



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 15 Sayı 2

2025

Volume 15 Issue 2



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 15, Sayı 2, Haziran 2025

Volume 15, Issue 2, June 2025

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. Birsan 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 Zuhur 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 MENGİ (Giresun Üniversitesi)

Prof. Dr. Fulya AYDIN TEMEL (Giresun Üniversitesi)

Doç. Dr. Selin KALKAN (Giresun Üniversitesi)

Doç. Dr. Volkan BAŞER (Giresun Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Murat GÜL (Giresun Üniversitesi)

Doç. Dr. Erdi ŞAHİN (Giresun Üniversitesi)

Prof. 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

Prof. 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/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>
Elettaria Cardamomum Ekstraktı ve Tamoxifen İlacı Kombinasyonunun AU-565 Meme Kanseri Hücrelerindeki Sitotoksik Etkilerinin İncelenmesi	592-600
Yağmur Zengin, Murat İhlamur, Hümeýra Başarı, Emrah Şefik Abamor	
Yüksek Enerjili Büyük Hadron Çarpıştırıcısı Bazlı Müon-Proton Çarpıştırıcılarında Uyarılmış Müon Üretimi	601-614
Mehmet Şahin, Abdullatif Çalışkan	
Cerrahi Maskelerin Geçirgenlik Özelliklerinin Regresyon Analizi ile Tahminlenmesi	615-632
Gizem Celep, Fulya Yılmaz, Gamze Tetik	
Predicting Stroke Risk with Machine Learning and Hyperparameter Optimization	633-647
Burak Özkanat, Evin Şahin Sadık	
Nutrient Content of Some Wild Plants Growing in Köyceğiz Special Environmental Protection Area (Sandras Mountain)	648-660
Mahmut Yıldıztekin , Kenan Akbaş, Atilla Levent Tuna, Ömer Varol	
EMG Tabanlı MYO Kol Bandı ile Parmak Hareketlerinin Müzikal Etkileşim Performansına Etkisinin Araştırılması	661-687
Eda Çetin , İlayda Kaya , Kübra Erat , Pınar Onay Durdu	
Forecasting the Tobacco Market in Türkiye with Artificial Neural Networks	688-701
Aysel Topşir, Ferdi Güler	
Bir Bina İç i LoRaWAN Ağında SNR ile RSSI İlişkisinin MATLAB Eğri Uydurma Yöntemi Yardımıyla Regresyon Analizi	702-717
Ömer Yıldız, Sait Eser Karlık	
Bir Hidrolik Motor Takozunun Taguchi Yöntemi ile Deneysel Olarak İncelenmesi	718-729
Zeliha Kamış Kocacıbaşı	
Determination the Environmental Performance of Biogas Production from Cattle Manure via Life Cycle Assessment	730-744
Alp Özdemir	
Repurposing Pheophorbide a as an Antiviral Molecule for Human Papillomavirus type 16	745-763
Ragıp Soner Silme	

Decision-Making Method That Prioritizes User Ranking by Using Intuitionistic Fuzzy Soft Set	764-786
Gözde Yaylalı Umul	
Investigating the Potential of Natural Agents for Colorectal Cancer Treatment with Molecular Modeling	787-806
Eda Arabacı, Nil Sazlı, Deniz Karataş	
Kadastro, Tescil ve Planlama İlişkisinin Yeniden Yorumlanması: Tescil Dışı Alanların İhyası	807-832
Bayram Uzun, Volkan Yıldırım, Fatih Terzi, Bura Adem Atasoy, Miraç Yılmaz	
Determination of Rooting Rates of Rootstock Hazelnut (Corylus colurna L.) Genotypes in Wood Cuttings	833-842
Salih Çolak, Ali İslam, Ali Turan, Muharrem Yılmaz, Selim Karagöl, Sezgin Ayan	
Elektrikli Motosiklet İçin Fırçasız Doğru Akım ve Asenkron Motorun Karşılaştırmalı Analizi: Tasarım, Performans ve Optimizasyon	843-864
Hakan Kahveci, Furkan Muhammed Kırıkçı, Ömür Akyazı	
Effects of Starter Cultures on the Physicochemical and Nutritional Characteristics of Fermented Fish Sausages	865-880
Fatma Öztürk, Hatice Gündüz, Fettah Gündüz	
Lamine edilmiş Poli(laktik asit)/Keten Biyokompozitlerin Biyobozunurluk Özelliklerinin İncelenmesi	881-896
Ramazan Yıldırım, Levent Elen	
Mobil EEG Cihazları ile Veri Toplama: Metodolojik Bir Kılavuz ve Uygulamalarla Değerlendirme	897-922
Çağatay Murat Yılmaz, Bahar Hatipoğlu Yılmaz	
Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenmeye Dayalı Duygu Analizinde Metin Temsil Yöntemlerinin Sınıflandırma Başarımına Etkisinin İncelenmesi	923-959
Aleyna Kahraman, Durmuş Özkan Şahin, Dilara Bıyıklı, Feyzanur Aytekin, Hasan Basri Darga	

Elettaria Cardamomum Ekstraktı ve Tamoxifen İlacı Kombinasyonunun AU-565 Meme Kanseri Hücrelerindeki Sitotoksik Etkilerinin İncelenmesi

Yağmur ZENGİN¹, Murat IHLAMUR^{2*}, Hümeysra BAŞARI³, Emrah Şefik ABAMOR⁴

Öz

Kanser normal hücrelerin kontrolsüz çoğalması sonucunda oluşmaktadır. Birçok kanser çeşidi olmakla birlikte meme kanseri dünyada yaygın görülen kanserendir. Meme kanseri tedavisinde cerrahi tedavi, hormonoterapi, kemoterapi ve immünoterapi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Fakat bu yöntemler kanser hücreleri ile birlikte sağlıklı hücreler üzerinde etkinlik göstererek iki hücreyi de öldürmektedir. Kullanılan tedavi yöntemlerinin dezavantajlarından dolayı son yıllarda yeni tedavi yöntemlerine yönelik araştırmalar artmıştır. Yapılan araştırmalarda kanser tedavisinde bitkisel tedavi yaklaşımları denenmektedir. *Elettaria Cardamomum* ekstraktının meme kanseri hücrelerinde anti-tümör etkisi olduğu bilinmektedir. Yapılan çalışmada *E. Cardamomum* ekstraktının tek başına ve tamoxifen ilacı kombinasyonlarının L929 fibroblast ve AU-565 meme kanseri hücre hatları üzerindeki sitotoksik etkinliği araştırılmıştır. Sonuç olarak *Elettaria Cardamomum* ekstraktının içeriğinde olan diindolilmetan (DIM) ve indol-3-karbinol (I3C) meme kanseri hücreleri üzerinde hormon yollarını baskılayarak kanser hücrelerini öldürdüğü bilindiği için AU-565 meme kanseri hücre hattında da sitotoksik etkiye sahiptir. Fakat bu etkinlik düşüktür. *Elettaria Cardamomum* ekstraktının tamoxifen ilacı ile kombinasyonunda ise AU-565 meme kanseri hücrelerinde *Elettaria Cardamomum* ekstraktının tek başına uygulamasına göre daha fazla sitotoksik etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Meme kanseri, AU-565, *E. cardamomum*, Tamoxifen, Sitotoksiste.

Investigation of the Cytotoxic Effects of *Elettaria Cardamomum* Extract and Tamoxifen Drug Combination on AU-565 Breast Cancer Cells

Abstract

Cancer occurs as a result of uncontrolled proliferation of normal cells. Although there are many different types of cancer, breast cancer is one of the most common cancer types in the world. Methods such as surgical treatment, chemotherapy, hormoneotherapy and immunotherapy are used in the treatment of breast cancer. However, these methods act on healthy cells as well as cancer cells, killing both cells. Due to the disadvantages of the treatment methods used, research on new treatment methods has increased in recent years. In research, herbal treatment approaches are being tried in the treatment of cancer. It is known that *Elettaria Cardamomum* extract has an anti-tumor effect on breast cancer cells. In the study, the cytotoxic activity of *E. cardamomum* extract alone and tamoxifen drug combinations on L929 fibroblast and AU-565 breast cancer cell lines was investigated. As a result, Diindolylmethane (DIM) and indole-3-carbinol (I3C) molecules found in *Elettaria Cardamomum* extract also have a cytotoxic effect on the AU-565 breast cancer cell line, as it is known to kill cancer cells by suppressing hormone pathways on breast cancer cells. But this effectiveness is low. It was determined that tamoxifen drug combined with *Elettaria Cardamomum* extract had a more cytotoxic effect on AU-565 cells than the application of *Elettaria Cardamomum* extract alone.

Keywords: Breast cancer, AU-565, *E. cardamomum*, Tamoxifen, Cytotoxicity.

¹Boğaziçi Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği Enstitüsü, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, yagmurzengn08@gmail.com

²Biruni Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, İstanbul, Türkiye, ihlamurmurat@gmail.com

^{3,4}Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya Metalürji Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, İstanbul, Türkiye, humeysra.basari@gmail.com esabamor@gmail.com

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Kanser normal hücrelerin kontrolsüz bir şekilde çoğalması sonucunda oluşmaktadır. Mide, meme, akciğer gibi birçok kanser çeşidi vardır (Krieghoff-Henning ve ark., 2017). Kadınlarda en çok görülen kanser çeşitlerinden biri ise meme kanseridir. Meme kanserinin oluşum nedenleri arasında genetik faktörler ve dış faktörler (UV, kimyasallar vb.) yer almaktadır. Meme kanseri tanısında mamografi, ultrason ve biyopsi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Meme kanseri tedavisinde ise cerrahi tedavi, kemoterapi, hormonoterapi ve immünoterapi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Meme kanseri hastalarında ilaç tedavisi olarak docetaxel, doksorubisin, paklitaksel, epirubisin, trastuzumab, tamoksifen, aromataz inhibitörleri gibi ilaçlar kullanılmaktadır (Alkabban ve Ferguson, 2024; Łukasiewicz ve ark., 2021). Fakat meme kanserinde kullanılan bu tedavi yöntemleri meme kanserinin önlenmesinde etkili olamamaktadır. Bundan dolayı meme kanseri tedavisinde yeni tedavi yaklaşımları geliştirilmektedir. Geçmişten günümüzde kadar birçok bitki meme kanseri tedavisinde araştırılmakta ve kullanılmaktadır. Ekinezya, sarımsak, zerdeçal, zencefil, kudret narı gibi bitkilerin meme kanserine uygulandığı çalışmalarda yüksek oranda öldürücü oldukları belirlenmiştir (Lopes ve ark., 2017). Bundan dolayı bitkisel yaklaşımların meme kanserinde etkili olabileceği düşünülmektedir. Aynı zamanda yapılan çalışmalarda bitki ekstraktları ile birlikte ilaçlar da kombine edilerek kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda bitki ve ilaç kombinasyonlarında, bitki ekstraktlarının hem ilaçların öldürme etkinliklerini arttırdığı hem de ilaçların toksik etkinliklerini azalttığı belirlenmiştir (Laurent ve ark., 2021). *E. Cardomomum* bitkisinin de antifungal, antibakteriyel ve antikanser etkinlik gösterdiği yapılan çalışmalar ile belirlenmiştir. *E. Cardomomum* bitkisinin yapısında birçok birincil ve ikincil metabolit bulunmaktadır. Bunlardan biri olan I3C; meme kanserinde metastazı, inflamasyonu, tümörijenizi ve immünomodülasyonu azaltmaktadır. Ayrıca kanser yolaklarına etki ederek ve hormon aktivitelerinin düzenlenmesinde de rol oynamaktadır (Zengin ve ark., 2022). Yapılan bu çalışmada ise L929 fibroblast ve AU-565 meme kanseri hücre hatlarında tek başına *E. Cardomomum* ekstraktının ve *E. Cardomomum* ekstraktı-tamoksifen ilacı kombinasyonlarının sitotoksik etkinliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca bu kombinasyonların AU-565 meme kanseri hücrelerinin gelişimini engellenmesi hedeflenmektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. *E. Cardomomum* Ekstraktının Hazırlanması

E. Cardomomum bitkisinin tohumları çıkarıldı ve çıkarılan tohumlar ezilerek toplandı. 8 gr *E. Cardomomum* tohumu tartıldı ve metanol eklenerek karanlıkta 6 gün inkübe edildi. İnkübasyon

sonunda elde edilen ekstrakt, whatman kağıdı kullanılarak süzüldü. Daha sonra beher içine alındı ve metanolün hava akımı ve sıcaklık yoluyla buharlaşması sağlandı (Kelleci ve ark., 2022). *E. Cardomomum* ekstraktının miktarı hassas tartım ile belirlendi.

2.2. Hücre Kültürünün Yapılması

Fare fibroblast hücre hattı (L929) ve insan meme kanseri hücre hattı (AU-565) laboratuvarında bulunan kriyobanktan alınarak kullanıldı. Hücre çoğalması için DMEM (Gibco) ve RPMI-1640 (Gibco) medyumları hazırlandı. Stok medyumların hazırlanması %1'lik L-glutamin ve penisilin-streptomisin eklenerek gerçekleştirildi. Deneysel aşamada ise %10 fetal bovine serum (FBS) (Sigma) medyumlara eklendi (Ihlamur ve ark., 2022). Yapılan çalışmada pasaj sayıları 10. ile 15. arasında olan hücre hatları kullanıldı.

%10 FBS (Sigma) içeren RPMI-1640 (Gibco) besiyerinde AU-565 meme kanseri hücre hatlarının kültürü gerçekleştirildi. L929 fibroblast hücrelerinin kültürü ise %10 FBS içeren DMEM (Gibco) besiyerinde yapıldı. Hücrelerin üretimi 37°C, %95 nem ve %5 CO₂ içeren ortamda gerçekleştirildi. Hücreler enzimatik yol ile toplanarak 25°C 5 dk 1000 rpm'de santrifüj edildi. 96 kuyulu plakalara kuyu başına 1x10⁵ hücre/ml olacak şekilde ekimleri yapıldı. Ekimleri yapılan hücreler 48 saat boyunca inkübe edildi (Ihlamur ve ark., 2022a).

2.3. MTT Analizinin Yapılması

Hazırlanan ekstrakt ve ekstrakt-ilaç formülasyonlarının sitotoksik etkinliklerini belirlemesi için MTT kullanıldı. Hücrelerin canlılığı 3-(4,5-dimetiltiazol-2-il)-2,5-Difeniltetrazilyum bromür kullanılarak analiz edildi. 96'lık plakalara ekilen hücrelere ekstrakt ve ekstrakt-ilaç kombinasyonları eklendi. Uygulama yapılan hücreler %5 CO₂ içeren 37°C'lik inkübatörde 48 saat boyunca inkübasyona bırakıldı. Inkübasyon sonrasında kuyucuklara 10 µl MTT solüsyonu eklendi ve %5 CO₂ içeren etüvde 37°C'de 3 saat inkübe edildi. Daha sonra her bir kuyucuğa 100 µl dimetilsülfoksit (DMSO) ilave edildi. 30 dakika plakalar karanlıkta tutuldu (Kelleci ve ark., 2022a; Ihlamur ve ark., 2024). Hücre canlılığı analizi 570 nm dalga boyunda ölçüldü. Hücre canlılığı analiz verileri eşitlik 1 kullanılarak veri grafikleri elde edildi.

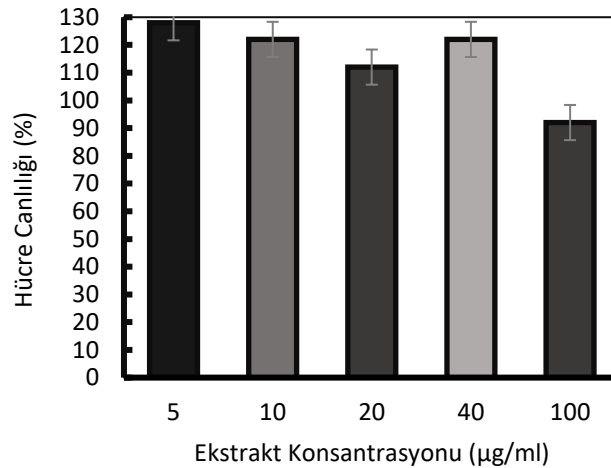
$$\text{Hücre Canlılığı (\%)} = \left(\frac{\text{Örnek absorbansı}}{\text{Kontrol absorbansı}} \right) * 100 \quad (1)$$

2.4. İstatistiksel Analiz

Çalışmadan elde edilen veriler IBM SPSS 25.0 (IBM Corporation, Armonk, NY, ABD) paket programında analiz edildi. Gruplar arası karşılaştırmalar tek yönlü varyans analizi Tek Yönlü ANOVA testi ile yapıldı. Sonuçlar ortalama±standart sapma (Ortalama±SD) olarak verilmiş ve istatistiksel anlamlılık $p<0,05$ olarak kabul edildi.

3. Bulgular ve Tartışma

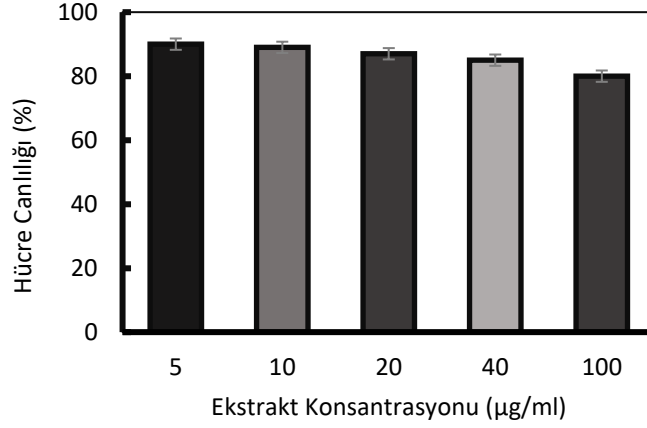
Bitkilerde bulunan ikincil metabolitler, flavonoidler, tanenler, kinonlar, fenolik asitler gibi aktif bileşikler kanser yolaklarını baskılayarak kanserlerin önlenmesinde ve tedavisinde etkili olabilmektedir (Cragg ve Pezzuto, 2016). *E. cardamomum* bitkisinden yapılan çalışmada macerasyon yöntemi ile ekstrakt elde edilmiştir. Elde edilen *E. cardamomum* ekstraktı tek başına ve tamoxifen ilacı ile kombine edilerek L929 fibroblast ve AU-565 meme kanseri hücre hatları üzerindeki sitotoksik etkinliklerine bakılmıştır. Bu çalışma sonucunda meme kanserinin tedavisi için en uygun *E. cardamomum* ekstraktı-tamoxifen ilacı konsantrasyonları belirlenmiştir. Belirlenen formülasyonların in vivo çalışmalarda kullanılması hedeflenmektedir. MTT sonuçlarına göre hücre canlılığı 48. saatin sonundaki bütün gruplar arasında % hücre canlılığı üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır.



Şekil 1. *E. Cardamomum* ekstraktının L929 fibroblast hücre hattı üzerindeki sitotoksik etkisi

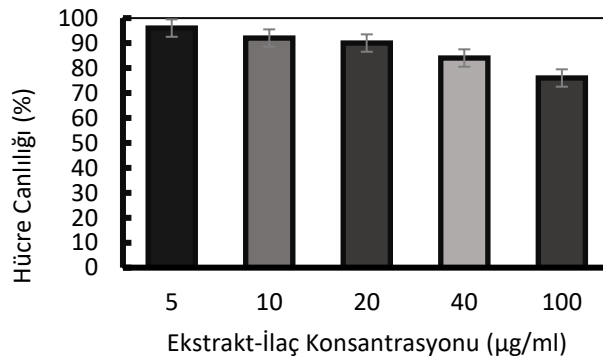
E. Cardamomum ekstraktı ile muamele edilen L929 fare fibroblast hücre hattının canlılık analizleri şekil 1’de gösterilmiştir. *E. Cardamomum* bitkisinden elde edilen ekstraktın en yüksek öldürme etkinliği 100 µg/ml konsantrasyonda gerçekleştirilmiştir. Fakat bu konsantrasyonda

fibroblast hücrelerine uygulandığında hücrelerde ciddi bir sitotoksik etki gösterdiği için kullanmaya uygun olmadığı görülmektedir. *E. Cardomomum* ekstraktı 100 µg/ml'den sonra en yüksek sitotoksik etkinliği 40 µg/ml konsantrasyonunda göstermiştir. Yapılan çalışmada 40 µg/ml konsantrasyondaki *E. Cardomomum* ekstraktının tek başına sitotoksikite analizinde fibroblastlarda %122 canlılık tespit edilmiştir. ($p<0,05$).



Şekil 2. *E. Cardomomum* ekstraktının AU-565 meme kanseri hücre hattı üzerindeki sitotoksik etkisi

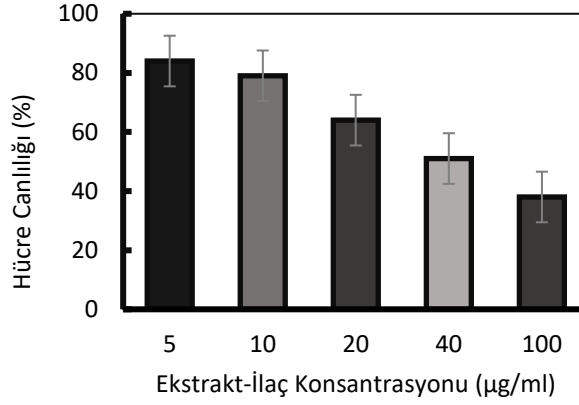
E. Cardomomum ekstraktı ile muamele edilen AU-565 meme kanseri hücre hattının canlılık analizleri Şekil 2’de gösterilmiştir. Bu çalışmada, *E. Cardomomum* ekstraktının AU-565 meme kanseri hücre hatlarına uygulanması sonucu hücre canlılıklarında azalmalar mevcuttur. Hücrelere, 40 µg/ml konsantrasyondaki *E. Cardomomum* ekstraktı uygulandığında AU-565 meme kanseri hücre hattında %85 canlılık tespit edilmiştir.



Şekil 3. *E. Cardomomum* ekstrakt-tamoxifen ilacının L929 fibroblast hücre hattı üzerindeki sitotoksik etkisi

E. Cardomomum ekstraktının tamoxifen ilacı ile kombinasyonlarının fibroblast hücre kültürü sistemindeki sitotoksik analizi Şekil 3’te gösterilmiştir. 40 µg/ml *E. Cardomomum* ekstraktının

kullanıldığı tamoksifen ilacı kombinasyonlarında, en yüksek sitotoksik etkinliğin 40 µg/ml tamoksifen ilacının kullanıldığı kombinasyonlarda olduğu görülmektedir. 40 µg/ml ekstrakt + 40 µg/ml tamoksifen ilacının fibroblastlarla muamelesinde %84 canlılık tespit edilmiştir ($p<0,05$).



Şekil 4. *E. Cardomomum* ekstrakt-tamoksifen ilacının AU-565 meme kanseri hücre hattı üzerindeki sitotoksik etkisi

Şekil 4'te ekstrakt ve tamoksifen ilacı kombinasyonlarının AU-565 meme kanseri hücre hattındaki sitotoksik etkileri gösterilmiştir. Bu verilere göre 40 µg/ml *E. Cardomomum* bitkisi ekstraktlarının kullanıldığı tamoksifen ilacı kombinasyonlarında 40 µg/ml tamoksifen ilacının kullanıldığı kombinasyon meme kanseri hücre hattında da en yüksek öldürme etkisi göstermiştir. 40 µg/ml ekstrakt + 40 µg/ml tamoksifen ilacının kullanıldığı kombinasyonun sitotoksikite analizinde AU-565 meme kanseri hücre hattında %51 canlılık tespit edilmiştir.

Meme kanseri tedavisinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Fakat bu yöntemlerin avantajları olduğu kadar dezavantajları olduğu için ve bu yöntemlerde istenilen sonuçların alınamadığı için meme kanseri tedavilerinde yeni yaklaşımlar geliştirilmeye başlanmıştır. Günümüzde toksik etkinliği yok ya da çok düşük olduğu için alternatif tıpta kullanılan bitkiler gün geçtikçe popüler bir araştırma konusu olmuştur (Shrihastini ve ark., 2021). Zencefil, yeşil çay, sarımsak, zerdeçal ve kakule gibi bitkilerin etkinlikleri kanserlerde incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda bitkilerde bulunan ikincil metabolitler, flavonoidler, tanenler, kinonlar, fenolik asitler gibi bileşikler kanser hücrelerinin öldürülmesinde etkili olmaktadır. Aynı zamanda bunlar gibi birçok bitkinin meme kanserinde için de antikanser özellikte olduğu belirlenmiştir (Ben Kridis ve ark., 2021; Lopes ve ark., 2017). Ayrıca yapılan çalışmalarda bitki ekstraktlarının antikanser ajanlar ile kombine edilerek de meme kanseri hücrelerinde denenmiştir. Yapılan çalışmalarda bitkisel ajanlar, antikanser ajanları ile kullanıldıklarında antikanser ajanlarının tedavi edici etkilerini artırdığı ve antikanser ajanların toksik etkinliklerini de azalttığı belirlenmiştir (Falzon ve Balabanova, 2017). *E. Cardomomum* bitkisi de ekstrakte edilerek birçok kanserde antikanser özellikleri incelenmiştir. *E. Cardomomum* ekstraktında

bulunan DIM ve I3C gibi birincil ve ikincil metabolitler, hormon aktivitelerinin düzenleyerek kanserin engellenmesinde etkili olmaktadır (Kong ve ark., 2020). *E. Cardomomum* ekstraktının proleukin ilacı ile kombine edilerek mide kanseri hücreleri üzerindeki etkilerinin incelendiği bir çalışmada *E. Cardomomum* ekstraktının tek başına mide kanseri üzerinde sitotoksik etkisinin olduğu ilaçla kombine edildiğinde ise hem ilacın doğal immün sistem hücreleri üzerindeki sitotoksik etkisinin azaldığı hem de mide kanseri hücrelerinde daha yüksek sitotoksik etkinlik oluşturduğu belirlenmiştir (Hamurci ve ark., 2022).

Yapılan çalışmada *E. Cardomomum* ekstraktının sitotoksik etkinliği iki hücre hattı üzerinde incelenmiştir. *E. Cardomomum* ekstraktının L929 fare fibroblast hücreleri üzerinde sitotoksik etkinliğinin olmadığı belirlenmiştir. Sağlıklı hücre hatlarına 5, 10, 20 40 µg/ml konsantrasyonda *E. Cardomomum* ekstraktı uygulandığında hücre hatlarında canlılık artmaktadır. 100 µg/ml konsantrasyonda ise hücreye sitotoksik etkisi tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda *E. Cardomomum* ekstraktının tek başına 40 µg/ml konsantrasyonda AU-565 meme kanseri hücre hattı üzerinde öldürme etkisi göstermektedir. Fakat bu oran düşüktür. Bu çalışmada, *E. Cardomomum* ekstraktının klinikte meme kanseri tedavisi için kullanılan tamoksifen ile kombinasyonu da araştırılmıştır. *E. Cardomomum* ekstraktı ve tamoksifen ilacı kombinasyonları birlikte kullanıldığında ise yüksek oranda öldürme etkisinin olduğu belirlenmiştir. Ekstrakt ve ilaç kombinasyonlarının AU-565 meme kanseri hücre hattı üzerinde en yüksek sitotoksik etkiyi 40 µg/ml *E. Cardomomum* bitkisi ekstraktları ve 40 µg/ml tamoksifen ilacının kullanıldığı kombinasyonda gösterdiği tespit edilmiştir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Yapılan çalışmada *E. Cardomomum* ekstraktının içerdiği metabolitler sayesinde meme kanseri hücreleri üzerinde öldürme etkinliği vardır. Bunun yanında *E. Cardomomum* ekstraktı sağlıklı hücre hatlarında toksik etki göstermemiştir. Bu bilgiler ışığında toksik etki göstermeyen ve antikanser özellikte olan *E. Cardomomum* ekstraktının tek başına kullanıldığında meme kanseri tedavisinde yüksek oranda etkili sonuçları olmasa da ilaç kombinasyonu ile kullanıldığında etkili sonuçları olduğu belirlenmiştir. Bundan dolayı meme kanseri tedavisinde ekstrakt-ilac kombinasyonu yaklaşımlarının etkili sonuçlar vereceği ve in vivo çalışmalara geçilerek meme kanseri tedavisinde yeni ilaç formülasyonları olarak denenebileceği 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

- Alkabban, F. M., and Ferguson, T. (2024). Breast Cancer. In StatPearls. Treasure Island (FL) ineligible companies. Disclosure: Troy Ferguson declares no relevant financial relationships with ineligible companies.: StatPearls Publishing Copyright © 2024, StatPearls Publishing LLC.
- Ben Kridis, W., Mnif, A., Khmiri, S., Toumi, N., and Khanfir, A. (2021). Self-medication with herbal medicine and breast cancer survival: a prospective monocentric study. *J Cancer Res Clin Oncol*, 147(11), 3401-3407. doi:10.1007/s00432-021-03600-y
- Cragg, G. M., and Pezzuto, J. M. (2016). Natural Products as a Vital Source for the Discovery of Cancer Chemotherapeutic and Chemopreventive Agents. *Medical principles and practice : international journal of the Kuwait University, Health Science Centre*, 25 Suppl 2(Suppl 2), 41-59. doi:10.1159/000443404
- Falzon, C. C., and Balabanova, A. (2017). Phytotherapy: An Introduction to Herbal Medicine. *Prim Care*, 44(2), 217-227. doi:10.1016/j.pop.2017.02.001
- Hamurci, Y., Ihlamur, M., and Zengin, Y. (2022). Elettaria Cardamomum Ekstraktının Proleukin İlacı Kombinasyonu ile Mide Kanseri Hücre Hattı Üzerindeki İmmünostimulan/Sitotoksik Etkilerinin İncelenmesi. [Investigation of Immunostimulant/Cytotoxic Effects of Elettaria Cardamomum Extract with Combination of Proleukin Drug on Gastric Cancer Cell Line]. *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(2), 283-294. doi:10.55007/dufed.1133501
- Ihlamur, M., Akgül, B., and Abamor, E. Ş. (2022). Farklı Hücre Hatlarında Besiyeri ve FBS'in Hücre Proliferasyonu Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. [Investigation of the Effects of Medium and FBS on Cell Proliferation in Different Cell Lines]. *Süleyman Demirel University Faculty of Arts and Science Journal of Science*, 17(1), 55-64. doi:10.29233/sdufeffd.927126
- Ihlamur, M., Başarı, H., Zengin, Y., and Abamor, E. Ş. (2022a). Evaluation Of Immunostimulant/Cytotoxic Activity Of Human Breast Cancer Prepared By Different Antigen Preparation Methods With Adjuvants Combination. [Farklı Antijen Hazırlama Metotları İle Hazırlanan İnsan Meme Kanseri Hücre Lizatlarının Adjuvan Kombinasyonları İle İmmünostimulan/Sitotoksik Aktivitelerinin İncelenmesi]. *Süleyman Demirel University Faculty of Arts and Science Journal of Science*, 17(1), 96-110. doi:10.29233/sdufeffd.940806
- Ihlamur, M., Kelleci, K., Gölebatmaz, E., and Abamor, E. Ş. (2024). Foeniculum Vulgare Ekstraktının Altuzan İlacı Kombinasyonu ile A549 Akciğer Kanseri Hücrelerine Karşı Antikanser Etkileri. [Anticancer Effects of Foeniculum Vulgare Extract with Altuzan Drug Combination Against A549 Lung Cancer Cells]. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(1), 189-195. doi:10.21605/cukurovaumfd.1460427
- Kelleci, K., Ihlamur, M., Özkan, M., and Abamor, E.Ş. (2024). Momordica Charantina Ekstraktının Amfotericin B ve Miltefosin İlaç Kombinasyonları ile Leishmania Parazitleri Üzerindeki Sitotoksik Etkilerinin İncelenmesi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(1), 1-7.
- Kelleci, K., Gölebatmaz, E., Ihlamur, M., and Abamor, E. Ş. (2024a). Foeniculum Vulgare Ekstraktının Altuzan İlacı Kombinasyonu ile A549 Akciğer Kanseri Hücrelerine Karşı Antikanser Etkileri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 39(1), 189-195.
- Kong, W., Li, C., Qi, Q., Shen, J., and Chang, K. (2020). Cardamonin induces G2/M arrest and apoptosis via activation of the JNK-FOXO3a pathway in breast cancer cells. *Cell Biol Int*, 44(1), 177-188. doi:10.1002/cbin.11217

- Krieghoff-Henning, E., Folkerts, J., Penzkofer, A., and Weg-Remers, S. (2017). Cancer – an overview. *Med Monatsschr Pharm*, 40(2), 48-54.
- Laurent, V., Saillard, J., Thierry, M., Lepelletier, A., Fronteau, C., and Huon, J. F. (2021). Anticancer agents and phytotherapy: Interactions that are often unrecognized. *J Oncol Pharm Pract*, 27(2), 322-328. doi:10.1177/1078155220920363
- Lopes, C. M., Dourado, A., and Oliveira, R. (2017). Phytotherapy and Nutritional Supplements on Breast Cancer. *Biomed Res Int*, 2017, 7207983. doi:10.1155/2017/7207983
- Łukasiewicz, S., Czezelewski, M., Forma, A., Baj, J., Sitarz, R., and Stanisławek, A. (2021). Breast Cancer- Epidemiology, Risk Factors, Classification, Prognostic Markers, and Current Treatment Strategies-An Updated Review. *Cancers (Basel)*, 13(17). doi:10.3390/cancers13174287
- Shrihastini, V., Muthuramalingam, P., Adarshan, S., Sujitha, M., Chen, J. T., Shin, H., and Ramesh, M. (2021). Plant Derived Bioactive Compounds, Their Anti-Cancer Effects and In Silico Approaches as an Alternative Target Treatment Strategy for Breast Cancer: An Updated Overview. *Cancers (Basel)*, 13(24). doi:10.3390/cancers13246222
- Zengin, Y., Ihlamur, M., and Başarı, H. (2022). Immunostimulant/Cytotoxic Effect of Cardamom Extract with Adjuvant Combination on Breast Cancer Cell Line. [Kakule Ekstraktının Adjuvan Kombinasyonu ile Meme Kanseri Hücre Hattı Üzerinde İmmünostimulan/Sitotoksik Etkisinin İncelenmesi]. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 229-234. doi:10.55117/bufbd.1144102

Yüksek Enerjili Büyük Hadron Çarpıştırıcısı Bazlı Müon-Proton Çarpıştırıcılarında Uyarılmış Müon Üretimi

Mehmet ŞAHİN^{1*}, Abdullatif ÇALIŞKAN²

Öz

Bu çalışmada uyarılmış müonların Yüksek Enerjili Büyük Hadron Çarpıştırıcısı (YE-BHÇ) bazlı müon proton çarpıştırıcılarında temas etkileşim yöntemiyle üretilip ayar etkileşimleri ile foton kanalına bozunmasıyla oluşan uyarılmış müon sinyal süreci ($\mu p \rightarrow \mu^* j \rightarrow \mu \gamma j$) incelenmiştir. Uyarılmış müonun sinyalini ardalardan ayırmak için keşif sınırlamaları uygulanarak sinyal-ardalan analizi yapılmıştır. Farklı kompozitlik skalası değerleri için yapılan hesaplamalar sonucunda uyarılmış müon kütlelerine ait keşif (5σ), gözlem (3σ) ve dışarlama (2σ) limitleri belirlenmiştir. Kütle merkezi enerjileri 9 ve 12,7 TeV olan bu çarpıştırıcıların uyarılmış müon araştırmalarında iyi bir potansiyele sahip olacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Uyarılmış müon, Kompozit modeller, YE-BHÇ, Müon-Proton çarpıştırıcıları.

