaklık payını ifade etmektedir.

Uygulamaya giren parselden yapılamayan kesintinin miktarının (*EA* – Eksik Kalan Alan Miktarı) tamamlanabilmesi için AADHY'nin 16. maddesinin 1. fıkrasının a bendinde yer alan “Belediye/Valilik mülkiyetindeki alanlardan veya Hazine taşınmazlarından tahsis yapılmak suretiyle hisselenilerek, parselasyon planı yapılır.” hükmü uygulanır (T.C. Resmî Gazete, 2020). Buna göre, öncelikle düzenleme bölgesinde Belediye/Valilik mülkiyetindeki alanların veya hazine taşınmazlarının varlığı irdelenir. Şayet bu alanlardan biri varsa; uygulamaya giren parsel, bu alanlar ile Eksik Kalan Alan Miktarınca (*EA*) hisselenilerek tahsis edilir.

Düzenleme bölgesinde Belediye/Valilik mülkiyetinde herhangi bir alan veya hazine taşınmazı yoksa AADHY'nin 16. maddesinin 1. fıkrasının b bendinde yer alan “Yasalara uygun olarak inşaa edilmiş mevcut yapı nedeniyle kesinti yapılamayan parselde denk gelen miktarı bedele dönüştürmek suretiyle, parselasyon planı yapılır.” hükmü uygulanır (T.C. Resmî Gazete, 2020). Buna göre, ilgili parsel için eksik kalan alan miktarınca (*EA*) bedele dönüştürme işlemi gerçekleştirilir.

Bedele dönüştürme işleminin gerekçesi 3194 sayılı İmar Kanunu'nda ve AADHY'de “parselden alınamayan düzenleme ortaklık payı” olarak belirtilmektedir (T.C. Resmî Gazete, 1985a; 2020). Bu, parselden alınacak düzenleme ortaklık payının bir kısmının ya da tamamının bedele

dönüştürülmesi anlamına gelmektedir. (6) ve (7) numaralı eşitliklerde de belirtildiği üzere bedele dönüştürülecek miktar yani eksik kalan alan miktarı (EA), parselden alınacak düzenleme ortaklık payından (DOP_M) büyük olamaz.

2.2.3. Kesin Tahsis Alanlarının Hesaplanması

Bedele dönüştürmeye gerek duyulan bir AAD uygulamasında, bedele dönüştürme miktarı, eksik kalan alan miktarı (EA) olarak (4) ve (5) numaralı formüller kullanılarak hesaplanır. Bedele dönüştürme işleminde parselden alınamayan düzenleme ortaklık payı, düzenlemeye giren diğer kadastral parsellere yansıtılır. AADHY'nin 16. maddesinin 3. fıkrasında “*Bedele dönüştürme işleminde; yapılaşmış alanlar nedeniyle kesilemeyen DOP oranına göre düzenleme sahasındaki diğer parsellerin her birinden fazladan kesilecek alan miktarı bulunur.*” hükmü yer almaktadır (T.C. Resmî Gazete, 2020). Buna göre, bedele dönüştürülecek miktar için yeni bir oranın hesaplanması ve düzenlemeye giren diğer parsellerden bu orana göre ilave kesinti yapılması gerekmektedir. Bu maddeden; bu işlem için ayrı bir hesabın yapılması ve ek klişelerin oluşturulması gerektiği anlaşılmaktadır. Ancak Yönetmelik ekinde bu işlemlere ilişkin bir klişe örneği bulunmamaktadır. Belirtilen ilave kesinti oranı ile ilgili olarak Yönetmelik'te açık ve anlaşılır bir yöntem de sunulmamıştır. Ancak süregelen uygulamalardan da anlaşılacağı üzere bedele dönüştürülecek miktar diğer parsellerden alanları oranınca kesilir. Uygulamaya giren diğer parsellerden yapılacak ilave kesinti (8) numaralı eşitlik kullanılarak belirlenir.

$$IK = BDA \times \frac{KPA}{\sum KPA - KPA_{BD}} \quad (8)$$

Formülde;

- IK , kadastral parselden yapılacak ilave kesinti miktarını,
- BDA , bedele dönüştürme miktarını,
- KPA , ilave kesinti yapılacak kadastral parselin alanını,
- $\sum KPA$, uygulamaya giren parsellerin alanları toplamını,
- KPA_{BD} , bedele dönüştürülen parselin alanını ifade etmektedir.

Bedele dönüştürme işlemi yapılan bir AAD uygulamasında, bedele dönüştürülen parselden YTK miktarınca kesinti yapılırken, diğer parsellerden DOP ve IK miktarınca kesinti yapılır. Bedele dönüştürülen parselin kesin tahsis alanı (9) numaralı eşitlik, diğer parsellerin kesin tahsis alanı ise (10) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$KTA_{BD} = KPA - YTK \quad (9)$$

$$KTA^* = KPA - DOP^* - IK^* \quad (10)$$

$$KPA - DOP \leq KTA_{BD} \leq KPA - DOP_M \quad (11)$$

Formülde;

- KTA^* , parselin kesin tahsis alanını,
- KTA_{BD} , bedele dönüştürülen parselin kesin tahsis alanını
- KPA , parselin uygulamaya giren alanını (eski terk miktarları dâhil),
- DOP^* , parselden AAD sebebiyle alınacak düzenleme ortaklık payının miktarını (eski terk miktarları dâhil),
- IK^* , parselden bedele dönüştürme sebebiyle yapılacak ilave kesintinin miktarını,
- YTK , bedele dönüştürülecek parselden yapılabilecek toplam kesintinin miktarını ifade etmektedir (* ile işaretlenen değerler bedele dönüştürülen parsel haricindeki uygulamaya giren parseller için geçerlidir).

(11) numaralı eşitlikte de belirtildiği üzere bir parsel, uygulama sonrasında en fazla uygulamaya girdiği alanla tahsis edilmelidir. Yani bedele dönüştürme işlemi uygulamaya giren bir parsel ile alan kazandırmak amacıyla yapılamaz. Bu durum mevzuat hükümlerine aykırıdır. Ayrıca bu durum bedele dönüştürülen parselin sahiplerinin haksız kazancına, ilave kesinti yapılacak parsellerin sahiplerinin ise mağduriyetine sebep olacaktır.

3. Bulgular ve Tartışma

Özet denge cetveli oluşturulurken çalışma alanına ilişkin veriler kullanılmıştır (Tablo 1). Uygulamaya giren parseller ve bu parsellere ilişkin alanlar cetvele doğrudan işlenmiştir. Yapılan irdelemelerde 617/78 numaralı parselin daha önce isteğe bağlı imar uygulaması ile oluştuğu ve bu uygulama sırasında 1,434.32 m² alanı bedelsiz kamuya terk ettiği belirlenmiştir (Tablo 2).

Parsellerin düzenlemeye giren alanlarının toplamı (daha önceki terkler dâhil) 327,194.40 m² olarak hesaplanmıştır. Düzenleme sahasındaki parsellenecek yapı adalarının alanları toplamı ise 240,023.37 m²'dir. (1) numaralı eşitlik kullanılarak yapılan hesaplara göre; DOPO, %26.64 (0.2664197)'tür. (Tablo 2).

Hesaplanan DOPO'ya göre Tablo 2'de gerekli sütunlar doldurulmuştur. Tablo 2'nin 10 numaralı sütununda parsellerden alınacak düzenleme ortaklık payının toplamı belirlenmiştir. Buna göre 617/78 numaralı parselden ilave 7,493.69 m², toplamda ise 8,928.01 m² (1,434.32 m² alanı daha önce terk etmiştir) düzenleme ortaklık payı alınması gerekmektedir. Yapılan uygulamada söz konusu

parsel için bedele dönüştürme işleminin yapılacağı ve parselin üzerindeki yapıyı korumak için ihtiyaç duyulan alanın 32,076.74 m² olduğu kabul edilmiştir. Belirtilen sebeplerle parselin ilave düzenleme ortaklık payının tamamı bedele dönüştürülecektir. Uygulamada bedele dönüştürme miktarı 7,493.69 m² olarak kabul edilmiştir.

Bedele dönüştürülmesi öngörülen 7,493.69 m², uygulamaya giren diğer parsellerden ilave olarak alanları oranınca kesilecektir. Tablo 2'nin 12 numaralı sütununda, ilave kesinti miktarları (8) numaralı eşitliğe göre belirlenmiştir. Daha sonra Tablo 2'de 10 ve 12 numaralı sütunların toplamları alınarak, 13 numaralı sütunda parsellerden yapılacak toplam kesinti miktarları belirlenmiştir.

Ardından Tablo 2'nin 15 numaralı sütununda (9) ve (10) numaralı formüller kullanılarak uygulamaya giren parsellerin kesin tahsis alanları hesaplanmıştır. Özet denge cetvelinde ilave kesintiler ve bedele dönüştürülen miktar açıkça belirtilmiştir. Bedele dönüştürme işlemlerinin sağlıklı yürütülebilmesi ve dava süreçlerinde denetlenebilmesi için bu miktarların nasıl hesaplandığı ve parsellerin nasıl işlem gördüğü Tablo 2 örneğinde olduğu gibi klişelerde açıkça belirtilmelidir. Bu miktarlar uygulama sırasında taşınmaz değerlendirme işlemiyle bedele dönüştürülmelidir.

Tablo 2. Çalışma alanında gerçekleştirilen AAD uygulamasına ilişkin özet denge cetveli

Kadastro Parseli										İmar Parseli						
Ada/Par	Alan	EskiDOP	EskiDOPMik	Kamu.	Bağış	D.Girmeyen	DOPal	DOPalma	DOP	Kesilebilecek Miktar	Bedele Dönüştürme	Toplam Kesinti	Terk	İ.Tahsis	AdaNo	Alan
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
567/25	17,571.75	-	-	-	-	-	17,571.75	-	4,681.46		448.36	5,129.82		12,441.93	617	240,023.4
567/26	14,771.76	-	-	-	-	-	14,771.76	-	3,935.49		376.92	4,312.41		10,459.35		
567/27	14,771.76	-	-	-	-	-	14,771.76	-	3,935.49		376.92	4,312.41		10,459.35		
617/40	15,400	-	-	-	-	-	15,400	-	4,102.86		392.95	4,495.81		10,904.19		
617/41	20,090	-	-	-	-	-	20,090	-	5,352.37		512.62	5,864.99		14,225.01		
617/42	21,730	-	-	-	-	-	21,730	-	5,789.30		554.47	6,343.77		15,386.23		
617/43	22,300	-	-	-	-	-	22,300	-	5,941.16		569.01	6,510.17		15,789.83		
617/44	29,230	-	-	-	-	-	29,230	-	7,787.45		745.84	8,533.29		20,696.71		
617/45	28,960	-	-	-	-	-	28,960	-	7,715.51		738.95	8,454.46		20,505.54		
617/48	50,576	-	-	-	-	-	50,576	-	13,474.44		1,290.51	14,764.95		35,811.05		
617/75	58,282.07	-	-	-	-	-	58,282.07	-	15,527.49		1,487.14	17,014.63		41,267.44		
617/78	32,076.74	4.280139	1,434.32	-	-	-	33,511.06	-	8,928.01	1,434.32	-7,493.69	1,434.32		32,076.74		
	325,760.1						327,194.4				0			240,023.37		

DOPO 0.2664197

* Bu tablo Türkiye'de gerçekleştirilen AAD uygulamalarında sıklıkla kullanılan özet denge cetveline ilişkin klişe üzerinden tasarlanmıştır.

** Ada/Par (Kadastro Parseli): Kadastral parselin ada ve parsel numarası,

Alan (Kadastro Parseli): Kadastral parselin alanı

EskiDOP (Kadastro Parseli): Evvelce yapılan AAD ile alınan DOP'un ya da isteğe bağlı uygulama ile terk edilen alanın oranı

EskiDOPMik (Kadastro Parseli): Evvelce yapılan AAD ile alınan DOP'un ya da isteğe bağlı uygulama ile terk edilen alanın miktarı

Kamu. (Kadastro Parseli): Evvelce parselden yapılan kamulaştırmanın miktarı

Bağış. (Kadastro Parseli): Evvelce parselden yapılan bağışın miktarı

D.Girmeyen (Kadastro Parseli): Ayırma çapı uygulanan parsellerde parselin düzenleme sınırı dışında kalan alanı

DOPal (Kadastro Parseli): Düzenleme ortaklık payı alınacak olan parsellerin düzenlemeye giren alanı

DOPalma (Kadastro Parseli): Düzenleme ortaklık payı alınmayacak olan parsellerin düzenlemeye giren alanı

DOP (Kadastro Parseli): Düzenleme ortaklık payının miktarı

Kesilebilecek Miktar (Kadastro Parseli): Bedele dönüştürülen parselden yapılabilecek olan toplam kesintinin miktarı

Bedele Dönüştürme (Kadastro Parseli): Parseller için yapılacak bedele dönüştürme miktarı ve ilave kesintilerin miktarı

Toplam Kesinti (Kadastro Parseli): Parselden yapılacak toplam kesintinin miktarı

Terk (Kadastro Parseli): Parselden doğrudan terk edilen alanın miktarı

İ.Tahsis (Kadastro Parseli): Parselin tahsis alanı

AdaNo (İmar Parseli): Parselin tahsis edildiği ada numarası

Alan (İmar Parseli): Parselin tahsis edildiği adanın alanı

DOPO hesaplanırken parsellerin kök parsel alanları dikkate alınmıştır. Buna göre 617/78 numaralı parselin hesaplarda dikkate alınan alanı 33,511.06 m²'dir. Parselin evvelce yaptığı terkin oranı ise %4.28 (0.042801392)'dir. Bu yönüyle irdelendiğinde parselden ilave düzenleme ortaklık payı alınması gerektiği anlaşılmaktadır. 617/78 numaralı parsel uygulama sonrasında alanı 32,076.74 m² olan ve uygulama öncesindeki konumunda oluşturulan 617/79 numaralı imar parseline tahsis edilmiştir. Böylelikle üzerindeki yapı korunmuştur.

617/78 numaralı parselin uygulamaya girdiği alanla tahsis edilmiş olması parselden ilave düzenleme ortaklık payı alınmadığı anlamına gelmektedir. Ancak bu parsel, hizmet donatılarına isabet eden kısımlarını evvelce bedelsiz olarak kamuya terk etmiştir. Bu, kök parsel alanı dikkate alındığında parselden bir miktar kesinti yapıldığı şeklinde değerlendirilebilir.

Uygulamada bedele dönüştürülecek alan için öncelikle parsel geometrisinin irdelenmesi ve düzenleme ortaklık payının alınıp alınamayacağı, ne kadarının bedele dönüştürüleceği ve ne kadarının parsel alanından kesilebileceği belirlenmelidir. Aksi halde parselden aslında bir miktar daha düzenleme ortaklık payı alınabilecekken, tamamı bedele dönüştürülecek, dolayısıyla mevzuatın bedele dönüştürme hükümlerine aykırılık söz konusu olacaktır.

Mevzuat farklı parsel tipleri için farklı yaklaşımlar ortaya koymaktadır. Üzerindeki yasalara uygun ruhsatlı yapı nedeniyle, AAD ile oluşmuş parsellerden alınacak düzenleme ortaklık payının tamamı bedele dönüştürülürken, diğer parsellerden yapılacak kesintinin yeterli miktarı bedele dönüştürülmektedir. AAD ile oluşmuş parsellerden, üzerinde yasalara uygun ruhsatlı yapı olması durumunda, hiçbir şart ve koşulda ilave düzenleme ortaklık payı alınmamaktadır (T.C. Resmî Gazete, 2020).

Bedele dönüştürme işlemleriyle, üzerinde korunacak yapı bulunan parsel sahiplerinin mağduriyetinin giderilmesi amaçlanmaktadır. Uygulamalarda bu mağduriyet ve bedele dönüştürme miktarı net bir şekilde ortaya koyulmalıdır. Düzenleme ortaklık payının bedele dönüştürülmesi suretiyle parsel fazladan alan kazandırılmamalıdır. Böylesi bir durum yapı sahibinin haksız kazancına, düzenleme bölgesindeki diğer parsel sahiplerinin ise mağduriyetine sebep olacaktır. Mağduriyetin önüne geçilmesi için hangi parsel için ne kadar miktarın bedele dönüştürüleceği matematiksel yöntemlerle belirlenmeli, krokilerle gösterilmeli ve ayrıca raporlanmalıdır. Bu husus, uygulamaların özellikle yargısal denetimi için oldukça önemlidir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, 2019 yılında 3194 sayılı İmar Kanunu'nda yapılan değişikliklerle re'sen uygulanabilir olarak yürürlüğe giren bedele dönüştürme uygulamaları, bedele dönüştürme miktarının belirlenmesi yönünden irdelenmiştir. AAD uygulamalarının ve bedele dönüştürme işlemlerinin yasal

dayanağı 3194 sayılı İmar Kanunu ve AADHY'dir. Ancak mevzuatta bedele dönüştürme işlemlerinde karar verme süreci net bir şekilde ortaya koyulmamıştır. Ayrıca mevzuatta bedele dönüştürme miktarının nasıl belirleneceğine ilişkin hüküm ya da klişe yer almamaktadır. Literatürde yapılan irdelenmelerde bedele dönüştürmeye ilişkin karar verme süreçlerini ve matematiksel hesapları içeren kapsamlı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Çalışma kapsamında bedele dönüştürme uygulamalarında karar verme süreci ve bedele dönüştürme miktarının belirlenmesinde kullanılacak matematiksel model ortaya koyulmuştur. Çalışmayla birlikte uygulaması anlaşılabilir olmaktan uzak olan bedele dönüştürme uygulamalarının, geliştirilen matematiksel formüller ve klişeler eşliğinde, iş akış adımları ile anlaşılabilir olmasının sağlanması amaçlanmıştır. Çalışmanın devamında ise mevzuatta yer alan çelişkili hükümlere yer verilmiştir.

AAD uygulamalarının anayasal güvence altında bulunan mülkiyet hakkı üzerinde tasarrufla bulunması sebebiyle şeffaf olması gerekir. Uygulamalarda, parseller üzerinde yapılan tüm işlemler açıkça belirtilmeli ve gerekçelendirilmelidir. Böylelikle AAD'ye taraf olan herkesin sürece etkin katılımı sağlanabilir.

AAD uygulamalarında, uygulamaya giren parsellerden önemli ölçülerde toprak kesintisi yapılabilmektedir. Bazı durumlarda uygulamaya giren parsellerin tahsis alanları müstakil bir parsel almak için yeterli olmayabilir. Bu durumda da ilgili parseller en uygun parseller ile hisselendirilmek suretiyle tahsis edilmektedir. Ancak üzerinde yasalara uygun ruhsatlı yapı bulunan parseller için söz konusu hisselendirme işlemleri büyük problemlere yol açmaktadır. Üzerinde yapı bulunan parselde hisselenen taşınmaz sahiplerinin mülkleri üzerindeki tasarruflarının zayıflaması, yapı sahiplerinin zeminde başkalarıyla hissedar olması gibi durumlar bu sorunlara örnek verilebilir.

Bu gibi durumlarda 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 18. maddesinin 11. fıkrasındaki ve AADHY'nin 16. maddesindeki hükümler söz konusu mağduriyeti gidermek amacıyla kullanılabilir. Bu kapsamda müstakil olarak tahsis edilemeyen parsel, düzenleme ortaklık payının bir kısmının ya da tamamının bedele dönüştürülmesi suretiyle çözüme kavuşturulabilir.

Ancak düzenleme ortaklık payının bedele dönüştürülmesi oldukça karmaşık bir süreçtir. Dahası mevzuatta yer alan hükümler anlaşılır ve uygulanabilir olmaktan oldukça uzaktır. Bu kapsamda gerçekleştirdiğimiz çalışma karar verme süreçlerinin daha etkin gerçekleştirilebilmesi için gerekli iş akışını sunmaktadır. Buna göre uygulamalarda parsellerin nasıl oluştuğu irdelenmeli ve bedele dönüştürmeye doğru bir şekilde karar verilmelidir. Öte yandan bedele dönüştürülecek miktar da doğru bir şekilde belirlenmeli ve klişelerde gösterilmelidir. Parselasyon açıklama raporunda düzenleme ortaklık payının bedele dönüştürülmesine ilişkin gerekçeler açıkça belirtilmeli ve encümen kararlarında da yer almalıdır.

Bu süreçler, uygulamanın denetlenebilir bir şekilde yürütülmesi için oldukça önemlidir. Çünkü bedele dönüştürme işlemleri, 2019 yılında 3194 sayılı İmar Kanunu'nda yapılan değişikliklerle birlikte

isteğe bağılı olmaktan çıkarılmış, yerel yönetimlerin takdirine bağılı olarak re'sen uygulanabilir olarak yürürlüğe girmiştir. Bedele dönüştürmeye ilişkin sağlıklı örneklere rastlamak çok mümkün değildir. Özellikle davaya konu AAD uygulamalarının önemli bir çoğunluğunun uygulamanın iptali ile sonuçlandığı dikkate alındığında, bedele dönüştürmenin AAD uygulamalarında iptalleri önemli ölçüde arttırabileceği değerlendirilmektedir.

Belirtilen bu sebeplerle yerel yönetimler, uygulamalarda düzenleme ortaklık payının bedele dönüştürülmesi sürecini doğru bir şekilde yönetmeli ve bedele dönüştürülen parsel lehine haksız hazanın yaratacak ya da mağduriyete sebep olacak uygulamalardan uzak durmalıdır. Çünkü bu gibi uygulamalar ile parsellerden gereğinden fazla alanı bedele dönüştürmek suretiyle fazladan bedel almak mümkündür. Öte yandan gerekmediği halde fazladan bedele dönüştürme işlemi yaparak uygulamaya giren parsellere alan kazandırmak da mümkündür. Belirtilen bu durumların uygulama için bir iptal sebebi olacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

Bedele dönüştürmeye ilişkin Kanun'da ve Yönetmelik'te birbiriyle çelişen ya da uygulamada farklılık gösteren durumlar söz konusudur. Örneğin Kanun'a göre bedele dönüştürme işlemi sonrasında düzenleme ortaklık payı dönüştürülen parselden alınacak bedel, uygulamanın gerçekleştirilmesi için yapılacak kamulaştırmalarda kullanılırken, Yönetmelik'e göre ilave kesinti yapılan parsellere dağıtılır. Kanun'a göre düzenleme ortaklık payı dönüştürülen parselden alınacak bedel, her yıl yeniden değerlendirme oranınca arttırılmaktadır. Ancak Yönetmelik'e göre AAD oluşmuş parseller için değerlendirme bedelin belirleneceği zaman yapılır. Ayrıca Kanun'a göre düzenleme ortaklık payı dönüştürülen parselden alınacak bedel, her yıl yeniden değerlendirme oranınca arttırılırken, Yönetmelik'e göre ilave kesinti yapılan parsellerin alacakları TÜFE oranınca arttırılır.