Excited Muon Production at High Energy Large Hadron Collider-Based Muon-Proton Colliders

Abstract

In this study, the excited muon signal process ($\mu p \rightarrow \mu^* j \rightarrow \mu \gamma j$), which occurs when excited muons are produced by the contact interaction method in muon-proton colliders based on the High Energy Large Hadron Collider (HE-LHC) and decay into the photon channel by gauge interactions, was examined. In order to separate the signal of the excited muon from the background, signal-background analysis was performed by applying discovery cuts. As a result of the calculations for different values of the compositeness scale, discovery (5σ), observation (3σ) and exclusion (2σ) limits of the excited muon mass were determined. It is concluded that these colliders with center-of-mass energies of 9 and 12,7 TeV will have a good potential in excited muon researches.

Keywords: Excited muon, Composite models, HE-LHC, Muon-Proton colliders.

¹Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Uşak, Türkiye, mehmet.sahin@usak.edu.tr

²Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye, acaliskan@gumushane.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Parçacık fiziğinde, temel parçacıklar ve bu parçacıklar arasındaki etkileşimler Standart Model (SM) olarak adlandırılan bir teori tarafından başarılı bir şekilde açıklanmaktadır. 2012 yılında Avrupa Nükleer Araştırma Merkezindeki (CERN) ATLAS (Aad ve ark., 2012) ve CMS (Chatrchyan ve ark., 2012) deneylerinde SM'nin eksik bir parçası olan Higgs bozonunun keşfedilmesi SM'ye olan güvenilirliği daha da artırmıştır. Tüm bu başarılarına rağmen SM'nin açıklayamadığı parametre enflasyonu, CP ihlali, kuark-lepton simetrisi, nötrino salınımları ve karanlık madde gibi birçok konu bulunmaktadır. Bu problemlere bir çözüm getirebilmek amacıyla SM'nin ötesinde Büyük Birleşim Teorisi (BBT), Teknikolor, Süpersimetri ve Kompozitlik gibi pek çok teori geliştirilmiştir. Bu teoriler günümüzdeki parçacık fiziği deneylerinde sürekli test edilmektedir.

Bu teorilerden en dikkat çeken kompozitlik. Çünkü kompozitlik, preon olarak adlandırılan daha temel parçacıkların varlığını ileri sürerek temel parçacık enflasyonu problemine açıklama getirmektedir. Günümüze kadar çeşitli kompozit modeller ve bu modeller çerçevesinde yeni parçacıklar önerilmiştir. Uyarılmış fermiyonlar kompozit modeller tarafından önerilen yeni tip parçacıklardır ve bunların olası bir keşfi, kompozitliğin varlığına dair doğrudan bir kanıt oluşturacaktır. Uyarılmış fermiyonlarla ilgili ilk çalışma 1965 yılında F. E. Low tarafından "Heavy electrons and muons" isimli makale ile yapılmıştır (Low, 1965). Sonrasında ise Abdus Salam ve J. C. Pati tarafından yayınlanan iki makale ile kompozit modellerin temeli inşa edilmiştir (Pati ve Salam, 1974; Pati ve ark., 1975).

Uyarılmış fermiyonlarla ilgili birçok teorik, fenomenolojik (Renard, 1983; Kuhn ve Zerwas, 1984; Pancheri ve Srivastava, 1984; Rujula ve ark., 1984; Kuhn ve ark., 1985; Baur ve ark., 1987; Spira ve Zerwas, 1989; Jikia, 1990; Boudjema ve ark., 1993; Cakir ve Mehdiyev, 1999; Cakir ve ark., 2000; Cakir ve ark., 2001; Eboli ve ark., 2002; Cakir ve ark., 2004; Cakir ve ark., 2004; Cakir ve Ozansoy, 2008; Cakir ve Ozansoy, 2009; Ozansoy ve Billur, 2012; Köksal, 2014; Biondini ve Panella, 2015; Ozansoy ve ark., 2016; Panella ve ark., 2017; Caliskan, 2017; Caliskan ve ark., 2017; Günaydin ve ark., 2018; Caliskan ve Kara, 2018; Caliskan, 2018; Caliskan, 2019; Sahin ve ark., 2019; Akay ve ark., 2019; Caliskan, 2020; Sahin ve Caliskan, 2023) ve deneysel çalışmalar (Adloff ve ark., 2000; Acciarri ve ark., 2001; Chekanov ve ark., 2002; Khachatryan ve ark., 2014; Sirunyan ve ark., 2019; Sirunyan ve ark., 2020) yapılmıştır ve yapılmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda uyarılmış lepton ve kuarklarla ilgili şu ana kadar herhangi bir sinyal gözlenmemiştir. Fakat bu çalışmaların sonucunda uyarılmış lepton ve kuarkların kütlelerine deneysel sınırlamalar getirilmiştir. Bu çalışmanın konusunu oluşturan uyarılmış müonlara ait en güncel kütle limitleri CERN'deki CMS deneyi sayesinde elde edilmiştir. Uyarılmış müon kütlelerinin kompozitlik skalasına eşit olduğu durum için, uyarılmış müonların kütlesi fotonik ayar bozunumu için 3,8 TeV (Sirunyan ve ark., 2019) ve

temas etkileşimli bozunum için 5,7 TeV'e (Sirunyan ve ark., 2020) kadar dışarılanmıştır. Bu çalışmada uyarılmış müonun foton+müon son durumlu bozunum kanalı incelendiği için, hesaplamalarda 3,8 TeV'lik kütle limiti dikkate alınmıştır.

Uyarılmış müonlarla ilgili daha geniş ve daha hassas araştırmaların yapılabilmesi için daha yüksek enerjili çarpıştırıcılara ihtiyaç vardır. Bunlardan biri de 2030'lu yıllarda CERN'de faaliyete geçmesi planlanan YE-BHÇ'dir (Abada ve ark., 2019). CERN'deki mevcut Büyük Hadron Çarpıştırıcısının (BHÇ) daha yüksek enerjili versiyonu olacak olan YE-BHÇ projesinde kütle merkezi enerjisi 27 TeV ve yıllık toplam ışınlık değeri 750 fb^{-1} olan bir proton çarpıştırıcısı önerilmektedir. Dairesel hadron çarpıştırıcılarına teğetsel olarak bir müon hızlandırıcısı kurulursa, proton-proton çarpışmalarına ek olarak müon-proton çarpışma opsiyonu da elde edilmiş olur. YE-BHÇ projesi baz alınarak yapılan bu tarz bir çalışmada müon-proton çarpıştırıcıları önerilmiş ve temel parametreler belirlenmiştir (Ketenoglu ve ark., 2023). YE-BHÇ bazlı üç farklı çarpıştırıcı opsiyonunun önerildiği bu çalışmada hesaplanan temel parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. YE-BHÇ bazlı müon-proton çarpıştırıcılarına ait temel çarpıştırıcı parametreleri.

$E_\mu [\text{TeV}]$	$E_p [\text{TeV}]$	$\sqrt{s} [\text{TeV}]$	Anlık Işınlık [$10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	Yıllık Işınlık [$\text{fb}^{-1} \text{ y}^{-1}$]
0,75	13,5	6,36	1,6	16
1,5	13,5	9	2,8	28
3	13,5	12,7	1,9	19

Müon+foton son durumuna bozunan $\frac{1}{2}$ spinli uyarılmış müonun kütesine 3,8 TeV'lik limit getirildiği için hesaplamalarda Tablo 1'deki 9 ve 12,7 TeV kütle merkezi enerjili çarpıştırıcılar tercih edilmiştir.

Makalenin 2. Bölümünde uyarılmış müonlara ait etkileşim Lagranjiyeni, bozunum genişlikleri, tesir kesitleri sunulmuş ve sinyal-ardalan analizi yapılmıştır. 3. Bölümde analiz sonucunda elde edilen bulgular verilmiş ve son bölümde ise bu bulgular yorumlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Uyarılmış Leptonlar ve Etkileşim Lagranjiyeni

Kompozit modellerde SM leptonları taban durumu olarak değerlendirilir ve bunların uyarılmış durumları uyarılmış leptonlar olarak adlandırılır. Uyarılmış leptonlar spin-1/2 ve spin-3/2 spin durumlarında bulunabilir ve kütlelerinin SM leptonlarına göre daha ağır olması beklenmektedir.

Uyarılmış leptonların çarpıştırıcılarda üretimi ve bozunumu iki farklı etkileşim mekanizmasıyla gerçekleşebilir. Parçacıklar arasındaki etkileşim ayar parçacıklarının değiş tokuşu ile gerçekleşiyorsa, bu etkileşim ayar etkileşimi olarak tanımlanır. Spin değeri $\frac{1}{2}$ olan uyarılmış leptonların, ayar

bozonları ve SM leptonları ile etkileşimini tanımlayan Lagranjiyen ifadesi Denklem 1’de verilmiştir (Hagiwara ve ark., 1985; Baur ve ark., 1990).

$$L_A = \frac{1}{2\Lambda} \overline{L_R^*} \sigma^{\mu\nu} \left[f g \frac{\vec{\tau}}{2} \cdot \overrightarrow{W_{\mu\nu}} + f' g' \frac{Y}{2} B_{\mu\nu} \right] L_L + h. c. \quad (1)$$

Bu denklemde L_L ve L_R^* sırasıyla sol-elli SM leptonunu ve sağ elli uyarılmış leptonu göstermektedir. $\overrightarrow{W_{\mu\nu}}$ ve $B_{\mu\nu}$ alan şiddeti tensörlerini, Λ kompozitlik ölçeğini, f ve f' boyutsuz serbest parametreleri, Y hiperyükü, g ve g' bağlaşım sabitlerini, $\vec{\tau}$ ise Pauli matrislerini temsil etmektedir. σ ifadesi $\sigma^{\mu\nu} = i(\gamma^\mu \gamma^\nu - \gamma^\nu \gamma^\mu)/2$ ile tanımlı olup burada γ^μ Dirac matrisini göstermektedir.

Uyarılmış leptonların bir diğer etkileşim mekanizması dörtlü-fermiyon temas etkileşimleridir. Kısa mesafelerde daha etkili olan bu etkileşimi tanımlayan etkin Lagranjiyen Denklem 2’de verilmiştir (Hagiwara ve ark., 1985; Baur ve ark., 1990).

$$L_K = \frac{g_*^2}{\Lambda^2} \frac{1}{2} j^\mu j_\mu \quad (2)$$

$$j_\mu = \eta_L \overline{f_L} \gamma_\mu f_L + \eta'_L \overline{f_L^*} \gamma_\mu f_L^* + \eta''_L \overline{f_L^*} \gamma_\mu f_L + h. c. + (L \rightarrow R) \quad (3)$$

Denklem 2 ve 3’deki formüllerde, g_* etkileşim sabitini ($g_*^2 = 4\pi$), Λ kompozitlik skalasını ve j_μ sol-elli akımları göstermektedir. η , sol-elli akımlara ait katsayıları temsil etmekte ve değerleri bu çalışmada 1 olarak alınmıştır. f ve f^* ise sırasıyla SM ve uyarılmış fermiyon alanlarını göstermektedir.

Her iki etkileşime ait Lagranjiyen ifadelerinde, Λ kompozitlik skalasının ters orantılı olduğu görülmektedir. Dolayısıyla her iki etkileşim için Λ arttıkça tesir kesiti değerleri azalacaktır. Fakat ayar etkileşimlerde Lagranjiyen Λ ile ters orantılı iken, temas etkileşimlerde Λ^2 ile ters orantılıdır. Dolayısıyla yüksek Λ değerlerinde ayar etkileşimler, düşük Λ değerlerinde ise temas etkileşimler daha baskındır.

2.2. Bozunum Genişliği ve Tesir Kesitleri

Uyarılmış müonlar temas ve ayar etkileşim mekanizmalarıyla bozunur. Ayar etkileşimleri için üç tane bozunum modu mevcuttur. Uyarılmış müonlar γ , Z ve W kanallarına $\mu^* \rightarrow \mu\gamma$, $\mu^* \rightarrow \mu Z$ ve $\mu^* \rightarrow \nu W$ şeklinde bozunabilir. Bu kanalların bozunum genişliğini veren analitik formül Denklem 4’de verilmiştir.

$$\Gamma(l^* \rightarrow lV) = \frac{\alpha m^{*3}}{4\Lambda^2} f_V^2 \left(1 - \frac{m_V^2}{m^{*2}}\right)^2 \left(1 + \frac{m_V^2}{2m^{*2}}\right), \quad (4)$$

Bu denklemde V ayar bozonlarını, m^* uyarılmış müonun kütlesini, m_V ayar bozonunun kütlesini ve f_V etkileşim sabitini temsil etmektedir. f_V etkileşim sabitinin her bir bozunum kanalı için sahip olacağı formül Denklem 5, 6 ve 7’de ayrıca verilmiştir.

$$f_Y = fT_3 + f' \frac{Y}{2}, \quad (5)$$

$$f_Z = fT_3 \cos^2 \theta_W - f' \frac{Y}{2} \sin^2 \theta_W, \quad (6)$$

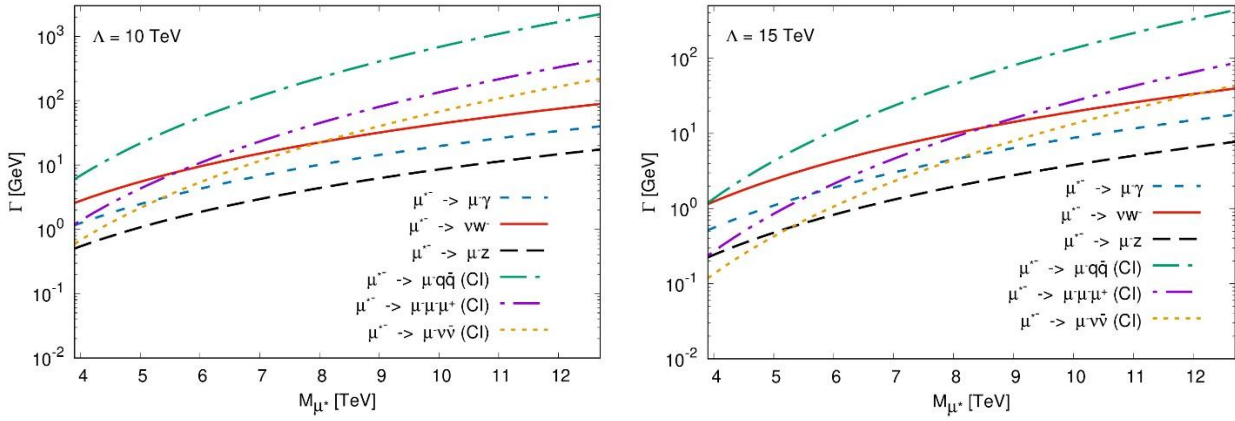
$$f_W = \frac{f}{\sqrt{2}}, \quad (7)$$

Bu denklemlerde T_3 zayıf izospinin üçüncü bileşenini, θ_W zayıf karışım açısını ve Y hiperyükü temsil etmektedir. Uyarılmış leptonlar için $T_3 = -1/2$ ve $Y = -1$ değerlerine sahiptir.

Temas etkileşimler için de üç tane bozunum kanalı bulunmaktadır. Bunlar $\mu^* \rightarrow \mu q \bar{q}$, $\mu^* \rightarrow \mu^- \mu^- \mu^+$, $\mu^* \rightarrow \mu \nu \bar{\nu}$ kanallarıdır. Burada q kuarkları göstermektedir. Bu süreçlerin bozunum genişliklerini veren analitik formül Denklem 8’de gösterilmiştir.

$$\Gamma(l^* \rightarrow lF\bar{F}) = \frac{m_l^*}{96\pi} \left(\frac{m_l^*}{\Lambda}\right)^4 N'_c S', \quad (8)$$

Bu denklemde F ve l sırasıyla SM fermiyonlarını ve leptonlarını göstermektedir. N'_c renk faktörü olup leptonlar için 1, kuarklar için 3 değerine sahiptir. S' ise kombinatorial faktör olup $F \neq l$ için 1, $F = l$ için kuark durumunda 4/3, lepton durumunda 2 değerlerine sahiptir.

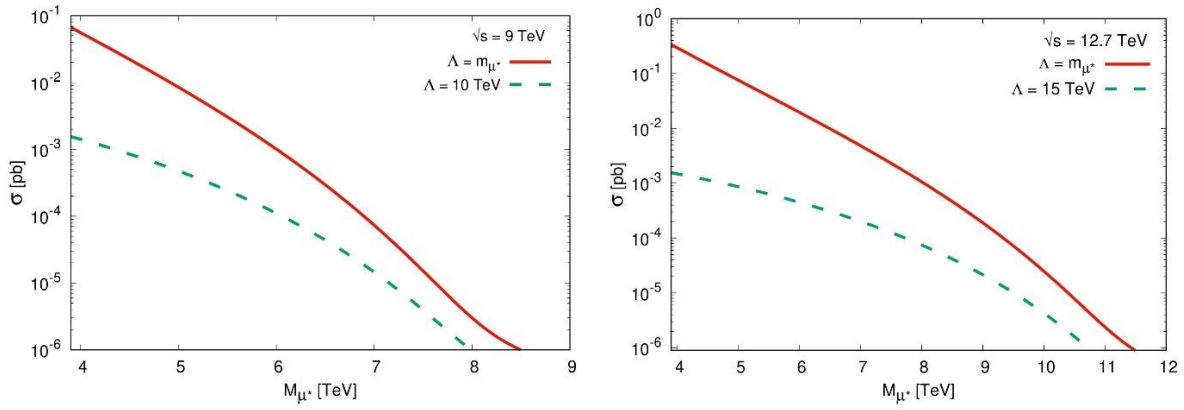


Şekil 1. $\Lambda = 10$ TeV ve 15 TeV için, uyarılmış müonun ayar ve temas etkileşim kanallarına ait bozunum genişliğinin kütleyle göre değişim grafikleri

Nümerik hesaplamalar için her iki etkileşime ait Lagranjiyenler LanHEP (Semenov, 2016) programı yardımıyla CalcHEP (Belyaev ve ark., 2013) simülasyon programına girildi ve uyarılmış leptonlar için model dosyası hazırlandı. Her iki etkileşim için toplam altı bozunum kanalına ait bozunum genişlikleri hesaplandı ve aynı grafikte üst üste çizdirildi. Şekil 1’de $\Lambda = 10$ ve 15 TeV değerlerine ait kısmi bozunum genişliği grafikleri görülmektedir.

Her iki grafikte de temas etkileşimlere ait kanalların daha baskın olduğu açıkça görülmektedir. Diğer taraftan iki grafik karşılaştırıldığında Λ değeri arttıkça ayar bozunumlarına ait kanalların baskın olmaya başladığı görülmektedir. Bu bilgilerin ışığında $\mu q \bar{q}$ bozunum kanalı en baskın süreç olacaktır. Fakat, sinyal ve ardaalan süreçlerimizin son durumda üç tane jet’e sahip olması ve detektörde jetlerin büyük belirsizliklere sahip olması, bu sürecin detektörde ardalardan ayırt edilmesini oldukça zorlaştıracaktır. $\mu^- \nu \bar{\nu}$ ve νw^- son durumuna sahip bozunum süreçleri de baskındır. Fakat, son durumdaki nötrinoların detektör tarafından detekte edilememesi, bu süreçlerin çalışılmasını oldukça güç hale getirmektedir. Diğer baskın süreçler ise $\mu^- \mu^- \mu^+$ ve $\mu^- \gamma$ bozunum kanallarıdır. Her iki kanalda da son durumdaki parçacıklar μ^- , γ ve μ^+ olacağı için bu süreçler detektörde diğer kanallara göre daha düşük belirsizliklere sahip olacaktır. Bu iki süreçten $\mu^- \gamma$ son durumlu kanal diğerine göre daha yüksek kompozitlik skalası değerlerine izin verdiği için (Sirunyan ve ark., 2019), bu çalışmada, sinyal süreci olarak $\mu p \rightarrow \mu^* j \rightarrow \mu \eta j$ seçilmiştir.

Sonraki aşamada her iki μp çarpıştırıcısına ait tesir kesiti hesaplamaları yapıldı. Kütle merkezi enerjisi 9 TeV olan çarpıştırıcı için $\Lambda = m_{\mu^*}$ ve 10 TeV, kütle merkezi enerjisi 12,7 TeV olan çarpıştırıcı için ise $\Lambda = m_{\mu^*}$ ve 15 TeV’lik kompozitlik skalası değerleri kullanılarak tesir kesiti hesaplaması yapıldı ve grafikler çizdirildi. Şekil 2, her iki çarpıştırıcı için hesaplanan tesir kesiti grafiklerini göstermektedir. Bu grafiklere göre için Λ değeri arttıkça beklenildiği gibi tesir kesiti değerleri azalmaktadır. Diğer taraftan Tablo 1’deki ışınlık değerleri de dikkate alındığında bu iki çarpıştırıcının spin-1/2 uyarılmış müon için yeterli sayıda olay üretebileceği görülmektedir.



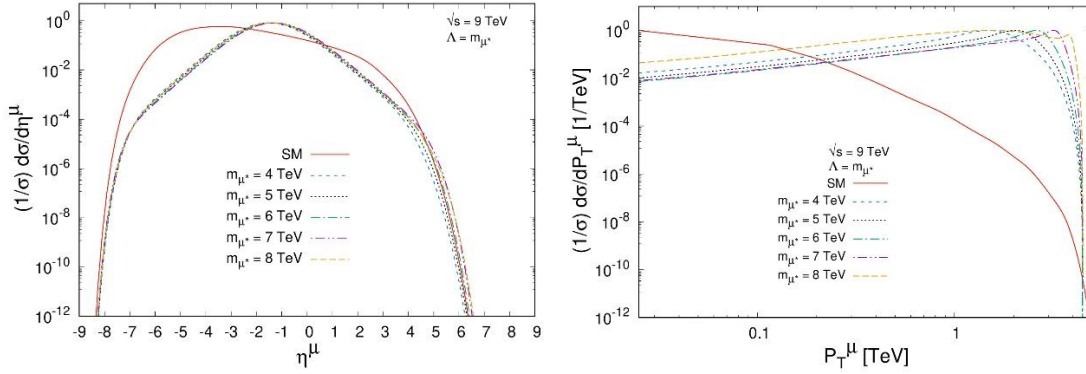
Şekil 2. Kütle merkezi enerjisi 9 TeV ve 12,7 TeV olan μp çarpıştırıcılarında farklı kompozitlik skalası (Λ) değerleri için tesir kesitinin kütleyle değişim grafikleri

2.3. Sinyal ve Ardalan Analizi

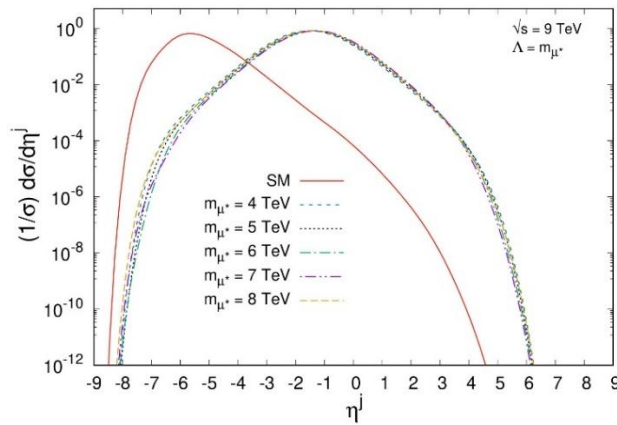
YE-BHÇ bazlı müon-proton çarpıştırıcılarında uyarılmış müonlar $\mu p \rightarrow \mu^* j$ süreci boyunca temas etkileşim metoduyla üretilip, ayar etkileşimleriyle bir müon ve fotona bozunacaktır. Bu yüzden sinyal sürecimiz $\mu p \rightarrow \mu^* j \rightarrow \mu \gamma j$ şeklindedir. Burada j, jetleri göstermekte olup $u, \bar{u}, d, \bar{d}, c, \bar{c}, s, \bar{s}, b, \bar{b}$ kuark ve anti-kuarklarını içermektedir. Sinyalimizin alt süreçleri $\mu j \rightarrow \mu^* j \rightarrow \mu \gamma j$ formundadır. Sinyale karşılık gelen ardalan sürecimiz, $\mu p \rightarrow \mu \gamma j$ sürecine uyan SM diyagramlarından oluşmaktadır.

Sinyal-ardalan süreçlerimizin detektörde daha hassas algılanabilmesi için son durumdaki parçacıklara bazı kinematik sınırlar uygulandı. Bu amaçla müon, foton ve jetlerin enine momentumlarına 25 GeV'lik bir sınırlama getirildi. Sonra sinyal ve ardalanın her ikisi için de son durum parçacıklarının bazı kinematik dağılımları hesaplandı ve sinyal ile ardalan dağılımları aynı grafik üzerinde çizdirildi. İlk olarak kütle merkezi enerjisi 9 TeV olan μp çarpıştırıcısına ait dağılımlar çizdirilerek son durum parçacıkları olan müon, foton, ve jetlere ait enine momentum (P_T) ve sözde-hızlılık (psedö-rapidity) (η) grafikleri elde edildi. Bu dağılımlarda uyarılmış müon sinyali için $m_{\mu^*} = 4, 5, 6, 7$ ve 8 TeV'lik kütle değerleri kullanıldı. Müon ve fotona ait grafikler benzer dağılım gösterdiği için burada gösterim olarak sadece müona ait P_T ve η dağılım grafiklerine yer verilmiş ve bu grafikler Şekil 3'de gösterilmiştir. Diğer taraftan, son durumdaki jetlerin P_T dağılımları müon ve fotonların P_T dağılımlarıyla benzer davranışa sahip olduğu için jetlerin P_T dağılım grafiklerine çalışmamızda yer verilmemiştir. Fakat, sinyal ve ardalanına ait jet son durumlarının η dağılım grafikleri sinyali ardalandan ayırt etmede daha etkili olacağı için çalışmamızda jetlerin η dağılımlarına yer verilmiş olup, bu grafik Şekil 4'de gösterilmiştir. Kütle merkezi enerjisi 12,7 TeV olan çarpıştırıcı için de benzer dağılımlar elde edildi ve müona ait sonuçlar Şekil 5'de gösterilmiştir. Bu çarpıştırıcıya ait sinyal ve ardalan süreçlerinin foton son durum parçacığına ait P_T ve η dağılımları

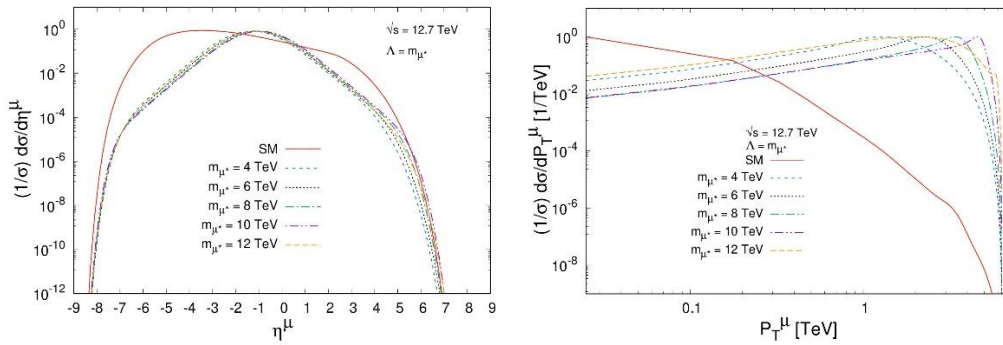
müonların dağılımıyla benzer davranış gösterdiği için çalışmamızda foton son durumu için P_T ve η dağılımlarına yer verilmemiştir. Benzer nedenlerden dolayı, jet son durumları için P_T dağılımlarına da yer verilmemiştir. Şekil 6, sinyal ve ardaan süreçlerinin jet son durumları için η dağılımını göstermektedir.



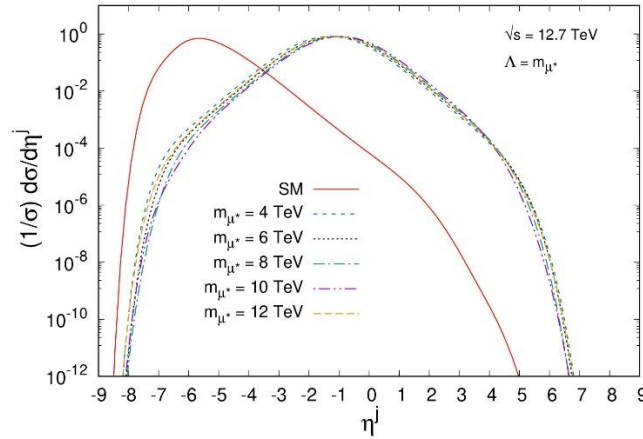
Şekil 3. Kütle merkezi enerjisi 9 TeV olan μp çarpıştırıcısında son durum parçacığı olan müona ait sözde-hızlılık ve enine momentum dağılımları.



Şekil 4. Kütle merkezi enerjisi 9 TeV olan μp çarpıştırıcısında son durum parçacığı olan jet'e ait sözde-hızlılık dağılımları.



Şekil 5. Kütle merkezi enerjisi 12,7 TeV olan μp çarpıştırıcısında son durum parçacığı olan müona ait sözde-hızlılık ve enine momentum dağılımları.



Şekil 6. Kütle merkezi enerjisi 12,7 TeV olan $\mu\mu$ çarpıştırıcısında son durum parçacığı olan jet'e ait sözde-hızlılık dağılımları

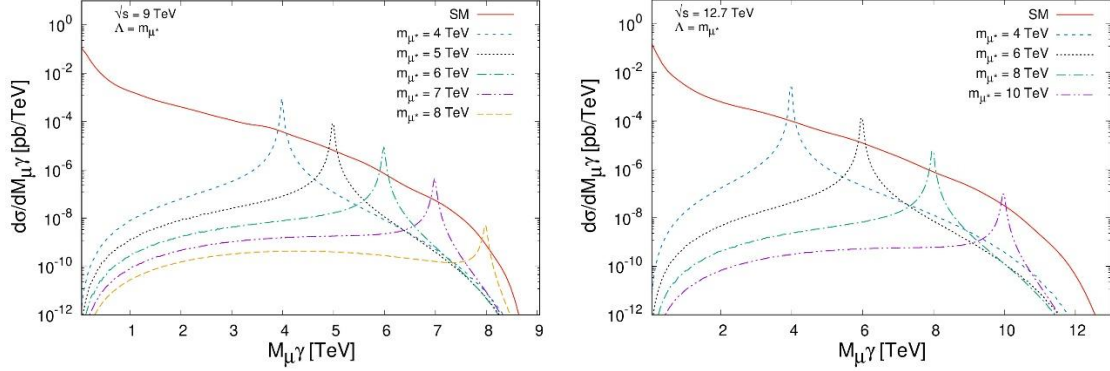
Şekil 3, 4, 5 ve 6'daki P_T ve η dağılım grafikleri incelendiğinde sinyal ve ardalana dağılımlarının birbirinden biraz ayrıldığı görülmektedir. Fakat ardalana ait tesir kesiti daha büyük olduğu için uyarılmış müon sinyali için bu ayrışma yeterli değildir. Bu yüzden daha büyük sınırlamalar getirerek sinyali ön plana çıkarmamız gerekmektedir. Şekil 3'deki η grafiğinde $-2,5 < \eta^\mu < 2,5$, P_T grafiğinde ise $P_T^\mu > 200$ GeV aralıkları seçilerek bir sınırlandırma getirilirse, bu seçim sinyalin tesir kesitini çok fazla etkilemeyecektir. Fakat diğer taraftan ardalana ait tesir kesitinin büyük oranda azaltılmasıyla sinyalin ön plana çıkarılması sağlanacaktır. Fotona ait dağılımlar benzer olduğu için aynı sınırlamalar foton için de seçilmiştir. Sinyal ve ardalana süreçlerindeki son durum jetlerine ait P_T dağılımları müon ve foton dağılımlarına benzer olduğu için aynı sınırlama seçildi. Jetlerin Şekil 4'deki η dağılımları için ise $-3,5 < \eta^j < 5$ sınırlamasını seçtik. Benzer yaklaşım, kütle merkezi enerjisi 12,7 TeV olan çarpıştırıcıya ait Şekil 5 ve 6'daki dağılımlar için de uygulanmıştır. Yani, sinyali çok fazla etkilemeyen ama ardalanı azaltan sınırlamalar belirlenmiştir. Her iki çarpıştırıcıya ait müon, foton ve jet için belirlenen tüm sınırlamalar Tablo 2'de listelenmiştir.