Belirtilen bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda anlaşılmaktadır ki; yerel yönetimler bedele dönüştürme uygulamalarından olabildiğince uzak durmalı, zorunlu haller dışında bu yöntemi tercih etmemelidir. Ayrıca uygulama ve denetim işlerini gerçekleştiren yüklenicilerin ve yerel yönetimlerin teknik personellerinin, AAD'nin bedele dönüştürme gibi karmaşık süreçlerini daha iyi yönetebilmesi için, güncel mevzuatı konu alan detaylı eğitimler alması gerekmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, veri kaynağı temini noktasında ve diğer teknik destekler bağlamında Karadeniz Teknik Üniversitesi Coğrafi Bilgi Sistemi Ar-Ge Laboratuvarına (GISLab) teşekkür eder.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Akyol, N., ve Uzun, B. (1997). *18.Madde Uygulamalarının Örnek Üzerinde İncelenmesi*. Kentsel Alan Düzenlemelerinde İmar Planı Uygulama Teknikleri (s.33-53), Trabzon: Jefod.
- Atasoy, M., Demir, O., Uzun, B. ve Nişancı, R. (2002, Ekim). İmar Uygulamalarının İptal Nedenleri ve Öneriler. *Selçuk Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Öğretiminde 30. Yıl Sempozyumu* (s. 184-192), Konya, Türkiye.
- Başer, V., Uzun, B., ve Yıldırım, V. (2017). An alternative method for expropriation for lane-like projects in planned area: a case study from Trabzon in Turkey. *Survey Review*, 51(365), 147-153.
- Çoruhlu, Y. E., Uzun, B., ve Yıldız, O. (2020). Zoning plan-based legal confiscation without expropriation in Turkey in light of ECHR decisions. *Land Use Policy*, 95, 104598. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104598>
- Çelik Şimşek, N., ve Uzun, B. (2018). İptale Konu İmar Planı Uygulamalarında Geri Dönüş İşleminin İrdelenmesi. *Türkiye Adalet Akademisi Dergisi*, 9(33), 709-720.
- Çoruhlu, Y. E., ve Demir, O. (2013). Vakıf Taşınmazlarda Arsa ve Arazi Düzenlemesi Sürecinin İncelenmesi. *Ankara Barosu Dergisi* 71(3), 57-83.
- Doebele, W. A., Matsubara, J., ve Nishiyama, Y. (1986). *Conceptual models of land readjustment*. Land Readjustment: The Japanese System (s. 81-96), A Lincoln Institute of Land Policy Book, Boston, USA.
- Küçükmehtemoğlu, M. ve Geymen, A. (2016). Optimization models for urban land readjustment practices in Turkey. *Habitat International*, 53, 517-533. doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.12.020
- Sarı M. (2008). *İmar Uygulamalarında Bedele Dönüştürmeler*. Yüksek Lisans Tezi. Kadir Has Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Uzun, B. (1992). *Kentsel alan düzenlemelerinde imar parseli üretme yöntemleri ve sonuçlarının irdelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- Uzun, B. (2000). *Çevre yolu-mülkiyet ilişkilerinin imar hakları açısından incelenmesi ve arazi düzenlemesi yaklaşımıyla bir model önerisi*. Doktora Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- Uzun, B. (2009). Using Land Readjustment Method as an Effective Urban Land Development Tool in Turkey. *Survey Review*, 41(311), 57-70.
- Uzun, B., ve Çelik Şimşek, N. (2018). Land readjustment for minimizing public expenditures on school lands: a case study of Turkey. *Arabian Journal Of Geosciences*, 11(228), 1-12.
- Uzun, B., Atasoy, B. A., ve Çelik Şimşek, N. (2022). Unmanned Aerial Vehicle (UAV) support for subdivision phase of land readjustment: A case study from Turkey. *Land Use Policy*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106301>
- T.C. Resmî Gazete. (1985a). *İmar Kanunu*, 18749.
- T.C. Resmî Gazete. (1985b). *İmar Kanununun 18 inci Maddesi Uyarınca Yapılacak Arazi ve Arsa Düzenlemesi ile İlgili Esaslar Hakkında Yönetmelik (mülga)*, 18916.
- T.C. Resmî Gazete. (2020). *Arazi ve Arsa Düzenlemeleri Hakkında Yönetmelik*, 31047.

Sıçanlarda Deneysel Kafa Travması Sonrası Kan Şekeri Değişikliklerinin İstatistiksel Analizi

Mehmet MERAL^{1*} 

Öz

Travmaya bağlı santral sinir sistemi hasarları önemli ölüm ve sakatlık sebebidir. Ancak travma sonucu oluşan hasardan sadece primer beyin harabiyeti değil bunu takip eden kompleks fizyopatolojik sekonder olaylar da sorumludur. Travma sonrası beyin dokusunun sistemik bozukluklara daha duyarlı hale geldiği tespit edilmiştir. Travma sonrası ortaya çıkan hipoksi ve iskemik olaylar sereberal enerji metabolizmasını belirgin şekilde etkileyerek yaygın beyin harabiyeti oluştururlar. Ağır kafa travmasını takiben erken dönemde hipergliseminin mevcut olduğu, kan glikoz düzeyi ile travmayı takiben iyileşme arasında negatif ilişki olduğu gösterilmiştir. Deneyde toplam 42 adet 250/350 gram ağırlığında erkek Wistar albino sıçan kullanıldı. Sıçanların 36 tanesinde yukarıda belirtildiği şekilde kafa travması oluşturuldu. Altı tanesinde travma oluşturulmadı, kontrol grubu olarak ölçümleri yapıldı. Çalışmamızda travma grubundaki sıçanlarda travma sonrası yapılan tüm ölçümlerde belirgin hiperglisemi tespit edildi ($P<0.0001$). Hiperglisemi ilk 24 saat içerisinde en yüksek seviyede seyretti. 48 saatten sonra azalmakla birlikte 7. günde kan şekeri değerleri travma öncesi değerlerin üzerinde görüldü ($P<0.0001$). Kontrol grubunda tüm ölçümlerde kan şekeri değerleri normal seyretti.

Anahtar kelimeler: Ağır kafa travması, Kan şekeri, Deneysel ağır kafa travması.

Statistical Analysis of Blood Glucose Changes After Experimental Head Trauma in Rats

Abstract

Trauma-related central nervous system injuries are an important cause of death and disability. However, not only primary brain damage but also complex physiopathological secondary events are responsible for the damage caused by trauma. It has been determined that brain tissue becomes more sensitive to systemic disorders after trauma. Post-traumatic hypoxia and ischaemic events markedly affect cerebral energy metabolism and cause widespread brain damage. It has been shown that hyperglycemia is present in early recovery following severe head trauma and that there is a negative correlation between blood glucose level and recovery following trauma. A total of 42 male Wistar albino rats weighing 250/350 grams were used in the experiment. Head trauma was induced in 36 rats as described above. Six rats were not traumatized and measured as a control group. In our study, significant hyperglycemia was detected in all measurements made after trauma in rats in the trauma group ($P<0.0001$). Hyperglycaemia was at the highest level in the first 24 hours. Although it decreased after 48 hours, blood glucose values were above the pre-trauma values on the 7th day ($P<0.0001$). In the control group, blood glucose values were normal in all measurements.

Keywords: Severe head trauma, Blood glucose, Experimental severe head trauma.

¹Özel Erciyes Hastanesi Beyin Cerrahi Kliniği, Kayseri, Türkiye, m.meral@erciyeshastanesi.com.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 03.08.2024

Kabul/Accepted: 11.09.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Giriş

Kafa travmaları sık karşılaşılan adli, tıbbi ve cerrahi yönleri ile önemli bir konudur. Genel travmaya bağlı ölümlerin %50 sinde kafa travması en önemli sebeptir. Özellikle çocuklarda ve genç erişkinlerde morbidite ve mortalitenin en sık görülen sebebidir (Becker ve Gudeman, 1980; Jennett ve Galbraith, 1983). Travmaya bağlı santral sinir sistemi (SSS) hasarları önemli ölüm ve sakatlık sebebidir (Becker ve Gudeman, 1980). Travma sonucu SSS’de primer doku hasarı meydana gelmektedir. Ancak travma sonucu oluşan hasardan sadece primer beyin harabiyeti değil bunu takip eden kompleks fizyopatolojik sekonder olaylar da sorumludur (Chesnut ve ark., 1993; Generalli, 1990). Travma sonrası beyin dokusunun sistemik bozukluklara daha duyarlı hale geldiği tespit edilmiştir. Travma sonrası ortaya çıkan hipoksi ve iskemik olaylar serebral enerji metabolizmasını belirgin şekilde etkileyerek yaygın beyin harabiyeti oluştururlar (Jenkins ve ark., 1989).

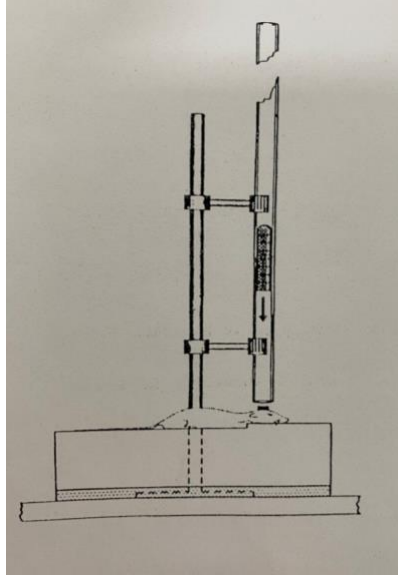
Ağır kafa travmasını takiben erken dönemde hipergliseminin mevcut olduğu, kan glikoz düzeyi ile travmayı takiben iyileşme arasında negatif ilişki olduğu gösterilmiştir (De Salles ve ark., 1987; Gardiner ve ark., 1982). Hipergliseminin hipoksi ve iskemi mevcudiyetinde serebral enerji metabolizmasını değiştirerek nöronal hasarın iyileşmesini geçiktirdiği, klinik ve nörolojik cevabı bozduğu ve mortaliteyi arttırdığı tespit edilmiştir. Hiperglisemi fizyolojik sınırlar içerisinde tutmanın nörolojik iyileşme üzerine olumlu etkiler yaptığı belirtilmiştir (Hamilton ve ark., 1995; Jenkins ve ark., 1989; Kerby ve ark., 2012; Pulsinelli ve ark., 1982; Rehenora ve ark., 1981; Siemkowicz ve ark., 1978).

Ağır kafa travmasında yapılan klinik çalışmalarda travmadan sonraki ilk 12 saat içerisinde belirgin hiperglisemi gözlenmiş, travmayı izleyen beş günlük sürede hiperglisemi devam etmiştir. Ağır kafa travması sonrası ortaya çıkan kısa dönme hiperglisemi hasara karşı oluşan stres cevap ile ilişkilidir. Travma anındaki anti insülin hormonların salınımı bu durumun nedeni olabilir. Travmayı takiben katekolamin ve glukagon sekresyonunun arttığı gösterilmiştir. İnsülin karşıtı bu hormonların salınımıyla da kafa travması sonrası glikoza karşı bir intolerans oluşmaktadır (King ve ark. 1971; Rosner ve ark., 1984; Shi ve ark., 2016). Hiperglisemi hipoksi sonucu ortaya çıkan doku hasarını daha da arttırmaktadır. Hipergliseminin bu etkisi, iskemi boyunca beyin laktik asid düzeyini artırıcı etkisiyle ilişkilidir. Ağır kafa travmasında hiperglisemi nörolojik iyileşmeyi olumsuz yönde etkiler. Deneysel olarak oluşturulmuş ağır kafa travması modellerinde yaralanmanın ciddiyeti ile kan glikoz konsantrasyonlarındaki artış arasında bir ilişki olduğu ve hipergliseminin de sempatoadrenal cevap nedeniyle ortaya çıktığı gösterilmiştir (Rosner ve ark., 1984).

Bu çalışmada kafa travması oluşturulan sıçanlar da travma sonrasında takip eden 7 günlük süreçte kan glikoz düzeylerini takip edip sonuçları kontrol grubuyla karşılaştırıp istatistiksel olarak farkları ortaya koymaya çalışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Tıp Fakültesi Klinik ve Deneysel araştırma biriminde yapıldı. Hayvanlar da ağır kafa travması oluşturulurken Marmarou'nun (Marmarou ve ark., 1994) geliştirdiği model modifiye edilerek kullanıldı. Travma aletinin prensibi metalden yapılmış 450 gram ağırlığın yerçekiminin etkisiyle sıçanların kafasındaki metal diske 2 metre yükseklikten şeffaf bir tüpün içerisinden düşürülmesinden ibarettir. Bu tüpün iç çapı 19 mm, metal ağırlığın çapı ise 18 mm dir.



Şekil 1. Travma aleti

Çalışmaya başlarken ilk olarak sıçanların başındaki tüyler traş edildi. Steril şartlarda kafa derisine lokal anestezi yapıldıktan sonra orta hat cilt insizyonu uygulandı. Düşen ağırlığın diffüz kafa travması oluşturması ve daha geniş kranial temas yüzeyi sağlamak için sıçanın verteksine 10 mm çapında 3 mm kalınlığında disk akrilik ile yapıştırıldı. Böylece verteksin düz olmaması nedeniyle disk ile verteks arasındaki boşluk akrilik ile doldurulmuş oldu (Marmarou ve ark., 1994). Sıçanlarda travma oluşturmadan önce intraperitoneal olarak ketamine hidroklorür (60 mg/kg) ile sedasyon sağlandı. Entübasyonsuz spontan solunuma bırakıldı. Travma oluşturulduktan sonra sıçanın kafasındaki metal plaka çıkarılıp birkaç dakika gözlemlendi. Yaraya antiseptik solüsyon (%10 povidone) uygulandı. Steril şartlarda insizyon usulüne uygun suture edildi. Travmatik diffüz kafa travması oluşturulan sıçanlar 7 gün takip edildi.

Deneyde toplam 42 adet 250/350 gram ağırlığında erkek Wistar albino sıçan kullanıldı. Sıçanların 36 tanesinde yukarıda belirtildiği şekilde kafa travması oluşturuldu. Altı tanesinde travma oluşturulmadı, kontrol grubu olarak ölçümleri yapıldı. Kafa travması oluşturulan 36 sıçan kendi arasında altılı gruplara ayrıldı. Bu gruplardan travma öncesi ve travma sonrası periyodik olarak kan şekeri, kan gazı ve hematokrit değerleri kaydedildi. Alınan kan örnekleri Erciyes Üniversitesi Tıp Fakültesi Biyokimya ana bilim dalında incelendi.

Mortalite oranı %42, kırık oranı %14 olarak tespit edildi. Ölüm sebeplerinin uzamış apneye bağlı olduğu belirlendi. Ölen ve kafatası kırığı olan hayvanlar çalışma dışı bırakıldı. Çalışma sayısına, çalışma dışı bırakılan sıçanlar yenileriyle değiştirilerek ulaşıldı. Ölüm sebeplerinin tespiti için otopsi yapılmadı.

2.1. İstatiksel Analiz

Tüm sonuçlar ortalama +/- standart deviasyon şeklinde sunuldu. Grup içi analizleri Mann Whitney U testi, gruplar arası analizler Kruskal Wallis varyans analizi ile yapıldı.

3. Bulgular ve Tartışma

Travma grubunda, travma öncesi kan şekeri değerleri ile travma sonrası kan şekeri değerleri arasında travma sonrası ilk iki saate en yüksek olmak üzere yedinci güne kadar devam eden ve yedinci günde de halen travma öncesinden yüksek seyreden kan şekeri değerleri elde edildi ($P < 0.0001$) (Tablo 1). Bu travma sonrası tüm değerler travma öncesine göre istatistiksel olarak anlamlı derecede yüksekti. Kontrol grubunda kan şekeri değerleri normal seyretti ($P > 0.05$) (Tablo 2). Her iki grup birbirleri ile karşılaştırıldığında istatistiksel olarak anlamlı derece de fark görüldü (Tablo 3).

Tablo 1. Travma grubunun kan şekeri sonuçları.

Travma Öncesi	Travma Sonrası					
	2. saat	6. saat	12. saat	24. saat	48. saat	7.gün
154	198	195	197	190	188	170
151	201	201	198	192	185	168
158	197	197	201	188	189	171
154	200	194	194	196	180	174
160	194	198	191	194	188	169
148	199	194	199	195	176	168
154.2±4.4	198.2±2.5	196.5±2.7	196.8±3.3	192.5±3.1	184.3±5.2	170.0±2.3

Tablo 2. Kontrol grubunun kan şekeri sonuçları.

Travma Öncesi	Travma sonrası					
	2.saate	6. saat	12. saat	24. saat	48 saat	7.gün
157	151	150	152	156	159	153
153	152	156	154	147	158	149
156	149	150	158	160	161	146
158	153	148	147	151	144	160
145	156	160	157	157	147	148
149	158	149	145	145	157	151
155.8±4.8	154.2±2.3	150.3±4.8	157.2±4.7	152.7±6.0	156.5±6.6	149.5±4.8

Tablo 3. Travma ve kontrol grubunun değerlerinin istatistiksel karşılaştırılması.

	Grup 1	Grup 2
Dönemler	Ortalama Değerler	Ortalama Değerler
T* Öncesi	154.2±4.4	155.8±4.8
T*sonrası 2.saat	198.2±2.5	154.2±2.3
6.saat	196.5±2.7	150.3±4.8
12 saat	196.8±3.3	157.2±4.7
24.saat	192.5±3.1	152.7±6.0
48.saat	184.3±3.1	156.5±6.6
7.gün	170.0±2.3	149.5±4.8
İstatistiksel analiz	KW:35.476 P< 0.0001	KW:0.613 P> 0.05

Grup1:Travma grubu. Grup: 2 Kontrol grubu T:Travma

Son yıllarda insanlardaki kafa travmasının deneysel modelini oluşturmak üzere çeşitli metodlar geliştirilmiştir (Dixon ve ark., 1987; Foda ve Marmarou, 1994; Marmarou ve ark., 1994; Mc Intosh ve ark., 1989; Sullivan ve ark., 1976). Ancak yaygın beyin hasarını laboratuvar şartlarında oluşturmak oldukça güçtür. Direk kraniuma, dura üzerine yada durayı açıp direk nöral dokuya travma uygulanması şeklindeki metodlara ek olarak deney hayvanlarında sıvı kullanılarak yapılan vurmalar şeklindeki travmatik hasar metodu geliştirilmiştir (Dixon ve ark., 1987, Sullivan ve ark., 1976). Mekanik travmanın sağlam kafatasına uygulanması direk dura üzerine travma oluşturmaktan daha diffüz hasara yol açar (Dixon ve ark., 1987). İnsanlarda çok görülen diffüz kafa travması ile olan benzerliği nedeniyle çalışma Marmarou ve arkadaşlarının tanımladığı kafatasının sağlam kaldığı kapalı kafa travması modeli esas alınarak yapılmıştır. Bu modelde ana kural düşük insidanslı kafatası kırığı ile birlikte ağır kafa travması oluşturmaktır. Bu grupta yaklaşık % 44 mortalite vardır. Kafatası kırığı oranı ise % 12.5 dir (Marmarou ve ark., 1994). Bizim yaptığımız çalışmada da benzer değerler elde edilmiştir. Mortalite oranı %42, kafatası kırığı oranı % 14 olarak tespit edildi.

(Robertson ve ark., 1990) kan glikoz düzeyinin düşük olmasının yüksek olan gruba göre ketojenezi belirgin olarak arttırdığını tespit etmişlerdir. Yine bu çalışmada yüksek kan glikoz konsantrasyonu ile ağır nörolojik hasar ve yüksek mortalite arasında pozitif bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Yapılan başka bir çalışmada serebral iskemi varlığında glikoz olmayan enerji substratlarının kullanımının artırılması ve glikozun anaerobik metabolizmasının azaltılmasının nörolojik hasarın azaltılmasında koruyucu etkisinin olduğu gösterilmiştir. (Rosner ve ark.1984) yaptıkları çalışmada deneysel olarak oluşturulmuş ağır kafa travması modellerinde hipergliseminin sempoadrenal cevap nedeniyle ortaya çıktığını göstermişlerdir. Yine aynı çalışmada yaralanmanın ciddiyeti ile kan glikoz konsantrasyonlarındaki artış arasında bir ilişki olduğu ve hipergliseminin nörolojik iyileşme üzerine olumsuz etkileri olduğunu belirtmişlerdir. Hiperglisemi serebral iskemi sonucu ortaya çıkan doku hasarını daha da arttırmaktadır. (Davallo ve ark.1990) ile (Pulsinelli ve ark.1982) yaptıkları çalışmada hipergliseminin travma harici inmede de iskemik hasarı arttırdığı,

prognozu olumsuz etkilediği ve nörolojik iyileşmeyi azalttığını göstermişlerdir. Bilindiği gibi glikoz SSS'nin primer enerji kaynağıdır. Ancak beyin enerji üretimi için glikoz olmayan enerji substratlarını da kullanabilir. Bunlar keton cisimleri, kısa zincirli yağ asitleri, laktak ve piruvattır (Falkowska ve ark., 2015; Hawkins ve Mans, 1982; Lying-Tunell ve ark., 1980; Roberson ve ark., 1991).

Çalışmamızda travma grubundaki sıçanlarda travma sonrası yapılan tüm ölçümlerde belirgin hiperglisemi tespit edildi ($P<0.0001$). Hiperglisemi ilk 24 saat içerisinde en yüksek seviyede seyretti. 48 saatten sonra azalmakla birlikte 7. günde kan şekeri değerleri travma öncesi değerlerin üzerinde görüldü ($P<0.0001$). Kontrol grubunda tüm ölçümlerde kan şekeri değerleri normal seyretti. Sıçanlarda ağır kafa travmasını takiben belirgin olarak hipergliseminin ortaya çıktığı, yedi gün boyunca giderek azalmasına rağmen yedinci günde de travma öncesinin üzerinde seyrettiği görüldü. Bu veriler bu konuda yapılan diğer çalışmalar ile uyumlu idi.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu deneysel çalışmada oluşturulan ağır kafa travması sonrası ilk yedi gün içerisinde sıçanlarda kan şekeri değerleri kontrol grubuna göre istatistiksel olarak anlamlı derecede yüksek seyretti. Travma sonrası yükselen bu kan şekeri oluşan beyin hasarında sorunlu faktörlerden biridir. Kafa travması sonrası kan şekeri değerleri kontrol altında tutularak nöral hasar önlenebilir. Bu konuda daha uzun vadeli çalışmaların yapılmasının faydalı olacaktır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı



Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Becker DP, Gudeman SK.,(1980) Acute head injury: Assessment, management, and prognosis.In: Hardy JD(ed), Critical surgical illness (2nd ed). *WB Saunders*, Philadelphia pp 110-134.
- Chesnut RM, Marshall LF, Klauber MR, Blunt BA, et al,(1993) The role of secondary brain injury in determining outcome from severe head injury. *J Trauma*. 34:216-22.
- Davalos A,Cendra E,Teruel J, et al.(1990) Deteriorating ischemic stroke: Risk factors and prognosis. *Neurology* 40:1865-1869.
- De Salles AA, Muizelar JP, Young HF.(1987) Hyperglycemia, cerebrospinal fluid lactic acidosis, and cerebral blood flow in severely head-injured patients. *Neurosurgery*. 21:45-50.
- Dixon CE, Lyeth BG, Povlishock JT, et al.(1987) A fluid percussion model of experimental brain injury in the rat. *J Neurosurg* 67:110-119.
- Falkowska A, Gutowska I, Goschorska M, et al.(2015). Energy metabolism of the brain, including the cooperation between astrocytes and neurons, especially in the context of glycogen metabolism. *Int J Mol Sci*. 16:25959-81.

- Foda MAA, Marmarou A. (1994) A new model of diffuse brain injury in rats. Part 2: Morphological Characterization. *J Neurosurg* 80:301-313.
- Gardiner M, Smith ML, Kågström E, et al.(1982) Influence of blood glucose concentration on brain lactate accumulation during severe hypoxia and subsequent recovery of brain energy metabolism. *J Cereb Blood Flow Metab.* 2:429-38.
- Generalli TA.(1990) Mechanism of cerebral concussion, contusion and other effects of head injury. In: Youmans JR(ed), *Neurological surgery*. Vol.3(vascular disease and trauma)WB Saunders, Philadelphia. pp1953-1964.
- Hamilton MG, Tranmer BI, Auer RN.(1995) Insulin reduction of cerebral infarction due to transient focal ischemia. *J Neurosurg.* 82:262-8.
- Hawkins RA, Mans AM.(1982) Intermediary metabolism of carbohydrates and other fuels, In: Lajtha A(ed) *Handbook of Neurochemistry*. Vol 3. Plenum Press, New York pp259-294.
- Jenkins LW, Moszynski K, Lyeth BG, et al.(1989) Increased vulnerability of the mildly traumatized rat brain to cerebral ischemia: The use of controlled secondary ischemia as a research tool to identify common or different mechanisms contributing to mechanical and ischemic brain injury. *Brain Res.* 477:211-24.
- Jennett B, Galbraith S.,(1983) Head Injuries: Pathology and history of head injury. An introduction to Neurosurgery(4th ed). *William Heinemann*, London pp 214-223.
- Kerby JD, Griffin RL, MacLennan P, et al.(2012) 3rd. Stress-induced hyperglycemia, not diabetic hyperglycemia, is associated with higher mortality in trauma. *Ann Surg.* 256: 446-52.
- King LR, Knowles HC, Mc Laurin RL, et al.(1971) Glucose tolerance and plasma insulin in cranial trauma. *Ann Surg* 173:337-343.
- Lying-Tunell U, Lindblad BS, Malmund HO, et al.(1980) Cerebral blood flow and metabolic rate of oxygen, glucose, lactate, pyruvate, ketone bodies, and amino acids. *Acta Neurol Scand* 62:265-275.
- Marmarou A, Foda MA, van den Brink W, et al.(1994) K. A new model of diffuse brain injury in rats. Part I: Pathophysiology and biomechanics. *J Neurosurg.* 80:291-300.
- Mc Intosh TK, Vink R, Noble L, et al(1989). Traumatic brain injury in the rat: Characterization of lateral fluid-percussion model. *Neuroscience* 28:233-244.
- Pulsinelli WA, Waldman S, Rawlinson D, et al (1982). Moderate hyperglycemia augments ischemic brain damage: a neuropathologic study in the rat. *Neurology.* 32:1239-46.
- Rehenora S, Rosen I, Siesjö BK.(1981) Brain lactic acidosis and ischemic cell damage. Biochemistry and Neurophysiology. *J Cereb Blood Flow Metab* 1:297-311.
- Roberson CS, Goodman JC, Narayan RK, et al.(1991) The effect of glucose administration on carbohydrate metabolism after head injury. *J Neurosurg* 74:43-50.
- Rosner MJ, Newsome HH, Becker DP.(1984) Mechanical brain injury: The sympathoadrenal response. *J Neurosurg* 61:76-86.
- Shi J, Dong B, Mao Y, et al.2016)(Review: Traumatic brain injury and hyperglycemia, a potentially modifiable risk factor. *Onco Target.* 7:71052-71061.
- Siemkowicz E, Hansen AJ.(1978) Clinical restitution following cerebral ischemia in hypo-, normo- and hyperglycemic rats. *Acta Neurol Scand.* 58: 1-8.
- Sullivan HG, Martinez J, Becker DP, et al.(1976) Fluid percussion of mechanical brain injury in the cat. *J Neurosurg* 45:520-534.

Application of Chaotic Maps to Economic Load Dispatch Problem

Mehmet Safa AYDIN^{1*}, Ertuğrul ÇAM²

Abstract

This paper aims to solve the economic load dispatch problem (ELD) by using random numbers generated by chaotic maps with particle swarm optimization (PSO). The randomly generated coefficients r_1 and r_2 in the velocity equation of the PSO algorithm are generated by three different chaotic map methods namely logistic map, gaussian map, and tent map. As a result, three different methods are proposed: PSO with logistic map (LMPSO), PSO with Gaussian map (GMPSO), and PSO with tent map (TMPSO). These algorithms are applied to a 40-unit test system that includes transmission line losses, and the results are compared with the standard PSO algorithm. Each algorithm was run 50 times, and the maximum, minimum, and average values were recorded. All the proposed methods found lower costs than the standard PSO algorithm. Although the lowest cost was achieved with the GMPSO algorithm, the LMPSO algorithm was observed to be more successful on average.

Keywords: Economic Load Dispatch, Particle Swarm Optimization, Chaotic Maps, Optimization.

Kaotik Haritaların Ekonomik Yük Dağıtım Problemine Uygulanması

Öz

Bu çalışmada kaotik haritalar ile üretilen rassal sayıların parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ile kullanılarak ekonomik yük dağıtım probleminin (EYD) çözülmesi hedeflenmiştir. PSO algoritmasının hız denkleminde yer alan ve rastgele oluşturulan r_1 ve r_2 katsayıları Lojistik kaotik harita metodu ile oluşturularak Lojistik haritalı PSO (LMPSO), gauss kaotik harita metodu ile oluşturularak gauss haritalı PSO (GMPSO) ve çadır kaotik harita metodu ile oluşturularak çadır haritalı PSO (TMPSO) metotları oluşturulmuştur. Oluşturulan bu algoritmalar iletim hattı kayıplarının dahil edildiği 40 üniteli test sistemine uygulanmış ve sonuçlar standart PSO algoritması ile karşılaştırılmıştır. Her algoritma 50 defa çalıştırılmış ve maksimum, minimum ve ortalama değerler kaydedilmiştir. Önerilen metotların hepsi standart PSO algoritmasından daha düşük maliyetler bulmuştur. En düşük maliyete GMPSO algoritması ile ulaşılmış olsa da ortalamada LMPSO algoritmasının daha başarılı olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ekonomik Yük Dağıtım, Parçacık Sürü Optimizasyonu, Kaotik Haritalar, Optimizasyon.

¹Bartın University, Faculty of Engineering, Architecture and Desing, Electrical and Electronics Engineering Department, Bartın, Turkey, maydin@bartin.edu.tr

²Samsun University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Electrical and Electronics Engineering Department, Samsun, Turkey, ertugrul.cam@samsun.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 08.08.2024

Kabul/Accepted: 28.08.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

1. Introduction

Economic load dispatch (ELD) is one of the most important problems to be solved in the operation and planning of a power system. The main objective of the ELD problem is to determine the optimum values of the power outputs of all generating units to meet the load demand at minimum operating cost while satisfying the system equality and inequality constraints. Therefore, the ELD problem can be defined as a nonlinear, constrained optimization problem (Balamurugan & Subramanian, 2007). Metaheuristic algorithms are used to solve nonlinear optimization problems and natural phenomena have caused different metaheuristic algorithms to be proposed (Onan, 2013). For example, the genetic algorithm (GA) is based on natural selection (Barati & Sadeghi, 2018). The particle swarm optimization (PSO) algorithm is based on the movements of the swarm of birds and fish. (Doğru et al., 2019).

In the literature, it is seen that different metaheuristic algorithms, such as PSO (Sudhakaran et al., 2007) and GA (Walters & Sheble, 1993), are used to solve the ELD problem. New hybrid metaheuristic algorithms have also been created by using metaheuristic algorithms together to solve the ELD problem faster and more optimally (Younes & Benhamida, 2011).

The chaotic maps are used to improve the performance of metaheuristic algorithms. Chaotic maps have also been utilized to obtain the optimum result in the ELD problem. Chaotic maps are used to generate the random numbers needed by metaheuristic algorithms by utilizing chaos theory with simple mathematical equations and easy initial conditions. Chaotic firefly algorithm (Arul et al., 2013), chaotic bat algorithm (Adarsh et al., 2016), and chaotic PSO (Tao & Jin-ding, 2009) are among the works encountered in the literature to solve the ELD problem.

The work by Xu et al. demonstrates that integrating Chaotic Local Search (CLS) into the Grey Wolf Optimizer (GWO) significantly improves the algorithm's performance, with the piecewise linear chaotic map (PWLCM) and Gaussian map identified as particularly effective in enhancing GWO's search capabilities (Xu et al., 2021). Another study introduces the Chaotic Artificial Ecosystem-Based Optimization Algorithm (CAEO) to optimize economic load dispatch and reduce environmental pollution, showing superior results compared to conventional methods (Hassan et al., 2021). In 2018, Rezaie et al. studied to develop the Chaotic Improved Harmony Search Algorithm (CIHSA), which, when applied to the Combined Economic Emission Dispatch (CEED) problem, delivers higher quality and more accurate solutions compared to other existing techniques.

In the literature review, it was observed that different chaotic maps and optimization methods were applied to the ELD problem, but no study was found in which different chaotic maps were added to the same optimization method and applied to the ELD problem. In this study, the randomly generated numbers in the velocity equation of the PSO algorithm are generated by logistic chaotic

map, Gaussian chaotic map, and tent chaotic map methods. With these methods, PSO with logistic map, PSO with Gaussian map, and PSO with tent map methods are created.

2. Materials and Methods

2.1. Economic Load Dispatch

In the ELD problem, the cost function of each unit is represented by a quadratic function. The fuel cost corresponding to the power produced by each generator is shown in equation (1) (Zaraki & Othman, 2009).

$$C_i = \sum_{i=1}^N a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (1)$$

Where,

C_i : fuel cost for generator i .

N : Number of units

a_i, b_i, c_i : Fuel cost coefficients for generator i .

P_i : Generated power by generator i .

The total cost of the system is calculated by summing the cost of each unit separately. The total power generated by the units must be equal to the demand power. Since transmission line losses are included in the system in this study, the total demand power is obtained by summing the demand power and line losses. This equality constraint is shown in equation (2) (Tao & Jin-ding, 2009).

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_D + P_L \quad (2)$$

P_D = Demand power

P_L =Transmission line loss

Line losses are modeled as developed by Kron and adopted by Kirchmayer (Zaraki & Othman, 2009). According to this model, line losses are written in matrix form.

$$P_L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^N B_{i0} P_i + B_{00} \quad (3)$$

B_{ij} : $N \times N$ dimensional matrix of loss coefficients

B_{i0} : $1 \times N$ dimensional loss coefficients matrix

B_{00} : Dimensionless loss coefficients matrix

In addition, the amount of power to be produced by each unit must be between the maximum and minimum points that the units can produce. This inequality constraint is shown as follows (Zaraki & Othman, 2009).

$$\text{for } i = 1:N \quad P_{i,max} \geq P_i \geq P_{i,min} \quad (4)$$

In this study, other constraints such as ramp rates, prohibited operating zones, valve point effect, and multi-fuel options were neglected.

2.2. Particle Swarm Optimization

In the PSO algorithm, a swarm of particles with predefined constraints is randomly distributed in the search space. The performance of each particle is evaluated by the value of the objective function. Given that minimization is desired, then the particle with the lower value has better performance.

For each particle, the best values in iterations are saved and called the personal best (Pbest). The best Pbest value among particles determines the global best (Gbest). Using these values, the new velocity values of each particle are calculated by equation (5) (Doğru et al., 2019).

$$V_i^{k+1} = w^{k+1} * V_i^k + c1r1(X_{pbest} - X_i^k) + c2r2(X_{gbest} - X_i^k) \quad (5)$$

V_i^{k+1} : Particle velocity in the current iteration

V_i^k : Particle velocity at iteration k

X_i^k : Particle position at iteration k

r1, r2: Random values between 0-1

w^{k+1} : Inertia weight value

c1: Personal learning coefficient

c2: Global learning coefficient

The calculated velocity is summed with the particle positions and the new positions of the particles are calculated.

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (6)$$

Particles whose positions are updated may exceed the upper and lower limits. In this case, particles exceeding the limits are pulled to the limit values (Doğru et al., 2019). The objective function is recalculated at each iteration with the updated velocity and position vectors. After reaching the maximum iteration, the objective function value of Xgbest is given as the best value.

2.2. Test System Used

For ELD, a power system consisting of 40 generation units with a total demand power of 10,500 MW is considered. The data for the 40-unit system, including line losses, is taken from Barisal & Prusty (2015).

2.3. The Methods Used

Long-period random number sequences play an important role in metaheuristic algorithms. The risk of the algorithm getting stuck in local optima may increase when randomly generated numbers are collected in a certain area or the same values are repeated. By using a chaotic map, it is possible to avoid the optimum points or reduce the risk of getting stuck in the local optimum. The chaotic number sequence is easy and fast to generate and store. With a simple function and a few initial parameters, it is very easy to obtain sequences of any length. It has been theoretically proven that the numbers generated by chaotic maps are unpredictable, have spread spectrum characteristics, and are non-periodic (Tanyıldız & Cigalı, 2017).

Optimization algorithms by their nature require random numbers. Chaotic maps can be used to generate the random numbers needed by these algorithms with simple mathematical equations and easy initial conditions by utilizing chaos theory.

In this section, the random numbers r1 and r2 in the PSO velocity equation in equation (5) are replaced with numbers obtained from different chaotic map methods and Logistic Map PSO (LMPSO), Gaussian Map PSO (GMPSO) and Tent Map PSO (TMPSO) methods are created. These methods are applied to the ELD problem with 40 units and transmission line losses.

2.3.1. Logistic Map PSO

The logistic map, a chaotic system, is used to generate a sequence of chaotic numbers. In the PSO algorithm, these chaotic numbers are employed to replace the random numbers typically used for updating the velocity and position of particles. This integration enhances the diversity of the search process and helps avoid premature convergence to local minima. The logistic map typically generates a chaotic sequence within the interval $[0,1]$, based on initial conditions, which is then integrated into the PSO algorithm.

The logistic map is often preferred due to its simple structure. The mathematical expression of the logistic map is given in equation (7) (Burak Demir et al., 2019).

$$X_{n+1} = aX_n(1 - X_n), \quad x_0 \neq \{0.25, 0.5, 0.75\} \quad (7)$$

n: Number of iterations

Xn: Chaotic number in iteration n

a: Logistic map parameter

In this study, the logistic map parameter is taken as 4.

2.3.2. Gaussian Map PSO

The Gaussian map, leveraging chaos theory, can be employed to generate long-term random numbers. In the PSO algorithm, the random numbers in the velocity equation are generated using the Gaussian map, with the aim of enhancing the algorithm's performance.

The Gaussian map is also a frequently preferred chaotic map method in the literature. The Gaussian map is shown in equation (8) (Burak Demir et al., 2019).

$$X_{n+1} = \begin{cases} 0, & X_n = 0 \\ \frac{1}{X_n} \text{mod}(1), & X_n \in (0,1) \end{cases} \quad (8)$$

$$1/X_n \text{mod}(1) = \frac{1}{X_n} - \left\lfloor \frac{1}{X_n} \right\rfloor$$

n: Number of iterations

Xn: Chaotic number in iteration n

$\lfloor \frac{1}{x_n} \rfloor$: represents the largest integer less than $\frac{1}{x_n}$ (Alataş, 2007).

2.3.3. Tent Map PSO

The tent map, utilizing chaos theory, can be used to generate long-term random numbers. In the PSO algorithm, the random numbers in the velocity equation are generated using the tent map, with the goal of improving the algorithm's performance.

The Tent map is one of the chaotic map methods used to generate numbers between 0 and 1. The mathematical expression for the Tent map is shown in equation (9). (Arul et al., 2013).

$$x_{n+1} = \begin{cases} 2a_n, & a_n \leq 0.5 \\ 2(1 - a_n), & a_n \geq 0.5 \end{cases} \quad x_n \neq \{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1\} \quad (9)$$

3. Findings and Discussion

The simulation was performed in MATLAB R2023b program on a personal computer with Intel i5 1240P 4.40 GHz, 8 Gb RAM. The swarm population in the algorithms was set to 200, and the maximum number of iterations was set to 1000. For each algorithm, 50 trial runs are made, and the maximum, minimum, and average costs are given in Table 1.

Table 1. Maximum, minimum, and average fuel cost table for PSO, LMPSO, GMPSO, and TMPSO (\$/h)

Method \ Cost	PSO	LMPSO	GMPSO	TMPSO
Max	134,932.1	135,370.28	134,907.303	138,675.23
Average	134,318.4	133,274.42	133,322.436	134,872.03
Min	133,847.6	132,857.54	132,856.657	133,483.30

Since cost minimization is performed in this study, the minimum output of each method is considered the best value. Table 2 shows the generator power outputs, line losses, and fuel costs for the best values. Table 2 also shows the computation times of the algorithms for 50 trial runs.

Table 2. Best Generator Power Outputs

Units	Generator Power Output (MW)			
	PSO	LMPSO	GMPSO	TMPSO
1	106,1541	114	114	65,4914
2	111,5905	114	114	114
3	101,5961	120	120	120
4	190	190	190	190
5	84,3717	97	97	80,3336
6	106,8004	119,9844	116,9314	102,6339
7	300	300	300	300
8	299,2505	300	300	300
9	286,1491	300	300	300
10	268,5757	300	300	300
11	217,4998	94	94	131,8292
12	94	94	94	94
13	471,2866	359,9022	378,5870	365,9508
14	393,2629	440,6596	436,4317	500
15	469,8322	447,3151	448,9715	500
16	500	500	500	500
17	467,9436	500	500	500
18	499,9663	500	480,0221	399,0247
19	544,7558	550	550	550
20	550	550	550	550
21	550	550	550	550
22	550	550	550	550
23	550	550	550	550
24	529,9300	550	550	550
25	550	550	550	550
26	550	550	550	550
27	11,4107	10	10	10
28	10	10	10	10
29	10	10	10	10
30	85,4914	97	97	97
31	183,8706	190	190	190
32	180,1104	190	190	190
33	190	190	190	190
34	200	200	200	200
35	200	200	200	200
36	186,3784	200	200	200
37	96,3703	110	110	110
38	110	110	110	110
39	110	110	110	110
40	550	550	550	550
Total Power	11466,5981	11467,8616	11460,9440	11440,2640
Loss	965,9984	967,8354	960,9434	939,6143
Fuel Cost (\$/h)	133,847.6665	132,857.5413	132,856.6574	133,483.3054
Time (s)	207,25	209,53	219,77	194,64

4. Conclusions and Recommendations

Chaotic maps can be used to generate long-term sequences of random, non-repeating numbers (Eke et al., 2023). The non-repeating nature of these sequences and the sensitivity to even the smallest initial changes are reflected in the optimization results. Each chaotic map exhibits its own unique distribution. Thus, it can be argued that the varying power output distributions and different power loss levels observed between algorithms are due to these distinct numerical distributions. Consequently, it can be said that the algorithms demonstrate different distributions to meet the total power demand, thereby forming different production strategies.

The generation cost is different for each unit in the ELD problem. The algorithms created meet the demand power with minimum cost by keeping the production quantities of the units with high production costs low and increasing the production quantities of the cheaper units.

In this study, the goal was to achieve the minimum cost, and in this context, the GMP SO algorithm can be considered the most successful. However, when examining the average values in Table 2, the LMPSO algorithm provided a lower average cost. This suggests that during the 50 iterations of the algorithms, the LMPSO algorithm produced more minimum results, leading to a lower average cost.

In light of all these findings, it can be concluded that the LMPSO algorithm yielded the best overall results among the proposed methods. However, if only the minimum value is considered, the GMP SO algorithm is the most successful in this study, as it achieves the lowest cost. This paper demonstrates the applicability of chaotic maps using chaos theory to the ELD problem.

Authors' Contributions

Ertuğrul Çam identification of conceptual and design processes, critical examination of intellectual content and interpretation of analyses, Mehmet Safa Aydın data collection, data analysis, data interpretation, identification of conceptual and design processes and interpretation of analyses.

Statement of Conflicts of Interest

The authors confirm that there are no known conflicts of interest or common interests with any organization or individual.

Statement of Research and Publication Ethics

The author declares that this study complies with Research and Publication Ethics.