Tablo 2. YE-BHÇ bazlı $\mu\mu$ çarpıştırıcılarında son durum parçacıklarına ait belirlenen keşif sınırlamaları

$\sqrt{s}$ [TeV]	P_T^μ	P_T^γ	P_T^j	η^μ	η^γ	η^j
9	$P_T^\mu > 200$ GeV	$P_T^\gamma > 200$ GeV	$P_T^j > 200$ GeV	$-2,5 < \eta^\mu < 2,5$	$-2,5 < \eta^\gamma < 2,5$	$-3,5 < \eta^j < 5$
12,7	$P_T^\mu > 300$ GeV	$P_T^\gamma > 300$ GeV	$P_T^j > 300$ GeV	$-2,5 < \eta^\mu < 2,5$	$-2,5 < \eta^\gamma < 2,5$	$-3,5 < \eta^j < 5$

Sinyali ardalandan ayırmanın en güçlü yöntemlerinden biri de müon-foton değişmez kütle dağılımlarına sınırlama getirmektir. Şekil 7, her iki çarpıştırıcıya ait değişmez kütle dağılımlarını göstermektedir. Bu dağılımlar incelendiğinde uyarılmış müonlara ait değişmez kütle dağılımları ardalana dağılımlarını ancak pik değerlerinde geçmektedir. Sinyali ön plana çıkarıp ardalanı bastırmak için $M_{\mu^*} - 2\Gamma_{\mu^*} < M_{\mu\gamma} < M_{\mu^*} + 2\Gamma_{\mu^*}$ şeklinde bir değişmez kütle sınırlandırması her iki çarpıştırıcı için

de uygun olacaktır. Buradaki Γ_{μ^*} , uyarılmış müonun bozunum genişliğini temsil etmektedir. Değişmez kütle sınırlaması diğerlerine göre daha etkili bir yöntemdir. Bu yüzden analizimizde bu sınırlamayı da kullandık.

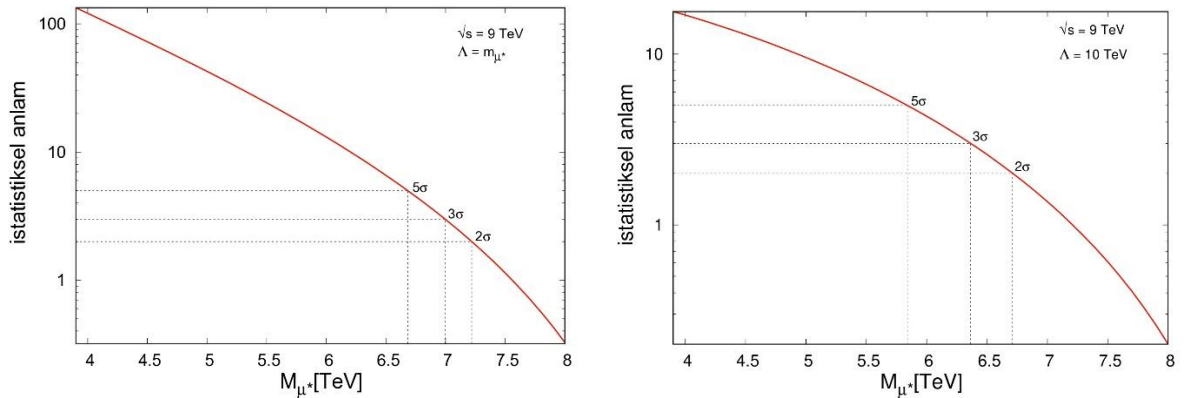


Şekil 7. Kütle merkezi enerjileri 9 ve 12,7 TeV olan μp çarpıştırıcılarında uyarılmış müonun bazı kütle değerleri için değişmez kütle dağılım grafikleri.

3. Bulgular ve Tartışma

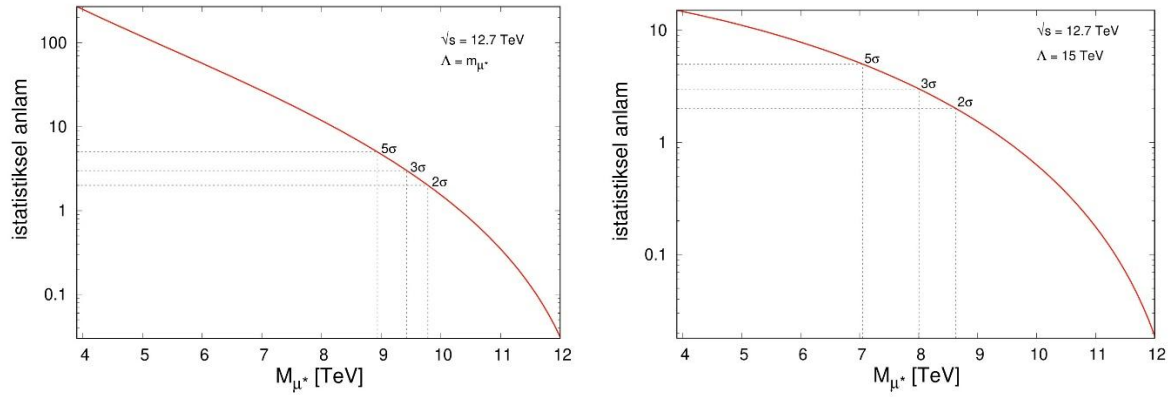
Tablo 1'deki toplam ışınlık değerleri ve sinyali ardalandan ayırmak için önceki alt bölümde belirlenen tüm sınırlamalar kullanılarak sinyale ait İstatistiksel Anlamlılık (İA) değerleri hesaplandı. Bu hesaplamada Denklem 9'da verilen formül kullanılmıştır (Cowan, 2011). Bu formüldeki S ve B ifadeleri sırasıyla sinyal ve ardalana ait olay sayılarını göstermektedir.

$$\text{İA} = \sqrt{2[(S + B) \ln \left(1 + \left(\frac{S}{B}\right)\right)] - S} \quad (9)$$



Şekil 8. Kütle merkezi enerjisi 9 TeV olan μp çarpıştırıcısında $\Lambda = m_{\mu^*}$ ve 10 TeV için istatistiksel anlamlılığın uyarılmış müonun kütlesine göre değişim grafiği

Hesaplamalardan elde edilen değerler kullanılarak her bir çarpıştırıcı için Λ 'nın uyarılmış müona ait değişim grafikleri elde edildi. Bu grafikler, kütle merkezi enerjisi 9 TeV olan çarpıştırıcı için $\Lambda = m_{\mu^*}$ ve 10 TeV, kütle merkezi enerjisi 12,7 TeV olan çarpıştırıcı için ise $\Lambda = m_{\mu^*}$ ve 15 TeV'lik kompozitlik skalası değerleri için çizdirildi. Şekil 8 ve 9, sırasıyla 9 ve 12,7 TeV'lik çarpıştırıcılara ait grafikleri göstermektedir.



Şekil 9. Kütle merkezi enerjisi 12,7 TeV olan μp çarpıştırıcısında $\Lambda = m_{\mu^*}$ ve 15 TeV için istatistiksel anlamlılığın uyarılmış müonun kütlesine göre değişim grafiği

Bu grafiklere göre kütle merkezi enerjisi 12,7 TeV olan μp çarpıştırıcısı $\Lambda = m_{\mu^*}$ durumunda, uyarılmış müonları 8938 GeV'e kadar keşif (5σ), 9427 GeV'e kadar gözlem (3σ) ve 9783 GeV'e kadar ise dışarlama (2σ) potansiyeline sahip olacaktır. Her iki çarpıştırıcıya ait hesaplanan detaylı kütle limitleri Tablo 3'de rapor edilmiştir.

Tablo 3. YE-BHÇ bazlı μp çarpıştırıcılarında uyarılmış müon için istatistiksel anlamlılık çizelgesi

$\sqrt{s}$ [TeV]	Λ	Keşif - 5σ (GeV)	Gözlem - 3σ (GeV)	Dışarlama - 2σ (GeV)
9	m_{μ^*}	6683	6995	7219
9	10 TeV	5840	6362	6711
12,7	m_{μ^*}	8938	9427	9783
12,7	15 TeV	7050	8005	8631

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada YE-BHÇ bazlı müon-proton çarpıştırıcılarında uyarılmış müonların temas etkileşim yöntemiyle üretilip foton ışıması yoluyla ayar etkileşim kanallı bozunumu incelenmiştir. Hesaplamalar, kütle merkezi enerjisi 9 ve 12,7 TeV olan iki farklı müon-proton çarpıştırıcısı için yapılmıştır. Sinyal-ardalan analizinde, uyarılmış müon sinyalini ardalandan ayırıp ön plana çıkarmak için ön-sınırlamalara ilave olarak büyük keşif sınırlamaları uygulanmıştır. Tüm hesaplamalarda her

bir çarpıştırıcı için iki farklı kompozitlik skalası değeri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kütle merkezi enerjisi 9 TeV ve toplam ışınlık değeri 28 fb^{-1} olan μp çarpıştırıcısı, uyarılmış müonları $\Lambda = m_{\mu^*}$ için 6683 GeV, $\Lambda = 10 \text{ TeV}$ için ise 5840 GeV'e kadar keşfedebilecektir. Kütle merkezi enerjisi 12,7 TeV ve toplam ışınlık değeri 19 fb^{-1} olan çarpıştırıcı ise $\Lambda = m_{\mu^*}$ için 8938 GeV, $\Lambda = 15 \text{ TeV}$ için 7050 GeV'e kadar uyarılmış müonları keşfetme potansiyeline sahip olacaktır.

Sonuç olarak, tüm bu hesaplamalar, YE-BHÇ bazlı müon-proton çarpıştırıcılarının uyarılmış müon için iyi bir araştırma potansiyeline sahip olacağını göstermektedir.

Teşekkür

Uşak Üniversitesi, Enerji, Çevre ve Sürdürülebilirlik Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne bu çalışmaya verdiği destekten dolayı 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

- Aad, G., Abajyan, T., Abdallah, J., Khalek, S. A., Abdelalim, A. A., vd. (2012). Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Physics Letters B*, 716 (1), 1-29.
- Abada, A., Abbreccia, M., Abdussalam, S. S., Abdyukhanov, I., Fernandez, J. A., vd. (2019). HE-LHC: The High-Energy Large Hadron Collider. *The European Physical Journal Special Topics*, 228, 1109-1382.
- Acciarri, M., Achard, P., Adriani, O., Benitez, M. A., Alcaraz, J., vd. (2001). Search for excited leptons in e^+e^- interactions at $s=192\text{-}202 \text{ GeV}$. *Physics Letters B*, 502 (1-4), 37-50.
- Adloff, C., Andreev, V., Andrieu, B., Arkadov, V., Astvatsatourov, A., vd. (2000). A search for excited fermions at HERA. *The European Physical Journal C*, 17, 567-581.
- Akay, A. N., Günaydin, Y. O., Sahin, M., ve Sultansoy, S. (2019). Search for excited u and d quarks in dijet final states at future pp colliders. *Advances in High Energy Physics*, 2019, 9090785.
- Baur, U., Hinchliffe, I., Zeppenfeld, D. (1987). Excited quark production at hadron colliders. *International Journal of Modern Physics A*, 2 (4), 1285-1297.

- Baur, U., Spira, M., Zerwas, P. M. (1990). Excited-quark and -lepton production at hadron colliders. *Physical Review D*, 42 (3), 815-824.
- Belyaev, A., Christensen, N. D., Pukhov, A. (2013). CalcHEP 3.4 for collider physics within and beyond the Standard Model. *Computer Physics Communications*, 184, 1729-1769.
- Biondini, S., Panella, O. (2015). Exotic leptons at future linear colliders. *Physical Review D*, 92 (1), 015023.
- Boudjema, F., Djouadi, A., Kneur, J. L. (1993). Excited fermions at e^+e^- and ep colliders. *Zeitschrift für Physik C Particles and Fields*, 57, 425-449.
- Cakir, O., Cakir, İ. T., Kirca, Z. (2004). Single production of excited neutrinos at future e^+e^- , ep and pp colliders. *Physical Review D*, 70 (7), 075017.
- Cakir, O., Leroy, C., Mehdiyev, R. R. (2000). Search for excited quarks with the ATLAS experiment at the CERN LHC: Double jets channel. *Physical Review D*, 62 (11), 114018.
- Cakir, O., Leroy, C., Mehdiyev, R. R. (2001). Search for excited quarks with the ATLAS experiment at the CERN LHC: W/Z+jet channel. *Physical Review D*, 63 (9), 094014.
- Cakir, O., ve Mehdiyev, R. R. (1999). Excited quark production at the CERN-LHC. *Physical Review D*, 60, 034004.
- Cakir, O., Ozansoy, A. (2008). Search for excited spin-3/2 and spin-1/2 leptons at linear colliders. *Physical Review D*, 77 (3), 035002.
- Cakir, O., Ozansoy, A. (2009). Single production of excited spin-3/2 neutrinos at linear colliders. *Physical Review D*, 79 (5), 055001.
- Cakir, O., Yilmaz, A., ve Sultansoy, S. (2004). Single production of excited electrons at future e^-e^+ , ep and pp colliders. *Physical Review D*, 70(7), 075011.
- Caliskan, A. (2017). Excited neutrino search potential of the FCC-based electron-hadron colliders. *Advances in High Energy Physics*, 2017, 4726050.
- Caliskan, A. (2019). Search for excited muons at the future SPPC-based muon-proton colliders. *Acta Physica Polonica B*, 50, 1409-1422.
- Caliskan, A. (2018). Single production of the excited muons at the SPPC-based ultimate μp collider. *Turkish Journal of Physics*, 42 (4), 343-349.
- Caliskan, A. (2020). Single production of composite electrons at the future SPPC-based lepton-hadron colliders. *Canadian Journal of Physics*, 98 (4), 1-21.
- Caliskan, A., ve Kara, S. O. (2018). Single production of the excited electrons in the future FCC-based lepton-hadron colliders. *International Journal of Modern Physics A*, 33 (24) 1850141.
- Caliskan, A., Kara, S. O., ve Ozansoy, A. (2017). Excited muon searches at the FCC-based muon-hadron colliders. *Advances in High Energy Physics*, 2017, 1540243.
- Chatrchyan, S., Khachatryan, V., Sirunyan, A.M., Tumasyan, A., Adam, W., vd. (2012). Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Physics Letters B*, 716 (1), 30-61.
- Chekanov, S., Derrick, M., Krakauer, D., Magill, S., Musgrave, B., vd. (2002). Searches for excited fermions in ep collisions at HERA. *Physics Letters B*, 549 (1-2), 32-47.
- Cowan, G., Cranmer, K., Gross, E., Vitells, O. (2011). Asymptotic formulae for likelihood-based tests of new physics. *The European Physical Journal C*, 71 (1554), 1-19.
- Eboli, O. J. P., Lietti, S. M., ve Mathews, P. (2002). Excited leptons at the CERN large hadron collider. *Physical Review D*, 65, 075003.
- Günaydin, Y. O., Sahin, M., ve Sultansoy, S. (2018). Resonance production of excited u quark at FCC-based γp colliders. *Acta Physica Polonica B*, 10 (49), 1763-1779.
- Hagiwara, K., Komamiya, S., Zeppenfeld, D. (1985). Excited lepton production at LEP and HERA. *Zeitschrift für Physik C – Particles and Fields*, 29, 115-122.
- Jikia, G. (1990). Excited quark production at ep and γp colliders. *Nuclear Physics B*, 333 (2), 317-334.
- Ketenoglu, B., Dağlı, B., Öztürk, A., Sultansoy, S. (2022). Review of muon-proton and muon-nucleus collider proposals. *Modern Physics Letters A*, 37 (38), 2230013.
- Khachatryan, V., Sirunyan, A. M., Tumasyan, A., Adam, W., Bergauer, T., vd. (2014). Search for excited quarks in the γ + jet final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV. *Physics Letters B*, 738, 274-293.
- Köksal, M. (2014). Analysis of excited neutrinos at the CLIC. *International Journal of Modern Physics A*, 29 (24), 1450138.
- Kühn, J. H., Tholl, H. D., Zerwas, P. M. (1985). Signals of excited quarks and leptons. *Physics Letters B*, 158 (3), 270-275.
- Kühn, J., Zerwas, P. (1984). Excited quarks and leptons. *Physics Letters B*, 147 (1-3), 189-196.

- Low, F. E. (1965). Heavy electrons and muons. *Physical Review Letters*, 14, 238-239.
- Ozansoy, A., Ari, V., Çetinkaya, V. (2016). Search for excited spin-3/2 neutrinos at LHeC. *Advances in High Energy Physics*, 2016, 1739027.
- Ozansoy, A., Billur, A. A. (2012). Search for excited electrons through $\gamma\gamma$ scattering. *Physical Review D*, 86 (5), 055008.
- Pancheri, G., Srivastava, Y. N. (1984). Weak isospin spectroscopy of excited quarks and leptons. *Physics Letters B*, 146 (1-2), 87-94.
- Renard, F. M. (1983). Excited quarks and new hadronic states. *II Nuovo Cimento A (1965-1970)*, 77, 1-20.
- Rujula, A., Maiani, L., Petronzio, R. (1984). Search for excited quarks. *Physics Letters B*, 140 (3-4), 253-258.
- Sahin, M., Aydin, G., ve Günaydin, Y. O. (2019). Excited quarks production at FCC and SppC pp colliders. *International Journal of Modern Physics A*, 34 (29), 1950169.
- Sahin, M., ve Caliskan, A. (2023). Excited muon production in muon colliders via contact interaction. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 50 (2), 025002.
- Semenov, A. (2016). LanHEP – A package for automatic generation of Feynman rules from the Lagrangian Version 3.2. *Computer Physics Communications*, 201, 167-170.
- Spira, M., Zerwas, P. M. (1989). Excited quarks and leptons. *Heavy Flavours and High-Energy Collisions in the 1-100 TeV Range*, 519-529.
- Panella, O., Leonardi, R., Pancheri, G., Srivastava, Y. N., Narain, M., Heintz, U. (2017). Production of exotic composite quarks at the LHC. *Physical Review D*, 96 (7), 075034.
- Pati, J. C., ve Salam, A. (1974). Lepton number as the fourth color. *Physical Review D*, 10, 275-289.
- Pati, J. C., Salam, A., ve Strathdee, J. A. (1975). Are quarks composite?. *Physics Letters B*, 59 (3), 265-268.
- Sirunyan, A. M., Tumasyan, A., Adam, W., Ambrogio, F., Bergauer, T., vd. (2020). Search for an excited lepton that decays via a contact interaction to a lepton and two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. *Journal of High Energy Physics*, 2020 (52), 1-39.
- Sirunyan, A. M., Tumasyan, A., Adam, W., Ambrogio, F., Asilar, E., vd. (2019). Search for excited leptons in lly final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. *Journal of High Energy Physics*, 2019 (15), 1-36.

Cerrahi Maskelerin Geçirgenlik Özelliklerinin Regresyon Analizi ile Tahminlenmesi

Gizem CELEP^{1*}, Fulya YILMAZ², Gamze D. TETİK³

Öz

Bu çalışmanın amacı, maskelerden beklenen ve son kullanıcı konforu için önemli olan hava ve su buharı geçirgenlik özelliklerinin üretim öncesinde kalınlık, gramaj ve gözeneklilik parametrelerine bağlı olarak tahmin edilmesidir. Bu amaçla, piyasadan temin edilen üç katlı spunbond- meltblown- spunbond (SMS) cerrahi maskelerin katman morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenerek; kalınlık, gramaj ve gözeneklilik gibi yapısal-fiziksel özellikleri ile hava ve su buharı geçirgenlikleri test edilmiştir. Cerrahi maskelerin ölçülen özellikleri arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı ANOVA testi ile belirlenmiştir. Hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliklerinin kalınlık, gramaj ve gözeneklilik parametreleri ile tahminlenmesine yönelik regresyon denklemleri oluşturulmuştur. İncelenen maskelerin hava geçirgenliği değerleri 81,4-149,4 l/m²/s, su buharı geçirgenlik değerleri ise 6,67-9,78 g.mm/m².gün.kPa arasında değişmektedir. En yüksek hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliğine sahip maskenin gözeneklilik değerinin diğer maskelere göre daha yüksek; kalınlık ve gramaj değerlerinin ise daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar maskelerin kalınlık ve gramajındaki artışın hava ve su buharı geçirgenliği değerlerini düşürdüğünü, gözeneklilikteki artışın ise hava ve su buharı geçirgenliğini artırdığını göstermektedir. Çoklu doğrusal regresyon modeline dahil edilen gramaj, kalınlık ve gözeneklilik değerlerinin cerrahi maskelerin hava geçirgenliğini %99,6; gözeneklilik ve kalınlık değerlerinin ise su buharı geçirgenliğini %91,9 oranında açıklayabileceği bulunmuştur. Çalışmada yapılan regresyon analizi ile cerrahi maskelerin geçirgenlik özelliklerinin seçilen yapısal-fiziksel özellikler ile yüksek bir oranda açıklanabileceği ortaya konulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Cerrahi maske, Hava geçirgenliği, Regresyon analizi, Su buharı geçirgenliği, Tıbbi tekstil.

Estimation of Permeability Properties of Surgical Masks by Regression Analysis

Abstract

The aim of this study is to estimate the air and water vapor permeability properties expected from masks, which are important for end-user comfort, before production, depending on thickness, weight per unit area, and porosity parameters. For this purpose, firstly, the layer morphologies of three-layer spunbond-meltblown-spunbond (SMS) surgical masks obtained from the market were examined by scanning electron microscope (SEM) and structural-physical properties such as thickness, weight per unit area, porosity, air and water vapor permeability were tested. The ANOVA test was used to determine whether the difference between the measured properties of the surgical masks was statistically significant. Regression equations were obtained to estimate air permeability and water vapor permeability with thickness, weight per unit area, and porosity parameters. The air permeability values of the examined masks varied between 81.4-149.4 l/m²/s and water vapor permeability values varied between 6.67-9.78 g.mm/m².day.kPa. The results show that the increase in the thickness and weight per unit area of the masks decreases the air and water vapor permeability values, while the increase in porosity increases the air and water vapor permeability. It was found that the weight, thickness and porosity values included in the multiple linear regression model could explain the air permeability of surgical masks by 99.6%, while the porosity and thickness values could explain the water vapor permeability by 91.9%. The regression analysis performed in the study revealed that the permeability properties of surgical masks can be explained to a high extent by the selected structural-physical properties.

Keywords: Air permeability, Medical textile, Regression analysis, Surgical mask, Water vapor permeability.

¹Uşak Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, Uşak, Türkiye, gizem.celep@usak.edu.tr

²Uşak Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Uşak, Türkiye, fulya.ozdemir@usak.edu.tr

³Uşak Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Nanoteknoloji Mühendisliği, Uşak, Türkiye, gamze.tetik@usak.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Kullanıcıları çeşitli mikroorganizma ve solunabilir partiküllere karşı koruyan cerrahi maskelerin önemi COVID-19 pandemisi ile daha da önem kazanmıştır. Özellikle sağlık çalışanlarının sürekli hayatlarında olan en temel kişisel koruyucu donanım ürünü olan cerrahi maskeler, genellikle polipropilen liflerden spunbonding (eğirmeli bağlantı) ya da meltblowing (eriyik üfleme) tekniklerinin birlikte kullanımı ile üretilmektedir. Cerrahi maske üretiminde her ne kadar en fazla kullanılan lif çeşidi polipropilen olsa da polyester, polistiren, polietilen ve polikarbon lifleri de kullanılmaktadır (Sisodia ve Mittal, 2023).

Maskeler, koruyuculuk özelliklerine göre birçok farklı alanda kullanılabilen kişisel koruyucu donanımlardır. Piyasada çeşitli tipte ve özellikte maskeler bulunmaktadır. Maskeler toz, kimyasallar, virüs ve çeşitli mikroorganizmalardan korunmak amacıyla kullanılan tıbbi tekstil ürünleridir. Maskelerin koruyuculuk performansı ve özelliklerini etkileyen çeşitli parametreler bulunmaktadır. Hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği maskelerin konfor özellikleri üzerinde kritik etkiye sahip parametrelerdir. Nefes alabilirlik ve filtreleme verimliliği arasında optimum bir değere ulaşılması maskelerin konfor, koruma ve kullanılabilirlik özellikleri açısından önem teşkil etmektedir (Angelova ve ark., 2023).

Koruyucu maskeler genel olarak; kumaş maskeler, cerrahi maskeler ve solunum maskeleri olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır. Kumaş maskeler tek ya da birden fazla katmandan oluşurlar, çok yüksek bulaş riski bulunmayan durumlarda kullanılırlar. Nefes alma ve termo-fizyolojik konfor açısından bu tür maskelerin kullanımı daha rahattır. Dokusuz yüzeylerden çeşitli tekniklerle üretilen cerrahi maskeler, iki boyutlu olarak üretilen dokuma ve örme tekstil yapılarından farklı olarak, tek tek liflerden meydana gelen konfigürasyon yapısındadır. Bu üretim tekniklerine bağlı olarak; mikro gözeneklilik, boyutsal stabilite ve kademeli filtrasyon özellikleri bakımından avantajlar sağlamaktadır (Memon ve ark., 2024). Cerrahi maskeler, genellikle spunbond-meltblown-spunbond (SMS) olmak üzere üç katlı dokusuz yüzeyden meydana gelmektedir. Meltblown dokusuz yüzeylerde kullanılan liflerin çapı en düşük 1 µm civarındadır, bu da gözenek boyutlarının küçük olmasını ve damlacıkları kalkanlamayı sağlamaktadır (Arora ve Majumdar, 2022; Memon ve ark., 2024).

Ağızdan çıkan damlacıklar gibi sıvıların dış katmandan iç katmanlara doğru nüfus etmesini önlemek amacıyla cerrahi maskelerin dış katmanının genellikle su geçirmez özellikte olması istenmektedir (Wang ve ark., 2020; Bhattacharjee ve ark., 2020; Li ve ark., 2006). Orta katmanın, belirli boyut üzerindeki partikül ve patojenlerin hem iç hem de dış katmana ilerlemesini önleyecek şekilde tasarlanması önemlidir. İç katmanda ise, ağızdan salınan damlacıkları hapsetmek için daha çok emici malzemeler tercih edilmektedir (Wang ve ark., 2020; Bhattacharjee ve ark., 2020). Dışarı verilen nefesteki nemin emilmesi, kullanıcının konforunu da arttırmaktadır. Bu üç katman birlikte,

partikül ve patojenlerin nüfuz etmesini sınırlandırarak hem kullanıcıyı hem de çevresindeki kişileri korumaya yardımcı olur (Chua ve ark., 2020).

Hava geçirgenliği, cerrahi maske kullanımında kullanıcıya konfor sağlayan en önemli özelliklerden biridir. Maske gözenekliliğinin artması, hava geçirgenliğini artırmakla birlikte, bulaş riski taşıyan aerosollerin maske yüzeyindeki gözeneklerden geçişini kolaylaştırarak, koruma seviyesinin düşmesine neden olmaktadır. Bununla birlikte yüksek hava geçirgenliği daha iyi nefes alabilirlik anlamına gelmektedir. (Hamouda ve ark., 2022; Kulichenko, 2005; Li ve ark., 2006). Maske kullanımı, özellikle sıcak ve nemli çevresel koşullarda terlemeyi artırmakta ve bu durum kullanıcı konforunu olumsuz yönde etkilemektedir. Tekstil ürünlerinden, terleme ile oluşan sıvının buharlaşarak dışarıya atılması yoluyla termo-fiziksel ve termo-fizyolojik bir konfor sağlaması beklenmekte iken (McCullough ve ark., 2003; Choudhury, 2017); benzer şekilde, maskelerden dışarı verilen nefeste bulunan nemin maske içindeki mikroklima ortamından uzaklaşarak kullanıcıya konfor sağlaması beklenmektedir. Nemin maske iç yüzeyinde hapsedilmesi, aynı zamanda mikroorganizmaların üremesi için elverişli bir ortam oluşturarak, bireyin maruziyet riskini artırabilir (Yang ve ark., 2017). Dolayısıyla, hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği maskelerin konfor özellikleriyle ilişkilendirilen parametrelerdir (Fadil ve ark., 2022). Yüksek nem oranı ve yüksek sıcaklıklarda, maske ve hava arasındaki sıcaklık farkından dolayı maskede su buharı yoğunlaşmasına neden olabilir. Maske kullanımı esnasında kullanıcı tarafından salınan damlacıklar da maskenin ıslanma sürecini hızlandırmaktadır. Nefes alma eylemi de penetrasyonu güçlendirmektedir (Li ve ark., 2006). Bu gerekçelerle, maske çeşitlerinin su buharı ve hava geçirgenliğine ilişkin parametrelerin değerlendirilmesi, kullanıcı konforunun sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır.

Literatürdeki çalışmalarda nem akümülyasyonunu azaltmak amacı ile maske yüzeylerine grafen oksitin eklendiği ve bu sayede nemin kumaş yüzeyi üzerinden hızlıca transfer edilerek nefes alabilirliğin geliştirildiği görülmüştür (Aziz ve ark., 2024). Şevkan Macit (2024), çok katmanlı maskelerin kalınlık, hava geçirgenliği, bakteriyel filtrasyon etkinliği ve diferansiyel basınç özelliklerini incelemiştir. Maskelerdeki gramaj ve katman sayısındaki artışın genel olarak kalınlık, bakteriyel filtrasyon etkinliği ve diferansiyel basınç değerlerinin artmasına, hava geçirgenlik değerinin ise azalmasına neden olduğunu ortaya koymuş ve gramajdaki artışın katman sayısındaki artışa kıyasla daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Cerrahi maskelere ekstra bir filtre tabakasının eklenmesi ile maskelerin filtreleme verimliliği de iyileştirilebilmektedir (Tcharkhtchi ve ark., 2021). Fadil ve ark., cerrahi maskelere elektrolif çekim tekniği ile nanoliflerden oluşan filtre tabakası yerleştirmiş ve maskelerin hava geçirgenliği, su buharı geçirgenliği ve eğilme rijitliği gibi özelliklerindeki değişimi incelemişlerdir. Ayrıca cerrahi maskelere ilave filtre tabakasının eklenmesi ile maskelerin hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir (Fadil

ve ark., 2022). Bir başka çalışmada, bakteriyel filtrasyon verimlilikleri (BFE) %98 ve üzeri olan maskelerin toplam su buharı geçirgenliklerinin en düşük değerde olduğu bulunmuştur. BFE değerinin yüksek olması bir avantaj iken, maskelerin su buharı geçirgenlik değerinin düşük olması maskenin kişisel koruyucu donanım olarak uzun bir süre boyunca kullanılması ile konforun bozulacağı belirtilmiştir (Akça, 2023). Lee ve ark. (2020) tek kullanımlık cerrahi maskeler ile tekrar kullanılabilir özellikteki örme ve dokuma maskeleri antimikrobiyal ve antiviral özellikleri hariç tutarak konfor özellikleri bakımından incelemişlerdir. Hava geçirgenliği ve kalınlık arasındaki korelasyon katsayısını 0,44 olarak bulmuşlardır. Kullanılan kumaş yapısı, kumaş özellikleri ve lif çapının bu durumda etkili olabileceğini belirtmişlerdir (Lee ve ark., 2020).

Konu ile ilgili güncel literatür, maskelerin çeşitli etken maddeler ve nanoliflerle birleştirildiği (Celebioglu ve ark., 2023), maskelerdeki ısı transferinin incelendiği (Angelova ve ark., 2024b), maskelerden geçen havanın nümerik olarak simüle edildiği (Angelova ve ark., 2024a) birtakım çalışmaları barındırmaktadır. Literatürde maskelerin hava geçirgenliği, su buharı geçirgenliği veya bakteriyel filtrasyon verimliliği özelliklerinin tespitine yönelik çalışmalar mevcuttur (Akca ve Katı, 2023; Leonas ve ark., 2003; Sekhar ve ark., 2023). Ancak deneysel olarak gözlemlenen sonuçlar ile birlikte istatistiksel modelleme yapılarak maskelerin hava ve su buharı geçirgenliklerinin tahminlendiği çalışmalar sınırlı olup, ağırlıklı olarak tek parametre ile maskelerin hava geçirgenlikleri tahminlenmiştir (Celep ve ark., 2022; Lee ve ark., 2020).

Bu çalışmanın amacı, piyasada bulunan ve son kullanıcıya ulaşmış ticari cerrahi maskelerin hava ve su buharı geçirgenliklerinin, maskelerin taşıdığı yapısal-fiziksel özelliklerle regresyon denklemleri sayesinde tahminlenmesidir. Bu amaçla üç farklı ticari cerrahi maske temin edilerek; kalınlık, gramaj ve gözeneklilik değerleri ölçülmüştür. Maskelerin geçirgenliklerini belirleyen bu özelliklerin hava ve su buharı geçirgenlikleri üzerindeki etkileri istatistiksel açıdan incelenerek, çoklu doğrusal regresyon modelleri oluşturulmuştur.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada piyasada bulunan üç farklı ticari markaya ait cerrahi maske kullanılmıştır. Bu maskeler polipropilen esaslı olup, üç katlı SMS yapıdadır. Cerrahi maskelerin gramajları tekstil standart atmosfer koşullarında ($20\pm2^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve $65\pm5\%$ bağıl nemde) 48 saat bekletildikten sonra, 0,1 mg hassasiyetli analitik terazi ile (Radwag, Polonya) 10 tekrarlı olarak ölçülmüştür. Maskelerin kalınlıkları 10 μm hassasiyetli dijital mikrometre (Mitutoyo, Japonya) ile 10 tekrarlı olarak ölçülmüştür.