References

- Adarsh, B. R., Raghunathan, T., Jayabarathi, T., & Yang, X.-S. (2016). Economic dispatch using chaotic bat algorithm. *Energy*, 96, 666–675. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.096>
- Alataş, B. (2007). *Kaotik Haritalı Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritmaları Geliştirme*.
- Arul, R., Velusami, S., & Ravi, G. (2013). Chaotic firefly algorithm to solve economic load dispatch problems. *2013 International Conference on Green Computing, Communication and Conservation of Energy (ICGCE)*, 458–464. <https://doi.org/10.1109/ICGCE.2013.6823480>
- Balamurugan, R., & Subramanian, S. (2007). Self-Adaptive Differential Evolution Based Power Economic Dispatch of Generators with Valve-Point Effects and Multiple Fuel Options. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 1, 543–550. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:11392605>
- Barati, H., & Sadeghi, M. (2018). An efficient hybrid MPSO-GA algorithm for solving non-smooth/non-convex economic dispatch problem with practical constraints. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 1279–1287. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.08.008>
- Barisal, A. K., & Prusty, R. C. (2015). Large scale economic dispatch of power systems using oppositional invasive weed optimization. *Applied Soft Computing Journal*, 29, 122–137. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.12.014>
- Burak Demir, F., Tuncer, T., Fatih Kocamaz, A., Turgut, M., Üniversitesi Bilgisayar, Ö., & Bölümü, T. (2019). *Lojistik-Gauss Harita Tabanlı Yeni Bir Kaotik Sürü Optimizasyon Yöntemi*.
- Doğru, A. S., Temel, B., & Eren, T. (2019). Comparison of Particle Swarm Optimization and Bat Algorithm Methods in Localization of Wireless Sensor Networks. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Gelistirme Dergisi*, 793–801. <https://doi.org/10.29137/umagd.668724>
- Eke, İ., SAKA, M., & Tezcan, S. (2023). Kaotik Parçacık Sürü Optimizasyonu Kullanarak Ekonomik Yük Dağıtım Probleminin Çözümü. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 11, 957–965. <https://doi.org/10.21923/jesd.1293964>
- Hassan, M. H., Kamel, S., Salih, S. Q., Khurshaid, T., & Ebeed, M. (2021). Developing Chaotic Artificial Ecosystem-Based Optimization Algorithm for Combined Economic Emission Dispatch. *IEEE Access*, 9, 51146–51165. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3066914>
- Onan, A. (2013). Metasezgisel Yöntemler ve Uygulama Alanları. *Çukurova Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 17(2), 113–128. <https://dergipark.org.tr/en/pub/cuiibfd/issue/4144/54418>
- Rezaie, H., Kazemi-Rahbar, M. H., Vahidi, B., & Rastegar, H. (2018). Solution of combined economic and emission dispatch problem using a novel chaotic improved harmony search algorithm. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(3), 447–467. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2018.08.001>
- Sudhakaran, M., Raj, P. A. .-. D. .-. V., & Palanivelu, T. G. (2007). Application of Particle Swarm Optimization for Economic Load Dispatch Problems. *2007 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ISAP.2007.4441694>
- Tanyıldızı, E., & Cıgalı, T. (2017). Kaotik Haritalı Balina Optimizasyon Algoritmaları. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(1), 307–317. <https://doi.org/10.35234/fumbd.314671>
- Tao, Z., & Jin-ding, C. (2009). A new chaotic PSO with dynamic inertia weight for economic dispatch problem. *2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/SUPERGEN.2009.5347916>
- Walters, D. C., & Sheble, G. B. (1993). Genetic algorithm solution of economic dispatch with valve point loading. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(3), 1325–1332. <https://doi.org/10.1109/59.260861>
- Xu, Z., Yang, H., Li, J., Zhang, X., Lu, B., & Gao, S. (2021). Comparative study on single and multiple chaotic maps incorporated grey wolf optimization algorithms. *IEEE Access*, 9, 77416–77437.
- Younes, M., & Benhamida, F. (2011). Genetic algorithm-particle swarm optimization (GA-PSO) for economic load dispatch. *Przeglad Elektrotechniczny*, 4, 369–372.
- Zaraki, A., & Othman, M. F. Bin. (2009). Implementing particle swarm optimization to solve economic load dispatch problem. *SoCPaR 2009 - Soft Computing and Pattern Recognition*, 60–65. <https://doi.org/10.1109/SoCPaR.2009.24>

Ekokardiyografi Görüntülerinde Aort Kapak Kalsifikasyon Segmentasyonu için Veri Artırma Yöntemlerinin İrdelenmesi

Elif BAYKAL KABLAN^{1*} 

Öz

Aort kapak kalsiyum skoru, aort darlığı tanısında, tedavisinde, takibinde ve koroner arter hastalığı riskinin belirlenmesinde oldukça önemlidir. Güncel kılavuzlar, düşük akım ve düşük gradyanlı aort darlığı tanısında aort kapak kalsiyum skorlarının dikkate alınmasını önermektedir. Aort kapak kalsiyumunun ölçümünde altın standart yöntem bilgisayarlı tomografidir (BT). Agatston skoru, kalsiyum alanı ile BT dansitesinin çarpılmasıyla hesaplanan yarı otomatik bir yöntem olmakla birlikte BT pahalı ve radyasyon riski taşımaktadır. Alternatif olarak, ekokardiyografi, daha ucuz ve radyasyon içermeyen bir yöntem olup bu görüntüleme üzerinde yapılan çalışmalar gözleme dayalı ve yarı kantitatif olup, objektif sonuçlar vermekte zorlanmaktadır. Bu çalışmada, aort kapak kalsifikasyon ölçümü için gerekli olan kalsifikasyon bölgelerini belirlemek üzere derin öğrenme tabanlı U-Net modeli çeşitli veri artırma teknikleri ile değerlendirilmiştir. Bu amaçla yeni bir veri seti oluşturulmuş ve renk, rijid ve rijid olmayan geometrik dönüşümler gibi farklı artırma yöntemlerinin etkinliği analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, rijid olmayan geometrik dönüşümlerin segmentasyon performansını en anlamlı şekilde artırdığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aort kapak, Kalsifikasyon, Kalsiyum skorlama, Ekokardiyografi, Veri artırma, Derin öğrenme, U-Net.

Analysis of Data Augmentation Methods for Aortic Valve Calcification Segmentation in Echocardiographic Images

Abstract

Aortic valve calcium scoring is crucial for diagnosing, treating, monitoring aortic stenosis, and assessing coronary artery disease risk. Current guidelines recommend incorporating aortic valve calcium scores in the diagnosis of low-flow and low-gradient aortic stenosis. The gold standard for measuring aortic valve calcium is computed tomography (CT). The Agatston score is a semi-automatic method for calculating calcium scores by multiplying the calcium area by CT density. However, CT is expensive and carries radiation risks. As an alternative, echocardiography, which is cheaper and radiation-free, has been explored. However, studies on echocardiography are observational and semi-quantitative, and they struggle to provide objective results. In this study, the deep learning-based U-Net model was evaluated for identifying calcification regions necessary for aortic valve calcification measurement using various data augmentation techniques. A new dataset was created for this purpose, and the effectiveness of different augmentation methods, including color adjustments, rigid transformations, and non-rigid geometric transformations, was analyzed. The results indicate that non-rigid geometric transformations significantly enhance segmentation performance.

Keywords: Aortic valve, Calcification, Calcium scoring, Echocardiography, Data augmentation, Deep learning, U-Net.

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, ebaykal@ktu.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

Geliş/Received: 15.08.2024

Kabul/Accepted: 05.09.2024

Yayın/Published: 15.09.2024

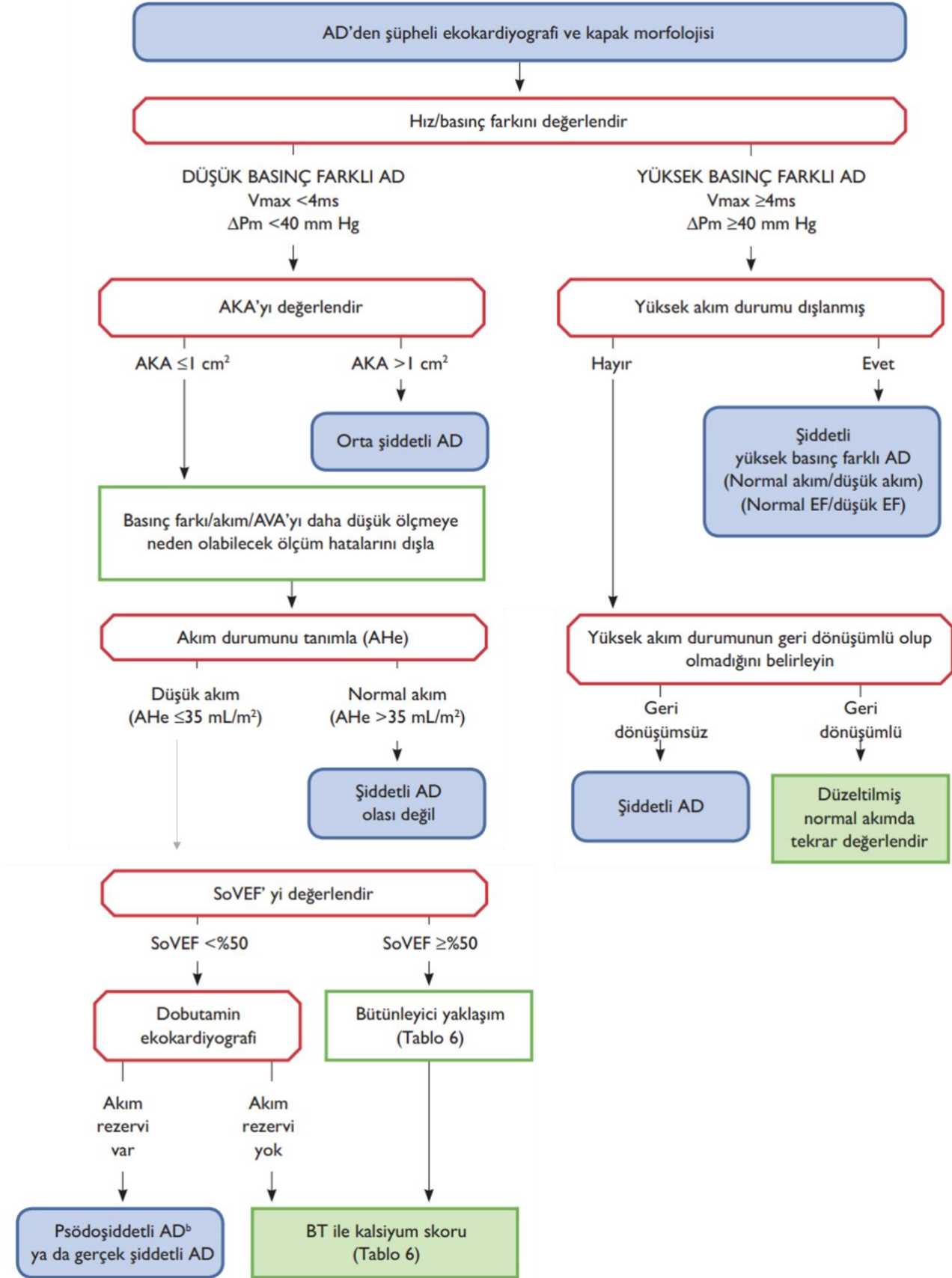
1. Giriş

Aort darlığı, gelişmiş ülkelerde, özellikle yaşlı nüfusta en sık karşılaşılan kalp kapak hastalığıdır (Lung, 2011; Osnabrugge, 2013). Aort darlığı tanısında ekokardiyografik inceleme ilk sıradadır. Ancak bazı hastalarda (yaklaşık %40 oranında) ekokardiyografik tanı da yetersiz olabilmektedir Clavel (2017). Özellikle düşük gradyanlı aort kapak hastalarında ek tanısal yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Kalsifikasyon aort darlığı gelişiminde en önemli faktördür. Kalsifikasyonun miktarı, yaygınlığı ve yoğunluğu aort kapak darlığı ciddiyeti (seviyesi) ile yakından ilişkilidir (Koos vd., 2004; Pawede vd., 2015). Ayrıca aort kapak kalsiyum skorunun olumsuz birçok klinik olayla da yakın ilişkili olduğu çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir (Rosenhek vd., 2000; Pawede vd., 2018). Bu nedenle kardiyolojik tanı ve tedavide yol gösterici olarak yararlanılan kılavuzlar tarafından aort kapak kalsiyum skorunun değerlendirilmesi önerilmektedir Falk vd. (2017). Şekil 1’de Avrupa Kardiyoloji Derneği kılavuzlarının en güncel versiyonunda uygulanması önerilen iş-akış diyagramı verilmiştir. Aort kapak kalsiyum skoru ölçümünde altın standart yöntem olarak Şekil 1’de gösterildiği gibi bilgisayarlı tomografi (BT) görüntülemesi önerilmektedir.

BT görüntülemesi ile kalsiyum miktarının belirlenmesinde en sık kullanılan ölçüm yöntemi Agatston skorlamasıdır Agatston vd. (1990). Bu yöntem, kalsifiye plak alanı ile elde edilen en yüksek Hounsfield dansitesinin çarpımı sonucu kalsiyum skorlamasını vermektedir. Agatston skorlamasında, birbirine komşu 2–3 pikselde, 1 mm²’den geniş bir alanda, BT dansitesi 130 Hounsfield ünite (HU)’den fazla olan lezyonlar kalsifikasyon olarak yorumlanmaktadır. Uzman radyolog tarafından her bir kesitte segment edilen lezyonların alanı ve dansitesi cihaz yazılımı tarafından otomatik olarak ölçülmektedir. Ancak her bir kesitteki segmentasyon süreci fazla zaman kaybına neden olabilmektedir ve uzman tecrübesine ve becerisine göre sonuçların doğruluğu değişebilmektedir. Ayrıca, her bir BT kesitinde aort ilgi bölgesinin farklı şekil, boyut ve pozisyonunun (açık kapak-kapalı kapak) olması, elle segmentasyon işlemini daha da zorlaştırmaktadır. Lezyonların her biri için kalsiyum skoru saptanarak, o hasta için toplam kalsiyum skoru yarı-otomatik olarak hesaplanmaktadır. Bu ölçümde kısmi olarak operatör (uzman radyolog) deneyimi önem kazanmaktadır. Son yıllarda, BT’de operatör etkisini azaltmaya yönelik yalnızca BT görüntülerinin irdelenmesine dayalı aort kapak kalsiyum skorunun ölçülmesi ve sınıflandırması amacı ile birkaç çalışma yapılmıştır.

Önerilen çalışmalar genellikle derin öğrenme yöntemlerine dayansa da çoğu koroner arter kalsifikasyonlarının BT görüntülerinden ölçülmesi üzerine odaklanmaktadır (Wolterink vd., 2016; Lessmann vd., 2018; van Assen vd., 2021). Aort kapak kalsiyum skorunun derin öğrenme tabanlı tespiti ve nicelendirilmeleri üzerine yapılan çalışmaların sınırlı olması (Chang vd., 2021; Singh vd.,

2021), bu araştırma alanının literatürdeki yeniliğini göstermektedir. Ayrıca, aort darlığı tanısı için kalsifikasyon ölçümleri genellikle BT taramaları ile yapılmaktadır.



Şekil 1. Aort darlığı tanı ve tedavisinde yol gösterici kılavuz iş-akış diyagramı Esc vd. (2017). Bilgisayarlı tomografi ile kalsiyum skor ölçümünün önerildiği kısım kırmızı kesik oklar ile gösterilmiştir.

Ekokardiyografi görüntülerinden aort kalsiyum skorunu ölçmeye yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır, ancak bu çalışmaların tümü gözleme dayalı ve yarı-kantitatif yöntemlere dayanmaktadır (Gaibazzi vd., 2014; Gaibazzi vd., 2015; Saha vd., 2015; Hardas vd., 2021). Elvas vd. (2021), bilgisayarlı görü kullanarak ekokardiyografi görüntülerinden kalsiyum piksellerinin tespit edilmesi ve nicelendirilmeleri için basit bir yöntem geliştirmiştir. Ekokardiyografi görüntülerindeki parlaklık farklılıklarından kaynaklanan değişkenliği gidermek için uyarlamalı görüntü ikiliği kullanılmıştır. İkiliğin ardından, ekokardiyograf, kalsiyum içeren ilgi alanını (ROI) etkileşimli olarak seçip çıkarmış ve kalsiyumun mekansal genişliğine karşılık gelen kalsiyum piksel sayısını hesaplamıştır. Ancak, bu sistem yalnızca yarı-otomatik kalsiyum tanımlamasını sağlamaktadır. Derin öğrenme, görüntü analizinde daha tutarlı ve objektif sonuçlar sağlayabilir ve ekokardiyografik tanıyı optimize etme potansiyeline sahiptir. Yapay zeka teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte, sınıflandırma (Gao vd., 2017; Wegner vd., 2022), segmentasyon (Amer vd., 2021; Mortada vd., 2023) ve çeşitli hastalıkların tanısında derin öğrenme yöntemleri ile ultrason görüntülerinin birleştirildiği uygulamalar giderek artmaktadır. Ancak, derin öğrenme algoritmalarını otomatik kalsifikasyon ile aort darlığı tespiti için uygulayan sınırlı sayıda çalışma (Tang vd., 2024; Cakir vd., 2024) mevcuttur. Tang vd., (2024), 33 hastadan alınan 757 görüntü içeren bir veri seti oluşturmuş ve bunu %90 eğitim ve %10 test olarak böldükten sonra ekokardiyografi görüntülerinde aort darlığını tam otomatik olarak tanımlayabilen açıklanabilir derin öğrenme algoritmaları geliştirmişlerdir. Önce Faster R-CNN kullanarak aort kapak bölgesini tespit etmiş daha sonra ise U-Net ile yüksek ekojenik (kalsifik olmaya aday) bölgeleri segment etmişlerdir. Segmentasyon sonuçları (Dice skoru) doğrulama setinde 0.7488'e ulaşmıştır.

Bu bağlamda, ekokardiyografik değerlendirmenin sınırlamaları, tam otomatik ve kantitatif aort kapak görüntülerinin analizi için bilgisayar destekli derin öğrenme yaklaşımlarının geliştirilmesiyle potansiyel olarak aşılabilir. Tam otomatik derin öğrenme yöntemleri, kalsifikasyon bölgelerinin doğru ve objektif bir şekilde tespit edilmesini sağlayarak, mevcut yöntemlerin sınırlamalarını gidermede önemli bir adım olacaktır. Bu yöntemler tanı sürecinin doğruluğunu artıracak, uygulama kolaylığı sağlayacak ve BT'ye olan bağımlılığı azaltarak radyasyon maruziyetini ortadan kaldıracaktır.

Bu çalışmada, ekokardiyografi görüntülerinde aort kapak kalsifikasyon alanının tam otomatik segmentasyonu için tamamen konvolüsyonel sinir ağlarından biri olan U-Net (Ronneberger vd., 2015) mimarisinin çeşitli veri artırma teknikleriyle, özellikle renk değişimleri, rijid dönüşümler ve rijid olmayan geometrik dönüşümler gibi yöntemlerle karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir. U-Net mimarisi 2015 yılında geliştirilmiş olup, tıbbi görüntü segmentasyonu alanında yüksek doğruluk oranları ve verimlilik sağlamasıyla tanınmaktadır (Ronneberger vd., 2015). U-Net'in özellikle sınırlı sayıda etiketli veri bulunan durumlarda başarılı sonuçlar vermesi, medikal görüntülerin düşük kontrast ve karmaşık yapısını etkili bir şekilde işleyebilmesi, bu mimariyi çalışmamız için ideal bir

seçim haline getirmiştir. Ayrıca, U-Net'in simetrik encoder-decoder yapısı, detaylı doku bilgilerini koruyarak segmentasyon performansını artırmaktadır (Ronneberger vd., 2015). U-Net'in bu güçlü yönleri, mimarinin hala güncel tıbbi görüntüleme uygulamalarında yaygın olarak kullanılmasına olanak tanımaktadır (Azad vd., 2024). Bu çalışma, kalsifikasyon alanı segmentasyonunu tamamen otomatik bir şekilde gerçekleştiren önceki çalışmadan (Cakir vd., 2024a) farklı olarak, veri artırma yöntemlerinin etkilerini detaylı bir şekilde incelemektedir. Ayrıca önerilen yöntem Tang vd., (2024) çalışmasından farklı olarak aort kapak bölgesini önceki çalışmamızda (Cakir vd., 2024b) önerdiğimiz gibi YOLOv5-x modelini kullanarak tespit etmektedir. YOLOv5'in, Faster R-CNN'e kıyasla daha hızlı ve verimli bir tek aşamalı model sunarak gerçek zamanlı nesne tespiti için daha uygun bir seçenek sağladığı bilinmektedir. Son olarak, kalsifikasyon alanı segmentasyonu için özel olarak geliştirilmiş yeni bir aort kapak kalsifikasyon veri seti oluşturulmuştur.

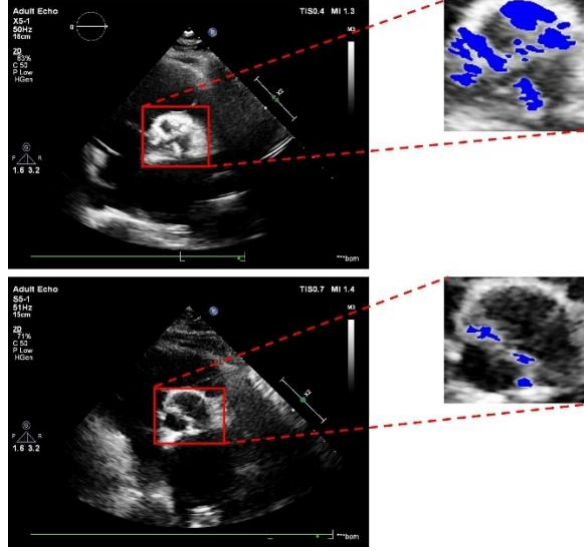
2. Materyal ve Metot

Önerilen sistemin iş akışı eğitim (eğitim ve validasyon) ve test olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Tüm deneyler, Intel(R) Core(TM) i9-11900K 3.50 GHz CPU ve NVIDIA GeForce RTX 3080 12GB GPU donanımlı bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Çalışmada oluşturulan aort kapak kalsifikasyon veri seti, önerilen U-Net modeli ve veri artırma yöntemleri ve performans değerlendirmesinde kullanılan ölçütler alt başlıklarda sunulmaktadır.

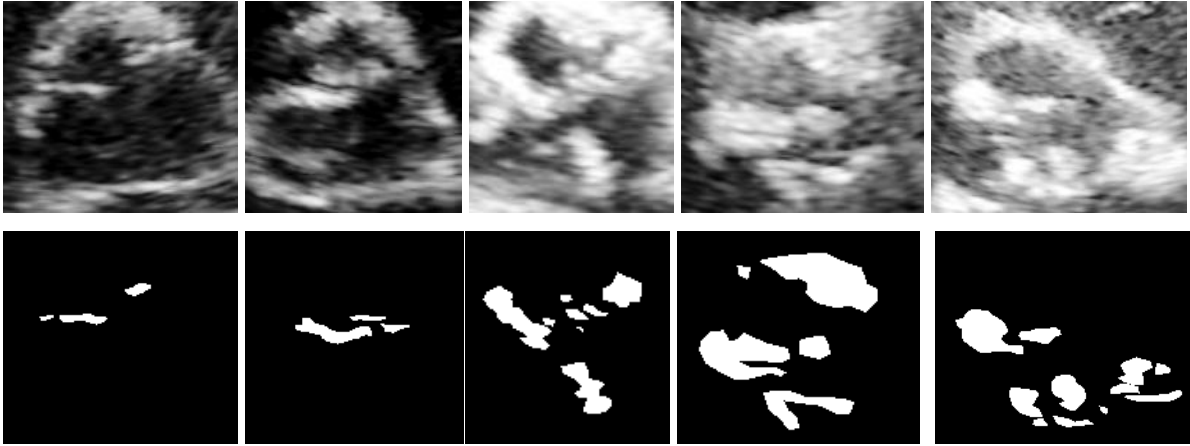
2.1. Aort Kapak Kalsifikasyon Veri Seti

Bu çalışmada, aort kapak kalsifikasyon alanı segmentasyonu için özgün bir veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti, Karadeniz Teknik Üniversitesi Tıp Fakültesi Kardiyoloji Anabilim Dalı'ndan 109 benzersiz hastadan alınmış 126 ekokardiyografi görüntüsünden oluşmaktadır. Görüntüler, uzman kardiyolog tarafından etiketleme işlemiyle oluşturulmuş karşılık gelen binary maskelerle birlikte sunulmuştur. Görüntüler, 1024x768 piksel boyutlarında JPG formatında kaydedilmiştir. Ekokardiyografi görüntülerini tüm hastalar arasında standart hale getirmek için, iki uzman kardiyolog parasternal kısa aks görüntüsünde tüm üç aort kapakçığının en net bir şekilde aynı anda görülebildiği bölgeyi belirlemiştir. Etiketleme işlemi, MATLAB 2022a Image Labeler aracı kullanılarak uzman kardiyologlar tarafından Şekil 2'deki gibi ekokardiyografi görüntülerindeki aort kapak kalsifikasyon sınırlarının çizilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Etiketleme sonrasında, tutarlı etiketleme ile bölge maskeleri PNG formatında dosyalar halinde kaydedilmiştir; siyah arka planı ve beyaz önyüzü temsil etmektedir.

Veri seti iki alt kümeye ayrılmıştır: %80'i eğitim ve %20'si test için kullanılmaktadır. Eğitim seti içinde, %10'u doğrulama için ayrılmıştır ve geri kalanı eğitim için kullanılmaktadır. Optimal ağ mimarisi, doğrulama sırasında elde edilen doğruluk ve hata metriklerine dayanarak belirlenmiş ve test seti üzerinde değerlendirilmiştir. Veri kümesine ait örnek görüntüler ve karşılık gelen maske görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 2. Ekokardiyografi görüntülerinde aort kapak kalsifikasyon bölgelerinin etiketlenmesi



Şekil 3. Veri kümesine ait örnek görüntüler ve karşılık gelen maske görüntüleri

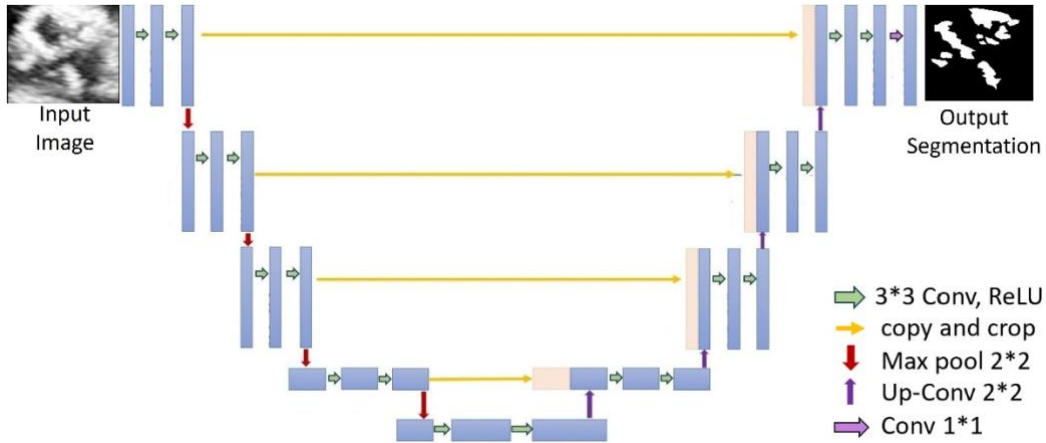
2.2. U-Net

Derin öğrenmeye dayalı yöntemlerden Konvolüsyonel Sinir Ağları (CNN), görüntü sınıflandırma problemlerindeki başarısıyla birlikte segmentasyon alanına da yönelmeye başlamıştır. 2014 yılında ilk olarak Tam Konvolüsyonel Ağ (Fully Convolutional Network, FCN) mimarisinin önerilmesiyle birlikte segmentasyon problemine etkili bir çözüm getirilmiştir. Daha sonra, segmentasyon için SegNet ve U-Net gibi birçok CNN varyasyonu geliştirilerek medikal alandaki

birçok probleme başarılı bir şekilde uygulanmıştır. U-Net modeli, simetrik bir "U" şeklinde yapılandırılmış olup, aşağı ve yukarı örnekleme yollarında eşit sayıda konvolüsyonel katman içerir.

Aşağı örnekleme yolu, görüntü özelliklerini giderek daha soyut ve küçük çözünürlükteki temsillere dönüştüren dört aşamalı bir konvolüsyonel ağdan oluşur. Her aşamada iki 3x3 konvolüsyon katmanı ve ardından bir 2x2 maksimum havuzlama katmanı bulunur. Bu yapı, özelliklerin derinlemesine öğrenilmesini sağlar. Yukarı örnekleme yolu, aşağı örnekleme yolundan elde edilen özellikleri tekrar yüksek çözünürlükteki çıktı haritalarına dönüştüren dört aşamalı bir konvolüsyonel ağ içerir. Her aşamada, 2x2 transpoze konvolüsyon (upsampling) ve ardından iki 3x3 konvolüsyon katmanı kullanılır. Ayrıca, yukarı örnekleme aşamalarında, ilgili aşağı örnekleme aşamasından gelen özelliklerle birleşme (concatenation) yapılır, bu da yerel detayların korunmasını sağlar. Model, son aşamada 1x1 konvolüsyon katmanı kullanarak her piksel için sınıf olasılıklarını tahmin eder. Sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılarak sonuçların $[0,1]$ aralığında olmasını sağlar.

Orijinal U-Net modelinde, aşağı örnekleme yolunda 64 özellik kanalı ile başlayan model, bu çalışmada 32 kanala düşürülmüştür. Ayrıca, konvolüsyonel katmanlarda maksimum özellik kanalı sayısı 1024'ten 512'ye azaltılmıştır. U-Net model mimarisi Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. U-Net model mimarisi

2.3. Veri Artırma Yöntemleri

Ultrason çekimi sırasında, sonografinin hastanın cildine uyguladığı baskı, transdüserin (ultrason probu) vücutla temasını etkiler ve bu da sinyalin kalitesini etkileyebilir. Çekim sırasında aşağıdaki değişkenler ortaya çıkabilir:

1. **Basınç Değişiklikleri:** Sonografin uyguladığı basınç, transdüserin ciltle temasını etkiler ve sinyalin gücünü değiştirebilir. Bu, görüntü kalitesinde farklılıklara yol açar. Yüksek basınç, daha net görüntüler sağlayabilirken, düşük basınç sinyalin zayıflamasına neden olabilir.

2. **Sinyal Gücü ve Kalitesi:** Ultrason sinyalinin gücü, uygulanan basınca bağlı olarak değişir. Basınç artışı, sinyalin güçlenmesini ve dolayısıyla görüntü kalitesinin artmasını sağlar, ancak aşırı basınç görüntüde distorsiyona yol açabilir.
3. **Açısal Değişiklikler:** Ultrason probunun cilt üzerinde farklı açılardan uygulanması, görüntülerin farklı yönlerden elde edilmesine neden olabilir. Bu, aynı anatomik yapının çeşitli açılardan görüntülenmesini sağlar ve görüntü kalitesinde farklılık yaratabilir.
4. **Cilt Üzerindeki Kayma:** Probu cilt üzerinde kayması, görüntüde bulanıklığa neden olabilir. Probu sabit tutulması önemlidir, aksi halde hareketler veya kaymalar görüntüde bozulmalara yol açabilir.
5. **Dokuların Elastik Özellikleri:** Ultrason, yumuşak dokuları görüntülerken bu dokuların elastik özelliklerinden etkilenir. Dokuların sıkışması veya genişlemesi, görüntüde değişiklikler yaratır ve bu da görüntü analizini zorlaştırabilir.

Bu faktörler, ultrason görüntülerinde doğal değişkenliklere neden olabilir ve derin öğrenme modelinin bu varyasyonları öğrenmesi ve genelmesi için veri artırma tekniklerinin uygulanması gereklidir. Veri artırma, derin öğrenme modelini eğitmek için kullanılan veri kümesinde yetersiz sayıda görüntü olduğunda veri kümesinin boyutunu artırmak için kullanılan ve yöntem performansında önemli iyileştirmeler sağlayan bir tekniktir. Ancak, hangi dönüşümün hangi veri kümesi için daha uygun olduğunu belirlemek genellikle zor olabilir. Bu çalışmada, üç temel veri artırma yöntemine odaklanmaktadır: renk dönüşümleri, rijid ve rijid olmayan geometrik dönüşümler.

Renk dönüşümleri, parlaklık, kontrast ve jitter gibi işlemler, tarama özelliklerini etkileyebilecek farklı ultrason görüntüleme koşullarını simüle etmektedir. Örneğin, bir sonografinin hastanın cildine uyguladığı basınç değişiklikleri, transdüserin ciltle temasını ve dolayısıyla sinyalin gücünü de etkiler.

Geometrik rijid dönüşümler, döndürme, çevirme ve kaydırma gibi işlemler, sonografinin belirli bir anatomi yapısını görüntülemek için uzman kişinin probu hastanın vücuduna farklı açılardan yerleştirebileceği veya vücut üzerinde kayması farklı görüntü görünümünü temsil eder.

Rijid olmayan dönüşümler, elastik dönüşüm ve ızgara distorsiyonu gibi yöntemler kullanılarak iç yapıların şekli ve göreceli konumu değiştirilir. Ultrason görüntüleme genellikle yumuşak dokuları görüntülemek için kullanıldığından, bu dokular rijid olmayan yapılar olup sıkışma, genişleme ve elastik hareket etme özellikleri taşır. Bu çalışmada, farklı artırma yöntemlerini uygulamak için Albumentations kütüphanesi (Buslaev vd., 2020), derin öğrenme modellerini oluşturmak ve test etmek için ise Pytorch (Paszke vd., 2019) kullanılmıştır.

2.4. Performans Değerlendirme Ölçütleri

Bu çalışmada, aort kapak kalsifikasyon alanının segmentasyonunda model performansını değerlendirmek için Dice skoru, Kesinlik ve Duyarlılık ölçütleri kullanılmıştır. Dice skoru, segmentasyon sonuçlarının doğruluğunu ölçmek için kullanılan bir benzerlik katsayısıdır ve genellikle iki set arasındaki örtüşme oranını ifade eder; bu sayede modelin hedef bölgeyi ne kadar doğru bir şekilde tespit ettiğini gösterir. Kesinlik, modelin pozitif olarak sınıflandırdığı piksellerin gerçek pozitif piksellerle olan oranını ölçer, yani modelin ne kadar doğru tahmin yaptığını değerlendirir. Duyarlılık ise, gerçek pozitif piksellerin ne kadarının model tarafından doğru bir şekilde tespit edildiğini gösterir, yani modelin kaçırıldığı pozitif pikselleri belirler. Bu üç ölçüt, segmentasyon modelinin hem doğruluğunu hem de hassasiyetini kapsamlı bir şekilde değerlendirmek için bir arada kullanılarak model performansının objektif bir şekilde analiz edilmesini sağlar. Bu ölçütler (1-3) eşitlikleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Eşitliklerde DP, DN, YP ve YN sırasıyla, doğru pozitif, doğru negatif, yanlış pozitif ve yanlış negatif sayısını ifade etmektedir.

$$Dice\ skoru = \frac{2 \times TP}{2 \times TP + FP + FN} \quad (1)$$

$$Kesinlik = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$Duyarlılık = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

3. Bulgular ve Tartışma

Bu uygulamada, tüm modellerin optimizasyonu için ADAM yöntemi kullanılmıştır ve ağırlık bozulma parametresinin değeri 0.0001 olarak ayarlanmıştır. Kayıp değerini belirlemek için modelin çıktısına sigmoid fonksiyonu uygulanmış ve ardından focal kayıp fonksiyonu kullanılmıştır. Focal kayıp fonksiyonu, sınıflar arasındaki dengesizliği ele almak için geliştirilmiş bir kayıp fonksiyonudur ve özellikle zor örnekleri daha iyi öğrenmeye yardımcı olur. Bu, segmentasyon sonuçlarının iyileştirilmesine katkı sağlar, çünkü nadir veya zor sınıflar üzerinde daha fazla odaklanır ve genel performansı artırır.

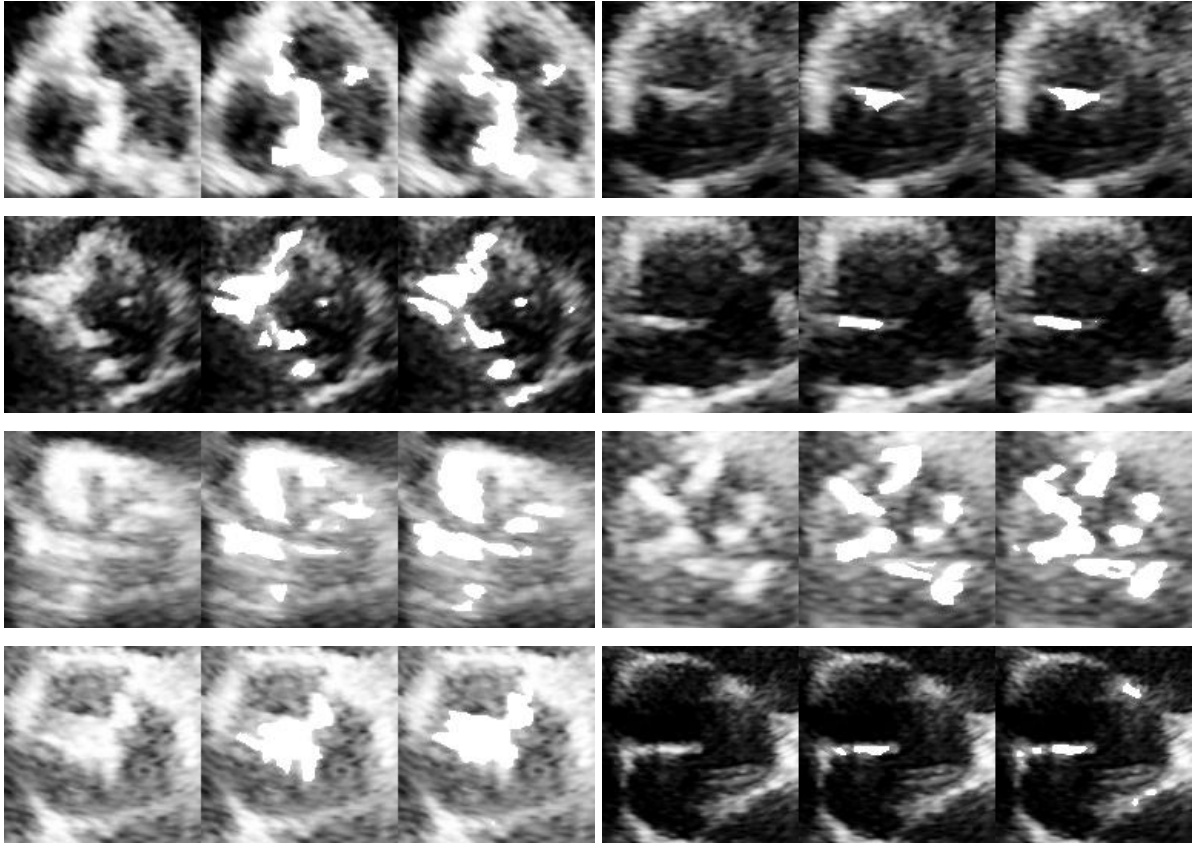
U-Net modelinin kodlayıcı katman mimarisi, veri setinin boyutları ve özellikleriyle uyumlu olacak şekilde $16 \rightarrow 32 \rightarrow 64 \rightarrow 128 \rightarrow 256 \rightarrow 512$ olarak belirlenmiş ve decoder katmanları modele göre ayarlanmıştır. Eğitim süreci modelde aşırı uyum olmaması amacıyla 100 epoch olarak

belirlenmiştir. Veri artırma uygulanmadan önce elde edilen sonuçlar (U-Net) ile renk (aug1), rijid (aug2) ve rijid olmayan (aug3) veri artırma yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırmalı analizi Tablo 1'de sunulmuştur. Tablo incelendiğinde, tüm veri artırma yöntemlerinin U-Net modelinin performansını iyileştirdiği görülmektedir. Özellikle, rijid-olmayan veri artırma yöntemi (aug3), modelin performansını Dice skoru açısından %4, kesinlik açısından %2 ve duyarlılık açısından %4 oranında en yüksek iyileştirmeyi sağlamıştır. Bu sonuç, rijid-olmayan veri artırma yöntemlerinin, aort kapak kalsifikasyon segmentasyonunda diğer veri artırma tekniklerine göre daha etkili olduğunu göstermektedir.

Tablo 1. U-Net modelinin veri artırma uygulanmadan önce ve renk, rijid ve rijid olmayan veri artırma yöntemleri uygulandıktan sonra elde edilen performans sonuçlarının karşılaştırmalı analizi.

Metrik	U-Net	U-Net + aug1	U-Net + aug2	U-Net + aug3
Dice skoru	0.73	0.75	0.75	0.77
Kesinlik	0.72	0.72	0.74	0.74
Duyarlılık	0.78	0.80	0.80	0.82

Ayrıca, segmentasyon sonuçlarının görsel incelenmesi, U-Net + aug3 modelinin etkinliğini daha da doğrulamaktadır. Şekil 5'te gösterildiği gibi, elde edilen segmentasyon sonuçları kesin referans maske görüntülerine çok yakın bir uyum göstermektedir. Bu, modelin aort kapak kalsifikasyon bölgelerini hassas bir şekilde belirleme yeteneğini vurgulamakla birlikte semantik segmentasyon görevlerinde etkinliğini ortaya koyar. Bu araştırma, tıbbi görüntüleme alanında önemli bir ilerlemeyi temsil ederek kardiyologlara aort kapak kalsifikasyonlarının otomatik ve doğru değerlendirilmesi için güvenilir bir araç sunmaktadır.



Şekil 5. Soldan sağa: Orijinal giriş görüntüsü, kesin referans maske görüntüsü ve U-Net + aug3 ile model eğitimi sonrası üretilen tahmin maskesi

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, ekokardiyografi görüntülerinde aort kapak kalsifikasyon alanının tam otomatik segmentasyonu için U-Net modelinin performansı çeşitli veri artırma teknikleriyle değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, U-Net modelinin aort kapak kalsifikasyon bölgelerini belirlemede yüksek doğruluk ve hassasiyet sağladığını göstermektedir. Modelin performansı, Dice skoru, kesinlik ve duyarlılık metrikleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Veri artırma tekniklerinin uygulanması, modelin genel performansını olumlu yönde etkilemiştir. Üç farklı veri artırma yöntemi (renk/değişimleri, rijid geometrik dönüşümler ve rijid olmayan dönüşümler) karşılaştırıldığında, rijid olmayan dönüşümlerin segmentasyon performansını en fazla iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Özellikle, rijid olmayan dönüşümler kullanılarak Dice skoru %4, kesinlik skoru %2 ve duyarlılık skoru %4 oranında iyileştirilmiştir. Görsel analizler, U-Net + aug3 modelinin aort kapak kalsifikasyon alanlarını başarılı bir şekilde belirlediğini ortaya koymuştur. U-Net'in segmentasyon sonuçları, kesin referans maskeleri ile yüksek uyum göstermiştir, bu da modelin segmentasyon görevlerindeki etkinliğini vurgulamaktadır.

Bu çalışmanın belirli kısıtları vardır. İlk olarak, çalışma sadece sınırlı bir veri seti üzerinde test edilmiştir, bu da sonuçların genelleştirilebilirliğini kısıtlamaktadır. Ayrıca, modelin performansı

yalnızca belirli veri artırma teknikleri ile değerlendirilmiş olup, diğer veri artırma ve düzenleme yöntemlerinin etkisi bu çalışmada ele alınmamıştır. Bunun yanı sıra, modelin klinik uygulamalara entegrasyonu henüz test edilmemiştir, bu da çalışmanın sonuçlarının gerçek dünya uygulamalarında ne kadar etkili olacağını belirsiz kılmaktadır. Bu limitler, çalışmanın gelecekteki araştırmalarda daha kapsamlı bir şekilde ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Gelecek çalışmalarda U-Net modelinin performansını daha da artırmak için, daha derin ağ yapıları ve hibrit model yaklaşımları değerlendirilebilir. Özellikle, dikkat mekanizmalarının entegrasyonu, modelin segmentasyon yeteneklerini geliştirebilir. Rijid olmayan dönüşümler, bu çalışmada en iyi performansı sağladığından, bu tür tekniklerin daha geniş bir veri setinde ve farklı medikal görüntüleme uygulamalarında test edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, kombinasyon teknikleri (örneğin, rijid ve rijid olmayan dönüşümlerin birleşimi) ile elde edilecek sonuçların araştırılması faydalı olabilir.

Son olarak elde edilen sonuçların klinik uygulamalarla entegre edilmesi, kardiyologlara aort kapak kalsifikasyonlarını daha hızlı ve doğru bir şekilde değerlendirme imkanı sunabilir. Makine öğrenimi ve derin öğrenme tabanlı sistemlerin klinik pratiğe entegrasyonu, teşhis süreçlerini iyileştirebilir ve hastaların tedavi süreçlerine katkıda bulunabilir.