Maskelerin tüm katmanlarının taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri, 10 kV ivmelendirme voltajı uygulanarak Phenom Pro X marka cihaz (Hollanda) ile 260 ve 500 kat

büyütmelerde alınmıştır. Maskeler polipropilen liflerden üretilmiş olup, yalıtkan olduklarından görüntünün sorunsuz alınabilmesi için katmanlara SEM analizi öncesinde 15 saniye süresince altın kaplama uygulanmış (Cressington Sputter Coater, Dortmund, Almanya) ve sonrasında görüntüleme gerçekleştirilmiştir. Ayrıca cihaza bağlantılı kamera ile alınan 52X büyütme görüntüleri de sunulmuştur. Katmanlara ait lif çapları ve bağlantı noktaları boyutları Amerikan Ulusal Sağlık Enstitüleri (National Institutes of Health, NIH) tarafından geliştirilen Image J açık erişimli görüntü inceleme programı ile ölçülmüştür.

Cerrahi maskelerin su buharı geçirgenlik testleri ASTM E96/E96M-24a-Malzemelerin Su Buharı İletim Oranının Gravimetrik Tayini için Standart Test Yöntemleri (2024) Standardına göre gerçekleştirilmiştir. Su buharı geçişinin önem taşıdığı, kalınlığı 32 mm'ye kadar olan kağıt, plastik filmler ve tabaka formunda malzemelerin su buharı geçirgenliğinin belirlenmesinde bu test yönteminden faydalanılmaktadır. Literatürde benzer malzemelerin bu test yöntemi ile su buharı geçirgenliği ölçümünü içeren çalışmalar mevcuttur (Bertuzzi ve ark., 2007; Tarhan ve Şen, 2022; Al-Hassan ve Norziah, 2012; Kar ve ark., 2007; Lee ve ark., 2020). Silika jel içeren desikatörün içerisine analog bir termohigrometre yerleştirilmiş ve desikatör içi nem oranının %0'a inmesi beklenmiştir. Su buharı geçirgenliği ölçümünde kullanılacak olan 4 cm iç çaplı cam kapların her birine 30 ml distile su eklenmiştir. Kapların ağız kısımları cerrahi maskelerle tamamen kapatılmıştır ve bu sayede kap içerisinde %100 bağıl nem oranı sağlanmıştır. Analitik terazi ile ağırlıkları ölçülen kaplar, desikatörün içerisine yerleştirilmiş ve test 24 saat sonunda desikatör içindeki nem oranı sabitlendiğinde tamamlanmıştır. Kapların ağırlıkları tekrar analitik terazi ile ölçülerek su buharı geçirgenlik oranı (SBGO) Denklem 1'e göre hesaplanmıştır:

$$SBGO = (m/t)/A \quad (1)$$

Bu denklemde, m/t (g/gün) zamana göre kaplardaki suyun ağırlık kaybı, A (m^2) ölçüme tabi olan cerrahi maske alanıdır (cam kap ağız alanıdır). Denklem 1'e göre hesaplanan SBGO ile maske kalınlığı ve basınç değişimi değerleri göz önünde bulundurularak, su buharı geçirgenliği (SBG) değerleri hesaplanmıştır.

$$SBG = SBGO * \tau / \Delta P = SBGO * \tau / S(R1 - R2) \quad (2)$$

Denklem 2'de τ (mm) cerrahi maske kalınlığı, ΔP (kPa) su buharı basıncındaki değişim, S test sıcaklığı olan 20°C' de su buharı doymunluk basıncı, $R1 - R2$ ise maskelerin iç ve dış yüzeyleri arasındaki bağıl nem farkıdır.

Cerrahi maskelerin hava geçirgenlik testleri TS 391 EN ISO 9237 Tekstil- Kumaşlarda hava geçirgenliğinin tayini (1999) standardına göre Prowhite Air Test II (Proser, İstanbul, Türkiye) test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. 20 cm² örnek alanı için 100 Pa basınç ayarlanarak testler yapılmıştır. Cerrahi maskelerin uygulamadaki karakteristiklerini belirleme noktasında su buharı geçirgenliği ile hava geçirgenliği değerlerini birlikte yorumlayabilmek amacıyla maskelerin sadece iç (arka) yüzeylerinden ölçüm alınmıştır.

Cerrahi maskelerin gözeneklilik değerleri civa porozimetresi (Autopore IV 9500, Micromeritics, ABD) ile ASTM UOP578-11-Civa Porozimetresi ile Gözenekli Malzemelerin Otomatik Gözenek Hacmi ve Gözenek Boyutu Dağılımı (2011) standart test metoduna göre ölçülmüştür. Gözeneklilik test sonuçları % cinsinden verilmiştir.

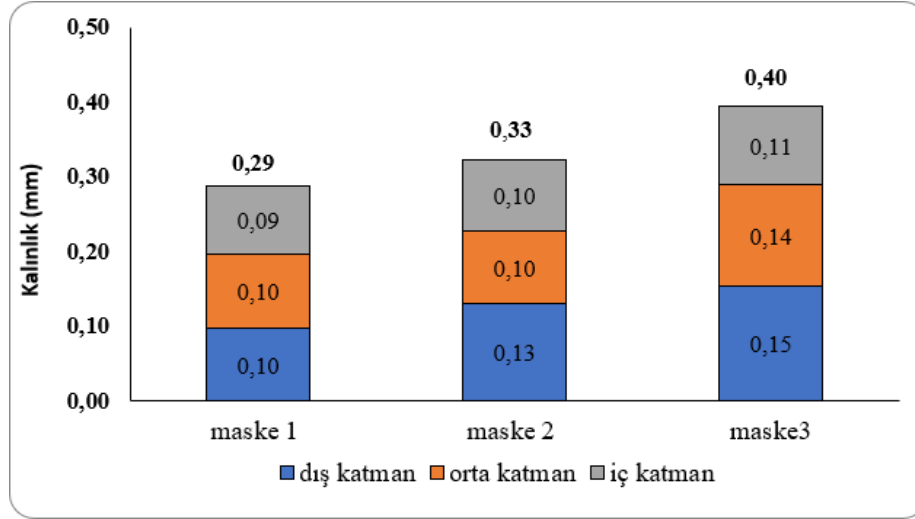
Çalışmanın istatistiksel analizi IBM SPSS 23 paket programı ile yapılmış olup, tek yönlü ANOVA değerlendirme yöntemi seçilmiştir. Testlerde önem seviyesi $\alpha=0,05$ olarak belirlenmiştir. Hava ve su buharı geçirgenliği ile kalınlık, gözeneklilik ve gramaj arasındaki ilişkinin açıklanması amacıyla doğrusal regresyon analizi yapılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Cerrahi maskelerin gramaj, kalınlık ve gözeneklilik değerleri Tablo 1’de, maskelerin katman kalınlıkları ise Şekil 1’de sunulmaktadır.

Tablo 1. Cerrahi maskelerin gramaj, kalınlık ve gözeneklilik değerleri

Maske Türü	Gramaj (g/m ²)	Kalınlık (mm)	Gözeneklilik (%)
1	71,96±0,41	0,288±0,008	78,97±0,55
2	76,40±0,85	0,332±0,008	77,34±0,61
3	89,02±0,13	0,404±0,005	77,07±0,40



Şekil 1. Maskelerin katman kalınlıkları

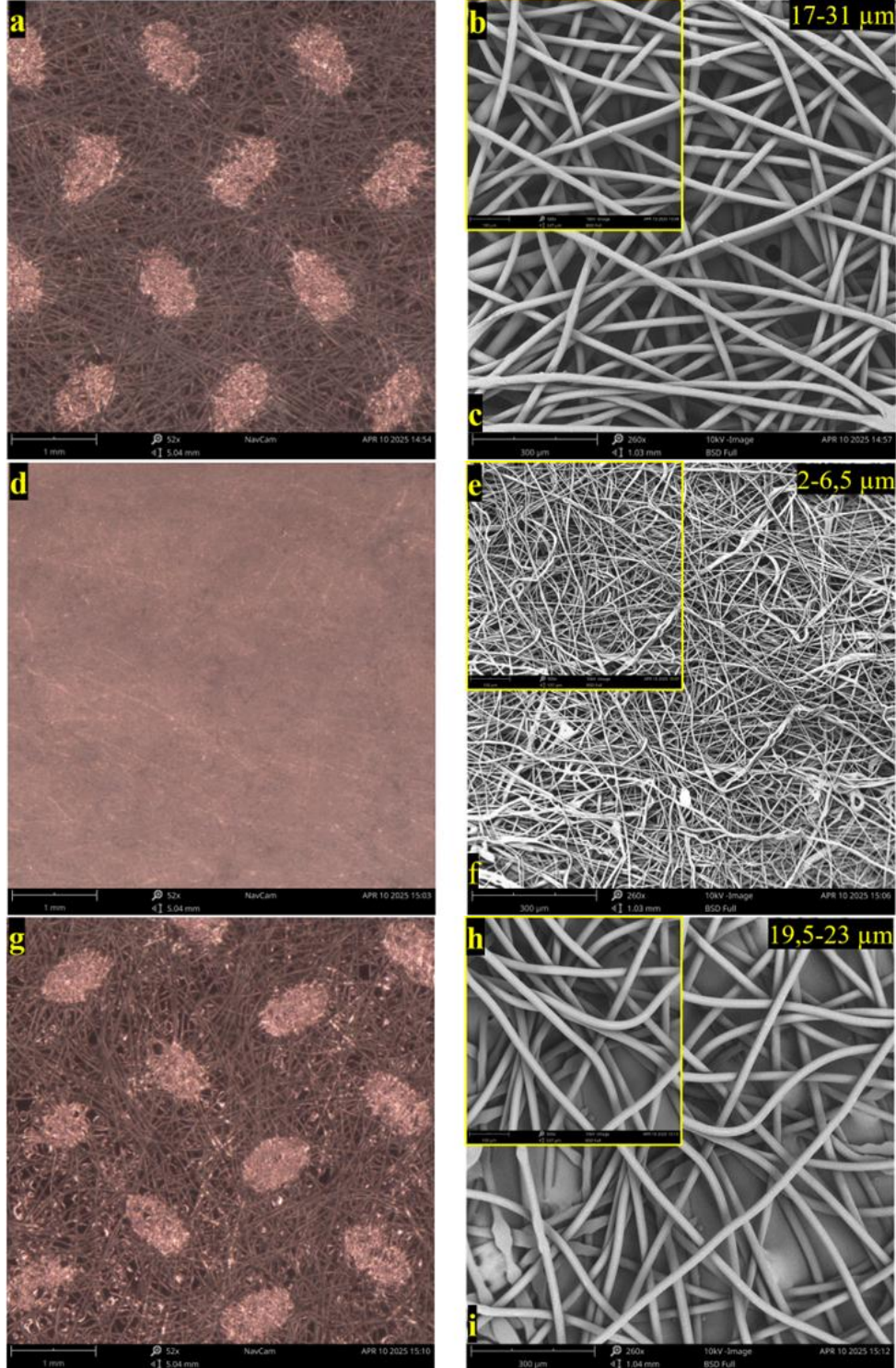
Her üç maskenin üst, orta ve alt katmanlarının SEM cihazı ile alınan tüm görüntüleri Şekil 2-4'te verilmektedir. Genel olarak maske üst katmanlarının lif çapları 17-31 μm arasındadır (Şekil 2-4 b, c). Bu çap değerleri literatürde belirtilen çap değerleri ile uyumludur. Djeghdır ve ark. (2023) spunbond tabakanın ortalama lif çapının 25 μm olduğunu belirtmiştir. Zhang ve ark. (2021) ise spunbond tabakalarda lif çaplarının 15-40 μm arasında değiştiğini ifade etmektedir. Üst katmanda en ince lif çapına sahip maske 3 nolu maske iken, 1 nolu maskenin lif çap dağılım aralığı en geniştir (Aralık(R) = 16 μm).

Genel olarak alt katman lif çapları üst katman lif çaplarından daha düşüktür. Alt katmanları oluşturan lif çapları değerlendirildiğinde, en ince lif çapları 3 nolu maskede gözlenmiştir (Şekil 2-4 h, i). Lif çapları maske alt katmanları için küçükten büyüğe doğru 3, 2 ve 1 nolu maske olarak sıralanmaktadır.

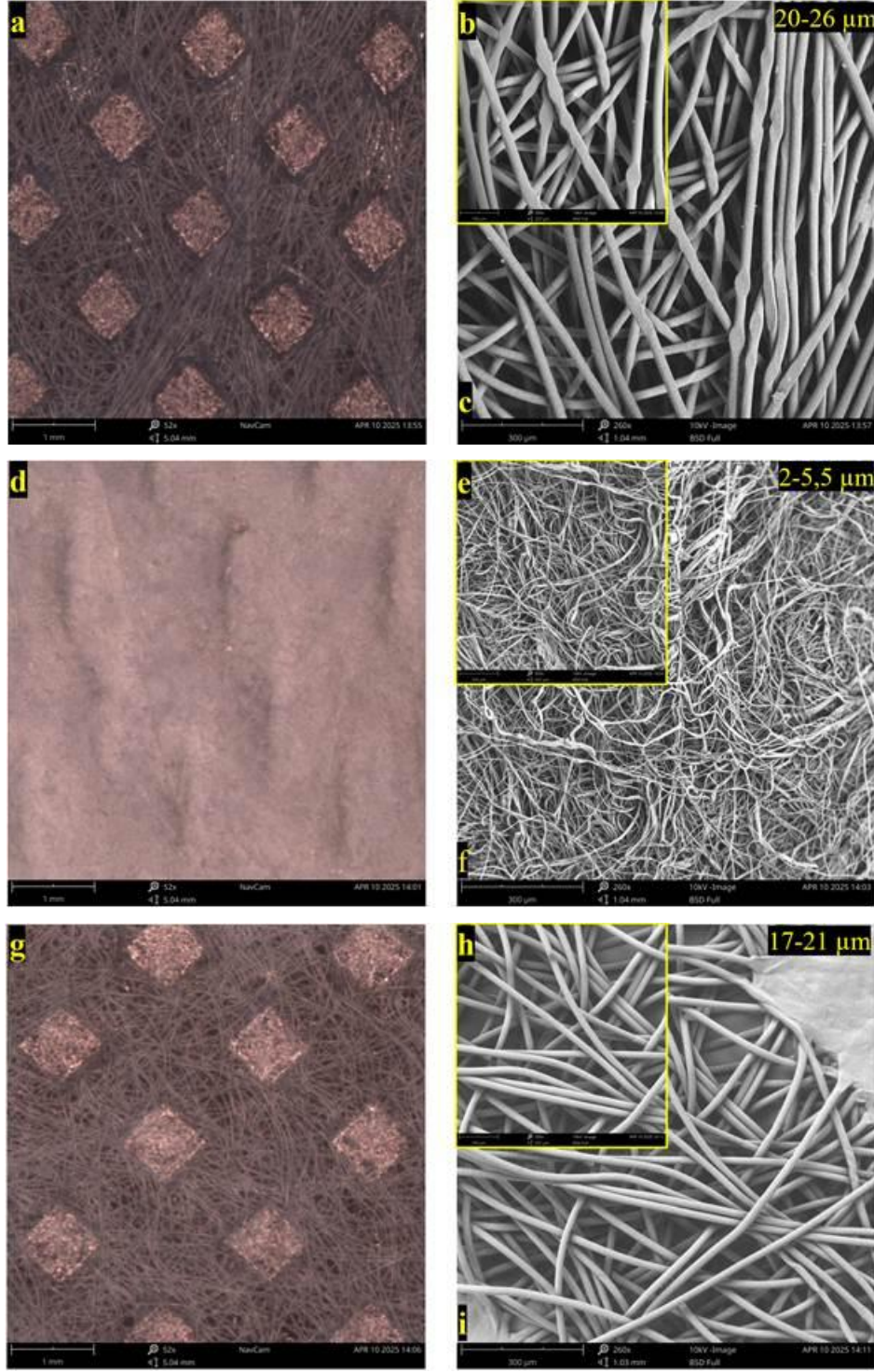
Meltblowing tekniği ile üretilmiş orta katmanlar göz önünde bulundurulduğunda, 1 ve 2 nolu maskeye ait lif çaplarının 2-6,5 μm arasında olduğu, 3 nolu maskenin lif çaplarının ise 2-11 μm arasında olduğu belirlenmiştir (Şekil 2-4 e, f). Han ve ark. (2023) polipropilenden oluşan meltblown maske katmanının ortalama lif çapını 3.06 μm olarak hesaplamıştır. Literatürde de belirtildiği üzere, SEM görüntülerinde cerrahi maskelerin orta katmanlarını oluşturan lif çaplarının daha ince olduğu belirlenmiştir.

SEM cihazı kamerası ile alınan görüntülerden görüldüğü üzere, SMS yapıda olan her üç maskenin spunbond tabakasına ait bağlantı noktaları tasarımları farklıdır (Şekil 2-4 a, g). 1 nolu maskede bağlantı noktası elips şeklinde iken, 2 ve 3 nolu maskelerde sırasıyla kare ve karo şeklinde bağlantı noktaları bulunmaktadır. Ayrıca bu bağlantı noktalarının üst katmanlarda boyutları 2 ve 3 nolu maske için sırasıyla $588 \pm 22 \mu\text{m}$ ve $634 \pm 24 \mu\text{m}$ 'dir. Elips formunda bağlantı noktası olan 1 nolu maske için kısa çap ortalaması $501 \pm 30 \mu\text{m}$ ve uzun çap ortalaması $847 \pm 35 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır.

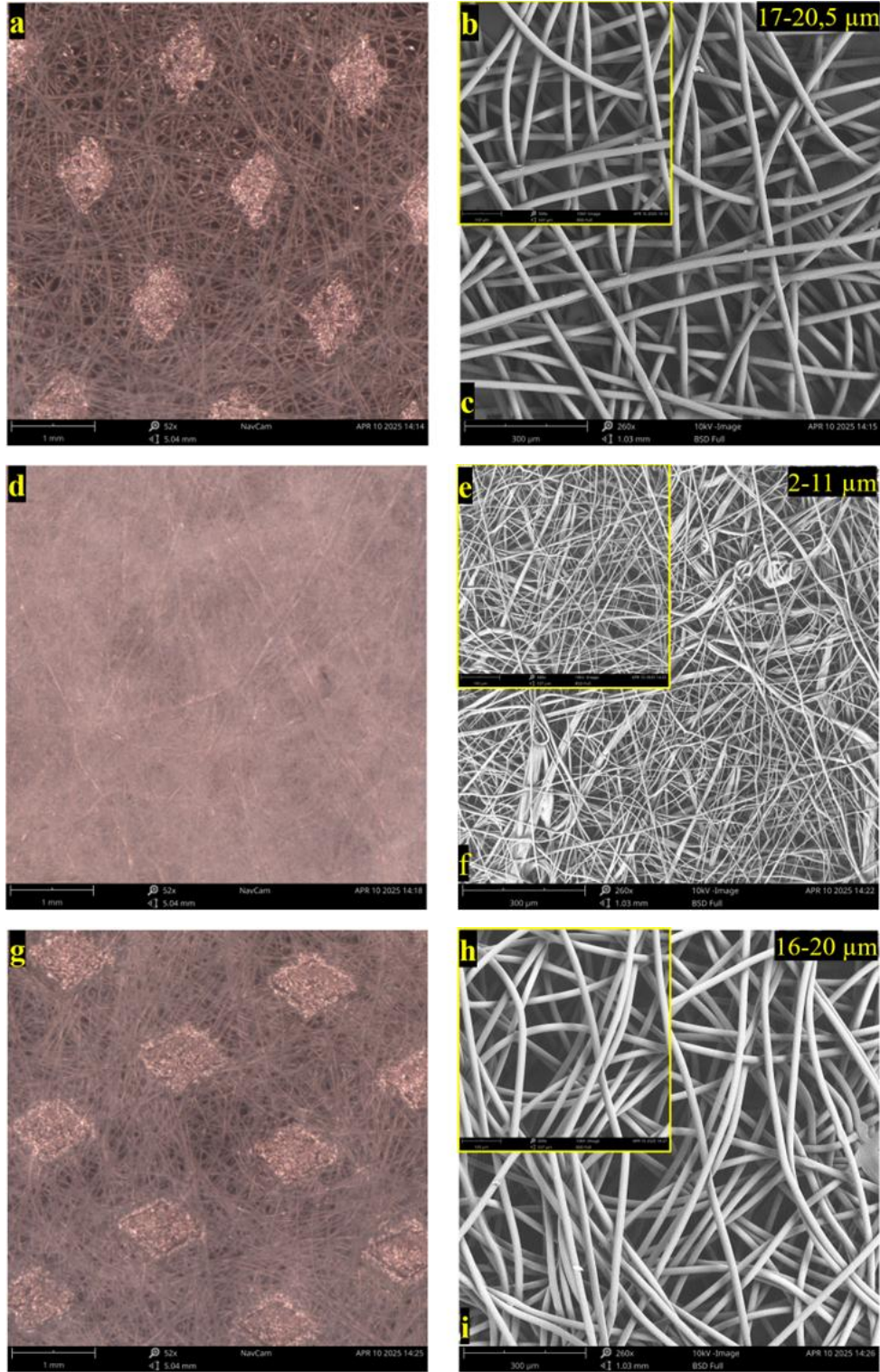
Maske alt katmanları için de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca bağlantı noktaları arasındaki en yakın dikey mesafe tüm maskelerde yaklaşık $1000\ \mu\text{m}$ 'dir.



Şekil 2. 1 numaralı maskenin sırasıyla üst, orta ve alt katmanlarına ait (a), (d), (g) kamera görüntüleri (52X); (b), (e), (h) 500X ve (c), (f), (i) 260X'te alınmış SEM görüntüleri



Şekil 3. 2 numaralı maskenin sırasıyla üst, orta ve alt katmanlarına ait (a), (d), (g) kamera görüntüleri (52X); (b), (e), (h) 500X ve (c), (f), (i) 260X'te alınmış SEM görüntüleri

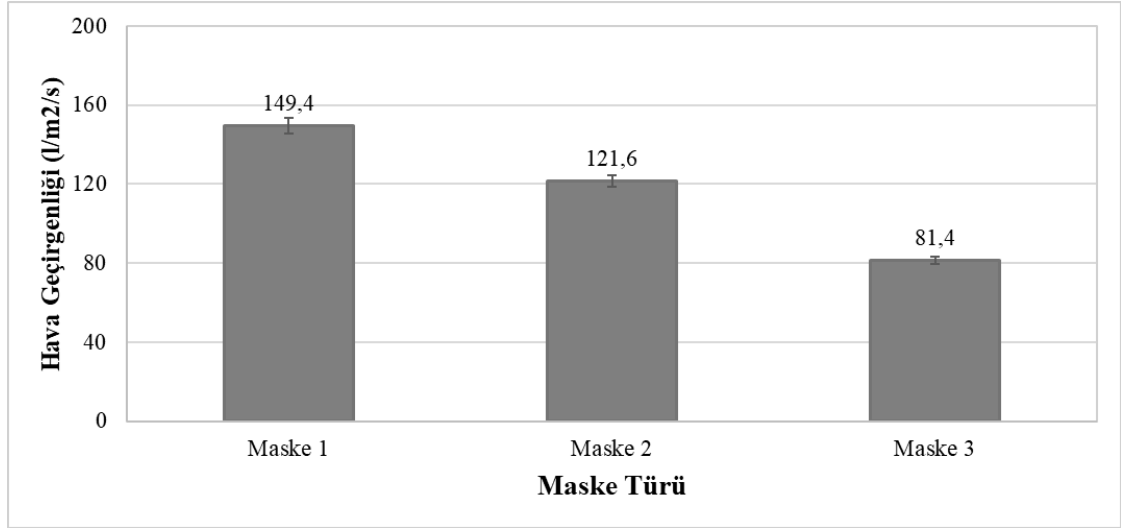


Şekil 4. 3 numaralı maskenin sırasıyla üst, orta ve alt katmanlarına ait (a), (d), (g) kamera görüntüleri (52X); (b), (e), (h) 500X ve (c), (f), (i) 260X'te alınmış SEM görüntüleri

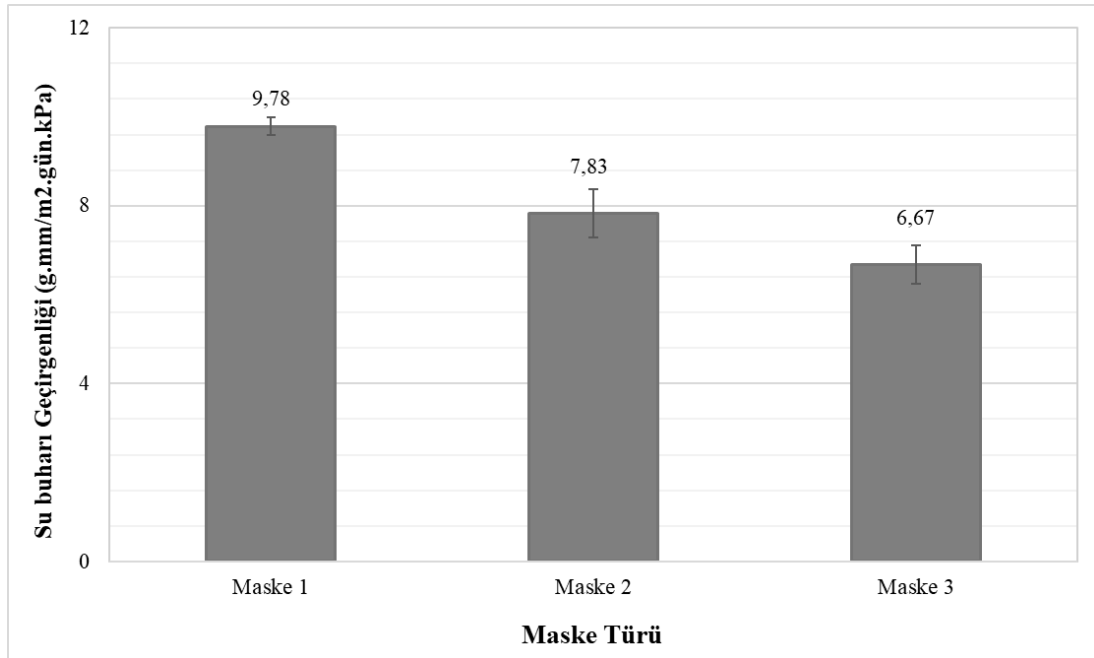
Şekil 5'te maske türüne göre hava geçirgenliği değerleri verilmektedir. Denklem 2'ye göre hesaplanan maskelerin su buharı geçirgenlik değerleri ise Şekil 6'da sunulmaktadır.

Maske türleri incelendiğinde, gramaj ve kalınlık değerleri arttıkça hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği değerlerinin azaldığı, gözenekliliğin artmasıyla hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliğinin arttığı belirlenmiştir. Gramajdaki artış genel olarak birim alanda daha fazla lif-lif

kesişmesi anlamına gelmekte olup, hava ve su buharı geçişi bu nedenle zorlaşmakta ve geçirgenlik azalmaktadır. SMS maskelerin orta katmanında bulunan meltblown tabaka geçirgenlik üzerinde spunbond katmanlara göre daha belirleyici bir etkiye sahiptir (Han ve ark., 2023). En kalın orta katmana sahip olan 3 numaralı maskenin (orta katman kalınlığı=0,14 mm) hava ve su buharı geçirgenliğinin en düşük olmasında bu durum etkili olmuştur. Gözeneklilikteki artış ise su buharı ve hava akışına karşı direncin azalmasına, dolayısıyla yüksek geçirgenliğe yol açmaktadır.



Şekil 5. Maskelerin hava geçirgenliği değerleri



Şekil 6. Maskelerin su buharı geçirgenliği değerleri

Tablo 2. Maskelerin hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliğine ait ANOVA test sonuçları

Ölçülen Özellik		Kareler Toplamı	Sd	Kareler Ortalaması	F	Sig.
Hava Geçirgenliği	Gruplar	23376,267	2	11688,133	1256,288	,000
	Arası					
	Gruplar İçİ	251,200	27	9,304		
	Toplam	23627,467	29			
Su Buharı Geçirgenliği	Gruplar	49,315	2	24,657	245,866	,000
	Arası					
	Gruplar İçİ	2,708	27	,100		
	Toplam	52,022	29			

Deneysel çalışmalarda elde edilen bulguların maskeler arasında istatistiksel açıdan anlamlı bir fark oluşturup oluşturmadığını tespit etmek için gerçekleştirilen ANOVA testine göre, maskelerin sahip oldukları yapısal-fiziksel özellikler, hava ve su buharı geçirgenliklerini istatistiksel açıdan anlamlı farklı kılmaktadır ($p<0,05$) (Tablo 2).

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, bulguların literatürle uyumlu olduğu görülmüştür. Konu ile ilgili çalışmalarda hava geçirgenliği ve kalınlık değeri arasında ters orantılı bir ilişki olduğu (Tharewal ve ark., 2013; Angelova ve ark., 2023); gramaj arttıkça geçirgenliğin azaldığı (Korkmaz ve ark., 2023; Epps ve Leonas, 2000) vurgulanmıştır.

Çalışmanın son aşamasında bağımsız değişkenler olarak belirlenen gramaj, kalınlık ve gözeneklilik değerlerinin, bağımlı değişkenler hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği değerleri ile ilişkileri regresyon denklemleri ile açıklanmaya çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre maskelerin hava geçirgenliği değerleri gramaj, kalınlık ve gözeneklilik değerlerinden etkilenmekte olup, gramaj ve kalınlıktaki artışla azalmakta, gözeneklilikteki artışla artmaktadır.

Hava geçirgenliği değeri için yapılan regresyon analizinde model başlığı altında yer alan sabit değerin hava geçirgenliğine olan etkisi anlamlı olmadığından ($p=0,560$), regresyon analizi sabiti içermeyecek şekilde yeniden yapılmıştır (Tablo 3).

Su buharı geçirgenliği için yapılan regresyon analizinde ise, gramajın su buharı geçirgenliği üzerindeki etkisi anlamlı bulunmamış olup ($p=0,085$), modelden gramaj değişkeni çıkarılarak regresyon analizi yeniden yapılmıştır (Tablo 3).

Tablo 3. Hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği doğrusal regresyon katsayıları

Hava Geçirgenliği					
Model	B	Standart Hata	Beta	t	Sig.
Gözeneklilik	4,434	,157	2,856	28,186	,000
Kalınlık	-238,979	65,232	-,682	-3,664	,001
Gramaj	-1,844	,422	-1,213	-4,371	,000
Su Buharı Geçirgenliği					
Model	B	Standart Hata	Beta	t	Sig.
(Sabit)	-20,462	8,158		-2,508	,018
Gözeneklilik	,451	,099	,334	4,574	,000
Kalınlık	-19,149	1,994	-,700	-9,601	,000

Hava geçirgenliği ile istatistiksel açıdan anlamlı etkiye sahip model ögeleri olan kumaş gramajı, kalınlık ve gözeneklilik arasındaki ilişki 3 numaralı regresyon denkleminde verilmektedir:

$$HG = 4,434 * G - 238,979 * K - 1,844 * Gr \quad (3)$$

Denklemden HG hava geçirgenliğini, G gözenekliliği, K kalınlığı ve Gr gramajı simgelemektedir. Regresyon denkleminde göre; hava geçirgenliği değeri ile gözeneklilik arasında pozitif yönlü bir ilişki vardır. Yani maskelerin gözeneklilik değerleri arttıkça hava geçirgenliği değeri de artmaktadır. Bununla birlikte hava geçirgenliği ile kalınlık ve gramaj arasında ise negatif yönlü bir ilişki bulunmaktadır (Denklemler 3). Maske kalınlığı ve gramaj değerleri arttıkça hava geçirgenliği değeri azalmaktadır.

Su buharı geçirgenliği ile istatistiksel açıdan anlamlı etkiye sahip model ögeleri olan kalınlık ve gözeneklilik değerleri arasındaki ilişki 4 numaralı regresyon denkleminde verilmektedir:

$$SBG = -20,462 + 0,451 * G - 19,149 * K \quad (4)$$

Denklemden SBG su buharı geçirgenliğini, G gözenekliliği, K kalınlığı simgelemektedir. Regresyon denklemi incelendiğinde, su buharı geçirgenliği değeri ile gözeneklilik değeri arasında pozitif yönlü bir ilişki; kalınlıkla ise negatif yönlü bir ilişki olduğu görülmektedir (Denklemler 4). Maskelerde gözeneklilik değerinin artmasıyla su buharı geçirgenliği değeri de artmaktadır. Maske kalınlığı arttıkça ise su buharı geçirgenliği değeri azalmaktadır.

Tablo 4. Hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği doğrusal regresyon modeli özetleri

Hava Geçirgenliği			
Model	R	R²	Düzeltilmiş R²
1	0,999 ^a	0,999	0,996
^a : Tahminleyiciler: K, G, Gr			
Su Buharı Geçirgenliği			
Model	R	R²	Düzeltilmiş R²
1	0,962 ^b	0,925	0,919
^b : Tahminleyiciler: Sabit, K, G			

Regresyon modeli özetlerine göre (Tablo 4) cerrahi maskelerin hava geçirgenliklerinin; gramaj, kalınlık ve gözeneklilik değerleri ile %99,6 oranında, su buharı geçirgenliğinin ise gözeneklilik ve kalınlık parametreleri ile %91,9 oranında açıklanabildiği görülmüştür.