Bu çalışma, aort kapak kalsifikasyonlarının otomatik segmentasyonu konusunda önemli bir ilerleme kaydetmiş olup, gelecekteki araştırmalara temel oluşturabilecek niteliktedir.

Teşekkür

Bu araştırma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 222S110 proje numarası altında desteklenerek yürütülmüştür. KTÜ Farabi Hastanesi'nden (2022/190 nolu) etik kurul onayı alınmıştır.

Yazarların Katkısı

E. Baykal Kablan çalışmanın tamamından sorumludur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Agatston, A. S., Janowitz, W. R., Hildner, F. J., Zusmer, N. R., Viamonte, M., & Detrano, R. 1990. "Quantification of coronary artery calcium using ultrafast computed tomography", *Journal of the American College of Cardiology*, 15(4), 827-832.
- Amer, A., Ye, X., & Janan, F. (2021). ResDUNet: A deep learning-based left ventricle segmentation method for echocardiography. *IEEE Access*, 9, 159755-159763.
- Azad, R., Aghdam, E. K., Rauland, A., Jia, Y., Avval, A. H., Bozorgpour, A., ... & Merhof, D. (2024). Medical image segmentation review: The success of u-net. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*.
- Buslaev, A., Igloukov, V. I., Khvedchenya, E., Parinov, A., Druzhinin, M., & Kalinin, A. A. (2020). Alumentations: fast and flexible image augmentations. *Information*, 11(2), 125.
- Cakir, M., Ekinci, M., Kablan, E. B., & Sahin, M. (2024, July). Automated Aortic Valve Calcific Area Segmentation in Echocardiography Images Using Fully Convolutional Neural Networks. In *2024 47th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)* (pp. 96-100). IEEE.
- Cakir, M., Ekinci, M., Kablan, E. B., & Şahin, M. (2024). AVD-YOLOv5: a new lightweight network architecture for high-speed aortic valve detection from a new and large echocardiography dataset. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 1-18.
- Chang S, Kim H, Suh YJ, Choi DM, Kim H, Kim DK, Kim JY, Yoo JY, Choi BW. 2021. "Development of a deep learning-based algorithm for the automatic detection and quantification of aortic valve calcium", *Eur J Radiol*. 137:109582.
- Clavel, M. A. 2017. "Cardiac imaging for assessing low-gradient severe aortic stenosis", *JACC Cardiovascular Imaging*, 10(2), 185-202.
- Elvas, L. B., Almeida, A. G., Rosario, L., Dias, M. S., & Ferreira, J. C. (2021). Calcium identification and scoring based on echocardiography. An exploratory study on aortic valve stenosis. *Journal of Personalized Medicine*, 11(7), 598.
- ESC, A. K. D., & Kardiyotorasik, A. 2017. "ESC/EACTS Kalp Kapak Hastalıkları Tedavi Kılavuzu".
- Falk, V., Baumgartner, H., Bax, J. J., De Bonis, M., Hamm, C., Holm, P. J., ... & Zamorano, J. L. 2017. "2017 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease", *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, 52(4), 616-664.
- Gaibazzi, N., Baldari, C., Faggiano, P., Albertini, L., Faden, G., Pigazzani, F., ... & Reverberi, C. (2014). Cardiac calcium score on 2D echo: correlations with cardiac and coronary calcium at multi-detector computed tomography. *Cardiovascular ultrasound*, 12, 1-9.
- Gaibazzi, N., Porter, T. R., Agricola, E., Cioffi, G., Mazzone, C., Lorenzoni, V., ... & Faggiano, P. (2015). Prognostic value of echocardiographic calcium score in patients with a clinical indication for stress echocardiography. *JACC: Cardiovascular Imaging*, 8(4), 389-396.
- Gao, X., Li, W., Loomes, M., & Wang, L. (2017). A fused deep learning architecture for viewpoint classification of echocardiography. *Information Fusion*, 36, 103-113.
- Hardas, S., Titar, P., Zanwar, I., & Phalgune, D. S. (2021). Correlation between echocardiographic calcium score and coronary artery lesion severity on invasive coronary angiography. *Indian Heart Journal*, 73(3), 307-312.
- Koos, R., Mahnken, A. H., Sinha, A. M., Wildberger, J. E., Hoffmann, R., & Köhl, H. P. 2004. "Aortic valve calcification as a marker for aortic stenosis severity: assessment on 16-MDCT", *American Journal of Roentgenology*, 183(6), 1813-1818.
- Lessmann, N., van Ginneken, B., Zreik, M., de Jong, P. A., de Vos, B. D., Viergever, M. A., & Išgum, I. 2017. "Automatic calcium scoring in low-dose chest CT using deep neural networks with dilated convolutions", *IEEE transactions on medical imaging*, 37(2), 615-625.
- Lung, B. 2011. "Epidemiology of valvular heart disease in the adult", *Nature Reviews Cardiology*, 8(3), 162-172.

- Mortada, M. J., Tomassini, S., Anbar, H., Morettini, M., Burattini, L., & Sbrollini, A. (2023). Segmentation of anatomical structures of the left heart from echocardiographic images using Deep Learning. *Diagnostics*, 13(10), 1683.
- Osnabrugge, R. L. 2013. "Aortic stenosis in the elderly: disease prevalence and number of candidates for transcatheter aortic valve replacement: a meta-analysis and modeling study", *Journal of the American College of Cardiology*, 62(11), 1002-1012.
- Paszke, A., Gross, S., Massa, F., Lerer, A., Bradbury, J., Chanan, G., ... & Chintala, S. (2019). Pytorch: An imperative style, high-performance deep learning library. *Advances in neural information processing systems*, 32.
- Pawade, T., Clavel, M. A., Tribouilloy, C., Dreyfus, J., Mathieu, T., Tastet, L., ... & Dweck, M. R. 2018. "Computed tomography aortic valve calcium scoring in patients with aortic stenosis", *Circulation: Cardiovascular Imaging*, 11(3), e007146.
- Saha, S. A., Beatty, A. L., Mishra, R. K., Whooley, M. A., & Schiller, N. B. (2015). Usefulness of an echocardiographic composite cardiac calcium score to predict death in patients with stable coronary artery disease (from the Heart and Soul Study). *The American journal of cardiology*, 116(1), 50-58.
- Singh, G., Al'Aref, S. J., Lee, B. C., Lee, J. K., Tan, S. Y., Lin, F. Y., ... & Credence And Iconic Investigators. 2021. "End-to-end, pixel-wise vessel-specific coronary and aortic calcium detection and scoring using deep learning", *Diagnostics*, 11(2), 215.
- Tang, L., Wang, X., Yang, J., Wang, Y., Qu, M., & Li, H. (2024). DLFFNet: A new dynamical local feature fusion network for automatic aortic valve calcification recognition using echocardiography. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 243, 107882.
- van Assen, M., Martin, S. S., Varga-Szemes, A., Rapaka, S., Cimen, S., Sharma, P., ... & Schoepf, U. J. 2021. "Automatic coronary calcium scoring in chest CT using a deep neural network in direct comparison with non-contrast cardiac CT: A validation study", *European Journal of Radiology*, 134, 109428.
- Wegner, F. K., Benesch Vidal, M. L., Niehues, P., Willy, K., Radke, R. M., Garthe, P. D., ... & Orwat, S. (2022). Accuracy of deep learning echocardiographic view classification in patients with congenital or structural heart disease: importance of specific datasets. *Journal of Clinical Medicine*, 11(3), 690.
- Wolterink, J. M., Dinkla, A. M., Savenije, M. H., Seevinck, P. R., van den Berg, C. A., & Išgum, I. (2017, September). Deep MR to CT synthesis using unpaired data. In *International workshop on simulation and synthesis in medical imaging* (pp. 14-23). Springer, Cham.

Kahverengi Kokarca [*Halyomorpha halys* Stal (Hemiptera: Pentatomidae)] Zararının Fındığın Fiziksel Özellikleri Üzerine Etkisi

Emre KAN¹, Mehmet AKGÜN², Ali TURAN^{3*}

Öz

Çalışma, kahverengi kokarcanın yoğun (YZ) ve orta düzeyde zarar verdiği (OZ) fındıklar ile zarar görmeyen (ZY) Ordu Levant fındıklarının fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla yürütülmüştür. Çalışmada kabuklu ve iç meyve boyutları (kalınlık, uzunluk, genişlik), meyve ağırlığı, iç ağırlığı, kabuk kalınlığı, randıman (teknik ve ticari), küflü ve çürük iç, limonlaşma, buruşuk ve abortif iç gibi fiziksel özellikler incelenmiştir. İnceleme sonrasında kahverengi kokarca zararının randıman, küflü ve çürük iç, limonlaşma, buruşuk ve abortif iç oranı üzerine etkisi istatistiksel olarak önemli bulunurken ($p < 0.05$) diğer özellikler üzerine etkisi ise önemsiz çıkmıştır. YZ oluşan fındıklarda ticari randıman değeri %25.40 olurken, zarar görmeyen fındıklarda randıman değeri ise %51.20 olarak kaydedilmiştir. Teknik olarak hesaplanan randımanda ise %55.95 ile zarar görmeyen kontrol uygulamasında en yüksek değer tespit edilmiştir. Diğer yandan da küflü (%20), çürük (%16.67) ve limonlaşma (%10.00) oranları en yüksek YZ gören fındıklarda görülmüştür. Elde edilen bu verilere dayanarak YZ gören fındıkların "fındık alım esaslarına" göre satışının yapılmasının söz konusu olamayacağı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kusurlu iç oranı, Limonlaşma, Randıman.

Effect of Brown Marmorated Stink Bug [*Halyomorpha halys* Stal (Hemiptera: Pentatomidae)] on Physical Traits of Hazelnuts

Abstract

The study was carried out to determine the physical traits of hazelnuts heavily (YZ) and moderately (OZ) damaged by brown marmorated stink bug and Ordu Levant hazelnuts not damaged (ZY). In the study, physical traits such as nut and kernel dimensions (thickness, length, width), nut weight, kernel weight, shell thickness, kernel percentage (technical and commercial), moldy and rotten ratio, lemonging, wrinkled and abortive kernel traits were examined. After the examination, the effect of brown marmorated stink bug damage on kernel percentage, moldy and rotten kernel, lemonging, wrinkled and abortive kernel ratio was found to be statistically significant ($p < 0.05$), while the effect on other traits was found to be insignificant. While the commercial kernel percentage of hazelnuts with YZ was 25.40%, the undamaged kernel percentage value was recorded as 51.20%. The technically calculated kernel percentage was 55.95% in the non-damaged control treatment. On the other hand, the highest rates of moldy (20%), rotten (16.67%) and lemonging (10.00%) were observed in hazelnuts with YZ. Based on these data, it is seen that it is out of question to sell hazelnuts that have been damaged according to "hazelnut purchase principles".

Keywords: Defective kernel, Lemonging, Kernel percentage.

¹Giresun Üniversitesi, Fındık İhtisaslaşma Koordinatörlüğü, Giresun, Türkiye, emre.kan@giresun.edu.tr

²Giresun Üniversitesi, Fındık İhtisaslaşma Koordinatörlüğü, Giresun, Türkiye, m.akgun@giresun.edu.tr

³Giresun Üniversitesi, Fındık İhtisaslaşma Koordinatörlüğü, Giresun, Türkiye, ali.turan@giresun.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Fındık (*Corylus avellana* L.) yüksek oranda yağ ve özel aroma içeriğine sahip dünya çapında en popüler sert kabuklu meyve türlerinden bir tanesidir. Günümüze kadar dünya üretiminin yaklaşık %80 civarındaki kısmını Türkiye (665.000 ton ile %61'i) ve İtalya (141.000 ton ile %13'ü) gibi ana üretici ülkeler karşılamaktayken son zamanlarda fındık yetiştiriciliği güney yarım kürenin dahil olduğu yeni üretim alanlarına doğru da yayılmaya başladığı görülmektedir (Morinoni ve ark., 2018; Sun ve ark., 2022). Bu ana fındık üretici ülkeleri USA ve Azerbaycan takip etmektedir (Durmaz ve Gökmen, 2019). Dünya lideri olan Türkiye'nin tek başına yıllık üretimi 650-700 bin ton civarındadır ve bu üretimin %70'i ihraç edilmektedir (KİB, 2022). Değişkenlik göstermekle birlikte Türkiye bazı yıllarda yıllık yaklaşık 2 milyar doların üzerinde bu fındık ihracatından gelir elde etmektedir.

Fındık özellikle oleik, linoleik asitlerin yanı sıra steroller gibi değerli besinler, temel mineraller, serbest fenolik asitler, fenolik bileşikler ve organik asitler gibi tekli ve çoklu doymamış yağ asitleri bakımından zengin ve sağlıklı bir kuruyemiştir (Shafiei ve ark., 2020). Bu nedenle de hem Gıda ve İlaç İdaresi (FDA) ve hem de Avrupa Gıda Güvenliği Birimi (EFSA) kalp hastalıkları riskini azaltmak için günlük yaklaşık bir avuç iç fındık (42.5 g FDA and 30 g EFSA) tüketilmesi gerektiğini önermektedirler (FDA, 2003; EFSA, 2011; Pelvan ve ark., 2018). Fındık aynı zamanda içerdiği protein, tekli doymamış yağ asitleri, karbonhidratlar, lif, mineraller, vitaminler (E vitamini gibi), fitosteroller ve ayrıca fenolik antioksidanlar bakımından çok iyi bir kaynaktır (Oliveira ve ark., 2008). Tüketimi kardiyovasküler hastalıkların önlenmesi gibi çeşitli sağlığa faydalı etkileri ile ilişkilendirilmektedir (Perna ve ark., 2016; Ferrão ve ark., 2021). Fındık natürel iç olarak tüketildiği gibi tercihen beyazlatılmış olarak ta tüketilmekle birlikte beyazlatılmış tüketim oranının daha yüksek olduğu değerlendirilmektedir.

Fındıklar yüksek oranda yağ içerir (~60%), bu yağın içerisindeki majör doymamış yağ asidi ise oleik asittir (Amaral ve ark., 2006). Fındık yağı sadece biyoaktif bileşenler içermez aynı zamanda tekli ve çoklu doymamış yağ asitleri içermektedirler (Alaşalvar ve ark., 2010). İnsan sağlığı üzerine etkilerine olan pozitif etkilerinden dolayı da aynı zamanda fındık yağı yenilebilir potansiyelde iyi bir yemeklik yağ olarak kabul edilmektedir (Alaşalvar ve Bolling, 2015; Cui ve ark., 2022). Fındığın bu besin içeriği üzerine çeşit, orijin, yetiştirme koşulları, olgunluk, hasat zamanı ve şekli, ürün sezonu, toprak tipi ve yapısı, iklim özellikleri, rakım, depolama ve bitki besleme gibi pek çok faktör etki etmektedir.

Ülkemizde son dönemlerde fındık alanlarında görülen hastalık ve zararlılar fındıkta meyve kalitesinde önemli düzeyde kayıplara neden olmaktadır. Bu hastalık ve zararlıların fındık alanlarında oluşturduğu zararlara yönelik çok sayıda çalışma yürütülmüştür (Ak ve ark., 2019; Göktürk, 2020; Turan, 2021; Turan ve Erdoğan, 2022; Kalkan ve ark., 2023; Özdemir ve ark., 2023; Gennari ve ark.,

2023). Ancak kahverengi kokarcanın fındığın fiziksel özellikleri üzerine etkisi konusunda günümüze kadar maalesef çalışma bulunmamaktadır. Dahası meyvede oluşan zararın fındık alım ve satışını nasıl etkileyeceği konusu bir araştırmaya dayalı olarak ortaya konulmamıştır. Bu nedenle bu konuda yapılacak çalışmalar çok önemli görülmektedir. Çalışma Ordu Levant fındıklarında kahverengi kokarcanın fındığın fiziksel özellikleri üzerine etkisini belirlemek amacıyla Ordu ili Perşembe ve Fatsa ilçelerinde yürütülmüştür. Çalışmadan elde edilecek sonuçlar bir yandan bundan sonraki çalışmalara örnek oluştururken, diğer yandan da fındık alımında yaşanan sorunlar için rehber olacaktır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Bu çalışma Ordu ili Perşembe (iki farklı bahçe) ve Fatsa ilçelerinde Levant fındıkları üzerinde 2023 yılında yürütülmüştür. Doğrudan çiftçilerle temas kurularak yoğun zarar gören, orta düzeyde zarar gören ve kahverengi kokarca zararı olmayan üç bahçe belirlenmiştir. Zarar oranları kabuklarından ayrılan iç fındıklarda gözlemlenmiştir. İç fındıklarda kusurlu iç oranı (Küflü, çürük, limonlaşma, buruşuk ve abortif) %50 ve üzerinde olanlar yoğun zarar, %50'nin altındaki zarar yoğunluğu orta ve %5 ve altındaki ise zarar görmeyen şeklinde değerlendirilmiştir. Yoğun zarar (YZ): Örnekler Perşembe ilçesi Kaleyaka Mahallesi (Koordinatlar: 41°05'10.61"K 37°46'27.07"D, Rakım: 60 m) tek bir bahçeden alınmıştır. Geleneksel fındık üretimi yapılan bahçede fındıklar yaklaşık 20 yaşında, ocak arası mesafe yaklaşık 4X4 m, 75 ocak/da ve ortalama 6-7 bitki/ocak şeklinde yetiştiricilik yapılmaktadır. Kış döneminde 400 g TSP/ocak dal izdüşümüne açılan çukurlara gömülmüş, 700 g/ocak CAN bahar döneminde taç izdüşümüne serpm şeklinde uygulanmıştır. Orta düzeyde zarar (OZ): Fındık örnekleri Perşembe ilçesi Yumrutaş Köyü (Koordinatlar: 41°05'23.53"K 37°45'59.12"D, Rakım: 85 m) tek bir bahçeden temin edilmiştir. Yaklaşık 25 yaşında olan fındıklarda, 4x4 m ocak arası mesafede, 6-8 bitki/ocak ve yaklaşık 70 ocak/da şeklinde yetiştiricilik yapılmaktadır. Bahçede kış döneminde 300 g/ocak TSP ve bahar döneminde 600 g /ocak CAN taç izdüşümüne serpm şeklinde uygulanmıştır. Zarar görmeyen (ZY): Örnekler Ordu ili Fatsa ilçesi "Karamolla Tarım Ürünleri İç ve Dış Tic. Ltd. Şti." den (Koordinatlar: 41°01'47.1"K 37°29'41.6"D, Rakım: 21 m) temin edilmiştir. Bahçe Levant fındıklarından oluşmuş yaklaşık 35 yaşında ve kültürel önlemler yaygın çiftçi uygulamaları şeklinde yürütülmektedir.

2.2. Metot

2.2.1. Kurutma, muhafaza ve pomolojik ölçümler

Hasat olumunda daldan elle hasat edilen fındıklar üç gün güneşte soldurulduktan sonra patoz yardımıyla zuruflarından ayrılmış ve çimen harmanda yine güneşte kurutulmuştur. %6 nem değerine ulaşan fındıklar pomolojik ölçümler yapıncaya kadar Fındık İhtisaslaşma Koordinatörlüğü (Koordinatlar: 40°55'08.74"K 38°23'08.75"D, Rakım: 21 m) adi depo şartlarında (25°C±5-%70-80 bağıl nem) muhafaza edilmiştir.

Meyve ve iç boyutları (uzunluk, genişlik ve kalınlık) tesadüfen seçilmiş (tekerrürde 30 meyve) ve her bir örnek için toplam 90 meyve kullanılmıştır. Ölçüm işlemleri 0.01 mm hassasiyete sahip dijital kumpas ile yapılmış, kabuk kalınlığı ve göbek boşluğu Turan (2023)'e göre yürütülmüştür. Meyve ve iç ağırlığı (%), randıman (%), küflü ve çürük iç (%), limonlaşma (%), buruşuk ve abortif iç (%) değerleri ölçümü 0.01 g'a duyarlı hassas terazide yapılmıştır (Turan, 2019; Turan, 2022). Randıman hesabında teknik olarak yapılan randıman toplam meyve ağırlığının toplam iç (dolgun ve kusurlu içler) ağırlığına oranlaması yoluyla yüzde (%) olarak hesaplanmıştır (Turan, 2021) (1).

$$\text{İç Oranı (\%)} = \frac{\text{İç Ağırlığı}}{\text{Meyve Ağırlığı}} \times 100 \quad (1)$$

Ayrıca fiyatlandırmaya esas ticari randıman değeri de hesaplanmıştır. Bu hesaplamada çürük, küflü ve limonlaşma tespit edilen iç fındıklar değerlendirmeye alınmamış, abortif ve buruşuk iç oranları beraber hesaplanarak %50'si değerlendirmeye alınmıştır (2) (Fiskobirlik, 2004; TMO, 2022; Turan, 2023).

$$\text{İç Oranı (\%)} = \frac{[\text{Sağlam İç Ağırlığı} + (\text{Buruşuk} + \text{Abortif})/2]}{\text{Meyve Ağırlığı}} \times 100 \quad (2)$$

2.3. İstatistik Analiz

Çalışma 3 tekerrürlü olarak tesadüf parselleri deneme desenine göre JMP 10.0 istatistik paket programı kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar arasındaki farklılıklar p<0.05 düzeyinde belirlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Kahverengi kokarcanın meyve uzunluğu, meyve genişliği, meyve kalınlığı, meyve ağırlığı ve kabuk kalınlığı üzerine etkisi Tablo 1'de verilmiştir. Kokarcanın meyve şekil özellikleri üzerine etkisi beklendiği gibi istatistiki olarak önemsiz bulunmuştur (p>0.05). Fındıkla ilgili yapılan önceki

çalışmalar incelendiğinde meyve ağırlığı, meyve uzunluğu, meyve genişliği, meyve kalınlığı ve kabuk kalınlığı değerlerinin çok sayıda faktör tarafından etkilendiği görülmüştür (Turan, 2022). Şöyle ki, çeşit, hasat zamanı, klonal varyasyon, verim, çotanaktaki meyve sayısı ve kültürel uygulamalar meyvenin boyutları üzerinde etkili olmaktadır (Matthaus ve Özcan, 2012; Hosseinpour ve ark., 2013; Kalkışım ve ark., 2016; İslam ve Çayan, 2019; Krol ve Gantner, 2020; İşbakan ve Bostan, 2020; Turan, 2022). Çalışmamızda ise meyve ölçümleri böcek emgisine rağmen boyutları genel olarak değişmeyen meyveler üzerinde yapıldığı için bu farklılık gözlenmemiştir. Kaldı ki kahverengi kokarcanın meyvenin boyutları (iç hariç) üzerinde şekilsel değişiklikler yapması beklenmemektedir.

Tablo 1. Kahverengi kokarca zararının meyve ağırlığı (MA, g) ve kabuk özellikleri (uzunluk, genişlik, kalınlık ve kabuk kalınlığı; MU, MG, MK ve KK, mm) üzerine etkisi

Örnek	MU	MG	MK	MA	KK
Yoğun Zarar	17.71±1.39	17.62±1.62	16.05±1.27	1.66±0.54	1.08±0.18
Orta Zarar	17.19±0.96	17.10±1.12	15.65±1.13	1.63±0.31	1.08±0.17
Zarar Görmeyen	17.73±1.41	16.74±1.57	15.00±1.31	1.68±0.36	1.04±0.21

Örnekler ortalama ± SD şeklinde ifade edilmiş ve arasındaki farklılıklar farklı harflerle gösterilmiştir (p < 0.05)

Araştırmada MU 17.19-773 mm, MG 16.74-17.62 mm ve MK 15.00-16.05 mm arasında değişkenlik göstermiştir. En yüksek MA 1.68 g ile sağlam meyvede tespit edilirken en düşük KK 1.04 mm ile yine aynı örneklerde kaydedilmiştir. İstatistiki farklılık olmasa bile sağlam meyve örnekleri bu yönleriyle diğer örneklerle göre öne çıkmıştır. Kabuklu fındıklarda MU 17.41-19.63 mm, MG 16.05-17.64 mm, MK 15.02-2.18 mm, MA 1.62-2.18 g ve KK 0.91 1.16 mm aralığında değişkenlik gösterdiği bilinmektedir (Hosseinpour ve ark., 2013; Kalkışım ve ark., 2016; Kan ve İslam, 2023). Aynı bahçede hatta aynı çotanakta bile meyve boyutlarındaki bu farklılığın olduğu görülmüştür (Turan, 2021; Turan 2022). Dolayısıyla önceki çalışmalarla oluşan farklılıklar beklendiği düzeyde gerçekleşmiştir.

İç özelliklerin boyutları arasındaki farklılıklar istatistiki olarak önemsiz çıkmış (p>0.05) ve detaylar Tablo 2’de verilmiştir. Tablo 2 incelendiğinde İA 0.86-0.94 g, İU 13.31-13.78 mm, İG 12.98-13.34 mm ve İK 11.89-12.33 arasında değişkenlik göstermiştir. İA beklendiği gibi en yüksek olarak 0.94 g ile sağlam meyvede kaydedilmiştir.

Tablo 2. Kahverengi kokarca zararının iç meyve özellikleri (iç ağırlığı; İA, g; iç uzunluğu, genişlik ve iç kalınlığı; İU, İG ve İK; mm) üzerine etkisi

Örnek	İA	İU	İG	İK
Yoğun Zarar	0.91±0.34	13.36±1.60	13.34±1.97	12.33±1.93
Orta Zarar	0.86±0.19	13.31±1.16	12.98±1.02	12.21±1.51
Zarar Görmeyen	0.94±0.18	13.78±1.35	13.02±1.64	11.89±1.38

Örnekler ortalama ± SD şeklinde ifade edilmiş ve arasındaki farklılıklar farklı harflerle gösterilmiştir (p < 0.05).

Fındığın değerlendirilen en önemli kısmı olan iç boyutları Turan (2019)'a göre İU 13.13-13.69 mm, İG 12.64-13.69 mm, İK 12.35-13.41 mm ve İA 0.85-0.86 g arasında değişkenlik göstermiştir. Turan (2022) ise bu boyutların sırasıyla 13.61-15.06 mm, 11.58-13.98 mm, 10.40-13.27 mm ve İA 0.90-1.40 g arasında; Turan (2023) sırasıyla; 12.09-15.39 mm, 12.70-13.57 mm, 11.53-12.94 mm ve 0.88-1.36 g arasında değişkenlik gösterdiklerini bildirmiştir. Kan ve İslam (2023) ise bu farklılığın daha belirgin olduğunu ortaya koymuş ve sırasıyla 13.39-17.97 mm, 9.56-13.97 mm, 7.99-12.85 mm ve 0.70-1.25 g gibi büyük farklılık olduğunu vurgulamışlardır. Bu farklılıklar kültürel uygulamalar, çeşit, ekoloji ve klonal varyasyondan kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla farklılıklar beklediği düzeyde gerçekleşmiştir.

Fındık alım ve satışında fiyatlandırma %50 randıman üzerinden yapılmaktadır. Fiyatlandırmaya esas alınan ticari randımanda (FR) buruşuk ve abortif iç oranı birlikte değerlendirilip toplam iç ağırlığının yarısı değerlendirmeye alınmaktadır (Fiskobirlik, 2004; Turan, 2023). Ayrıca limonlaşma, küflü ve çürük iç fındıklar ise değerlendirmeye alınmamaktadır. Dolayısıyla bu kusurların fazla olduğu örneklerde randıman düşük olmakta ve bu yüzden de düşük fiyatla satışa sunulmaktadır. Eğer sağlam iç oranı %40'ın altına düşerse de bu fındıkların alım ve satışı yapılmamaktadır (TMO, 2022; Turan, 2023). Çalışmamızda kahverengi kokarcanın randıman, küflü ve çürük iç üzerine etkisi istatistiki olarak önemli bulunmuştur ($p < 0.05$; Tablo 3). Veriler detaylı incelendiğinde yoğun zarar olan örneklerde ticari olarak hesaplanan randıman %25.40, teknik olarak hesaplanan randıman ise %32.76 olduğu görülmüştür. Her iki hesaplama yönteminde randıman değeri çok düşük gerçekleşmiştir. Randıman değeri çok düşük olan bu fındıkların iç piyasaya satışı ve/veya ihracatının yapılması mümkün görülmemektedir (Turan, 2023). Bu yüzden böcek zararının önlenmesi fındık alımı ve satışı bakımından büyük önem taşımaktadır. Diğer taraftan da piyasada satışa sunulan fındıkların randıman değerinin genel olarak %50-52 aralığında değiştiği önceki çalışmalarda görülmüştür (Turan, 2007; Turan ve Beyhan, 2009; Turan, 2019; Turan, 2021; Kan ve İslam, 2023; Turan, 2023). Randımanda böylesine düşüklüğün oluşması öngörülerin bile çok üzerinde olmuştur. Üreticilerin/bölgenin devlet desteği olmadan böylesine bir zararın altından kalkabilmeleri olası görülmemektedir.

Tablo 3. Kahverengi kokarca zararının randıman (ticari ve teknik; FR ve R, %; sırasıyla), küflü (K, %) ve çürük iç oranı (Ç, %) üzerine etkisi

Örnek	FR	R	K	Ç
Yoğun Zarar	25.40±5.95b	32.76±0.05c	20.00±2.01a	16.67±1.49a
Orta Zarar	48.20±0.53a	54.82±0.03b	4.44±0.00b	4.44±0.00b
Zarar Görmeyen	51.20±3.74a	55.95±0.01ab	0.01±0.00b	0.02±0.00b

Örnekler ortalama ± SD şeklinde ifade edilmiş ve arasındaki farklılıklar farklı harflerle gösterilmiştir ($p < 0.05$).

Küflü iç oranı en yüksek olarak %20.00 ile yoğun zarar gören örneklerde tespit edilirken, en düşük değer ise %0.01 ile sağlam meyvelerde kaydedilmiştir (Tablo 3). Çürük iç oranı da aynı şekilde

yoğun zararın olduğu örneklerde görülmüştür (Şekil 1). Dolayısıyla küflü ve çürük iç oranının yüksek kaydedildiği yoğun zararlı örneklerin fındık alım esaslarına göre satışı mümkün görülmemektedir (Turan, 2023). Fındığın satışa sunulabilmesi için bu kusurların mutlaka %5 değerinin altına düşürülmesi gerekmektedir (TMO, 2022). Orta düzeyde zarar gören fındıklar dahi satışa uygun görülmemektedir. Dolayısıyla bu zararı önlemeye ve/veya yoğunluğunu düşürmeye yönelik çalışmaların artırılması gelecek adına büyük önem taşımaktadır.



Şekil 1. Meyve özellikleri (yukarıdan aşağıya sırasıyla) A: Sağlam iç, B: Kahverengi kokarca zararı ve limonlaşma başlangıcı, C: Limonlaşmanın ilerlemiş durumu, Ç: Küflü ve çürük iç şeklinde verilmiştir.

Limonlaşma, böcek emgisinin olduğu yerde başlamakta, hasat, harman, kurutma ve muhafaza ortamlarına bağlı olarak değişkenlik göstermekte ve oksidasyon uygun şartlarda ilerleyerek küflü ve çürük içli meyvelere (Şekil 1) dönüşebilmektedir (Turan, 2017; Turan, 2018; Turan, 2019; Turan ve İslam, 2019; Turan, 2021). Fındıklarda yağ oksidasyonu başladığında artık onu önlemek mümkün olmamaktadır. Sadece muhafaza şartları ile oksidasyonun ilerlemesi bir süre durdurulabilir (Turan, 2017; Turan ve İslam, 2019). Bu yüzden böcek emgisinin önlenmesi ve muhafaza şartlarının iyileştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Tablo 4 incelendiğinde, limonlaşma en yüksek yoğun zararlı örneklerde kaydedilmiştir. Orta düzeyde zarar gören ve böcek zararı tespit edilemeyen örneklerde limonlaşma oranı beklendiği gibi daha düşük düzeyde gerçekleşmiştir. Buruşuk ve abortif iç oranı ile göbek boşluğu üzerine kahverengi kokarca zararını etkisi ile ilgili çalışma bulunmamaktadır. Elbette ki kahverengi kokarcanın böyle bir zarar oluşturması da beklenmemektedir. Ancak önceki çalışmalarda fındık yeşil kokarcasının urlu ve şekilsiz içe neden olduğu (Turan, 2021), bu yüzden de kahverengi kokarcanın da benzer zararları oluşturabileceği değerlendirilmiş ve incelemeye alınmıştır.

Tablo 4. Kahverengi kokarca zararının limonlaşma (L, %), buruşuk (BR, %), abortif iç oranı (A, %) ve göbek boşluğu değeri (GB, mm) üzerine etkisi

Örnek	L	BR	A	GB
Yoğun Zarar	10.00±1.82a	12.22±2.00a	5.55±1.12b	2.53±1.23
Orta Zarar	2.22±0.00b	8.89±0.02ab	14.44±0.00a	1.85±1.13
Zarar Görmeyen	1.12±0.05b	5.55±0.06b	6.66±0.05b	1.82±0.96

Örnekler ortalama ± SD şeklinde ifade edilmiş ve arasındaki farklılıklar farklı harflerle gösterilmiştir (p < 0.05).

Ayrıca bu kusurlu içler özellikle fiyatlandırmaya esas ticari randıman hesaplamasında çok önemli görülmektedir. Diğer taraftan da iç fındıklarda bozulma göbek boşluğundan başlayarak ilerleyebilmektedir (Turan, 2018; Turan, 2021). Bu özel durumun etkisini görmek açısından da özelliğın incelenmesi önemli görülmüştür. Tablo 4’den de anlaşılacağı üzere böceğın emgi yaptığı kısımlar gelişemediğı için en yüksek buruşuk oranı yoğun zararlı meyvelerde tespit edilmiştir. Ayrıca buruşuk iç oranını ekoloji, çeşit, klonal varyasyon, besleme ve hasat zamanı gibi çok sayıda faktör tarafından etkilenmektedir. Aynı şekilde abortif iç oranı da benzer faktörlerden etkilenmektedir (Turan, 2017). Göbek boşluğu üzerine farklı örneklerin etkisi istatistiki olarak önemsiz bulunmuştur (p>0.05). Bilindiğı üzere göbek boşluğu istikrarsız ve kararsız bir özelliktir (Turan, 2022; Turan, 2023) ve bir çotanak içerisindeki meyveler arasında bile değışkenlik gösterebilmektedir. Bu yüzden de çok dikkatli değıerlendirilmesi gerekiyor.

4. Sonuçlar ve Öneriler.

Çalışma kahverengi kokarca zararının Ordu Levant fındıkların fiziksel özellikleri üzerine etkisi konusunda yürütölen literatürdeki ilk çalışmadır. Çalışmada meyve boyutları haricinde örnekler arasındaki farklılık istatistiki olarak önemli bulunmuştur (p<0.05). Yoğun böcek zararının olduğı örneklerde randıman değeri %25.40-32.76 aralığında değışkenlik gösterirken, küflü iç %20.00, çürük iç %16.67 ve limonlaşma %10.00 olarak kaydedilmiştir. Ayrıca yoğun böcek zararlı fındıklarda adi depo şartlarında kısa süreli muhafaza da bile oksidasyonun artış eğiliminde olduğı görülmüştür. Elde edilen bu verilere dayanarak yoğun zarar oluşın fındıkların alım ve satış işlemlerine uygun olmadığı söylenebilir. Bu yüzden kahverengi kokarca zararını önlemeye yönelik çalışmaların arttırılmasının çok önemli olduğı değıerlendirilmektedir.

Teşekkür

Örneklerin temininde yardımlarını esirgemeyen Karamolla Tarım Ürünleri İç ve Dış Tic. Ltd. Şti. ve HAMUR’a (Fatsa/ORDU) çok teşekkür ederiz.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit düzeyde katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Ak, K., Uluca, & M., Aydın, Ö., (2019). Important invasive species and its pest status in Turkey: *Halyomorpha halys* (Stål) (Heteroptera: Pentatomidae). *J Plant Dis Prot*, 126, 401–408.
- Alasalvar, C., Pelvan, E., & Topal, B., (2010). Effect of roasting oil and fatty acid composition of Turkish hazelnut varieties (*Corylus avellana* L.). *Int J Food Sci Nutr* 61, 630–642.
- Alasalvar, C., & Bolling, B. W., (2015). Review of nut phytochemicals, fat-soluble bioactives, antioxidant components and health effects. *British J Nutr*, 113, S68–S78. <https://doi.org/10.1017/S0007114514003729>
- Amaral, J. S., Casal, S., Citová, I., Santos, A., Seabra, R. M., & Oliveira B. P. P., (2006). Characterization of several hazelnut (*Corylus avellana* L.) cultivars based in chemical, fatty acid and sterol composition. *Eur Food Res Technol*, 222, 274–280. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-0068-0>
- Cui, N., Zhao, T., Han, Z., Yang, Z., Wang, G., Ma, Q., & Liang, L., (2022) Characterisation of oil oxidation, fatty acid, carotenoid, squalene and tocopherol components of hazelnut oils obtained from three varieties undergoing oxidation. *Int J Food Sci Technol*, 57, 3456–3466. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15669>
- Gennari, F., Pagano, M., Toncelli, A., Lisanti, M. T., Paoletti, R., Roversi, P. F., & Giaccone, M., (2023). Terahertz imaging for non-invasive classification of healthy and cimiciato-infected hazelnuts, *Heliyon*, 9(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19891>
- Göktürk, T., (2020). *Halyomorpha halys* (Stål) mücadelesinde ışık ve feromon tuzaklarının etkinliklerinin araştırılması. *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 21(2), 270–275.
- Durmaz, G., & Gökmen, V., (2019). Effect of refining on bioactive composition and oxidative stability of hazelnut oil. *Food Res Int*, 116, 586–591. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.08.077>
- EFSA. (2011). Scientific opinion on the substantiation of health claims related to nuts and essential fatty acids (omega-3/omega-6) in nut oil (ID 741,1129, 1130 1305, 1407) pursuant to Article 13(1) of Regulation (EC) No 1324/2006. *EFSA Journal*, 9(4), 2032.
- Ferrão, A. C., Guiné, R. P. F., Ramalhosa, E., Lopes, A., Rodrigues, C., Martins, H., Gonçalves, R., & Correia, P. M. R., (2021). Chemical and Physical Properties of Some Hazelnut Varieties Grown in Portugal. *Agronomy*, 11, 1476. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081476>
- FDA. (2003). Qualified health claims: Letter of enforcement discretion-nuts and coronary heart disease. Docket No 02P-0505. Washington DC: Food and Drug Administration.
- Hosseinpour, A., Seifi, E., Javadi, D., Ramezanpour, S. S., & Molnar, T. J., (2013). Nut and kernel characteristics of twelve hazelnut cultivars grown in Iran. *Sci Hortic*, 150, 410–413.
- İslam, A., & Çayan, M., (2019). Ordu ili Gürgentepe ilçesinde yetiştirilen Çakıldak fındık çeşidinde klon seleksiyonu. *Akademik Ziraat Dergisi*, 8, 1-8.
- İşbakan, H., & Bostan, S. Z., (2020). Fındıkta bitki morfolojik özellikleri ile verim ve meyve kalite özellikleri arasındaki ilişkiler. *Ordu Üniv. Bil. Tek. Derg.*, 10 (1), 32-45.

- Kalkan, Ç., & Satar, S., (2023). Türkiye'nin Doğu Doğu Akdeniz Bölgesi için yeni Bir istilacı Tür: [Halyomorpha halys Stal (Hemiptera: Pentatomidae)]. *Çukurova Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 38(2), 381-392.
- Kalkışım, Ö., Turan, A., Okcu, Z., & Özdes, D., (2016). Evaluation of the effect of different harvest time on the fruit quality of Foşa nut. *Erwerbs Obstbau*, 5, 89–92.
- Kan, E., & İslam, A., (2023). Clonal Selection in the Local 'Trabzon Sivrisi' Hazelnut Population Grown in Some Districts of Trabzon. *Akademik Ziraat Dergisi*, 12 (Özel Sayı), 1-10. <https://doi.org/10.29278/azd.1355638>
- KİB. (2022) <https://kib.org.tr/files/downloads/2021-2022.pdf>. Accessed 24 Jan 2023
- Krol, K., & Gantner, M., (2020). Morphological traits and chemical composition of hazelnut from different geographical origins: A review. *Agriculture*, 10, 375.
- Marinoni, T. D., Valentini, N., Portis, E., Acquadro, A., Beltramo, C., Mehlenbacher, S. A., (2018). High density SNP mapping and QTL analysis for time of leaf budburst in *Corylus avellana* L. *PLoS ONE*, 13(4), e0195408. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195408>
- Matthaus, B., & Özcan, M. M., (2012). The comparison of properties of the oil and kernels of various hazelnuts from Germany and Turkey. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 114(7), 801–806.
- Oliveira, I., Sousa, A., Morais, J. S., Ferreira, I. C. F. R., Bento, A., Estevinho, L., & Pereira, J. A., (2008) Chemical composition, and antioxidant and antimicrobial activities of three hazelnut (*Corylus avellana* L.) cultivars. *Food Chem Tox*, 46, 1801-1807. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2008.01.026>
- Özdemir, I. O., Karakaya, O., Ates, U., Ozturk, B., Uluca, M., & Tuncer, C. (2023). Characterization of hazelnut kernel responses to brown marmorated stink bug [Halyomorpha halys Stal (Hemiptera: Pentatomidae)] infestations: Changes in bioactive compounds and fatty acid composition. *Journal of Food Composition and Analysis*, 124, 105696.
- Pelvan, E., Elmas, E. Ö., Ayşe, A., & Alasalvar, C., (2018). Phenolic profiles and antioxidant activity of Turkish Tombul hazelnut samples (natural, roasted, and roasted hazelnut skin). *Food Chem*, 244, 102-108. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.011>
- Perna, S., Giacosa, A., Bonitta, G., Bologna, C., Isu, A., Guido, D., & Rondanelli, M., (2016). Effects of hazelnut consumption on blood lipids and body weight: A systematic review and bayesian meta-analysis. *Nutrients*, 8(12), 747. <https://doi.org/10.3390/nu8120747>
- Shafiei, G., Ghorbani, M., & Hosseini, H., (2020). Estimation of oxidative indices in the raw and roasted hazelnuts by accelerated shelf-life testing. *J Food Sci Technol*, 57, 2433-2442. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04278-9>
- Sun, J., Pengpeng, H., Chunmao, L., Jinlong, T., Xianjun, M., Hui, T., & Wenxuan, D., (2022) Comprehensive lipidomics analysis of the lipids in hazelnut oil during storag., *Food Chem*, 378, 132050. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132050>
- TMO. (2022). Fındık satın alma şartları. Erişim adresi <https://www.tmo.gov.tr/Upload/Document/findik/satinalmasartlari2022.pdf> (Erişim tarihi: 21.02.2023).
- Turan, A., (2007). *Giresun ili Bulancak ilçesi Tombul fındık klon seleksiyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Turan, A., & Beyhan, N., (2009). Investigation of the pomological characteristics of selected Tombul hazelnut clones in the Bulancak area of Giresun province. *Seventh International Congress on Hazelnut, Book of Proceeding* (61–66), 23–27 June, Viterbo, Italy.
- Turan, A., (2017). *Fındıkta kurutma yöntemlerinin meyve kalitesi ve muhafazası üzerine etkileri*. Doktora Tezi, Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Giresun.
- Turan, A., (2018). Effect of drying methods on fatty acid profile and oil oxidation of hazelnut oil during storage. *European Food Research and Technology*, 12, 2181–2190.
- Turan, A., ve İslam, A., (2019). Tombul fındık çeşidinde yağ oksidasyonunu azaltacak kurutma yönteminin belirlenmesi. *GIDA*, 44 (4), 563-575.
- Turan, A., (2019). Effect of drying on the chemical composition of Çakıldak (cv) hazelnuts during storage. *Grasas y Aceites*, 70(1): e296.
- Turan, A., (2021). Effect of the damages caused by the green shield bug (*Palomena prasina* L.) on the qualitative traits of hazelnuts. *Grasas Aceites*, 72(1), e391.
- Turan, A., & Erdoğan, V., (2022). Spread and Damage of Citrus Longhorned Beetle [Anoplophora chinensis (Forster, 1771) (Coleoptera: Cerambycidae)] to Hazelnut Orchards in Turkey. *Turkish Journal of Agriculture Food Science and Technology*, 10(4), 531–535. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v10i4.531-535.4480>

- Turan, A. (2022). Clonal selection of 'Mincane'hazelnut cv: Physical properties. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(2), 1081-1097.
- Turan, A. (2023). Alım Noktalarına Gelen Fındık Meyvelerinde Bazı Özelliklerin Belirlenmesi: Giresun Örneği. *Akademik Ziraat Dergisi*, 12(Özel Sayı), 99-108.