4. Sonuçlar ve Öneriler

COVID19 pandemisi ile yaşamımızda yeri oldukça kritik hale gelen cerrahi maskeler bireyleri hem zararlı partiküllerden hem de hastalık oluşturma riski olan çeşitli bakteri ve virüs benzeri mikroorganizmalardan koruma amaçlı kullanılan tekstil ürünleri olarak son yıllarda üzerlerinde odaklanılan bir malzeme ve ürün grubunu oluşturmaktadır. Bu çalışmada üç katlı, SMS yapıda ticari cerrahi maskelerin kullanıcının konforu ve korunması açısından önemli olan hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği özellikleri incelenmiştir. Kullanıcının kolay nefes alıp vermesinin bir parametresi olan hava geçirgenliği ve maskenin iç kısmında mikroorganizma gelişmesine neden olan nem birikimi ile ilgili bir karakteristik olan su buharı geçirgenlik değerlerinin cerrahi maskelerin kalınlık, gramaj ve gözeneklilik değerleri ile ilişkisi belirlenmeye çalışılmıştır. SEM analizi ile maskelerin morfolojik özellikleri incelenmiştir. Maskelerin üst katmanlarındaki lif çapları 17-31 µm, orta katmanlarındaki lif çapları 2-11 µm ve alt katmanlarındaki lif çapları ise 16-23 µm arasında değişmektedir. Buna göre, üç katmandan oluşan cerrahi maskelerin orta katmanındaki lif çaplarının, üst ve alt katmanlardaki lif çaplarına kıyasla daha ince olduğu söylenebilir. Hem üst hem de alt katmanda en ince lif çapı, 3 nolu maskede ölçülmüştür. SMS maskelerin spunbond tabakalarında bulunan bağlantı noktalarının tasarımının birbirinden farklı olduğu tespit edilmiştir. 1, 2 ve 3 nolu maskelerde bağlantı noktaları sırasıyla elips, kare ve karo şeklindedir.

Araştırmada incelenen cerrahi maske numunelerin hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği değerlerinin istatistiksel açıdan anlamlı düzeyde birbirinden farklı olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar, cerrahi maskelerin hava ve su buharı geçirgenliğinin gözeneklilik, kalınlık ve gramaj gibi yapısal-fiziksel özelliklerden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği açısından en düşük değere sahip maske 3 nolu maske iken, en yüksek geçirgenliğe sahip maske 1 nolu maske olarak belirlenmiştir. Maskelerin kalınlık ölçüm sonuçlarına göre, 3 nolu maskenin tüm katmanları, 1 ve 2 nolu maskelere göre daha yüksek kalınlık değerine sahiptir ve bu durum 3 nolu maskenin hava ve su buharı geçirgenlik değerlerinin daha düşük olmasında etkilidir. Maskelerin gramajlarını karşılaştırdığımızda en yüksek gramaj değerine 3 nolu maske, en düşük gramaj değerine ise 1 nolu maske sahiptir. Maskelerin gramaj değerleri arttıkça geçirgenlik değerleri de azalmıştır. Gözeneklilik genel olarak malzeme yapısındaki boşluğu ifade etmekte olup, maskelerin geçirgenlik özelliğini belirleyen bir faktördür. Maskelerin gözeneklilik değerleri sırasıyla %78,97, %77,34 ve %77,07 olarak ölçülmüştür. Maskelerin gözeneklilik değerleri arttıkça geçirgenlik özellikleri artmış ve en yüksek hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliğine sahip maske, 1 nolu maske olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak; cerrahi maskelerin kalınlık ve gramaj değerlerindeki artış hem hava hem de su buharı geçirgenliğini azaltırken; gözeneklilikteki artış, hava ve su buharı geçirgenliğini arttırmaktadır.

Çalışmada maskelerin yapısal-fiziksel özelliklerinden hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenlik özelliklerini tahminlemek için doğrusal regresyon analizleri yapılmıştır. Kalınlık, gramaj ve gözeneklilik bağımsız değişkenleri ile oluşturulan doğrusal regresyon modeli maskelerin hava geçirgenliğini %99,6 oranında açıklamakta olup, regresyon denklemi şu şekilde gösterilmektedir: $HG=4,434 \cdot G-238,979 \cdot K-1,844 \cdot Gr$. Kalınlık ve gözeneklilik bağımsız değişkenleri ile oluşturulan doğrusal regresyon modeli maskelerin su buharı geçirgenliğini %91,9 oranında açıklamaktadır. Su buharı geçirgenliği için regresyon modeli şu şekildedir: $SBG=-20,462+0,451 \cdot G-19,149 \cdot K$.

Üretim öncesi özellik tahminlemeye yönelik oluşturulan denklemler, üretim süreçlerinde hem malzeme hem de zamandan tasarruf sağlayarak maliyetlerin azaltılmasına ve malzeme özelliklerinin geliştirilmesine katkı sunar. Hava ve su buharı geçirgenliği gibi kullanıcı açısından önemli olan cerrahi maske özelliklerinin kalınlık, gramaj ve gözeneklilik gibi yapısal-fiziksel karakteristiklerle tahminlenmesi bu bağlamda kritik bir öneme sahiptir. Bununla birlikte maske performansı ve koruyuculuğu açısından bakteriyel veya viral filtrasyon verimliliği ve partikül tutma kapasitesinin önemi tartışılmaz olup, ileriki çalışmalar maskelerin konfor özellikleri, nefes alabilirlik ve nefes alma direnci gibi filtrasyon özelliklerinin birlikte incelenerek tahminlenmesini ve maskelerin uzun süre kullanımının maske performansı ve koruyuculuğu üzerindeki etkilerinin analizini, optimum kullanım süresinin belirlenmesini içerebilir. Gelecekte sürdürülebilir maske üretim yöntemleriyle, enerji tasarrufu ve çevresel etkiler göz önünde bulundurularak; geri dönüşüm, biyobozunur liflerin

kullanımına yönelik çalışmalar yapılabilir. Bakteriyel filtrasyonun yanı sıra ergonomik ve duyuşal özelliklerin geliştirildiğı, maske katmanlarına çeşitli nanopartiküllerin katkılандığı, yeni geliştirilen lif çeşitlerinin kullanıldığı inovatif maskeler üretilebilir. Bakteri ve virüs maruziyet durumunun takibine yönelik yapay zekâ sistemleriyle entegre edilmiş maskeler üzerine de çalışmalar gerçekleştirileceğı öngörülmektedir. Bu sayede hem sürdürülebilir hem kullanıcılara üst seviyede koruma ve konfor özellikleri sağlayan multifonksiyonel tıbbi tekstil ürünlerinin geliştirileceğı tahmin edilmektedir.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiğı Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Akça, B. (2023). *COVID 19 Pandemi Sürecinde Kullanımı Artan Tıbbi Maskelerin Yapısal Olarak İncelenmesi ve Karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Akca, C., and Katı, M. İ. (2023). Investigation of the relationship between the structural properties and air, water drop and particle permeability of different masks available in the market. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 19(4), 373-380.
- Al-Hassan, A. A. and Norziah, M. H. (2012). Starch–gelatin edible films: Water vapor permeability and mechanical properties as affected by plasticizers. *Food Hydrocolloids*, 26(1), 108-117.
- Angelova, R. A., Mijorski, S., Stankov, P., Sofronova, D., Velichkova, R., Simova, I., and Markov, D. (2024a). Numerical simulation of the air permeability of protective face masks. *AIP Conference Proceedings*, 3034(1), 020016.
- Angelova, R. A., Sofronova, D., Dimova, M., Sofronov, Y., Velichkova, R., Stankov, P., and Simova, I. (2024b). Heat transfer through protective face masks and respirators. *AIP Conference Proceedings*, 3034(1), 080003.
- Angelova, R. A., Velichkova, R., Sofronova, D., Markov, D., Dimova, M. and Simova, I., (2023, September). Air permeability of protective face masks. *2023 XXXIII International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)* (pp. 1-5). Sozopol, Bulgaria.
- Arora, S., and Majumdar, A. (2022). Face masks to fight against COVID-19 pandemics: A comprehensive review of materials, design, technology and product development. *Journal of Industrial Textiles*, 51(3_suppl), 3613S-3647S.
- ASTM E96/E96M-24a (2024). *Malzemelerin su buharı iletim oranının gravimetrik tayini için standart test yöntemleri*.

- ASTM UOP578-11 (2011). *Civa porozimetresi ile gözenekli malzemelerin otomatik gözenek hacmi ve gözenek boyutu dağılımı*.
- Aziz, U., Nor Affandi, N., Harun, A., Rahman, M., Indrie, L., and Bonnia, N. (2024). Facemask comfort enhancement with graphene oxide from recovered carbon waste tyres. *AUTEX Research Journal*, 24(1), 20230013.
- Bertuzzi, M. A., Vidaurre, E. C., Armada, M., and Gottifredi, J. C. (2007). Water vapor permeability of edible starch based films. *Journal of Food Engineering*, 80(3), 972-978.
- Bhattacharjee, S., Bahl, P., Chughtai, A. A., and MacIntyre, C. R. (2020). Last-resort strategies during mask shortages: Optimal design features of cloth masks and decontamination of disposable masks during the COVID-19 pandemic. *BMJ Open Respiratory Research*, 7(1), e000698.
- Celebioglu, A., Lawson, C. W., Hsiung, E. Z., Chowdhury, R., Altier, C., and Uyar, T. (2023). Antibacterial nanofibrous mat of pullulan/cinnamaldehyde-cyclodextrin inclusion complexes as a potential cloth mask layer with long-term storage stability and facile disposal property. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(30), 11269-11280.
- Celep, G., Yilmaz, F., and Tetik, G. D. (2022). Evaluation of some physical and tensile properties of commercial surgical masks. *Indian Journal of Fibre & Textile Research (IJFTR)*, 47(1), 125-130.
- Choudhury, A. K. R. (2017). 7-Repellent finishes, In A. K. R. Choudhury (Ed.), *Principles of Textile Finishing* (pp. 149-194). Woodhead Publishing Series in Textiles, United Kingdom: Woodhead Publishing.
- Chua, M. H., Cheng, W., Goh, S. S., Kong, J., Li, B., Lim, J. Y., and Loh, X. J. (2020). Face masks in the new COVID-19 normal: Materials, testing, and perspectives. *Research*, 7286735.
- Djeghdir, S., Peyron, A., Sarry, G., Leclerc, L., Kaouane, G., Verhoeven, P. O., and Pourchez, J. (2023). Filtration efficiency of medical and community face masks using viral and bacterial bioaerosols. *Scientific Reports*, 13, 7115.
- Epps, H. H., and Leonas, K. K. (2000). Pore size and air permeability of four nonwoven fabrics. *International Nonwovens Journal*, os-9(2), 1558925000OS-900215.
- Fadil, F., Affandi, N. D. N., Harun, A. M., and Alam, M. K. (2022). Improvement of moisture management properties of face masks using electrospun nanofiber filter insert. *Adsorption Science & Technology*, 2022, 9351778.
- Hamouda, T., Kafafy, H., Mashaly, H. M., and Aly, N. M. (2022). Breathability performance of antiviral cloth masks treated with silver nanoparticles for protection against COVID-19. *Journal of Industrial Textiles*, 51(9), 1494-1523.
- Han, Z., Wang, L., Liu, Y., Chan, T., Shi, Z., and Yu, M. (2023). How do three-layer surgical masks prevent SARS-CoV-2 aerosol transmission?. *Separation and Purification Technology*, 314, 123574.
- Kar, F., Fan, J., and Yu, W. (2007). Comparison of different test methods for the measurement of fabric or garment moisture transfer properties. *Measurement Science and Technology*, 18(7), 2033.
- Korkmaz, G., Kılınç, M., Razak, S. A., Ocak, M., Korkmaz, S., and Kut, Y. D. T. (2023). Comparison of the performance properties of spunlaid non-woven fabrics used as face mask, *The Journal of The Textile Institute*, 114(2), 250-256.
- Kulichenko, A. V. (2005). Theoretical analysis, calculation, and prediction of the air permeability of textiles. *Fibre Chemistry*, 37(5), 371-380.
- Lee, K. P., Yip, J., Kan, C. W., Chiou, J. C., and Yung, K. F. (2020). Reusable face masks as alternative for disposable medical masks: factors that affect their wear-comfort. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(18), 6623.
- Leonas, K. K., Jones, C. R., and Hall, D. (2003). The relationship of fabric properties and bacterial filtration efficiency for selected surgical face masks. *Journal of Textile and Apparel Technology and Management*, 3(2), 1-8.
- Li, Y., Wong, T., Chung, J., Guo, Y. P., Hu, J. Y., Guan, Y. T., Yao, L., Song, Q. W., and Newton, E. (2006), In vivo protective performance of N95 respirator and surgical facemask. *American Journal of Industrial Medicine*, 49(12), 1056-1065.
- McCullough, E. A., Kwon, M., and Shim, H. (2003). A comparison of standard methods for measuring water vapour permeability of fabrics. *Measurement Science and Technology*, 14(8), 1402-1408.
- Memon, H., Liao, S., Maryam, R., Patrucco, A., and Riccardi, C. (2024). Development of medical masks: performance, properties, and prospects. *Materials Advances*, 5(21), 8333-8350.
- Sekhar, S. C., Pabba, M., Tallam, A., Fatima, S., Butti, S. K., Vani, B., Sahu, N., and Sundergopal, S. (2023). Development of a reusable low-cost facemask with a recycled hydrophobic layer for preventive health care. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(13), 36325-36336.

- Sisodia, D., and Mittal, M. (2023). Optical microscopic methods for testing face mask efficacy for COVID-19. *Materials Today: Proceedings* (Article in press).
- Şevkan Macit, A. (2024). A study on multi-layered surgical masks performance: permeability, filtration efficiency and breathability. *Industria Textila*, 75(1), 57-65.
- Tarhan, Ö., and Şen R. (2022). Heat-denatured and alcalase-hydrolyzed protein films/coatings containing marjoram essential oil and thyme extract. *Food Bioscience*, 45, 101466.
- Tcharkhtchi, A., Abbasnezhad, N., Seydani, M. Z., Zirak, N., Farzaneh, S., and Shirinbayan, M. (2021). An overview of filtration efficiency through the masks: Mechanisms of the aerosols penetration. *Bioactive Materials*, 6(1), 106-122.
- Tharewal P. G., Landage S. M., and Wasif A. I. (2013). Application of nonwovens for air filtration. *International Journal of Advanced Research in IT and Engineering*, 2(2), 14-36.
- TS 391 EN ISO 9237 (1999). *Tekstil- Kumaşlarda hava geçirgenliğinin tayini*.
- Yang, A., Cai, L., Zhang, R., Wang, J., Hsu, P. C., Wang, H., Zhou, G., Xu, J. and Cui, Y. (2017). Thermal management in nanofiber-based face mask. *Nano Letters*, 17(6), 3506-3510.
- Wang, D., Sun, B. C., Wang, J. X., Zhou, Y. Y., Chen, Z. W., Fang, Y., and Chen, J. F. (2020). Can masks be reused after hot water decontamination during the COVID-19 pandemic?. *Engineering*, 6(10), 1115-1121.
- Zhang, Z., Ji, D., He, H., and Ramakrishna, S. (2021). Electrospun ultrafine fibers for advanced face masks. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 143, 100594.

Predicting Stroke Risk with Machine Learning and Hyperparameter Optimization

Burak ÖZKANAT¹, Evin ŞAHİN SADIK^{2*}

Abstract

Stroke is a serious medical condition that causes the death of brain cells due to insufficient blood flow due to blockage or rupture in the blood vessels leading to the brain. Stroke is the most common cause of death and disability in adults after heart attack and cancer, causing individuals to not only die but also live with permanent disabilities. In this study, 12 features and 7 different machine learning methods belonging to 5100 individuals in an open-source dataset were used to predict stroke risk. Hyperparameter optimization was applied to increase the performance of machine learning methods and the best parameters were selected. When the results were examined, the random forest algorithm was able to detect the risk of stroke with an accuracy of 96.98%, which is higher than other studies in literature. This study discusses the effective use of machine learning algorithms to predict stroke risk and efforts to improve model performance. The results obtained may help in more accurate determination of stroke risk and taking preventive measures.

Keywords: Classification, Hyperparameter optimization, Stroke, Machine learning.

Makine Öğrenimi ve Hiperparametre Optimizasyonu ile İnme Riskinin Tahmin Edilmesi

Öz

İnme, beyne giden damarlarda meydana gelen tıkanma veya yırtılma sonucu yetersiz kan akışıyla beyin hücrelerinin ölümüne neden olan ciddi bir tıbbi durumdur. İnme, bireylerin hayatını kaybetmesinin yanı sıra kalıcı sakatlıklarla yaşamlarını sürdürmelerine de yol açabilen erişkinlerde kalp krizi ve kanserden sonra en yaygın ölüm ve sakatlık sebebidir. Bu çalışma kapsamında, inme riskini tahmin etmek için açık kaynak bir veri setindeki 5100 bireye ait 12 öznitelik ve 7 farklı makine öğrenmesi yöntemi kullanılmıştır. Makine öğrenmesi yöntemlerinin performansını arttırmak için hiperparametre optimizasyonu uygulanmış ve en iyi parametreler seçilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde Rastgele orman algoritması ile literatürdeki diğer çalışmalara göre daha yüksek olan %96,98 oranında bir doğruluk ile inme riski tespiti yapılabilmektedir. Bu çalışmada, inme riskini tahmin etmek için makine öğrenimi algoritmalarının etkin kullanımı ve model performansını iyileştirmeye yönelik çabalar tartışılmaktadır. Elde edilen sonuçlar inme riskinin daha doğru belirlenmesine ve önleyici tedbirlerin alınmasına yardımcı olabilir.

Anahtar Kelimeler: Sınıflandırma, Hiperparametre optimizasyonu, İnme, Makine öğrenimi.

¹Kütahya Dumlupınar University, Electrical and Electronics Engineering Department, Kütahya, Turkey, burak.ozkanat0@ogr.dpu.edu.tr

²Kütahya Dumlupınar University, Electrical and Electronics Engineering Department, Kütahya, Turkey, evin.sahin@dpu.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Introduction

Stroke is a life-threatening condition that can cause loss or deterioration of brain functions as a result of sudden interruption of blood circulation to the brain or leakage of blood to an area of the brain (Katan & Luft, 2018). Stroke risk factors include hypertension, high cholesterol, diabetes, obesity, smoking, sedentary lifestyle and family history of stroke (Xia et al., 2019). Stroke remains one of the leading causes of death and disability worldwide, and the risk of stroke is predicted to continue to increase over the next decade and beyond. Approximately 17 million people in the world and 140 thousand people in our country have a stroke every year. According to the current Turkish Statistical Institute (TUIK) report, 33.4% of the 565,594 people who died in 2021 died due to circulatory system diseases, and 18.9% of this rate consisted of deaths due to cerebrovascular diseases (TUIK, 2021). The report published by the European Stroke Organization (ESO) and the European Stroke Alliance for Europe (SAFE) draws attention to the 780 thousand new stroke cases in Europe annually. This number is expected to be around 4 million 630 thousand in 2035 (SAFE, 2019). The rate of recovery and permanent damage after a stroke may vary depending on factors such as the individual's stroke type, severity, effectiveness of early interventions and suitability of the rehabilitation program. After a stroke, some patients may experience permanent disorders such as speech disorders, swallowing disorders, memory and cognitive activity disorders, depression, anxiety, paralysis or movement disorders (Delpont et al., 2018). In order to minimize post-stroke damage, it is necessary to pay attention to factors such as healthy nutrition, keeping diabetes and cholesterol under control, managing stress, keeping blood pressure under control, and not smoking and drinking alcohol (Marsh & Keyrouz, 2010; Pandian et al., 2018).

Nowadays, artificial intelligence techniques have begun to be used in addition to traditional methods in detecting strokes and monitoring the parameters that cause strokes. These methods can help predict the risk of stroke more effectively and enable preventive measures to be taken. Because machine learning algorithms are effective at analyzing large data sets, they can help determine individuals' risk of stroke by combining specific risk factors and clinical data to predict stroke risk, such as hypertension, high cholesterol, diabetes, and personal health data.

In this article, various machine learning algorithms used to predict stroke risk, as well as hyperparameter optimization and studies to improve model performance, are also discussed. These studies may allow a more precise determination of stroke risk and early preventive measures. In the remainder of the study, studies in literature on this subject have been examined, and in the next section, dataset, signal preprocessing, data balancing, data division, classification algorithms, and evaluation metrics are given under the title of material method. The results of the classification

algorithms are shown in the results section. The results were evaluated and discussed in the conclusion and evaluation section.

2. Related Works

In recent years, machine learning (ML) methods have been widely used in disease prediction. To date, various algorithms including Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), Logistic Regression (LR), Decision Tree (DT), K-Nearest Neighbors (KNN), Naive Bayes (NB) and Artificial Neural Networks (ANN) have been applied to publicly available stroke datasets for early diagnosis in stroke prediction.

For example, Tazin et al. (Tazin et al., 2021) used RF, DT, Voting Classifier (VC), and LR on a dataset of 5,110 individuals, reporting the highest accuracy of 96% with RF. Sailasya & Kumari (Sailasya & Kumari, 2021) tested six different algorithms (LR, DT, RF, KNN, SVM, NB) on the same dataset and achieved 82% accuracy with NB. Similarly, Imran et al. (Imran et al., 2022) employed DT, RF, and AdaBoost and reached 95% accuracy with both DT and RF

Emon et al. (Emon et al., 2020) implemented models like SGD, GBC, XGB, and Weighted Voting (WV), achieving 97% accuracy with the WV method. Singh et al. (Singh et al., 2022) also reported 95% accuracy using XGB. Additionally, Kansadub et al. (Kansadub et al., 2015) applied DT, NB, and ANN to over 68,000 records, obtaining 75% with DT and 74% with ANN. In their work on predicting modified Rankin Scale (mRS) scores, Monteiro et al. (Monteiro et al., 2018) compared LR, DT, SVM, RF, and XGB algorithms, reporting 93% accuracy with RF. Likewise, Nwosu et al. (Nwosu et al., 2019) evaluated DT, RF, and ANN on a large dataset of 29,072 individuals, reporting 74–75% accuracy with RF and ANN.

In addition to traditional models, some researchers have explored more advanced techniques such as Penalized Logistic Regression, Stochastic Gradient Boosting (SGB), and Decentralized SGD (DSGD), reaching accuracies up to 97% (Arslan et al., 2016; Penafiel et al., 2020). These studies demonstrate that both traditional and ensemble-based models can be effective in stroke classification when properly tuned and trained on representative data.

Building upon the findings of previous studies, this research not only evaluates seven commonly used ML algorithms LR, KNN, NB, SVM, DT, RF and ANN on the same open-source dataset, but also integrates advanced techniques such as hyperparameter optimization and class balancing. Unlike many earlier works that applied default model settings, this study employs GridSearchCV and Keras-Tuner to fine-tune parameters and utilizes SMOTE to mitigate class imbalance. As a result, the RF model achieves 96.98% accuracy, surpassing or matching the highest performance reported in related studies.

These findings reinforce the importance of data preparation and model tuning and demonstrate that even commonly used algorithms can outperform more complex approaches when properly optimized.

3. Materials and Methods

In this section, the study's basic building blocks and methodological approaches are discussed. The general scheme of the study is given in Figure 1. Under this section, details of the data set used are given first. The data preprocessing section explains the processes carried out to prepare the data for analysis, cleaning, standardization and attribute processes. The methods used to eliminate class imbalances in balancing the data are mentioned. In the classification algorithms section, algorithms used for stroke prediction and their features are discussed. The data evaluation section explains cross-validation, hyperparameter optimization, evaluation metrics and steps for comparing algorithms.

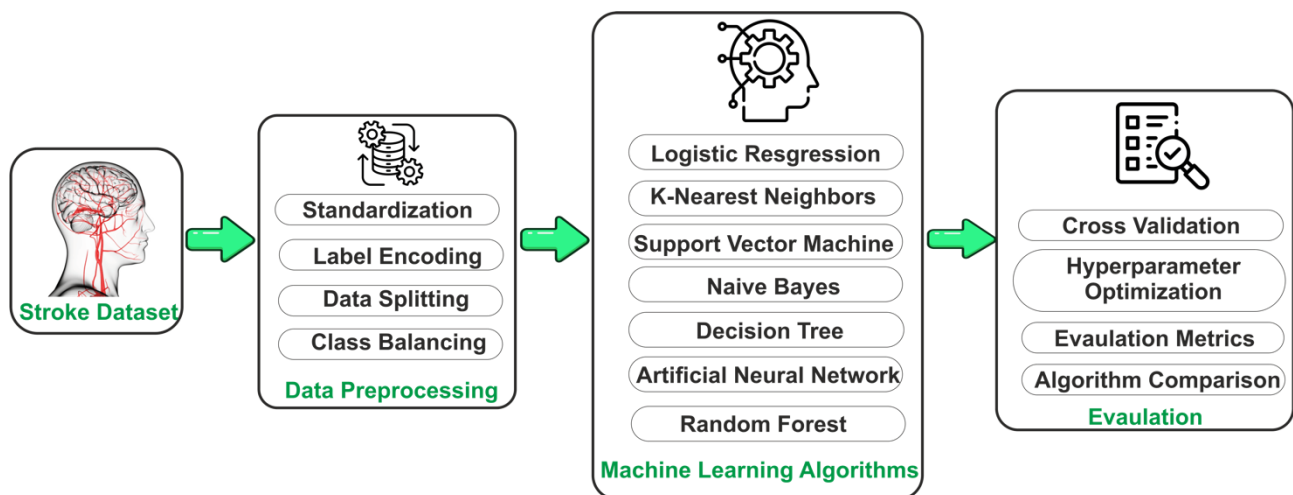


Figure 1. Overview of the stroke prediction workflow using machine learning algorithms.

3.1. Dataset

The dataset used in the study is an open-source stroke dataset obtained from Kaggle (Federico Soriano Palacios, n.d.). There are 12 features of 5100 people in the data set. ID, age, hypertension, heart disease, and stroke status are expressed as integers among these attributes. The other five features, gender, marriage status, type of work, housing type and smoking status, are categorical variables. Finally, the average glucose level and body mass index are decimal numbers.

3.2. Data Preprocessing

The data was subjected to some processes in the signal preprocessing step to make it suitable for machine learning algorithms. Five of the ten attributes in the data set (age, hypertension status, heart disease status, average glucose level and body mass index) contain numerical values. The other five features (gender, marriage status, type of work, housing type and smoking status) consist of categorical variables. For machine learning algorithms to process, categorical variables were converted to numerical values by label encoding. The missing data of 201 people in the body mass index attribute in the data set was filled with the median value. Additionally, one person whose gender was unclear was removed from the dataset.

3.3. Addressing Class Imbalance with SMOTE

The data used in machine learning algorithms training creates the problem of overfitting when the data of one class is more than the other classes when teaching two or multiple classes. In other words, while the model learns the data of one class very well, it ignores the other class or classes. This situation is also present in our data set. In our data set, the number of patients who had a stroke is 249, while the number of individuals who did not have a stroke is 4860. In order to prevent overfitting, synthetic data was generated using the SMOTE method (Chawla et al., 2002). The data of people who had a stroke were synthetically generated to create additional samples, and the dataset was balanced. The original version of the data is shown in Figure 2 a) and the version after the SMOTE process is shown in Figure 2 b).

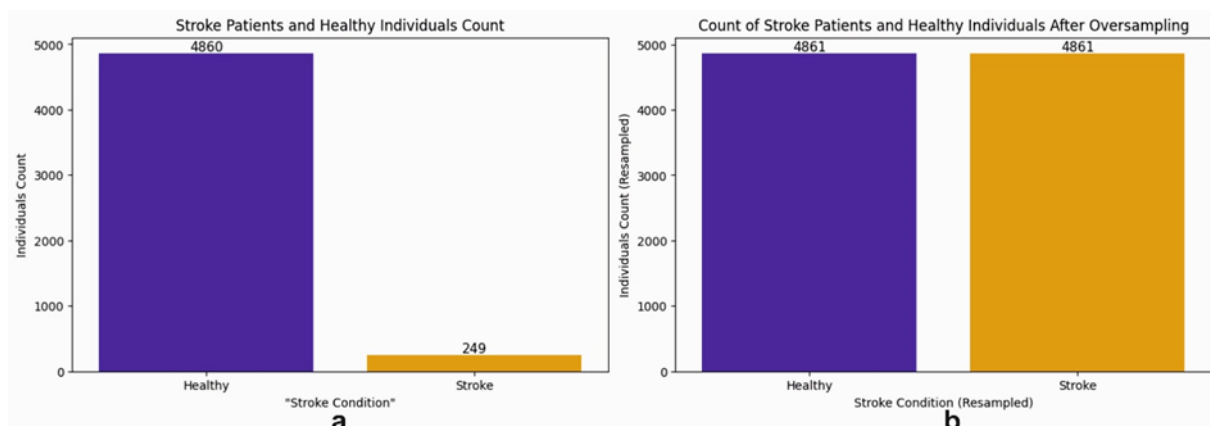


Figure 2. a) Original Data Set b) SMOTE applied dataset.

3.4. Data Splitting

Once you have completed data preprocessing and balanced the unbalanced dataset using oversampling, the next step is to build the model. The data was split into two sets for training the model: 67% for training data and 33% for test data. After the split, various classification algorithms were applied to train the model. The classification algorithms used for this purpose include LR, KNN, SVM, NB, DT, RF, and ANN.

3.5. Classification Algorithms

Within the scope of the study, the stroke dataset was evaluated using seven different machine learning methods, including LR, KNN, SVM, NB, DT, ANN and RF. The working logic of these algorithms is given below, one by one.

Logistic Regression: A statistical model is used to classify two-class (binary) data. It is an algorithm that gives the results as probabilities and classifies them according to a specific threshold value (Hosmer Jr et al., 2013).

K-Nearest Neighbour : Determines the class of an example based on the classes of its k closest neighbours. It selects the most common class of the k nearest neighbours based on the distance criterion (usually Euclidean distance) (Zhang & Zhou, 2007).

Support Vector Machine: Separates classes from each other by creating a hyperplane in the feature space. It aims to provide the best separation by maximizing the margin (distance) between two classes (Joachims, 1998).

Naïve Bayes: It is a probabilistic classification algorithm that assumes that each feature is independent of each other when calculating class probabilities (Rish, 2001).

Decision Tree: A decision tree is a model that is classified by a series of decision rules. It reaches the result by dividing the data set into branches according to certain features' values. It is an algorithm that resembles human thought and decision-making (Quinlan, 1987).

Artificial Neural Network: It contains many processing units (neurons) arranged in layers inspired by the functionality of neurons in the human brain. Can model complex patterns and data relationships (Agatonovic-Kustrin & Beresford, 2000).

Random Forest: It is an ensemble learning model with many decision trees. Each tree is trained with its own samples, feature subsets, and votes for classification (Pal, 2005).

3.6. Hyperparameter Optimization

Hyperparameter optimization is the selection of the best parameters that will increase performance in machine learning models. There are different hyperparameter optimization methods. In this study, the GridSearchCV method (Shamrat et al., 2020) in the Scikit-learn library was applied to machine learning methods. Using this method, all possible hyperparameter combinations were investigated and the parameters that provided the best model performance were determined. For the artificial neural network, optimum hyperparameters were determined using Keras-tuner (O'Malley et al., 2019). This process helped us fine-tune the model and achieve the best possible performance by adjusting hyperparameters such as the number of layers, neurons, and learning rate.

3.7. Classification Metrics

Within the scope of the study, the data were trained with 6 different machine learning algorithms and artificial neural networks and these trained models were compared using seven accuracy metrics. These metrics are: confusion matrix, accuracy, precision, recall, F1 score, ROC curve and Area Under the Curve (AUC) value. The equations for accuracy, precision, recall and F1 score metrics are given in Equation 1, Equation 2, Equations 3 and 4, respectively. The TP expression given in the equations represents true positive data, TN expression represents true negative data, FP expression represents false positive data and FN expression represents false negative data.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

$$F1\ Score = 2 \times \frac{Precision + Recall}{Precision \times Recall} \quad (4)$$

4. Findings and Discussion

In this section, the performance of all machine learning models applied to the stroke dataset is evaluated based on multiple classification metrics, including accuracy, precision, recall, F1-score, and AUC. The analysis is supported with visual representations such as confusion matrices and ROC curves, followed by a comparative discussion of model results and their alignment with previous studies. Table 1 summarizes the performance metrics and optimal hyperparameters for each algorithm. As observed, the RF algorithm achieved the highest accuracy 96.98% and AUC 0.993, followed closely by KNN and DT. On the other hand, NB and LR showed relatively lower performance, particularly in accuracy and AUC, yet they remain valuable due to their simplicity and interpretability. These results form the basis for the detailed model-by-model analysis, confusion matrix interpretation, and ROC curve discussion presented in the subsequent sections.

Table 1. Performance evaluation metrics of all algorithms.

Algorithms	Hyperparameter	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score	AUC
NB	model: BernoulliNB	0.7828	0.7519	0.7985	0.7745	0.866
LR	C: 0.001, penalty: l2, solver: lbfgs	0.7946	0.7626	0.8120	0.7865	0.873
ANN	layers: [1024, 512, 1536], learning_rate: 0.001, epochs: 10	0.9156	0.9234	0.9080	0.9156	0.976
SVM	C: 100, kernel: rbf	0.9299	0.9372	0.9227	0.9299	0.981
DT	criterion: gini, max_depth: None, min_samples_leaf: 2, min_samples_split: 5	0.9386	0.9416	0.9351	0.9383	0.951
KNN	metric: Manhattan, n_neighbors: 1	0.9430	0.9246	0.9590	0.9415	0.942
RF	criterion: gini, max_depth: None, min_samples_leaf: 1, min_samples_split: 2, n_estimators: 200	0.9698	0.9837	0.9835	0.9700	0.993

The performance differences between models can be partially attributed to the hyperparameter optimization process applied using GridSearchCV and Keras-Tuner. For example, the Random Forest model achieved its best results with 200 estimators, ‘gini’ criterion, and default maximum depth, which allowed the model to grow deeper trees and capture complex patterns. Similarly, the ANN model performed well with a deep architecture consisting of three layers ([1024, 512, 1536] units) and a learning rate of 0.001, which balanced convergence speed and accuracy. On the other hand, SVM’s strong performance (AUC = 0.981) can be linked to its high ‘C’ value (100) and RBF kernel, which are known to enhance class separation in non-linear spaces. These results show that proper hyperparameter tuning significantly enhances model accuracy and generalization capability.

When the training and test data of the study are evaluated and the confusion matrices given in Figure 3 are examined, it is possible to see that the matrices are listed from least successful to most successful. NB algorithm results in Figure 3 a) LR in Figure 3 b) SVM in Figure 3 c) DT in Figure 3

d) KNN in Figure 3 e) RF in Figure 3 f) Confusion matrices of the algorithms are given. These matrices clearly present the success level of each classification algorithm and show in detail the number of correct and incorrect classifications of each algorithm. Confusion matrices provide a valuable guide to understanding which classes algorithms predict better or worse. In this way, it can be understood which algorithm requires more improvement in which classes.

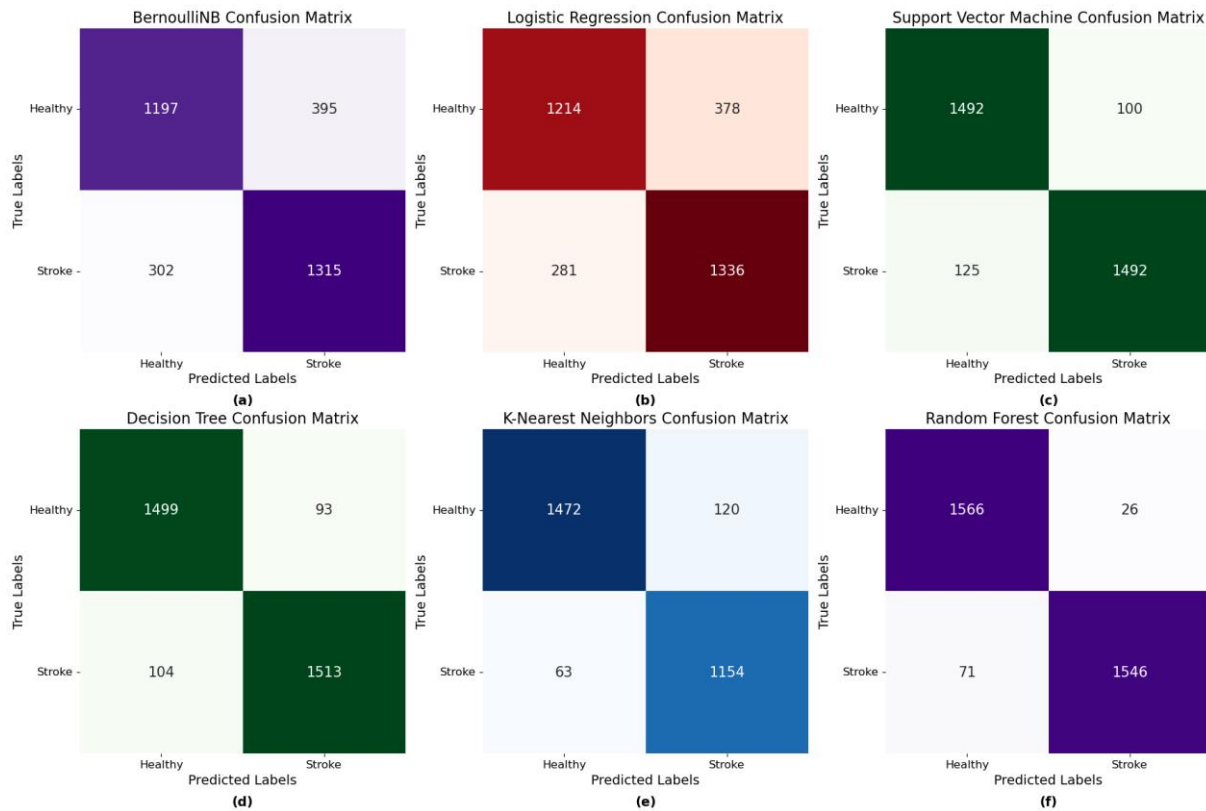


Figure 3. Confusion matrices for each machine learning a) NB b) LR c) SVM d) DT e) KNN f) RF.

The confusion matrix of the data evaluated in the artificial neural network algorithm is given in Figure 4. This matrix visualizes the classification performance of the ANN algorithm in detail. Each cell contains actual and predicted class labels, indicating the number of correct and incorrect algorithm classifications.

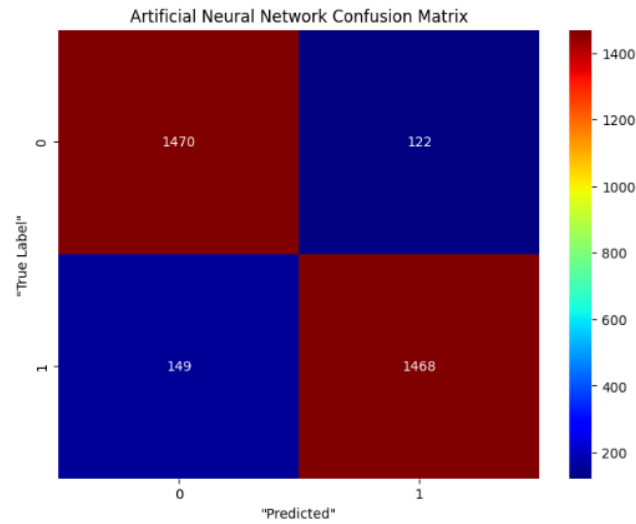


Figure 4. Confusion Matrix of ANN.

These quantitative results are further supported by confusion matrices and ROC curves, which visually illustrate the classification capabilities of each model. The ROC curve showing the classification results is given in Figure 5. The RF algorithm has the highest accuracy and AUC values and stands out in classification performance. This can be achieved thanks to the RF algorithm's ability to capture complex structures and interactions in the data set. Precision and recall values are also quite high, indicating that the algorithm's ability to identify and predict the positive class accurately is strong. F1-Score is the harmonic mean of precision and recall values, and a high F1-Score indicates that the model has a balanced performance in both metrics.

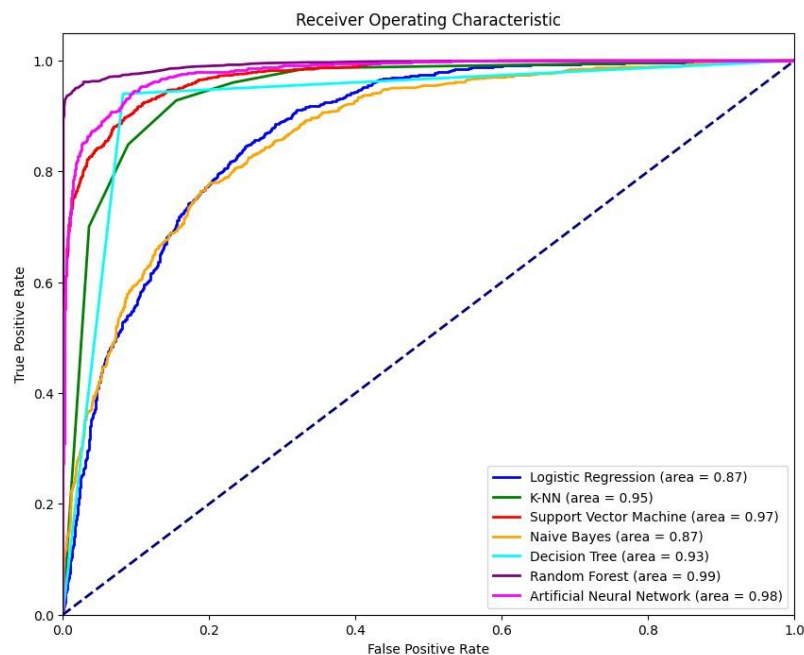


Figure 5. ROC curves of all machine learning algorithms used in the study.

When other algorithms are examined, it is seen that ANN and KNN algorithms exhibit high performance, especially the recall value of the KNN algorithm exhibits high performance. This shows that KNN effectively recognizes examples that need to be classified as positive without missing them. The decision tree and SVM algorithm also attract attention with its high AUC value and show that the classification ability of the model is strong. Although simpler algorithms such as NB and LR appear to perform relatively poorly in accuracy and other metrics, these methods can be advantageous in terms of speed and interpretability.

To evaluate the effectiveness of the proposed study, its results were compared with those reported in the literature using similar or identical stroke datasets. Table 2 presents a summary of machine learning algorithms used in previous studies and their corresponding highest accuracy rates. These studies vary in terms of dataset composition and classification methods, including the Kaggle stroke dataset also used in this research. By analyzing Table 2, the relative success of different approaches can be observed, and it becomes evident that the proposed model outperforms others in terms of classification accuracy.

Table 2. Comparison of stroke classification results.

Reference	Method	Dataset	Highest Accuracy (%)
Sergio Penafiel et al., (Penafiel et al., 2020)	DSGD, RF, MLP, SVM, K-NN, NB	Original Dataset non-stroke: 22140, stroke: 5736	DSGD:85, RF:84, MLP:82, SVM:82, K- NN:79, NB:61
Tahia Tazin et al., (Tazin et al., 2021)	RF, DT, VC, LR	Stroke Prediction Dataset (Kaggle) stroke: 249 non-stroke: 4861	RF:96, DT:94, VC:91, LR:79
Gangavarapu Sailasya et al., (Sailasya & Kumari, 2021)	LR, DT, RF, K-NN, SVM, NB	Stroke Prediction Dataset (Kaggle) stroke: 249 non-stroke: 4861	LR:78 DT:66, RF:73, K-NN:80, SVM:80, NB:82
Bahtiar Imran et al., (Imran et al., 2022)	DT, RF, AdaBoost	Stroke Prediction Dataset (Kaggle) stroke: 249 non-stroke: 4861	DT:95, RF: 95, AdaBoost: 91.7
Utkrisht Singh et al., (Singh et al., 2022)	XGB, RF, SVM, AdaBoost, DT	Stroke Prediction Dataset (Kaggle) stroke: 249 non-stroke: 4861	XGB:95, RF:92, SVM:91, AdaBoost:89, DT:87
Ting Zuo et al., (Zuo et al., 2024)	Dueling DQN	Stroke screening data from a hospital in China	Dueling DQN: 89
Muhammad Raihan Firmansyah et al., (Firmansyah & Astuti, 2024)	KNN	Stroke Prediction Dataset (Kaggle)	KNN: 95

Alomoush et al., (Alomoush et al., 2024)	Modified Mountain Gazelle Optimizer (mMGO) + kNN	Stroke Prediction Dataset (Kaggle)	mMGO + kNN : 95
This study	NB, LR, ANN, KNN, SVM, DT, RF	Stroke Prediction Dataset (Kaggle) stroke: 249 non-stroke: 4861	NB:78, LR:80, ANN:92, KNN:94, SVM:92, DT:93, RF:96.8

As seen in Table 2, the RF model in this study achieved an accuracy of 96.98%, which surpasses the results of comparable studies such as Tazin et al. (2021), who reported 96%, and Singh et al. (2022), who achieved 95% with XGBoost. While the differences may appear small numerically, they are significant in medical classification tasks where even marginal improvements can enhance early detection and prevention.

This performance improvement is largely related to the hyperparameter optimization strategies implemented in this study. In particular, using GridSearchCV for tree-based models and Keras-Tuner for ANN enabled more effective learning by adapting the models to the dataset features. Using SMOTE helped address the class imbalance issue in the stroke dataset and improved the generalization ability of the models.

The ANN model in this study outperformed similar models in previous studies such as Kansadub et al. (Kansadub et al., 2015), showing an accuracy of 91.56% compared to their accuracy of 74%. This improvement is likely due to the optimized learning parameters. Overall, the findings show that the performance of traditional algorithms can be significantly improved through model design, parameter tuning, and data preprocessing strategies.

5. Conclusions and Recommendations

This work explored that the stroke risk prediction can be significantly improved through the application of ML algorithms combined with hyperparameter optimization. Among the models evaluated, the RF algorithm outperformed others with the highest accuracy (96.98%) and AUC (0.993), indicating its strong capability to model complex relationships within the data. The success of RF can be largely attributed to hyperparameter fine-tuning, which enhanced its ability to generalize and reduced the risk of overfitting.

Hyperparameter optimization played a crucial role across all models tested. Classical algorithms like LR and NB, although initially less accurate, showed competitive performance after proper tuning, suggesting that model selection alone is not sufficient how the model is trained matters

equally. GridSearchCV and Keras-Tuner allowed the identification of optimal configurations for each algorithm, resulting in noticeable improvements in classification metrics, particularly for RF, KNN, and ANN.

One of the key strengths of this study is the integration of preprocessing strategies such as class balancing using SMOTE, which contributed to more stable and fair evaluations. Furthermore, unlike many previous studies that relied on default hyperparameters, this research emphasized systematic tuning, which appears to be a decisive factor in achieving state-of-the-art results.

Despite promising outcomes, this study has certain limitations. The dataset used is imbalanced and relatively small in stroke-positive samples, even after SMOTE adjustment. In real-world clinical environments, datasets may contain noise, missing values, or more complex patterns, which could affect model performance. Therefore, it is recommended that future studies validate these results using larger, more diverse datasets possibly from hospital records or multi-institutional databases.

Additionally, while the RF model performed best, it is computationally more expensive than simpler models. In time-critical medical applications, lighter models like LR or NB with acceptable accuracy and faster inference times might be more appropriate. This highlights the importance of aligning model selection with specific application requirements.

In future studies, researchers can focus on ensemble or hybrid models that combine the strengths of multiple classifiers to improve model performance. They can also use more advanced hyperparameter optimization techniques such as Bayesian optimization or genetic algorithms to further improve model accuracy. The use of deep learning architectures such as Convolutional Neural Networks (CNNs) or Long Short-Term Memory (LSTM) networks can also be useful, especially when working with temporal or image-based stroke indicators.

In conclusion, this study confirms that both traditional and advanced ML models can effectively predict stroke risk when appropriately tuned and supported by data preprocessing strategies. The findings offer a valuable foundation for developing real-time, ML-based stroke screening systems in healthcare settings.

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

- Agatonovic-Kustrin, S., & Beresford, R. (2000). Basic concepts of artificial neural network (ANN) modeling and its application in pharmaceutical research. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 22(5), 717–727.
- Alomoush, W., Houssein, E. H., Alrosan, A., Abd-Alrazaq, A., Alweshah, M., & Alshinwan, M. (2024). Joint opposite selection enhanced Mountain Gazelle Optimizer for brain stroke classification. *Evolutionary Intelligence*, 17(4), 2865–2883.
- Arslan, A. K., Colak, C., & Sarihan, M. E. (2016). Different medical data mining approaches based prediction of ischemic stroke. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 130, 87–92.
- Chawla, N. V., Bowyer, K. W., Hall, L. O., & Kegelmeyer, W. P. (2002). SMOTE: synthetic minority over-sampling technique. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 16, 321–357.
- Delpont, B., Blanc, C., Osseby, G. V., Hervieu-Bègue, M., Giroud, M., & Béjot, Y. (2018). Pain after stroke: a review. *Revue Neurologique*, 174(10), 671–674.
- Emon, M. U., Keya, M. S., Meghla, T. I., Rahman, M. M., Al Mamun, M. S., & Kaiser, M. S. (2020). Performance analysis of machine learning approaches in stroke prediction. *2020 4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, 1464–1469.
- Federico Soriano Palacios. (n.d.). *Stroke Prediction Dataset*. <https://www.kaggle.com/datasets/fedesoriano/stroke-prediction-dataset?resource=download>
- Firmansyah, M. R., & Astuti, Y. P. (2024). Stroke classification comparison with KNN through standardization and normalization techniques. *Advance Sustainable Science, Engineering and Technology*, 6(1), 2401012.
- Hosmer Jr, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. X. (2013). *Applied logistic regression* (Vol. 398). John Wiley & Sons.
- Imran, B., Wahyudi, E., Subki, A., Salman, S., & Yani, A. (2022). Classification of stroke patients using data mining with adaboost, decision tree and random forest models. *ILKOM Jurnal Ilmiah*, 14(3), 218–228.
- Joachims, T. (1998). *Making large-scale SVM learning practical*. Technical report.
- Kansadub, T., Thammaboosadee, S., Kiattisin, S., & Jalayondeja, C. (2015). Stroke risk prediction model based on demographic data. *2015 8th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON)*, 1–3.
- Katan, M., & Luft, A. (2018). Global burden of stroke. *Seminars in Neurology*, 38(02), 208–211.
- Marsh, J. D., & Keyrouz, S. G. (2010). Stroke prevention and treatment. *Journal of the American College of Cardiology*, 56(9), 683–691.
- Monteiro, M., Fonseca, A. C., Freitas, A. T., e Melo, T. P., Francisco, A. P., Ferro, J. M., & Oliveira, A. L. (2018). Using machine learning to improve the prediction of functional outcome in ischemic stroke patients. *IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics*, 15(6), 1953–1959.
- Nwosu, C. S., Dev, S., Bhardwaj, P., Veeravalli, B., & John, D. (2019). Predicting stroke from electronic health records. *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 5704–5707.
- O'Malley, T., Bursztein, E., Long, J., Chollet, F., Jin, H., & Invernizzi, L. (2019). Keras tuner. Retrieved May, 21, 2020.
- Pal, M. (2005). Random forest classifier for remote sensing classification. *International Journal of Remote Sensing*, 26(1), 217–222.
- Pandian, J. D., Gall, S. L., Kate, M. P., Silva, G. S., Akinyemi, R. O., Ovbiagele, B. I., Lavados, P. M., Gandhi, D. B. C., & Thrift, A. G. (2018). Prevention of stroke: a global perspective. *The Lancet*, 392(10154), 1269–1278.
- Penafiel, S., Baloian, N., Sanson, H., & Pino, J. A. (2020). Predicting stroke risk with an interpretable classifier. *IEEE Access*, 9, 1154–1166.
- Quinlan, J. R. (1987). Simplifying decision trees. *International Journal of Man-Machine Studies*, 27(3), 221–

234.

- Rish, I. (2001). An empirical study of the naive Bayes classifier. *IJCAI 2001 Workshop on Empirical Methods in Artificial Intelligence*, 3(22), 41–46.
- SAFE. (2019). *Avrupa İnme Faaliyet Planı Raporu*. <https://actionplan.eso-stroke.org/wp-content/uploads/2021/03/SAP-Turkish-s.pdf>
- Sailasya, G., & Kumari, G. L. A. (2021). Analyzing the performance of stroke prediction using ML classification algorithms. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(6).
- Shamrat, F. M. J. M., Ghosh, P., Sadek, M. H., Kazi, M. A., & Shultana, S. (2020). Implementation of machine learning algorithms to detect the prognosis rate of kidney disease. *2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON)*, 1–7.
- Singh, U., Jena, A. K., & Haque, M. T. (2022). An Ensemble Learning Approach and Analysis for Stroke Prediction Dataset. *2022 International Conference on Advancements in Smart, Secure and Intelligent Computing (ASSIC)*, 1–8.
- Tazin, T., Alam, M. N., Dola, N. N., Bari, M. S., Bourouis, S., & Monirujjaman Khan, M. (2021). Stroke disease detection and prediction using robust learning approaches. *Journal of Healthcare Engineering*, 2021.
- TUİK. (2021). *Ölüm ve Ölüm Nedeni İstatistikleri*.
- Xia, X., Yue, W., Chao, B., Li, M., Cao, L., Wang, L., Shen, Y., & Li, X. (2019). Prevalence and risk factors of stroke in the elderly in Northern China: data from the National Stroke Screening Survey. *Journal of Neurology*, 266, 1449–1458.
- Zhang, M.-L., & Zhou, Z.-H. (2007). ML-KNN: A lazy learning approach to multi-label learning. *Pattern Recognition*, 40(7), 2038–2048.
- Zuo, T., Li, F., Zhang, X., Hu, F., Huang, L., & Jia, W. (2024). Stroke classification based on deep reinforcement learning over stroke screening imbalanced data. *Computers and Electrical Engineering*, 114, 109069.

Nutrient Content of Some Wild Plants Growing in Köyceğiz Special Environmental Protection Area (Sandras Mountain)

Mahmut YILDIZTEKİN^{1*}, Kenan AKBAŞ², A. Levent TUNA³, Ömer VAROL⁴

Abstract

In this study, the mineral content of some plant species widely distributed around the Chromium mine area in the Sandras Mountain Gökçeova region and the physical and chemical properties of the soils were investigated. The soil samples were analyzed for its pH, CaCO₃, EC, sand, organic matter and Macro- micro elements while shoots and roots were determined for its macro and micro elements. The results obtained from soil analysis showed suitable amount of CaCO₃ and EC. e.g. When the nitrogen content of the soil samples was examined, it was determined that the values were close to each other. While some micro elements were discovered to be over the limit levels, there was no physical evidence that these high concentrations were altering the metabolism of the plants included in the study. This situation can be considered as a potential indicator that these plants, which are scattered in nature, are genetically tolerant.

Keywords: Mineral nutrients, Chromium deposit, Sandras mountain, Wild plants.

Köyceğiz Özel Çevre Koruma Bölgesi'nde (Sandras Dağı) Yetişen Bazı Yabani Bitkilerin Besin İçerikleri

Öz

Bu çalışmada Sandras Dağı Gökçeova bölgesindeki Krom madeni çevresinde yaygın olarak yayılış gösteren bazı bitki türlerinin mineral içerikleri ile toprakların fiziksel ve kimyasal özellikleri araştırılmıştır. Toprak örneklerinde pH, CaCO₃, EC, kum, organik madde ve makro-mikro elementler açısından analiz edilirken, sürgün ve köklerde ise makro ve mikro element kapsamı belirlenmiştir. Toprak analizlerinden CaCO₃ ve EC seviyeleri uygun değerlerde olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, toprak numunelerinin nitrojen içerikleri incelendiğinde değerlerin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Genel anlamda bazı mikro elementlerin sınır değerlerin üzerinde bulunmasına rağmen çalışmaya dâhil edilen bitkilerin bu yüksek değerlerden metabolik olarak etkilendiklerine dair fiziksel bir kanıt bulunamamıştır. Bu durum doğada dağınık olarak bulunan bu bitkilerin genetik olarak toleranslı olduğunun potansiyel bir göstergesi olarak değerlendirilebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Mineral besinler, Krom yatağı, Sandras dağı, Yabani bitkiler.

^{1,2}Muğla Sıtkı Koçman University, Köyceğiz Vocational School, Department of Herbal and Animal Production, Muğla, Turkey, mahmutyildiztekin@mu.edu.tr kenanakbas@mu.edu.tr

^{3,4}Muğla Sıtkı Koçman University, Faculty of Science, Department of Biology, Muğla, Turkey, tuna@mu.edu.tr ovarol@mu.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Introduction

Turkey possesses a wide variety of vegetation types and a very rich floristic structure due to its geographical location, geomorphological structure, diverse soil types and the influence of different climatic characteristics. Muğla plays an important role in this diversity (Özhatay et al., 2005).

Sandras Mountain, part of the Köyceğiz district of Muğla, is located in southwest Anatolia, in the southwest of the Gölgeli Mountains parallel to the borders of the Aegean and Mediterranean regions. This mountain mass is bordered by the Namnam stream from the west, Dalaman stream and its branches from the east, Köyceğiz depression from the south and the Beyağaç (Eskere) depression from the north. Sandras mountain, which rises to 2294 meters (Çiçekbaba Hill) inside these boundaries, is one of the highest mountains in southwest Anatolia (Doğan, 2011). As a natural result of its geographical location, topography and wide climatic and geomorphological diversity, Sandras mountain is rich in habitat types and this is reflected in the number of plant species and the endemism rate. A large part of Sandras mountain and its near surroundings consists of serpentine rocks (Minerals in this group, which are rich in Magnesium and Silicon). Regions with serpentine bedrock are not very suitable for plant growth. However, certain plants (mostly endemic taxa) demonstrate very good growth and adaptation in such areas. This feature is defined as geological isolation. The fact that Sandras mountain possesses different vegetation series, ranges from 80 m to 2294 m in height and consists of mostly serpentine bedrock leads to high plant diversity, which also affects the endemism rate. According to the findings of the literature study, there is a tight association between endemism rate and rock structure (Anacker, 2014).

In the literature, there are many studies on the nutrient content, ecological adaptations, and distribution of endemic species of wild plants in various regions of Turkey (Yıldırım et al., 2001; Kibar & Temel, 2016; Güzelsoy et al., 2017). However, studies conducted in Muğla province, particularly in areas with high floristic richness such as Sandras Mountain, are quite limited. In this context, this study aims to fill a significant gap in the literature by providing new data on the nutrient contents, ecological requirements, and distribution maps of plant species specific to the region. Additionally, the study aims to provide deeper insights into the adaptation processes of endemic plants and their impacts on ecosystems, offering scientifically-based recommendations for the conservation of biological diversity.

As a result, this study not only makes important contributions to academic literature but also provides valuable data for nature conservation and ecosystem management.

2. Materials and Methods

The locations of the plants were identified by preliminary assessments of the Flora of Turkey book (Davis, 1965-1988), and the review of previous flora studies conducted within Muğla and other related sources. Table 1 lists the plant species studied in this study.

Table 1. Survey study at Ağla (Yayla) neighborhood.

Name of Species	Local name	Code name	Herbarium Number
<i>Ebenus pisidica</i> Hub.-Mor. & Reese	Dirmil Morgeveni	Ep	K.A. 1866-a
<i>Genista anatolica</i> Boiss.	Kandaş Dikeni	Ga	K.A. 1865-a
<i>Thymus longicaulis</i> subsp. <i>chaubardii</i> (Rchb.f.) Jalas	Dağ Kekiği	Tl	K.A. 1862-a
<i>Asperula tenuifolia</i> Boiss.	Sipil Belumu	At	K.A. 1864-a

The plant specimens were collected on June 2024 from open areas within *Pinus nigra* (Black Pine) forests in the vicinity of Gökçeova pond, located on Sandras mounth (Köyceğiz, Muğla). The plant identifications were performed by Kenan Akbaş. The herbarium numbers of the specimens are as follows: *Ebenus pisidica* Hub.-Mor. & Reese (K.A.1866-a), *Genista anatolica* Boiss. (K.A.1865-a), *Thymus longicaulis* subsp. *chaubardii* (Rchb.f.) Jalas (K.A.1862-a), and *Asperula tenuifolia* Boiss. (K.A.1864-a).

Some of the samples collected were appropriately pressed and left to dry to be identified, while the information specified for each plant species was noted and analyzed in the Biology Department Herbarium. Soil samples were collected for each plant species from the locations where the plants were harvested in addition to shoot and root samples from the 4 specified plant taxa. The soil and plant samples collected were subjected to pre-treatment in the laboratory.

2.1. Chemical and physical analysis

Soil samples were collected from five separate places to represent the field before being blended, transported to the laboratory, pre-treated, and prepared for analysis. CaCO₃ was determined calcimetrically, the amount of organic matter was determined using the method proposed by Walkley

and Black (1934), available Zn, Fe, Mn and Cu that can be obtained from the soil samples was determined in accordance with the DTPA (diethylene-triamine-penta-acetic-acid) (Lindsay and Norvell, 1978) method while available K, Ca and Mg content (Thomas, 1982) and available Na content (Knudsen et al., 1982) were determined using the extracts obtained with 1 N neutral ammonium acetate solution through an atomic absorption spectrophotometer. Furthermore, the water-soluble phosphorus level was evaluated colorimetrically with a spectrophotometer using Bingham (1982). The B available for the plant in the soil was created based on the 0.01 M manitol+CaCl₂ extract method while the amount of B was determined using the ICP-AES (Kacar and Fox, 1966), and pH and EC were determined through a combined pH-EC meter. Total nitrogen determination in the soil samples was made by Kjeldahl method.

The plant samples were cleaned with tap water before being rinsed with huge amounts of pure water. The samples were then dried for 72 hours on a stove at 70 °C. The dried plant samples were crushed, and 1 g was extracted before decomposing in a muffle furnace at 550 °C for 6 hours. The ash obtained after the decomposition process was extracted with 2 N of warm HCl and pure water, and the macro elements P, K, Ca and Mg and the micro elements Fe, Cu, Mn, Zn and B contents were determined using the ICP-OES with separate wavelengths specific to each element Kacar (1992). The Kjeldahl method was used to determine total nitrogen in plant samples. The data were presented in the form of % and ppm in dry matter.

3. Findings and Discussion

3.1. Analysis results of soil samples

Table 2 shows the physical and chemical properties of soil samples gathered as a result of studies conducted in soils with naturally occurring plant species.

Table 2. Data on the analysis results of soil samples

Parameters		Ep	Ga	Tl	At
EC (dS/m)		0.57	0.35	0.36	0.87
pH		5.74	5.66	5.72	5.86
CaCO ₃ (%)		0.33	0.15	0.31	0.15
Organic Matter (%)		2.35	1.55	1.94	2.13
Nitrogen (%)		0.12	0.08	0.10	0.11
Macro Elements (ppm)	Phosphorus (P)	13.00	6.00	11.00	4.00
	Potassium (K)	76.03	85.82	79.00	168.56
	Calcium (Ca)	1155	807	821	1711
	Magnesium (Mg)	925	361	380	666
	Sodium (Na)	15.32	19.15	58.99	31.15
	Iron (Fe)	88.58	53.31	62.03	66.65
	Copper (Cu)	1.20	0.16	0.06	0.48
	Manganese (Mn)	151.58	115.81	131.88	111.42
	Zinc (Zn)	1.87	0.46	0.57	0.74
	Boron (B)	24.50	41.40	17.40	18.80

*Ep: *Ebenus pisidica*; Ga: *Genista anatolica*; Tl: *Thymus longicaulis*; At: *Asperula tenuifolia*

The pH of soil samples has a considerable impact on metal extraction (Ettler et al., 2007). pH of the soils is usually mildly acidic, averaging 5.75. When the soil qualities of the locations were investigated in general, research revealed that loamy soils with low pH, salt (EC), and CaCO₃ concentration are preferable. In the study conducted by Allison and Moodie (1965) on CaCO₃ content in soils, the proposed range of values was reported as 5.1–15.0%. Based on this range of values, it was determined that all of the soils examined had very low CaCO₃ content. Moreover, the soils belonging to the species had the lowest organic matter content in the species *Genista anatolica* with 1.55% and the highest in the species *Ebenus pisidica* with 2.35% (Table 2). In the study conducted by Walkley and Black (1934) it was reported that the range of organic matter values in soils should be between 2.01% and 3.0%. Based on this, it was determined that approximately 25% of the sampled soils contained low organic matter and 75% contained sufficient organic matter. It was determined that the EC values of the soil samples taken from the study site ranged between 0.35 and 0.87 dS/m (Table 2). In the study conducted by Waters et al. (1972), the proposed range of EC values was reported as 1.51-2.25 dS/m. Compared with these values, it was revealed through analyses that the soils tested were within the 100% salt-free class and that there was no problem in relation to salinity or total soluble salt concentration in water.

In terms of total nitrogen content, the soil sample of the *Genista anatolica* species had the lowest value (0.08%), whereas the soil sample of the *Ebenus pispida* species had the highest (0.12%) (Table 2). In the study conducted by FAO (1990), the proposed N limit values for the soils were reported as 0.15-0.40%. Accordingly, almost all of the soils examined in this study were found to be low in nitrogen level.

In terms of other soil macro element levels in general, it was established that the plant-available phosphorus (P) value was between 4.00 and 13.00 ppm (Table 2). Olsen et al. (1954) indicated that P limit values should be between 7.1 and 25 ppm in their investigation. In this case, it was determined that 50% of the soil samples had low levels of phosphorus content while the phosphorus % contents of the other soil samples were at sufficient levels. Phosphorus deficiency may not always be related to the lack of plant-available phosphorus in the soil. In general, P deficiency in plants is significantly affected by various soil properties such as pH, temperature, humidity and the type and amount of other nutrient elements. Therefore, symptoms of P deficiency may sometimes be observed even in plants grown in soils with sufficient levels of phosphorus for normal plant growth (Kacar and Katkat, 2007).

The plant-available potassium (K) content of the soil samples was found to be within the range of 76.03-168.56 ppm. Anonymous (1980) reported the desired limit values in soil as 201-250 ppm. However, it was reported that all of the soil samples had low levels of K. In soils, plant-available potassium constitutes a very small part of the overall potassium. It is acknowledged that a large part of the total potassium in soil is not available to plants (Kacar and Katkat, 1998). The highest plant-available calcium (Ca) content was determined as 1711 ppm while the lowest was found to be 807 ppm. Anonymous (1980) stated that the intended limit values for soil were 1439-3862 ppm. However, it was found that most of the soil samples had low levels of Ca. Calcium, an essential mineral for plant growth and development, plays a critical role in cell growth and development, membrane permeability adjustment, and supplying plants with quality-related characteristics (Marschner, 1995). According to Anonymous (1980), Mg limit values were determined to be between 116-475 ppm, and when the Mg concentration in our soil samples was evaluated, half of it was found to be sufficient, while the other half was found to be high. This may result from the interaction between the elements and seasonal differences. Various literature evaluations found that the most notable interactions occur between K, Ca, and Mg, and that an excess of one of these elements in a plant can lead to a lack of another (Kacar, 1995).