KARADENİZ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

YAZIM KURALLARI

Özet kısmında çalışmanın yenilikleri ve temel bulguları vurgulanmalıdır. Türkçe ve İngilizce özet kısımları Times New Roman yazı tipi ile yazılmalıdır ve 10 punto büyüklüğü seçilmelidir. Özet kısmının yazımında tek satır aralığı seçilmelidir. Makale özetinin en fazla 200 kelime olmasına dikkat edilmelidir. Türkçe ve İngilizce özetlerin 1 (bir) sayfayı geçmemesi önerilmektedir. Anahtar kelime sayısı en az 3 en fazla 6 olmalıdır.

Makalenin sayfa yapısı A4 kağıt boyutuna ve tüm kenar boşlukları 2 cm olmalıdır. Hem Türkçe hem de İngilizce başlıklar makale konusuna uygun, amacı ve sonucu anlatan, kısa ve yalın olmalıdır. Makale başlığı koyu, ilk harfleri büyük ve ortalanarak 14 punto Times New Roman fontu ile yazılmalıdır. Türkçe makalelerde İngilizce başlık, İngilizce özetten önce verilmelidir. Yazar isimleri kısaltılmadan soy isimler büyük harfle başlığın altına yan yana ortalanarak yazılır. Adreslerde kısaltma kullanılmamalıdır. Farklı adreslere sahip yazarlar için rakamlı üst indis kullanılmalıdır. İsimler Times New Roman 12 punto, düz; adresler ise Times New Roman 10 punto, düz olmalıdır. İsimlerden önce Ünvan yazılmamalıdır. Ayrıca sorumlu yazarın e-posta adresi 10 punto Times New Roman fontunda Sorumlu Yazar kısmına yazılmalıdır.

Ana metin 12 punto yazı büyüklüğünde Times New Roman yazı tipi ile 1,5 satır aralığında ve her iki yana yaslı şekilde yazılmalıdır. Ana bölüm başlıkları numaralandırılmalı, kelimelerin ilk harfleri büyük olmalı ve **koyu (bold)** karakterde yazılmalıdır. Ana bölüm başlığından sonra 1,5 satır aralıklı bir satır boşluk bırakılarak metne geçilmelidir. Başlıkla üst metin arasında da bir satır boşluk bırakılmalıdır. Paragraflar 1 cm içeriden başlamalıdır. Paragraflar arasında boşluk bırakılmamalıdır.

Bu bölümde çalışmayla ilgili yeterli literatür taraması verilmeli, çalışmanın amaçları ve literatürdeki yeri vurgulanmalıdır. Detaylı literatür incelemesinden ve sonuçların özetinin verilmesinden kaçınılmalıdır.

Materyal ve Metot bölümünde çalışmada kullanılan materyal ve metotlar detaylı ve açık bir şekilde anlatılmalıdır.

Şekiller grafik, diyagram fotoğraf, resim, harita olabilir. Şekil yazısı şeklin alt kısmına yazılmalıdır. Hem şekil hem de şekil yazısı sayfaya ortalanmalıdır. Şekil yazılar okunaklı olmalıdır. Şekil ile üst metin arasında 1 satır boşluk bırakılmalıdır. Şekil yazısı ile alt metin arasında da 1 satır boşluk bırakılmalıdır. Şekil yazısı 11 punto ve tek satır aralıklı olarak yazılmalıdır. Şekil yazılarına atıfta bulunulmalıdır.

Tablolar açık çerçeveli tercih edilebilir. Tablo yazısı tablonun üst kısmına yazılmalıdır. Hem tablo hem de tablo yazısı sayfanın soluna hizalanmalıdır. Tablo yazısı ile üst metin arasında 1 satır boşluk bırakılmalıdır. Tablo ile alt metin arasında 1 satır boşluk bırakılmalıdır. Tablo yazıları tercihen

11 punto ile ya da 10 punto ile yazılmalıdır ve tek satır aralığı seçilmelidir. Tablo yazılarına atıfta bulunulmalıdır.

Denklem ekleme ihtiyacı duyulduğunda denklemler sırasıyla 1'den başlanarak numaralandırılmalıdır. Denklem paragraftan başlanarak yazılır. Denklem numarası sağ kenara yerleştirilmelidir. Denklem ile metin arasında üstten ve alttan bir satır boşluk bırakılır. Denklemler resim formatında olmamalıdır.

Bulgular ve Tartışma bölümünde çalışma sonucunda elde edilen bulgular verilmelidir. Elde edilen bulgular ile ilgili literatür çalışmaları yapılarak karşılaştırmalar yapılabilir.

Sonuçlar ve Öneriler bölümünde çalışmadan elde edilen sonuçlar verilmelidir. Okuyucular için öneriler ve görüşler belirtilebilir.

Teşekkür kısmında çalışmada yardımcıları ya da destekleri bulunan kişi veya kişilere ya da kurumlara teşekkür edilebilir.

Yazarların makaleye olan katkıları belirtilmelidir. (Örneğin: Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.), (Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.), (Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.)

Kaynaklar 11 punto yazı büyüklüğünde Times New Roman yazı tipi ile tek satır aralığında yazılmalıdır. Kaynaklar yazar soyadına göre (alfabetik sıralama) dizini hazırlanmalıdır ve sayfanın sol kenar boşluğu hizasından başlanarak yazılmalıdır. Metin içindeki literatür açıklamaları soyadı ve tarih verilme suretiyle (Soyadı, 2017), (Soyadı ve Soyadı, 2017) şeklinde düzenlenmelidir. İki'den fazla yazar olması durumunda birinci yazardan sonra "ark." kısaltılması yapılmalıdır (Soyadı ve ark., 2017). Birden fazla kaynak belirtilmek istendiğinde bunlar noktalı virgül ile ayrılmalıdır (Soyadı, 2017; Soyadı ve Soyadı, 2017). Kaynaklar APA formatından esinlenerek hazırlanmıştır.

Periyodik yayınlar:

Soyadı, A., Soyadı, B. B. ve Soyadı, C., (2017). Yayınlanan Makalenin Adı. *Makalenin Yayınlandığı Dergi Adı*, 7(1), 1-12.

Kitaplar:

Soyadı, A. A., (2017). *Kitap adı*. Kitabın basıldığı yer: Yayınevi.

Sempozyum, Kongre, Bildiri:

Soyadı, A., Soyadı, B. B. ve Soyadı, C., (2017, Ay). Yayınlanan Bildirinin Adı. *Bildirinin Yayınlandığı Sempozyum, Kongre, Toplantı ya da Konferans Adı* (s. 1-12). Şehir: Varsa Üniversite veya Kuruluş.

Tez:

Soyadı, A. A., (2017). *Yüksek Lisans veya Doktora Tezinin Adı*. Yüksek Lisans Tezi, Giresun Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Giresun.

Diğer Kaynaklar:

Hallam, A. Duality in consumer theory [PDF document]. Retrieved from Lecture Notes Online Web site: <http://www.econ.iastate.edu/classes/econ501/Hallam/index.html>
URL-1: <http://www.giresun.edu.tr>, (Erişim Tarihi: 22 Mart 2017).

THE BLACK SEA JOURNAL OF SCIENCES

AUTHOR GUIDELINES

The abstract section should highlight the research in question's novelties and fundamental findings. Both the Turkish and English versions of the abstracts should be single spaced, and should be written in Times New Roman with a 10 pt font size. Abstracts should be no more than 200 words in length. Both versions of the abstract together should not exceed one (1) page in length. Number of keywords should be no less than 3, and no more than 6.

The page structure of the paper should be A4 size (210x297mm) and all margins should be 2 cm. Both Turkish and English titles should be appropriate for the topic of the paper, should describe the purpose of the paper and its conclusion and should be short and simple. The title of the paper should be in bold, with initials large and centered and 14 pt Times New Roman font. The Turkish title in the English papers should be given before the Turkish abstract. Author names are written side by side under the heading, without abbreviation (surnames in capital letters). Abbreviations should not be used in addresses. Numerical overhead indices should be used for authors with different addresses. Names of the authors should be Times New Roman 12 pt. and addresses should be Times New Roman 10 pt and flat. Appellations should not be written before names. In addition, the corresponding author's e-mail address should be written in 10 pt Times New Roman font in Corresponding Author.

The main text should be typed in Times New Roman font with a font size of 12 pt and lines spacing of 1.5. Main headings should be numbered and written in bold, and the initial letter of each word within the heading should be capitalized. A single 1.5-sized line spacing should be left underneath each main heading. A single line spacing should also be left between the heading and the text preceding it. Paragraphs should be indented by 1 cm. Spacing should not be left between paragraphs.

An adequate number of academic/scientific literature relating to the research in question, as well the overall aims of the research should be provided and emphasized within this section. Here, one should avoid detailed examining the literature as well as should avoid summarizing any results.

Materials and methodology used in the conducting of the research need to be described in detail in this section.

Figures can entail graphics, diagrams, photographs, illustrations, and/or maps. Figure descriptions should be written at the bottom of or below the figure(s), and should be legible. A single line space should be left between the figure and the text preceding it. Figure descriptions should be typed in a point-size of 11, as well as should be referenced.

Tables preferably should be open framed. Table descriptions should be written at the top of or above table. Both the table and the table description should be aligned on the left of the page. A single line space should be left between the table and the text preceding it. Table descriptions preferably should be single-spaced and written in either 11 or 10 pt. font, as well as should be referenced.

Equations—where needed—should be numbered from 1 and onwards. Equations are written starting with/following the paragraph. The equation number should be placed on the right edge. A single line spacing should be left between the equation and both the preceding as well as subsequent text. Equations should not be presented in the format of an image.

In Findings and Discussion Section, the results of as well as the findings obtained from the research in question are provided in this section. Here, one can compare and contrast the obtained findings with other relevant academic/scientific literature.

The conclusions of the results obtained from the research in question are given in this section. Here, one can provide readers with suggestions and personal comments.

Acknowledgements section is where one can acknowledge and thank the individuals and/or institutions who helped with and supported the author(s) with her/his/their research.

Contribution of the authors to the article should be indicated. (For example: All authors contributed equally to the study.), (There is no conflict of interest between the authors.), (The author declares that this study complies with Research and Publication Ethics.)

The references should be typed in Times New Roman font with a size of 11 pt font in single line spacing. Bibliographic resources should be arranged in alphabetical order according to the surname(s) of the author(s), and should be written starting from the left corner margin of the page. References to citations within the text should include the author's surname and the year of publication in parenthesis: (Surname, 2017), (Surname and Surname, 2017). In situations whereby a citation reference involves more than two authors, the abbreviation "et al." is to be written after the first author's surname: (Surname et al., 2017). In case of citing more than one resource, surnames and dates are to be separated using semicolons: (Surname, 2017; Surname and Surname, 2017). References should be prepared according to APA (American Psychological Association) Style format.

Periodicals:

Surname, A., Surname, B. B., and Surname, C., (2017). Title of the Published Paper. *Name of the Journal that the Paper is Featured/Published in*, 7(1), 1-12.

Books:

Surname, A. A., (2017). *Book title*. Location of where the book was published: Publisher.

Symposiums, Congresses, Presentations:

Surname, A., Surname, B. B., and Surname, C., (2017, Month). Title of the Published Presentation. *Name of the Symposium, Congress, Meeting or Conference that the Presentation was delivered at*. (pp. 1-12). City: University or Institution (If available).

Theses and Dissertations:

Surname, A. A., (2017). *Title of the Graduate or Doctoral Thesis/Dissertations*. Graduate Thesis, Giresun University, Institute of Natural Sciences, Giresun.

Other Resources:

Hallam, A. Duality in consumer theory [PDF document]. Retrieved from Lecture Notes Online Web site:
<http://www.econ.iastate.edu/classes/econ501/Hallam/index.html>

URL-1: <http://www.giresun.edu.tr>, (Date Accessed: 22 Mart 2017).

Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi (KFBD)

The Black Sea Journal of Sciences

Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Güre Kampüsü, GİRESUN
Telefon: 0 454 310 10 87-88 Faks: 0 454 310 10 89 E-posta: kfbd@giresun.edu.tr
ISSN: 2564-7377 (Online) <http://dergipark.gov.tr/kfbd>

TELİF HAKKI DEVİR SÖZLEŞMESİ

Makale Adı :

Makalenin yazarları :

Sorumlu Yazar;

Adı Soyadı :

Adresi :

T.C. Kimlik No :

E-posta :

Telefon :

Sunulan makalenin sorumlu yazarı tüm yazarlar adına aşağıdaki konuları taahhüt eder:

- Bu makale tarafım(ız)dan yapılmış özgün bir çalışmadır ve makalede intihal yapılmamıştır.
- Bu çalışma için yazar(lar) her türlü sorumluluğa ortakdır.
- Bu makale başka bir yerde yayınlanmamıştır ve yayınlanmak üzere sunulmamıştır.
- Yazar(lar) makaleyi görmüş ve onaylamıştır.
- Makalede bulunan materyaller, diğer şahısların telif haklarını ihlal etmemektedir.
- Makale etik kurallara uygundur ve belirtilen materyaller ve yöntemler kullanıldığında herhangi bir zarara ve yaralanmaya neden olmayacaktır.
- Telif hakkı ihlali durumunda tüm sorumluluk yazar(lar)a aittir.

Yazar(lar) makalenin telif hakkından feragat etmeyi kabul ederler. Makalenin telif hakkı Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi'ne devredilmiştir.

Makalenin tüm yazarlarından makale ile ilgili tüm mali hakları Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi'ne devretme hususunda yetki aldığımı ve bu nedenle doğabilecek tüm uyuşmazlıklardan sorumlu olacağımı taahhüt ederim.

Makaleye ait tüm materyaller, bilim ve yayın kurulunca bir yıl süreyle saklanacak ve daha sonra imha edilecektir. Bu belge sorumlu yazar tarafından ıslak imza ile imzalanmalıdır.

Sorumlu Yazar Adı Soyadı:

İmza / Tarih:

Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi (KFBD)

The Black Sea Journal of Sciences

Giresun University Institute of Natural Sciences Güre Campus, GİRESUN
Phone: 0 454 310 10 87-88 **Fax:** 0 454 310 10 89 **E-mail:** kfbd@giresun.edu.tr
ISSN: 2564-7377 (Online) <http://dergipark.gov.tr/kfbd>

AGREEMENT FOR THE TRANSFER OF COPYRIGHT

Title of Paper :

Authors' Names :

Corresponding Author;

Full Name :

Address :

Identity Number :

E-mail :

Telephone :

The corresponding author of the submitted manuscript undertakes on behalf of all authors for following issues:

- This manuscript is an original work done by us and is not plagiarized.
- The author(s) are responsible for all kinds of responsibilities for this study.
- This article has not been previously published and is not under consideration by another journal.
- The author(s) has seen and confirmed the article.
- The material contained in the article does not infringe the copyrights of other persons.
- The article is suitable for ethical rules. The use of the specified materials and methods will not cause any damage or injury.
- In the event of copyright infringement, all responsibility belongs to the author(s).

The authors agrees to disclaim the copyright of the article. The copyright of the manuscript has been transferred to The Black Sea Journal of Sciences.

I undertake to authorize from all authors of the article to transfer all financial rights related to the study to The Black Sea Journal of Sciences, and to be liable for all incidences arising from this.

All materials belonging to the study will be kept for one year at the time of the science and publishing committee and will be destroyed later. This document must be signed by the corresponding author with a wet signature.

Corresponding Author Full Name:

Signature / Date:

KARADENİZ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Etik İlkeler ve Yayın Politikası

Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi Mart, Haziran, Eylül ve Aralık aylarında olmak üzere yılda dört kez yayımlanan hakemli akademik bir dergidir.

Gönderilecek eserlerde; alanında bir boşluğu dolduracak özgün bir araştırma makalesi olması şartı aranır.

Dergimizde hakemlerin ve yazarların birbirlerine karşı kimliklerinin gizli tutulduğu çift taraflı kör hakem sistemi kullanılır. Yazarlar ve hakemler, kimliklerinin gizli kalması için gayret göstermelidir. Bu amaçla sisteme dosya gönderen yazar, editör, hakem gibi kişilerin metin ve dosyaları sisteme yüklerken dikkat etmeleri gerekir.

Yayın Kurulu, dergiye gönderilen eserlerin öncelikle yayın ilkeleri ile dergi kapsamı, bilimsel içerik ve şekil açısından inceler. Ön incelemeden geçen eserler değerlendirilmesi amacıyla en az 2 hakeme gönderilir. Eserin dergiye kabul edilebilmesi için 2 hakemden de olumlu değerlendirme alması gerekir. Gerektiği durumlarda 3. hakemden de değerlendirme sürecine katkı sağlaması istenebilir. Son karar editöre aittir.

Yayınlanmak üzere gönderilen makaleler ayrıca intihal tespitinde kullanılan özel bir program aracılığıyla makalelerin daha önce yayımlanmamış olduğu ve intihal içermediği teyit edilir.

Kabul edilen eserin yayınlanma süreci, eserin alındığı tarihten itibaren 2-6 ay sürmektedir.

Dergiye makale gönderimi ücretsizdir. Yayına kabul edilen makaleden de hiçbir ücret talep edilmez.

Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, hakemli ve açık erişim politikasını benimsemiş bir dergidir. Bu bağlamda, Budapeşte Açık Erişim Hareketine (BOAI) taraftır. BOAI'ye göre Açık Erişim, "hakem değerlendirmesinden geçmiş bilimsel literatürün, internet aracılığıyla; finansal, yasal ve teknik engeller olmaksızın, serbestçe erişilebilir, okunabilir, indirilebilir, kopyalanabilir, dağıtılabilir, basılabilir, taranabilir, tam metinlere bağlantı verilebilir, dizinlenebilir, yazılıma veri olarak aktarılabilir ve her türlü yasal amaç için kullanılabilir olması"dır.

Dergimize gönderilen akademik çalışmalardaki intihalleri tespit etmek amacıyla İntihal Tespit Programları kullanılır. Dergimize makale gönderen yazarlar etik ihlal yapmadıklarını beyan etmiş sayılırlar. İntihal yaptığı tespit edilen yazarların eserlerine dergimizde yer verilmez. Bu konuyla ilgili rapor yazara gönderilir.

Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi yazarlardan makale değerlendirme ve yayın süreci için herhangi bir ücret talep etmemektedir.

Bu dergi, iştirak eden kütüphanelerin dağıtılan arşivleme sistemi yaratması amaçlı, kütüphanelerin koruma ve restorasyon amaçlı kalıcı arşivler yaratmasına izin vermek için LOCKSS sistemi kullanmaktadır.

Bu dergide makalelerini yayımlayan yazarlar aşağıdaki şartları kabul etmiş bulunmaktadır:

Yazar makale telif hakkını elinde tutar ve ilk yayımlama hakkını dergiye verir. Makale, yazarının belirtilmesi ve ilk yayımının bu dergide yapılması koşuluyla diğerleri tarafından paylaşılmasına olanak veren Creative Commons Attribution lisansı altında lisanslanır.

Yazar, makalenin dergide yayımlanmış versiyonunun tam yetki vermeden dağıtımını (örneğin, kurumsal bir veri bankasına gönderilmesi ya da bir kitapta yayımlanması) için ayrı sözleşme düzenlemeleri yapabilir.

Yazarların makalelerini dergiye göndermeden önce ya da gönderi süreci devam ederken internet üzerinden (örneğin, kurumsal veri tabanında ya da kendi web sitelerinde) paylaşımları teşvik edilir; bu, hem verimli fikir alışverişlerine hem de makalenin daha erken ve daha çok atıf almasına yol açabilir (bakınız Açık Erişimin Etkisi).

THE BLACK SEA JOURNAL OF SCIENCES

Ethical Principles and Publication Policy

The Black Sea Journal of Sciences is a peer-reviewed academic journal that is published four times a year in March, June, September and December.

Prospective papers are expected to fill a gap in their respective field through innovative research.

Our journal employs a bilateral blind review system in which the personal identities of the reviewers and authors are kept confidential from one another, and whereby the parties involved are expected not to reveal themselves. With this objective in mind, parties submitting the file in question to the system such as the author, editor, and/or reviewer must handle the uploading of those files to the system with utmost care and attention.

The publishing team first examines (the) prospective papers in accordance with the criteria of the journal's scope, as well as for scientific content and format. After the pre-review step, the papers are forwarded to at least two reviewers for evaluation. In order for a paper to be accepted, it must receive positive evaluations from both reviewers. Papers can be requested to be reviewed again if needed and evaluation of a third reviewer should necessity warrant it. The final decision is made by the editor.

Papers that are to be submitted for publishing are first controlled using special detection software in order to verify that they have not been previously published elsewhere, as well as to ensure that they do not include any plagiarized content.

Publishing takes between 2 to 6 months from the acceptance date.

The publishing or evaluation of manuscripts are free of charge.

The Black Sea Journal of Sciences is an open access journal which means that all content is freely available without charge to the user or his/her institution. Users are allowed to read, download, copy, distribute, print, search, or link to the full texts of the articles in this journal without asking prior permission from the publisher or the author. This is in accordance with the BOAI definition of open access.

Academic research submitted to our journal is run through plagiarism detection software in order to check for any possible plagiarized content. Authors are expected as they declare that their work do not include any plagiarism. A report regarding this issue is sent to the authors.

The publishing or evaluation of manuscripts are free of charge.

This journal makes use of the LOCKSS system, which allows participating libraries to create a distributed digital archiving system, as well as allowing libraries to develop permanent archives for the purposes of protection and restoration.

An author's paper is entitled to copyright protection, and is to give her/his copyright to the journal upon its first initial publishing. One's paper is licensed under the Creative Commons Attribution License, which enables it to be shared by others via permission from the author as well according to the terms and conditions laid out by this journal upon (the paper's) first initial publishing.

The author is entitled to have a separate contract drawn up in which allows for her/his paper as it is published in our journal to be distributed without providing full authorisation (e.g., a paper's being sent to the databank of an institution, or for its being published in a book, etc.)

Authors are encouraged to share their share their papers via the internet either before they submit their work to our journal or as they wait through the submission process (e.g., to an institutional database or via their own personal websites, etc.). In doing so, this allows both for a fruitful exchange of ideas and feedback, as well as allows for the paper to be earlier as well as more widely referenced (see: The Effects of Open Access).