Despite the fact that micro elements are mineral components that have a wide range of biochemical roles in living organisms and are essential for human health, large amounts can be hazardous (Gürel, 2014). The recommended sufficient values of the micro elements in the soils examined were reported as Cu (0.2 ppm), Mn (1 ppm), Fe (2-4.5 ppm), Zn (0.5-1.0 ppm) (Follett and

Lindsay, 1970) and B (0.5-1.0 ppm) (Bray, 1948). When the micro element contents of the soils are evaluated based on the reference ranges, it was determined that the Fe and B contents are very high while the Mn and Zn values are at suitable or low levels. In terms of the Cu content of the soils, it was found that approximately 75% of the soils had suitable or low levels of Cu while 25% had high levels (Table 2).

3.2. Analysis results of plant samples

Table 3 shows the macro-micro element contents of the shoot and root parts based on the plant species.

Table 3. Macro and micro element contents of the shoot and root parts of the species

Parameters		Plant parts	Ep	Ga	Tl	At
Macro Elements (%)	Nitrogen (N)	Shoot	2.83	2.68	2.75	2.00
		Root	1.63	1.97	2.29	1.66
	Phosphorus (P)	Shoot	0.35	0.40	0.18	0.18
		Root	0.12	0.11	0.19	0.16
	Potassium (K)	Shoot	0.84	1.52	0.69	1.93
		Root	0.27	0.65	0.32	0.99
	Calcium (Ca)	Shoot	1.46	0.86	0.28	1.16
		Root	1.09	0.98	0.36	0.63
	Magnesium (Mg)	Shoot	0.50	0.59	0.37	0.32
		Root	0.25	0.71	0.28	0.37
Micro Elements (ppm)	Iron (Fe)	Shoot	3541	2580	4099	2839
		Root	2734	4335	4150	4821
	Manganese (Mn)	Shoot	427	67	96	242
		Root	247	112	323	310
	Zinc (Zn)	Shoot	20.03	31.88	75.68	57.10
		Root	13.19	34.43	35.32	38.11
	Copper (Cu)	Shoot	5.60	14.33	3.88	17.72
		Root	7.43	16.18	10.75	11.26
	Boron (B)	Shoot	34.36	28.23	10.64	22.63
		Root	13.73	33.89	10.35	10.72

*Ep: *Ebenus pisdica*; Ga: *Genista anatolica*; Tl: *Thymus longicaulis*; At: *Asperula tenuifolia*

When the plant shoot nitrogen content in Table 3 is showed, it is observed that the highest value is in the *Ebenus pisdica* shoots with 2.83% while the lowest value is in the *Asperula tenuifolia* shoots with 2.00%. When the average Nitrogen (N) content of the plant roots was examined, it was found to be 1.89% (Table 3). Korkmaz et al. (2014) reported that the nitrogen contents of certain medicinal and aromatic plants (*Laurus nobilis* L., *Matricaria chamomilla* L., *Urtica dioica* L., *Achillea millefolium* L., *Hypericum perforatum* L. and *Tilia cordata* L.) varied between 1.41% and 3.78%. In another study, the nitrogen content of 29 medicinal and aromatic plants widely consumed in Greece was reported to vary between 0.14% and 3.24% (Karagiannidis et al., 2010). The literature findings support the nitrogen contents obtained in the present study.

The shoot P content determined in the present study varies between 0.18-0.40% while the root P content varies between 0.11% and 0.19% (Table 3). There are studies on the subject in the literature. For example, the phosphorus content of medicinal and aromatic plant samples (papaya, lime flower, nettle, St. John's wort, laurel, and yarrow) obtained from spice shops in certain provinces in Northern Turkey was found to range between 0.11% and 0.54% (Korkmaz et al., 2014) while this value was reported to vary between 0.07% and 0.34% in certain *Lamiaceae* family members (thyme, rosemary, lavender, sage, basil, and oregano) (Kara et al., 2014). When the P contents identified in the present study are examined, it is observed that they are in line with the aforementioned literature findings.

The average amount of potassium in the shoots and roots of the plants analyzed was found to be 1.25% and 0.56%, respectively (Table 3). Looking at the literature, it was reported that the amount of potassium in *Malva sylvestris* L., *Cichorium intybus* L., *Asparagus acutifolius* L., *Chenopodium album* L., *Foeniculum vulgare* Mill., *Papaver rhoeas* L. and *Polygonum aviculare* L., which are consumed as vegetables in the Aegean Region, varied between 0.29-0.58 mg/100g (Kaya et al., 2004). In another study, it was found that the potassium content of the wild plants (*Arum dioscoridis* L., *Chenopodium album* L., *Malva sylvestris* L., *Mentha longifolia* (L.) L., *Nasturtium officinale* R.Br., *Papaver rhoeas* L., *Polygonum aviculare* L., *Rumex acetosella* L., *Sinapis alba* L. and *Urtica dioica* L.) in the Kilis and Gaziantep regions mainly varied between 2.5-3% (Akgünlü, 2012). There are similar and/or contradictory findings between the data obtained in the present study and the aforementioned studies in the literature.

In our study, the highest Ca content among the shoot and root parts of the plant species included in the present study was found in *Ebenus pisidica* (Table 3). In another study conducted, the calcium content of the *Gentiana olivieri* Griseb. plant was found to be 0.33% at the lowest and 1.76% at the highest in the stems of the plant (Koca et al., 2008). In another study, it was observed that the calcium content of the *Arnebia densiflora* (Nordm.) Ledeb. plant varied between 0.92 and 3.76% in different parts of the plant (Koca et al., 2009).

In this study, the magnesium (Mg) contents determined in the shoots and roots of the examined plant species showed significant differences between species. Notably, *Genista anatolica* had the highest Mg content, measured at 0.59% in shoots and 0.71% in roots. In contrast, the lowest Mg contents were recorded in *Asperula tenuifolia* (0.32%) and *Ebenus pisidica* (0.25%). These results reveal the influence of species-specific physiological traits on mineral accumulation. In a similar study reported in the literature, the mineral nutrient contents of certain aromatic plants grown in the Muğla region were analyzed, and the lowest Mg content was found in *Cichorium intybus* (0.18%), while the highest was recorded in *Brassica oleracea* var. *capitata* (0.58%) (Atabey et al., 2020). In both studies, it was observed that Mg accumulation varies considerably among different species,

which is associated not only with the plants' genetic makeup but also with environmental factors such as soil structure, pH, organic matter content, and climatic conditions.

When we look at the microelement contents of plant samples in our study, the average iron contents of the shoot and root parts of the plants analyzed were determined as 3265 and 4010 ppm, respectively. The highest Fe content was detected in the shoot of the *Thymus longicaulis* plant with 4099 ppm (0.41%) (Table 3). Generally, the trace amount of iron that plants can contain is 50-250 ppm. In our study, considering the limit values, it was observed that the Fe content in the shoots and roots of all the plants examined was well above the recommended values. In the study conducted by Turan (2014), the heavy metal and mineral nutrient element contents in the shoots and stems of certain medicinal plants and the iron contents measured in *Symphytum officinale* L. (849 ppm), *Viscum album* L. (728 ppm), *Salvia officinalis* L. (549 ppm), *Plantago lanceolata* L. (448 ppm), *Alkanna tinctoria* Tausch (358 ppm), *Artemisia dracunculus* Ledeb (318 ppm), *Ruta graveolens* L. (306 ppm) and *Taraxacum officinale* Cass (242 ppm) are in parallel with the results of the present study.

When the Mn contents of the species included in the present study are examined, the highest value is observed in the shoot part of *Ebenus pisidica* (427 ppm) while the lowest value was found in the shoot part of *Genista anatolica* (67 ppm) (Table 3). In one study, Meraler (2010) reported that the manganese content of the *Prunus mahaleb* varied based on the parts examined. The highest Mn content was found in the shoots of the *Prunus mahaleb* (36 ppm) while the lowest value (8 ppm) was found in the resin part. As a result of a previous study on certain plants that are grown naturally and consumed as vegetables in Ordu and its surroundings, it was reported that the manganese content of the plants ranged between 21.40 and 77.40 ppm (Şekeroğlu et al., 2005).

The average zinc content of the shoot and root parts of the plants was determined as 46.17 ppm and 30.26 ppm, respectively. The highest value was observed in the shoot part of *Thymus longicaulis* with 75.68 ppm (Table 3). In a previous study examining certain biological and ecological properties of *Origanum* (Lamiaceae) species endemic to Antalya, the annual average zinc content of the shoots of *Origanum* species; *O. solymicum*, *O. husnucanbaseri*, *O. bilgeri* and *O. minutiflorum* was reported as 14.5 ppm, 31.75 ppm, 38.75 ppm and 32.75 ppm, respectively (Ünal, 2003). As a result of the study, it was seen that the zinc contents of plants except *Ebenus pisidica* were compatible with the literature.

The highest Cu content in the shoot and root parts of the plants was found in *Asperula tenuifolia* (17.72 ppm) and *Genista anatolica* (16.80 ppm), respectively, while the lowest was found in *Thymus longicaulis* (3.88 ppm) and *Ebenus pisidica* (7.43 ppm) (Table 3). In a previous study, examining 30 medicinal plants in Kayseri (Tokatlıoğlu, 2012), it was reported that there was a very wide variation between 3.32 (*Ziziphus zizyphus* (L.) Meikle.) and 30.2 µg/g (*Ocimum basilicum* L.) in terms of copper content. A similar result was obtained by Şekeroğlu et al. (2006) for the copper content of

wild plants (*Trachystemon orientalis* (L.) G.Don, *Smilax excelsa* L., *Ornithogalum umbellatum* L., *Amaranthus retroflexus* L., *Aegopodium podagraria* L. and *Urtica dioica* L.) consumed as vegetables in Ordu, and the copper contents were reported to range between 2.7 and 21.3 ppm. As a result of the study, it was seen that the copper contents of the plants were at similar values to the literature.

Boron is an element that is required by plants in trace amounts, and its deficiency and toxicity limits are very close to each other (Brown et al., 2002). When the B content of the plant species included in the present study are examined, it is observed that the highest value is found in the shoot part of *Genista anatolica* (34.36 ppm) while the lowest value is detected in the root part of *Thymus longicaulis* (10.35 ppm) (Table 3). In one study, the highest average boron contents in the stem/rhizome plants examined were observed in *Verbascum* sp. (13.156 ppm), *Valeriana officinalis* L. (11.2 ppm) and *Arcticum lappa* L. (7.9 ppm) while the lowest values were found in *Alpinia officinarum* Hance (0.95 ppm), *Curcuma longa* L. (0.7 ppm) and *Zingiber officinale* Roscoe (0.6 ppm) (Çolak, 2014).

4. Conclusions and Recommendations

In general, this study has provided important preliminary findings regarding the nutritional status of naturally occurring plant species distributed across the Sandras Mountain region. Although the nutritional element profiles (especially micro and trace elements) of the sampled plants have been revealed, it is evident that further detailed biochemical and toxicological analyses are required. In particular, the detection of certain microelements at concentrations above internationally accepted threshold values in some edible and medicinal plants raises critical concerns both for ecological health and potential human consumption.

Interestingly, despite the elevated concentrations of these elements, no visible signs of physiological or morphological stress were observed in the sampled plants. This may suggest that these species possess inherent tolerance mechanisms or are genetically adapted to the metal-rich edaphic conditions of the serpentine-dominated landscapes, possibly via enhanced antioxidant capacity or selective ion sequestration. Similar findings have been reported in serpentine-endemic taxa, which often exhibit metallophyte characteristics (Anacker, 2014; Rajakaruna, 2004).

When the results of the current study are compared with similar studies conducted in metal-rich soils—such as those by Yıldırım et al. (2001), Kibar and Temel (2016), and Güzelsoy et al. (2017)—it becomes apparent that the elemental accumulation patterns observed in this region are consistent with previously reported data.

Acknowledgements

This study was supported by Muğla Sıtkı Koçman University Research Support and Funding Office with the project number "17/161".

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

- Akgünlü, S. B. (2012). *Kilis ve Gaziantep yöresinde tüketilen bazı yabani sebzelerin mineral içerikleri ve mikrobiyolojik analizleri*. (Yayınlanmamış yüksek lisans tezi). Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Kilis, Türkiye. (in Turkish).
- Allison, L.E. and Moodie, C.D. (1965). Carbonate. In: C.A. Black et al (ed.) *Methods of Soil Analysis, Part 2. Agronomy.*, Am. Soc. Of Agron., Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Anacker, B. L. (2014). The nature of serpentine endemism. *American Journal of Botany*, 101(2), 219–224.
- Anonymous, (1980). Soil and Plant Testing and Analysis as a Basis of Fertilizer Recommendations. *FAO Soils Bulletin*, 38(2), 95.
- Atabey, S., Yıldıztekin, M., Tuna, A. L., Nazlı, O., Ceylan, O., and Yokaş, İ. (2020). Mineral Nutrition Status of Some Aromatic Plants Grown in Muğla, Determination of Their Soil Characteristics and Uses in the Kitchen. *International Journal of Secondary Metabolite*, 7(3), 213-228.
- Bingham, F. T. (1982). *Boron methods of soil analysis. Part 2* (2nd ed.). American Society of Agronomy, Inc., Wisconsin USA.
- Bray, R. H. (1948). *Correlation of soils tests with crop response to added fertilizers and with fertilizer requirement, Diagnostic Techniques for Soils and Crops, Chap. 2.* (ed. H.B. Kitehen), Pub. Amer. Potash Inst, Washington D.C.
- Brown, P. H., Bellaloui, N., Wimmer, M. A., Bassil, E. S., Ruiz, J., Hu, H., Pfeiffer, H., Dannel, F., and Römhelt, V. (2002). Boron in Plant Biology. *Plant Biol.*, 4, 205-223.
- Çolak, C. (2014). *Ülkemizde geleneksel tedavilerde yaygın olarak kullanılan bazı tıbbi bitkilerin kök ve çiçeklerinde ağır metal ve mineral besin element tayini*. (Yayınlanmamış yüksek lisans tezi). Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye (in Turkish).
- Davis, P.H. (1965-1988). *Flora of Turkey and East Aegean Islands*. Vol.1-10, Edinburgh University Press, Edinburgh.
- Doğan, M. (2011). Sandras Dağında Buzullaşma ve Buzul Şekilleri. *Ege Coğrafya Dergisi*, 20(1), 29-52 (in Turkish).

- Ettler, V., Mihaljević, M., Šebek, O., and Grygar, T. (2007). Assessment of Single Extractions for The Determination of Mobile Forms of Metals in Highly Polluted Soils and Sediments Analytical and Thermodynamic Approaches. *Analytica Chimica Acta*, 602(1), 131-140.
- FAO, (1990). Micronutrient, *Assesment and the Country Level: An International Study*. FAO Soils Bulletin 63, Rome, Italy.
- Follett, R.H. and Lindsay, W. L. (1970). *Profile distribution of zinc, iron, manganese, and copper in Colorado soils*. Colorado State University, Agricultural Experiment Station, Department of Agronomy, Colorado, USA.
- Gürel, M. (2014). *Türkiye'de yaygın olarak kullanılan bazı tıbbi bitkilerin besin elementi içeriklerinin belirlenmesi*. (Yayınlanmamış yüksek lisans tezi). Ordu Üniversitesi, Ordu, Türkiye (in Turkish).
- Güzelsoy, N. A., Ucurum, Ö., Tokat, E., Tan, A., Tugrul Ay, S., and Özbek, K. (2017). Nutritional Properties of Some Wild Edible Plant Species in Turkey. *ANADOLU Ege Tarımsal Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 27(2), 39-45.
- Kacar, B. (1992). *Yapraktan Bardağa Çay*. T.C. Ziraat Bankası Kültür Yayınları, Ankara (in Turkish).
- Kacar, B. (1995). *Toprak Analizleri, Bitki ve Toprağın Kimyasal Analizleri: III*. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Eğitim Araştırma ve Geliştirme Vakfı Yayınları, Ankara (in Turkish).
- Kacar, B. and Fox, R. L. (1966). *Boron status of some Turkish soils*. University of Ankara, Yearbook of the faculty of Agriculture, Ankara.
- Kacar, B. and Katkat, A. V. (2007). *Bitki Besleme*. Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- Kacar, B. and Katkat, V. (1998). *Bitki besleme*. Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı Yayını, Bursa.
- Kara, Ş. M., Özkutlu, F., Açıkgöz, M. A., Batı, E. 2014. Essential macro nutrient profiles of selected medicinal and aromatic plants from the family of Lamiaceae. *8th Conference on Medicinal and Aromatic Plants of Southeast European Countries* May 19-22, 2014, Durres, Albania.
- Karagiannidis, N., Panou-Filotheou, H., Lazarib, D., Ipsilantisc, I., and Karagiannidoub, C. (2010). Essential Oil Content and Composition, Nutrient and Mycorrhizal Status of Some Aromatic and Medicinal Plants of Northern Greece. *Nat Prod Commun*, 5(5), 823-830.
- Kaya, İ., İncekara, N., and Nemli, Y. (2004). Ege Bölgesi'nde Sebze Olarak Tüketilen Yabani Kuşkonmaz, Sirken, Yabani Hindiba, Rezene, Gelincik, Çobandeğneği ve Ebegümecinin Bazı Kimyasal Analizleri. *Yüzyüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 14(1), 1-6 (in Turkish).
- Kıbar, B., and Temel, S. (2016). Evaluation of Mineral Composition of Some Wild Edible Plants Growing in the Eastern Anatolia Region Grasslands of Turkey and Consumed as Vegetable. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(1), 56-66.
- Knudsen, D., Peterson, G. A. and Pratt, P. F. (1982). *Lithium, sodium and potassium, Methods of soil analysis* (2nd ed.). Part 2, Chemical and Microbiological Properties, Agronomy Monograph No:9. ASA-SSSA, Madison-Wisconsin, USA.
- Koca, U., Özkutlu, F., and Şekeroğlu, N. (2009). Mineral Composition of *Arnebia densiflora* (Nordm.) Ledeb. an Endemic Medicinal Plant from Turkey. *Biomed*, 4, 51-56.
- Koca, U., Şekeroğlu, N. and Özkutlu, F. (2008). Mineral composition of *Gentiana olivieri* Griseb. (Gentianaceae): A traditional remedy for diabetes in Turkey. *Proceedings of Fifth conference on Medicinal and Aromatic Plants of Southeast European Countries 5th CMAPSEEC*. Brno-Czech Republic.
- Korkmaz, K., Kara, Ş. M., Akgün, M. and Batı, E. (2014). Determination of macro nutrient status in some medicinal plants from the Black Sea provinces in Turkey. *8th Conference on Medicinal and Aromatic Plants of Southeast European Countries*, Durres-Albania.
- Lindsay, W.L., and Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese and Copper. *Soil Sci Soc Am J*, 42, 421-428.
- Marschner, H. (1995). *Mineral nutrition of higher plants* (2nd ed.). Academic Press, San Diego.
- Meraler, S. A. (2010). *Mahlep (Prunus mahaleb L.)'in bitki kısımlarında mineral bileşiminin belirlenmesi*. (Yayınlanmamış yüksek lisans tezi). Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Kilis, Türkiye (in Turkish).
- Olsen, S. mR., Cole, C. V., Watanabe, F. S. and Dean, L. A. (1954). *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate*. U.S. Dep. of Agric. Circ.
- Özhatay, N., Byfield, A. ve Atay, S. (2005). *Türkiye'nin 122 Önemli Bitki Alanı*. Türkiye Doğal Hayatı Koruma Vakfı, ISBN 975-92433-7-7 (in Turkish).
- Rajakaruna, N. (2004). The Edaphic Factor in the Origin of Plant Species. *International Geology Review*, 46(5), 471-478.

- Şekeroğlu, N., Özkutlu, F., Deveci, M., Dede, Ö. and Yılmaz, N. (2005). Ordu ve yöresinde sebze olarak tüketilen bazı yabancı bitkilerin besin değeri yönünden incelenmesi. *Türkiye VI. Tarla Bitkileri Kongresi*, (s. 523-528), Antalya. (in Turkish).
- Şekeroğlu, N., Özkutlu, F., Deveci, M., Dede, Ö., and Yılmaz, N. (2006). Evaluation of Some Wild Plants Aspect of Their Nutritional Values Used as Vegetable in Eastern Black Sea Region of Turkey. *Asian J Plant Sci*, 5(2), 185-189.
- Thomas, G.W. (1982). Exchangeable cations. In: Methods of Soil Analysis. *Agronomy*, 9, 154-157.
- Tokatlıoğlu, Ş. (2012). Determination of Trace Elements in Commonly Consumed Medicinal Herbs By ICP-MS and Multivariate Analysis. *Food Chem*, 134, 2504-2508.
- Turan, Ş. (2014). *Ülkemizde yaygın olarak kullanılan bazı tıbbi bitkilerin yapraklarında ağır metal mineral besin element içeriklerinin tayini*. (Yayınlanmamış yüksek lisans tezi). Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye (in Turkish).
- Ünal, O. (2003). *Antalya için endemik olan Origanum L. (Lamiaceae) türlerinin bazı biyolojik ve ekolojik özelliklerinin saptanması üzerinde araştırmalar*. (Yayınlanmamış doktora tezi). Akdeniz Üniversitesi, Antalya Türkiye (in Turkish).
- Walkley, A., and Black, I. A. (1934). An Examination of The Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and A Proposed Modification of The Chromic Acid Titration Method. *Soil Sci*, 37, 29-38.
- Waters, W.E., NeSmith, J., Geraldson, C.M., and Woltz, S.S. (1972). The Interpretation of Soluble Salt Tests and Soil Analysis by Different Produces. *Florida Flower Grower*, 9(4), 5.
- Yıldırım, E., Dursun, A., and Turan, M. (2001). Determination of the Nutrition Contents of the Wild Plants Used as Vegetables in Upper Çoruh Valley. *Turkish Journal of Botany*, 25(6), 367–371.

EMG Tabanlı MYO Kol Bandı ile Parmak Hareketlerinin Müzikal Etkileşim Performansına Etkisinin Araştırılması

Eda ÇETİN¹, İlayda KAYA², Kübra ERAT^{3*}, Pınar ONAY DURDU⁴

Öz

Giyilebilir sensörler ve kamera tabanlı cihazlar gibi modern teknolojiler, temassız müzik performanslarına olanak tanıyan Müzikal İfade için Yeni Arayüzler (MİYA) kapsamında olan çeşitli jest tabanlı kontrolörlerin geliştirilmesini sağlamıştır. Bu çalışma, MYO kol bandının MİYA bağlamındaki performansına odaklanmakta, özellikle kullanıcıların piyano ile fiziksel temas olmadan EMG sinyalleri aracılığıyla basit piyano parçaları çalmalarını sağlamaktadır. Piyano çalma sırasında kullanıcıların kol kaslarından EMG verileri toplanmış ve sınıflandırma için makine öğrenimi algoritmaları (SVM - Destek Vektör Makineleri, GB - Gradyan Güçlendirme ve RF - Rastgele Orman) kullanılmıştır. Sonuçlar, EMG sinyallerinin ön işleme sonrası GB algoritmasının %97,40 ile en yüksek doğruluğu elde ettiğini göstermiştir. Çalışmada elde edilen bulgular, MYO kol bandı gibi EMG tabanlı teknolojilerin etkileşimli müzik yapma deneyimini geliştirebileceğini ve doğrudan müzik performansına olanak sağlayabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: EMG, MYO kol bandı, Müzikal ifade için yeni arayüzler (MİYA), Makine öğrenmesi, Doğal etkileşim.

Investigating the Impact of Finger Movements on Musical Interaction Performance Using an EMG-Based MYO Armband

Abstract

Modern technologies such as wearable sensors and camera-based devices have enabled the development of a variety of gesture-based controllers that fall within the scope of New Interfaces for Musical Expression (NIMEs), enabling non-contact musical performances. This study focuses on the performance of the MYO armband in the context of NIMEs, specifically enabling users to play simple piano pieces through EMG signals without physical contact with the piano. EMG data was collected from the users' arm muscles during piano playing and machine learning algorithms (SVM - Support Vector Machine, GB - Gradient Boosting and RF - Random Forest) were used for classification. The results demonstrated that after preprocessing the EMG signals, the GB algorithm achieved the highest accuracy of 97.40% for classification. The findings of the study suggest that EMG-based technologies such as the MYO armband can enhance the interactive music-making experience and enable direct music performance.

Keywords: EMG, MYO armband, New interfaces for musical expression (NIME), Machine learning, Natural interaction.

^{1,2,4}Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye, edacetin2001ebru@gmail.com qkayailayda@gmail.com pinar.onaydurdu@kocaeli.edu.tr

³Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye, kubra.erat@kocaeli.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

İnsanlığın müzik alanına ilgisi milattan önceki yüzyıllara dayanmaktadır ve o dönemlerden itibaren müzik yapabilmek için çeşitli enstrümanlar icat etmişlerdir (URL-1). Günümüzde ise teknolojiadaki gelişmelerin de etkisiyle sanatçılar ve araştırmacılar, insanların bedensel hareketlerini müzik enstrümanlarının çalınmasında da kullanmaya ilgi duymaya başlamışlardır (Erdem ve ark., 2020). Yeni teknolojiler genellikle giyilebilir sensörler veya kamera tabanlı cihazlar ile nesnelerle fiziksel olarak etkileşime girmeden müzikal temassız performanslara olanak tanıyan jest tabanlı kontrol cihazlarının kullanılmasına olanak tanımaktadır. Bu cihazlar müzik alanında Dijital Müzik Enstrümanları (DME) (DMI- Digital Musical Instruments) (Miranda ve Wanderley, 2006) ya da Müzikal İfade için Yeni Arayüzler (MİYA) (NIME- New Interfaces for Musical Expression) (Jensenius ve Lyons, 2017) olarak nitelendirilmektedir. Bu konuda dikkate değer örnekler arasında Sanal Hava Gitarı (Karjalainen ve ark., 2006), Sanal Kayan Gitar (Pakarinen ve ark., 2008) ve kullanıcıların bir web kamerası önünde gitar çalmayı taklit etmelerine olanak tanıyan Google'ın Öğretilbilir Makinesi (URL-2) yer almaktadır.

Geleneksel bir enstrümanı çalarken, enstrümanın fiziksel sınırlarına uymak için kas gücü sarf etmek gerekir. Yüzyıllar süren tasarımın ardından, geleneksel enstrümanların yapısı, bazı genişletilmiş çalma teknikleri veya ek ekipman kullanımı dışında artık fazla yoruma açık değildir (Erdem ve ark., 2020). Buna ek olarak, her müzik aletinin çalma hareketleri insanlardaki biyolojik sinyalleri üreten kas hareketlerini içerdiğinden, MİYA'lar bu biyosinyalleri algılayabilecek teknolojilere dayalı olarak geliştirilebilir (Lee, 2017). Biyosinyallerin popüler örnekleri arasında beyinden alınan elektroensefalogram (EEG), deriden alınan galvanik deri tepkisi (GSR), kalpten alınan elektrokardiyogram (EKG) ve kastan ölçülen elektromiyogram (EMG) yer alır ve tüm bunlar arasında MİYA alanında EMG sinyallerinin yaygın olarak kullanılabildiği görülmektedir (Karolus ve ark., 2018; Donnarumma ve ark., 2013; Atau, 1993; Knapp ve Lusted, 1990).

EMG, kasların kasılması sırasında ortaya çıkan elektrik akımlarını ölçen biyomedikal bir sinyaldir (Reaz ve ark., 2006). Kullanıcının koluna EMG sensörleri takıldığında, bunlar eldeki ve parmaklardaki kasların nasıl hareket ettiğini algılayabilir (Kamen ve Kinesiology, 2004). EMG, sadece uzuvlarınızın nerede olduğunu takip etmekten ziyade; aynı zamanda bir şey yapmaya hazır olduğunuzda ve gerçekten yaptığınızda kaslarınızın nasıl çalıştığını da algılamayı sağlar (Tanaka ve Ortiz, 2017). Bununla birlikte gelişen teknoloji ile EMG sinyallerinden jest tanıma ve parmak ucu kuvvetine dayalı hassas hareket tanımanın birleştirilmesi bu alandaki önemli yeniliklerden biridir (Ni ve ark., 2024). Bu alandaki örneklerden biri olan EMG sensörleri ile müzik enstrümanlarının kontrolü kullanıcılarla doğrudan etkileşim kurma potansiyelini artırır ve aynı zamanda kullanıcı ile doğal bir etkileşim sağlanmasına da olanak sağlar.

MİYA'lar ile ilgili araştırmalar genellikle ya kavramsal bir fikre uygun bir cihazın üretilmesi ya da mevcut bir kontrolcünün bir MİYA bağlamında kullanımına odaklanmaktadır (Nymoen ve ark., 2015). Bu çalışmanın amacı, EMG tabanlı MYO kol bandı kullanılarak kısıtlı parmak hareketlerinin müzikal etkileşim performansı üzerindeki etkilerini araştırmaktır. MYO kol bandı kullanılarak kullanıcının fiziksel bir piyanoya temasta bulunması gerekmeden MYO kol bandından elde edilen EMG sinyalleri aracılığıyla basit piyano parçalarını çalmasına olanak sağlayacak bir arayüz oluşturulmuştur. Farklı teknikler kullanılarak EMG sinyallerinin parmak hareketlerinin doğruluğu ve müzikal performans üzerindeki katkısı değerlendirilmektedir. Bu bağlamda, çalışmanın hipotezi, EMG tabanlı MYO kol bandı ile elde edilen parmak hareketlerine dayalı EMG sinyallerinin, müzikal etkileşim performansını anlamlı bir şekilde iyileştirebileceğidir. Ayrıca parmak hareketlerinin hassasiyeti ve doğruluğu, müzikal performansın etkinliğinde önemli bir rol oynayabilir.

2. Alanyazın Araştırması

Bu bölümde çalışma kapsamında incelenen ve bu çalışmaya temel sağlayan EMG sinyalleri kullanılarak MİYA alanında gerçekleştirilmiş güncel araştırma örnekleri sunulmaktadır. Ayrıca EMG sinyalleri ile parmak hareketlerinin algılanmasına yönelik güncel çalışmalara da örnekler sunulmaktadır. İncelenen çalışmalardan bazılarında EMG sinyalleri özel sensörler ile elde edilirken bazılarında ise bu çalışmada olduğu gibi MYO kol bandı kullanılmıştır. Tablo 1 ile de çalışmaların bağlamı, kullanılan sensör bilgisi, sinyal türü, sinyal işleme yöntemi ve sonuçlarına dayalı olarak özetlenmektedir.

(Putro ve ark., 2024) çalışmada parmak eklem açılarının tahmini için, ham sinyallerin hesaplama maliyetini düşürmeyi hedefleyen öznitelik çıkarımı ve transformer tabanlı derin öğrenme yöntemlerini birleştiren yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem, parmak eklemi açılarının fleksiyon-ekstansiyonunu tahmin etmek için bileşenler arasındaki korelasyonu öğrenmek amacıyla transformer modelini kullanmaktadır. Çalışmada, NinaPro DB5 veri setinin üçüncü deneyi kullanılmıştır. Pencereleme süreci, öznitelik çıkarımı, yürütme süresi ve sonuçları önceki çalışmalarla karşılaştırmış ve sonuçlar, önerilen modelin Median Frekans öznitelik çıkarma yöntemi sayesinde önceki çalışmadaki 0,957 olan R-Kare skorunu 0,970'e çıkardığını göstermiştir.

(Rahman ve Nasor, 2024), EMG sinyallerinden parmak hareketlerinin makine öğrenmesi yöntemleriyle tahmin edildiği bir diğer çalışmada araştırmacılar, yedi farklı el hareketinden toplamda 6822 veri ile tahminleme yapmıştır. Çalışmada Myo kol bandında bulunan 8 adet EMG sensöründen alınan veriler kullanılmış olup, sinyaller öncelikle ön işleminden geçirilmiş daha sonra da on farklı öznitelik çıkarımı yapılmıştır. RBF çekirdek fonksiyonu kullanan SVM ile gerçekleştirilen sınıflandırmada yedi parmak hareketi için AUC %95,29 elde edildiği belirtilmiştir.

Brain-Body Digital Musical Instrument (BBDMI) projesi kapsamında araştırmacılar (Tanaka ve ark., 2023) insan vücudundan elde edilen fizyolojik sinyalleri kullanarak dijital bir müzik enstrümanı sistemini prototip olarak oluşturmayı amaçlamışlardır. Bu sistem içerisinde EMG sinyallerine ek olarak EEG sinyallerinin de birlikte kullanılması öngörülmüştür. Projede EEG ve EMG sinyallerinin elde edilmesi için Texas Instruments ADS129x çipini kullanan özel bir donanım prototipi olan EAVI ExG kullanılmıştır. OWL (Open Ware Laboratory) çerçevesi üzerinde gömülü sinyal işleme kullanılarak hem EEG hem de EMG sinyallerinin işlenmesi ve ses sentezi yapılması sağlanmıştır. Proje kapsamında kullanıcı çalışmaları ve deneyleri yapılarak, farklı müzisyenler ve kullanıcılarla EEG ve EMG sinyallerinin müzikal performanslarda nasıl kullanılabileceği ve etkileşimli sistemlerin nasıl geliştirilebileceği araştırılmıştır.

(Tepe ve Erdim, 2022) çalışmalarında EMG ve Jiyroskopik (GYRO) sinyalleri kullanarak parmak hareketlerinin sınıflandırdıkları çalışmada 5 farklı parmağa ait ve dinlenme pozisyonu olmak üzere toplam 6 adet harekete ait veri toplamıştır. Myo kol bandı aracılığıyla, on katılımcıdan 30 tekrarda kaydedilen veriler, SVM, K-En Yakın Komşu (KNN) ve Yapay Sinir Ağı (ANN) kullanılarak sınıflandırılmıştır. EMG ve GYRO sinyalleri ön işleme ve öznitelik çıkarımı işlemlerine tabii tutulmuştur. Sadece öznitelikler çıkarılmış EMG sinyalleri için en yüksek başarımlı ANN algoritması ile %94,40 elde edilmiştir. EMG ve GYRO sinyalleri için öznitelik çıkarılmış verilerle ise %96,30 ile yine en yüksek başarımlı ANN kullanıldığında tespit edildiği ve jiyroskopik sinyallerin sınıflandırma performansına artırıcı yönde etkisi olduğu raporlanmıştır.

(Mani ve Rao, 2021) MYO kol bandını kullanarak müzik aletlerinin öğrenim sürecindeki sürekli denetimi ve değerlendirmeyi sağlamak için parmak hareketlerini izlemeyi amaçlayan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Elektronik klavye çalma bağlamında gerçekleştirdikleri sistem ile kullanıcıların parmak basımları, süreleri ve sıralamaları izlenmekte ve değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, EMG sinyallerin işlenmesi için çeşitli yöntemler kullanılmıştır ve özellikle de sinyallerin sınıflandırılması amacıyla özellik ve algoritma seçimi üzerinde durulmuştur. Öznitelik seçimi için önceki çalışmalardan seçilen 11 öznitelikten oluşan bir öznitelik seti kullanılmıştır. Bu öznitelikler arasında zaman alanı parametreleri (RMS, RMS oranı, Frekans Enerjisi vb.) bulunmaktadır. Lineer Diskriminant Analizi (LDA – Linear Discriminant Analysis) kullanılarak boyut azaltma uygulanmış ve sonrasında sinyalleri sınıflandırmada RF sınıflandırıcısı kullanılmıştır. Seçilen öznitelik setinin ve sınıflandırma yaklaşımının performansı, çeşitli el hareketleri ve jestler içeren (Sapsanis, 2013; Sapsanis ve ark., 2013) tarafından yayınlanan çoklu kullanıcı ve tek kullanıcı iki farklı veri kümelerinde değerlendirilmiştir. Çalışmada, LDA ve RF kullanılarak önerilen özniteliklerden elde edilen doğruluk oranları sırasıyla %88,88 ve %79,86 olarak belirlenmiştir. Ayrıca LDA ve RF kombinasyonu diğer sınıflandırma yöntemleriyle örneğin SVM (%61,11) de karşılaştırılmıştır.

Sonuçta verilen uygulama için LDA ve RF kombinasyonunun daha iyi sonuçlar (%83,33) verdiği raporlanmaktadır.

(Kilian ve ark., 2021) piyanistlerin piyano çalarken notanın tonunu zenginleştirme ve daha duygusal, daha canlı bir ses sağlama amacıyla kullandıkları pitch vibrato efekti eklemelerine olanak tanıyan EMPiano sistemini geliştirmişlerdir. Geleneksel olarak bu efekt piyanoların kenarında bulunan bir pitch wheel veya benzeri bir kontrol mekanizması kullanılarak elde edilmektedir. EMPiano sisteminde EMG elektrotları aracılığıyla piyanistin istediği herhangi bir parmak veya el hareketinin tanınması sağlanarak otomatik olarak bu efektin çalma deneyimine entegre edilmesi sağlanabilmektedir. Çalışmada BrainVision LiveAmp EMG cihazı kullanılmaktadır. EMG sinyallerinin sınıflandırılması için ise SVM kullanılmıştır. Elde edilen bulgular, EMPiano'nun kullanıcıların piyano çalma deneyimini artırdığını ve kas aktivasyonlarına dayalı olarak hassas ve hızlı bir şekilde pitch vibrato efekti eklenebildiğini göstermektedir.

(Karolus ve ark., 2018) çalışmalarında EMG tabanlı EMGuitar adlı interaktif bir gitar eğitim sistemi tasarlamıştır. Bu sistem EMG ile elde edilen kas hareketlerine dayalı olarak gitar çalma doğruluğunu kontrol ederek geri bildirim sağlamakta ve tempo ayarlamaya yardımcı olmaktadır. Çalışmada EMG verilerini kaydetmek için hem EEG hem de EMG kaydetmede kullanılabilen BrainVision actiCHamp EEG kaydedicisi kullanılmıştır. EMG verileri katılımcılardan belirli bir akor dizisi çalmalarını içeren tekrarlamalarla elde edilmiştir. Elde edilen EMG sinyallerinin işlenmesi için öncelikle ön işleme adımları uygulanmıştır. Bu adımlar arasında sinyal segmentasyonu, bant geçiren filtre (2-100 Hz arasında) ve bant durduran filtre (49-51 Hz arasında) bulunmaktadır. Ayrıca sinyalin gürültüsünü azaltmak için bir dizi son-işleme adımı da kullanılmıştır. Sonrasında EMG sinyallerinden özellikler çıkarmak için kare ortalamalarının karekökü (RMS - Root Mean Square) özellikleri kullanılmıştır. Sınıflandırma işlemi için destek vektör makineleri (SVM – Support Vector Machine) kullanılmış ve EMG sinyalleri üzerinde çeşitli akorları tanımak için eğitilmiştir. Oturumlar-arası sınıflandırma performansı için F1 skoru 0,87, kişiye özel sınıflandırma performansı için F1 skoru 0,89 olarak raporlanmıştır. Geliştirilen eğitim sisteminin kullanılabilirliğine yönelik olarak katılımcılar, elektrotların gitar çalmalarına engel olmadığını ancak EMGuitar sisteminin çalma doğruluğu hakkında katılımcılara daha ayrıntılı geri bildirim sağlamasını belirtmişlerdir.

Benzer şekilde (Jensenius ve Lyons, 2017) MYO kol bandının MicroMyos adını verdikleri bir prototip müzik enstrümanın kontrolünde kullanımını değerlendirmişlerdir. Çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada bireylerin mikro hareketlerini incelemek üzerine iki deney yapılarak farklı hareketlerin MYO kol bandı kullanılarak EMG ve ivmeölçer verileri toplanmıştır. Bu veriler ve deneyler sonucunda da MYO kol bandının dinlenme veya hafif kas hareketleri sırasında kas algılama yeteneğine odaklanılmıştır. Deneylerde elde edilen EMG sinyallerine önce bant geçiren filtreleme, sonrasında da tam dalga doğrultma uygulanmıştır. Toplanan EMG verileri, varyans analizi

(ANOVA) ve t-testleri gibi istatistiksel testler kullanılarak değerlendirilmiş ve farklı görevler sırasında kas aktivasyonu arasındaki farklar belirlenmiştir. İkinci aşamada kullanıcıların klasik enstrümanlardan farklı olarak daha az hareket olduğunda daha fazla ses çıkarmayı sağlayacak şekilde tasarlanan "MicroMyo" adlı bir prototip enstrümanı kullanmaları sağlanmıştır. Bu çalışma sonucunda kullanıcıların enstrümanı kolaylıkla herhangi bir kalibrasyona ihtiyaç duymadan kolaylıkla kullanabildikleri ve MYO kol bandının ses mikro etkileşimi için bir kontrol aracı olma potansiyeline sahip olduğu raporlanmıştır.

MYO kol bandının MİYA alanında uygulanmasına yönelik erken çalışmalardan birinde (Nymoen ve ark., 2015), MuMYO adlı bir prototip enstrümanın geliştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu prototip arayüz ile de MYO cihazının müzikal bir kontrol cihazı olarak kullanım potansiyeli ve kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Çalışmada MYO cihazının tanımlı hareketleri beş farklı modda müzikal eylemleri gerçekleştirmek için kullanılmıştır. MYO kol bandının hareket ve kas sensör verilerinin müzikal üretim ve modifikasyon için kullanılabildiği, ancak dâhili sınıflandırma eylemlerinin sınırlı olduğunu raporlanmaktadır. Ayrıca kullanıcı çalışmasının sonuçları da MYO kol bandının kullanımının kullanıcılar arasında genellikle anlaşılabilir olduğu ve ilgi çekici bulunduğunu, ancak EMG sınıflandırıcısının zamanlama ve doğruluk sorunlarına sahip olduğunu göstermektedir.

(Tanaka ve Knapp, 2002), İnsan-Bilgisayar Etkileşimi (HCI - Human-Computer Interaction) ve çok modlu etkileşim araştırmalarının müzikal etkilerini inceledikleri çalışmalarında elektronik müzik cihazlarının kontrolü için bir model önermişlerdir. Geliştirdikleri sistemde kaslardaki elektriksel aktiviteyi elde etmede hem geleneksel elektrolit bazlı elektrotlar hem de aktif kuru EMG elektrotlar ile dönüş ve yer değiştirme verilerini elde etmede jiroskop sensörleri kullanılmaktadır. Bu iki veri türünün beraber kullanılmasıyla da daha zengin ve ifade edici bir kontrol arayüzü oluşturulması sağlanabilmiştir. Çalışmanın sonucunda, EMG ve göreceli pozisyon algılama (jiroskop sensör verileri) her ne kadar birbirlerinden bağımsız olarak çalışabilen iki ayrı sistem olarak kullanılabilirler de aslında her iki sistemin birbirini tamamladığı ve birlikte kullanıldıklarında daha etkili hale geldikleri vurgulanmaktadır.

Tablo 1. Alanyazın araştırmasında incelenen makaleler.

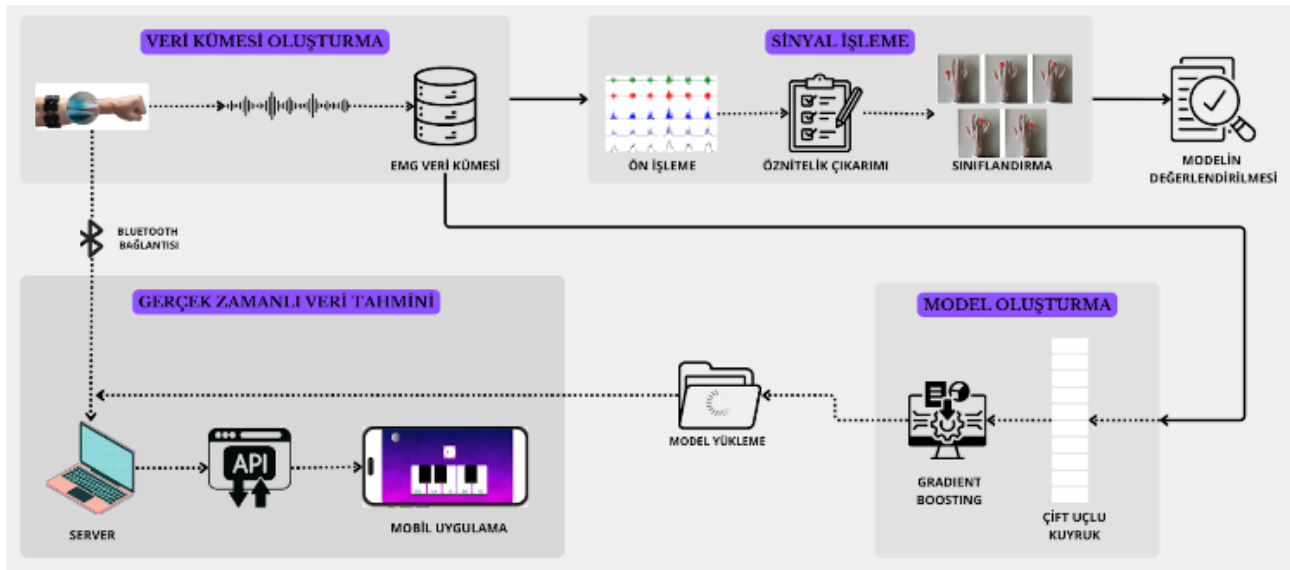
Çalışmanın Referansı	Bağlam	Veri Toplama Aracı	Sensör	Yöntem	Sonuç
(Putro ve ark., 2024)	EMG sinyallerinden parmak eklem açılarının tahmini	NinaPro DB 5 veri kümesi (Myo kol bandı)	EMG	Derin Öğrenme (transformer modeli)	Sonuçlar önerilen modelin R-Kare skorunun 0,970'e çıktığını göstermektedir.
(Rahman ve Nasor, 2024)	EMG sinyallerinden parmak hareketlerinin tahmini	Myo kol bandı	EMG	SVM	Önerilen SVM modeli, 7 parmak hareketi için AUC %95,29 değerine sahiptir.
(Tanaka ve ark., 2023)	EEG ve EMG sinyallerine dayalı Müzikal cihaz kontrolü	Texas Instruments ADS129x çipi, EAVI ExG	EEG, EMG	OWL (Open Ware Laboratory)	EEG ve EMG sinyallerinin müzikal performanslarda nasıl kullanılabileceği ve etkileşimli sistemlerin nasıl geliştirilebileceği araştırılmıştır.
(Tepe ve Erdim, 2022)	Parmak hareketlerinin EMG ve GYRO verileriyle sınıflandırılması	Myo kol bandı	EMG ve GYRO	SVM, KNN ve ANN	ANN ile sadece EMG sinyalleri için %94,40, EMG+GYRO için %96,30 başarımlar elde edilmiştir.
(Mani ve Rao, 2021)	Müzikal cihaz kontrolü	BrainVision LiveAmp	EMG	LDA, RF, SVM	Geliştirilen sistemin başarımları LDA ve RF için %83,33 ve SVM için %61,11 olarak raporlanmıştır.
(Kilian ve ark., 2021)	EMPiano	BrainVision LiveAmp	EMG	SVM	Geliştirilen EMPiano sisteminin piyano çalma deneyimini artırdığını vurgulanmıştır.
(Karolus ve ark., 2018)	EMGuitar- gitar eğitim sistemi	BrainVision actiCHamp	EMG	Segmentasyon, Bant geçiren filtre, Bant durdurucu filtre, RMS, SVM	Geliştirilen EMGuitar sisteminin oturumlar arası ve kişiye özel başarımları sırasıyla F1= 0,87 ve F1= 0,89 olarak raporlanmıştır.
(Jensenius ve Lyons, 2017)	MicroMyos Müzikal cihaz kontrolü	MYO kol bandı	EMG IMU	Bant geçiren filtre, Tam-dalga düzeltme, İstatistik yöntemler	MYO kol bandının ses mikro etkileşimi için bir kontrol aracı olma potansiyeline sahip olduğu raporlanmıştır

(Nymoen ve ark., 2015)	MuMYO Müzikal cihaz kontrolü	MYO kol bandı	EMG IMU	MYO kol bandının tanımlı hareketleri	MYO kol bandının dâhili sınıflandırmasının müzikal etkileşim için yetersiz olduğu raporlanmıştır.
(Tanaka ve Knapp, 2002)	Müzikal cihaz kontrolü	Elektrolit bazlı elektrotlar, aktif kuru EMG elektrotlar, ivmeölçer	EMG İvme verisi	-	EMG ve pozisyon algılamanın birlikte kullanılmasının daha etkili olduğu vurgulanmıştır.

3. Materyal ve Metot

3.1. Araştırma Tasarımı

Bu çalışma, Şekil 1’de sunulan çalışmanın genel akış şemasında da görüldüğü üzere belirli parmak hareketlerinin MYO kol bandı ile gerçek zamanlı algılanması ve bu verilerin önceden eğitilmiş bir model ile işlenmesi ve bunun sonucunda bir enstrümanın çalınması prensibine dayanmaktadır. Kol bandı aracılığıyla toplanan EMG sinyalleri, bir makine öğrenmesi algoritması ile gerçek zamanlı sınıflandırılır. Elde edilen bu sonuçlar, bir API aracılığıyla geliştirilen mobil uygulamaya iletilir ve bu sayede piyano çalma eylemi gerçekleştirilir. Bu sistem, kullanıcıların doğal parmak hareketleriyle mobil cihazlar üzerinden piyano çalabilmelerini imkân sağlar.



Şekil 1. Çalışmanın genel akışı.

3.2. MYO Kol Bandı

Thalmic Labs tarafından 2013 yılında geliştirilen MYO kol bandı, üzerinde bulunan EMG ve IMU sensörleri aracılığıyla bluetooth üzerinden veri kaydetmeyi sağlayan kablolu bir kol bandıdır (Düzenli ve ark., 2023). Şekil 2’de gösterilen MYO kol bandı ARM Cortex M4 adında kendine ait bir işlemcisi vardır. 8 kanaldan oluşan bu cihaz, 8 adet EMG sensörü ve 9 eksenli jiroskop, ivmeölçer, manyetometre sensörlerini içermektedir. LED ışıklar ve titreşimler aracılığıyla geri bildirim vermektedir. Kas aktivitesine ilişkin ölçülen ham EMG verileri, cihazın SDK’sı aracılığıyla 200 Hz örnekleme hızıyla toplanmaktadır.

Şekil 2’de görüldüğü üzere Myo kol bandı katılımcının sağ koluna yerleştirilmiştir. Cihazın takılma şekli ve doğru konumlandırılması verilerin doğru bir şekilde alınabilmesi için kritik bir faktördür. Cihazın konumu, dirseğin hemen altında, kolun ön yüz hizasında olacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca, LED ışıklarının bulunduğu kanal, ön kol pozisyonuna getirilerek sinyal alımında doğruluk sağlanmıştır.



Şekil 2. MYO kol bandı ve yerleşim düzeni.

3.3. Veri Kümesi

EMG tabanlı hareket tanımda geliştirilmiş bireysel veri kümelerinde modeller önemli rol oynar. Ancak (Ni ve ark., 2024) çalışmasında da vurgulandığı gibi mevcut araştırmalar veri elde etme zorluğunu bir nebze azaltmak için hep aynı kişi üzerinde modellemeye odaklanmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada da benzer bir yaklaşım benimsenmiş ve kullanılan veri kümesi katılımcılar-arası performans farklılığının etkisinden kaçınmak için tek bir katılımcıdan birçok tekrarda toplanan sinyallerden oluşturularak kullanılmıştır.

Veri kümesi, tek elle çalınan müzik parçaları için beş farklı parmak hareketine (notaya) ait EMG verilerini içermektedir. Tablo 2’de, her bir parmak hareketinin karşılık geldiği nota ve etiketler ayrıntılı bir şekilde belirtilmiştir. Cihaz katılımcının sağ kolunda Şekil 2’de belirtildiği gibi konumlandırılarak, her parmak hareketinin Tablo 2’de gösterildiği gibi 3 saniye boyunca basılı tutularak (Mani ve Rao, 2021) EMG verisi kaydedilmiştir. Her bir parmak hareketi 50 tekrar gerçekleştirilmiş olup tekrarlar arası 5 saniye dinlenme süresi verilmiştir.

Tablo 2’de gösterilen bu parmak hareketleri, müzik enstrümanlarını çalmak için yaygın olarak kullanılan temel parmak pozisyonlarıdır. Katılımcıdan toplanan EMG verileri, bu parmak hareketlerinin her birini temsil eden etiketlerle (1: başparmak, 2: işaret parmak, 3: orta parmak, 4: yüzük parmak, 5: serçe parmak) eşleştirilmiştir.

Tablo 2. Gerçekleştirilen parmak hareketleri ve nota karşılıkları.

					
<i>Parmak</i>	Başparmak	İşaret Parmak	Orta Parmak	Yüzük Parmak	Serçe Parmak
<i>Nota</i>	SOL	LA	Sİ	DO	RE
<i>Etiket</i>	1	2	3	4	5

3.4. Sinyal İşleme

EMG sinyalleri deterministik olmayan bir sinyaldir, bu da EMG sinyalinin bir diferansiyel denklemle temsil edilemeyeceği anlamına gelir. Bu nedenle, EMG sinyali istatistiksel sinyal işleme teknikleri kullanılarak işlenmelidir (Kandemir, 2013). Dolayısıyla bu çalışmada oluşturulan veri kümesi, ön işleme ve öznitelik çıkarımı gibi işlemlere tabi tutulmuştur. Daha sonra veriler, sınıflandırma algoritmalarına gönderilerek sınıflandırılmaktadır.

3.4.1. Ön İşleme

EMG sinyallerinden oluşan veri kümeleri, laboratuvar ortamlarında toplandıklarında genellikle ideal olarak toplanır ve sinyal kaybı yaşanmayabilir ancak gerçek hayat uygulamalarında sinyaller çok kolay bozulabilir ve sinyal kayıpları yaşanabilir (Ni ve ark., 2024). Dolayısıyla EMG sensörlerine ait veriler, iç ve dış faktörlere karşı duyarlı olduğundan doğru bir şekilde yorumlanabilmesi için normalize edilmelidir (Chalard ve ark., 2020). Bununla birlikte MYO kol bandı Bluetooth bağlantılı

bir cihaz olduğu için bazı anlarda bağlantının kopması dolayısıyla eksik veri kayıtları olabilmektedir. Ön işleme aşamasında 8 farklı EMG sensöründen gelen veriler standardizasyon işlemine tabi tutularak, ortalaması 0 ve standart sapması 1 olacak şekilde standardize edilmiştir. Standardizasyon, her bir özelliğin ortalamadan arındırılması ve birim varyansa ölçeklenmesi yoluyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, scikit-learn kütüphanesinin sunduğu StandardScaler yöntemi kullanılmıştır. StandardScaler (URL-3), özellikleri ortalamayı sıfırlayarak ve birim varyansa ölçekleyerek standartlaştırma işlemini etkili bir şekilde gerçekleştiren bir ön işleme tekniğidir. Bu işlem, Denklem (1)'de verilen matematiksel ifade ile tanımlanır:

$$X' = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

Burada, X ham EMG sinyalini, μ her sensör kanalının ortalama değerini, σ her sensör kanalının standart sapmasını ve son olarak X' standardize edilmiş EMG sinyalini temsil etmektedir.

3.4.2. Kayan Pencere Yaklaşımı

Ön işlenmiş EMG sinyallerinden öznitelikler genellikle kayan pencere yaklaşımı ile hesaplanmaktadır (Khushaba vd., 2012). Bu çalışmada da sürekli ve zaman serisinden oluşan EMG sinyallerinden anlamlı verilerin elde edilebilmesi için kayan pencere yaklaşımı kullanılmıştır. Kayan pencere yaklaşımı, zaman serisi verilerini belirli uzunluktaki örtüşen veya ayrık pencerelere bölerek daha fazla örnek üretilmesini sağlar. Çalışmada her pencere bir saniyelik veri, yani 200 örnek içermektedir. Adım miktarı ise 50 (0,25 saniye) olarak belirlenmiştir. Yani %75 örtüşmeli pencerelerle sağlanmıştır. Kayan pencere yönteminde pencere sayısı Denklem (2)'de verilen formül (Khushaba vd., 2012) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Eğitim kümesi örnek sayısı} = \frac{\text{veri uzunluğu} - \text{pencere boyutu}}{\text{adım miktarı}} + 1 \quad (2)$$

3.4.3. Öznitelik Çıkarımı

Ham sinyallerden gerekli bilgileri elde etmek için öznitelik çıkarma işlemine ihtiyaç vardır (Arozi ve ark, 2020). Öznitelik çıkarımı, EMG sinyallerinden yararlı bilgileri çıkarmak ve istenmeyen verileri ortadan kaldırmak için kullanılan bir yöntemdir (Boostani ve Moradi, 2003). Bu yöntem, ham sinyali analiz etmeyi ve sinyal işleme kullanarak jest içeriği hakkında önemli üst düzey bilgiler içeren bir temsil oluşturmaya imkân sağlamaktadır (Tamani ve ark., 2018). Özellikle EMG sinyalleri ile yapılan tanıma çalışmalarında, öznitelik çıkarma aşamasının uygulanmasının tanıma performansına önemli ölçüde etki ettiği bilinmektedir (Putro ve ark., 2024). Tablo 3'te bu çalışmada kullanılan

Ortalama Mutlak Değer (MAV – Mean Absolute Value), Varyans (VAR – Variance), Dalga Formu Uzunluğu (WL – Waveform Length) ve RMS özniteliklere ait kısa tanımlamalar ve matematiksel formülleri verilmiştir. Burada x_i sinyal örneklemini, N sinyalin uzunluğunu temsil etmektedir.

Bu çalışmada EMG sinyalinin ortalama genliğini ölçmek ve kas aktivitesinin genel seviyesini görmek için MAV, EMG sinyalinin genlik değişkenliğini ölçmek, sinyalin dalgalanma miktarını görmek ve kas kasılmalarının şiddetini belirlemek için VAR, EMG sinyalinin kompleksliğini, frekans bileşenlerini tespit etmek ve kas hareketinin karmaşıklığını ve hızını belirlemek için WL ve son olarak EMG sinyalinin enerjisini ve gücünü ölçmek ve motor ünitelerin aktivitesini belirlemek için RMS öznitelikleri seçilmiştir.

Tablo 3. Öznitelikler ve formülleri.

Öznitelik	Formül	Tanım
MAV	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i $	EMG sinyalleri üzerinden kas aktivitesini değerlendiren bir nitelik ve genellikle kasın genel aktivite düzeyini yansıtarak kasın ne kadar aktif olduğunu gösterir.
VAR	$\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N x_i^2$	Bir veri kümesindeki değerlerin dağılımının ne kadar yaygın olduğunu ölçen bir istatistiksel özniteliktir. Varyans, verilerin ortalamadan ne kadar uzaklaştığını gösterir.
WL	$\sum_{i=1}^{N-1} x_{i+1} - x_i $	EMG dalga formunun zaman dilimi boyunca kümülatif uzunluğu olarak tanımlanabilir.
RMS	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$	Kasılma sırasında motor ünitelerdeki fizyolojik aktivitelerin seviyesi, kas kasılmasının bir göstergesi olarak sıkça kullanılan bir parametredir (Kandemir, 2013).

3.4.4. Sınıflandırma

Bu çalışmada Destek Vektör Makinesi (SVM), Gradyan Güçlendirme (GB) ve Rastgele Orman (RF) algoritmaları kullanılmıştır.

SVM, sınıflandırma ve regresyon problemlerinde kullanılan denetimli öğrenme temelli bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. Farklı çekirdek türleri ile doğrusal ve doğrusal olmayan çeşitleri bulunmaktadır (Tepe ve Erdim, 2022). SVM'in temel amacı, sınıflar arasındaki en iyi ayrımı sağlayacak hiper-düzlemi bulmaktır. Bu çalışmada SVM algoritmasında rbf çekirdek fonksiyonu kullanılmıştır.

GB, bir dizi zayıf modeli ardışık olarak eğiterek güçlü bir model oluşturan bir topluluk öğrenme tekniğidir. Her bir model, bir öncekinin hatalarını düzeltmeye çalışır ve bu şekilde modelin doğruluğu artırılır (Friedman, 2001). GB, özellikle yüksek boyutlu ve karmaşık veri setlerinde etkili bir performans sergileyebilir (Chen ve Guestrin, 2016). Model, eğitim verileri üzerinden adım adım iyileştirilerek sınıflandırma doğruluğunu artırmayı hedefler (Natekin ve Knoll, 2013).

RF algoritması, yüksek derecede tahmin doğruluğu elde etmek için tahmin edicilerin ön-yüklem toplamasını ve rastgele hale getirilmesini kullanan bir regresyon ağacı tekniğidir (Rigatti, 2017). Birkaç rastgele karar ağacını birleştiren ve tahminlerini ortalama alarak, bir araya getiren yaklaşım değişken sayısının gözlem sayısından çok daha fazla olduğu ortamlarda iyi bir performans gösterebilmektedir (Biau ve Scornet, 2016).

3.4.5. Deneysel Çalışma Prosedürü

Gerçek zamanlı deneysel çalışmada, hazırlanan veri kümesi ile eğitilen model kullanılarak, MYO kol bandından anlık olarak alınan EMG verileri ile hareket tahminleri yapılır. Bu süreç aşağıdaki adımlardan oluşur:

Adım 1. Model Yükleme:

- Daha önce eğitilen model, tahmin işlemi için yüklenir.

Adım 2. Veri Toplama ve İşleme:

• MYO kol bandından gerçek zamanlı gelen EMG verileri belirli aralıklarla (her saniyede bir) toplanır.

- Toplanan veriler, uygun formatta bir veri çerçevesine dönüştürülür.
- Veriler, bir çift uçlu kuyruk veri yapısında tutulur. Bu yapı, maksimum 200 satır veri saklar ve 0.25 saniyede bir yeni veri geldikçe eski veriler kuyruk yapısından çıkarılır.

Adım 3. Veri Aktarma:

- Toplanan veriler, tahmin işlemi için modele aktarılır.
- Veri çerçevesine dönüştürülmüş EMG verileri, modelin öngörü yapabilmesi için sadece sensör değerlerini içerecek şekilde seçilir ve modele uygun formatta hazırlanır.

Adım 4. Sınıflandırma:

- Belirli aralıklarla saklanan EMG verilerinin model ile tahminlemesi yapılır.

Adım 5. Mobil Uygulamaya Aktarma

- Tahmin edilen hareket (nota), API aracılığıyla mobil uygulamaya aktarılır.
- Aktarılan harekete göre piyano ekranında ilgili notanın sesi çalınır.

3.4.6. Değerlendirme Metrikleri

Çalışma kapsamında performans ölçütü olarak karmaşıklık matrisinden elde edilen doğruluk, kesinlik, hassasiyet ve F1-Skoru kullanılmıştır (Powers, 2020). Burada, Doğru Pozitifler (TP) modelin pozitif olarak doğru tahmin ettiği örnekleri, Yanlış Pozitifler (FP) modelin pozitif olarak yanlış tahmin ettiği örnekleri, Doğru Negatifler (TN) modelin negatif olarak doğru tahmin ettiği, Yanlış Negatifler (FN) ise modelin negatif olarak yanlış tahmin ettiği sonuçları göstermektedir. Çalışmada EMG sinyalleriyle tahmin edilen parmak hareketlerinin toplam hareketler içindeki doğru tahmin oranını tespit etmek için Doğruluk, belirli bir parmak hareketi için modelin ürettiği pozitif tahminlerin ne kadarının gerçekten doğru olduğunu tespit etmek için Kesinlik, gerçekten meydana gelen bir parmak hareketinin model tarafından doğru şekilde tespit edilme oranını tespit etmek için Hassasiyet ve Kesinlik ve hassasiyetin dengeli bir ölçüsünü sunarak, modelin hem yanlış pozitifleri hem de yanlış negatifleri ne kadar iyi yönettiğini değerlendirmek için F1-Skoru hesaplanmıştır. Ayrıca Tablo 4'te çoklu sınıflandırma için Doğruluk, Kesinlik, Hassasiyet ve F1-Skor performans metriklerinin denklemleri verilmiştir.

Tablo 4. Doğruluk, Kesinlik, Hassasiyet ve F1-Skor metriklerinin denklemleri.

Metrik	Formül
Doğruluk	$\frac{\sum_{i=1}^k TP_i}{\sum_{i=1}^k (TP_i + FN_i + FP_i + TN_i)}$
Kesinlik (her bir i sınıfı için)	$\frac{TP_i}{TP_i + FP_i}$
Hassasiyet (her bir i sınıfı için)	$\frac{TP_i}{TP_i + FN_i}$
F1-Skor	$\frac{2 \times Kesinlik \times Hassasiyet}{Kesinlik + Hassasiyet}$

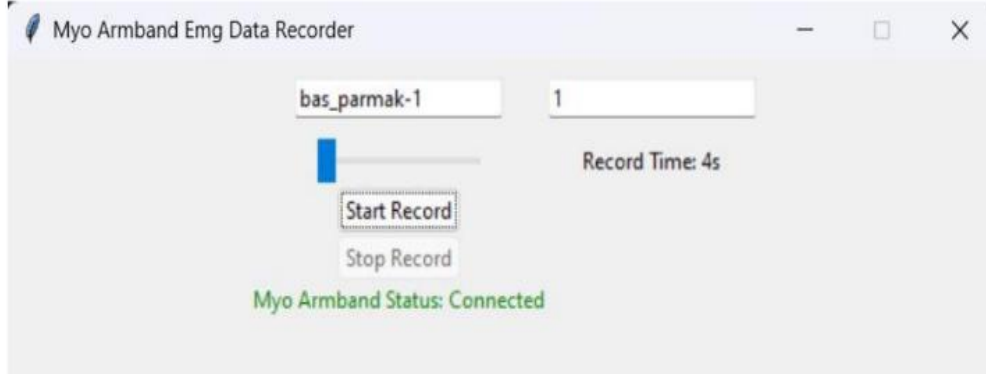
Performans değerlendirmesi için ayrıca ROC eğrisi kullanılmıştır. ROC eğrisi, bir modelin sınıflandırma performansını değerlendirmek için kullanılan önemli bir araçtır ve özellikle modelin çeşitli sınıflar üzerindeki ayırt edici gücünü gözlemlemek için kullanılır. Eğriler, her bir sınıf için ayrı ayrı çizilmiştir ve AUC (Area Under the Curve) değerleri belirtilmiştir. ROC eğrisi hesaplamasında "One-vs-All" (OvA) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, çok sınıflı sınıflandırma durumlarında ROC eğrisi ve AUC hesaplaması için sıkça kullanılan bir yaklaşımdır.

3.4.7. Yazılımlar

Bu bölümde veri toplama arayüzü ve uygulama arayüzünden bahsedilmiştir.

Veri Toplama Arayüzü:

MYO kol bandından alınan EMG sinyallerinin kaydedilmesi için geliştirilen Şekil 3'te örnek ekran görüntüsü gösterilen yazılım, Düzenli ve ark. (2023) çalışmalarında kullanılan veri toplama uygulaması örnek alınarak geliştirilmiştir. Bu yazılım, araştırmacıların veya geliştiricilerin EMG verilerini daha kolay bir şekilde toplamasını, belirli bir süre boyunca kaydetmesini ve bu verileri kullanıcının belirlediği bir dosyaya yazılmasını sağlar. Veri kaydı belirlenen süre boyunca yapılabildiği gibi manuel olarak da istenilen anda veri kaydı durdurulabilir.



Şekil 3. Veri kaydetme arayüzü.

Uygulama Arayüzü:

Proje kapsamında, uygulama Android Studio IDE'si kullanılarak Kotlin dilinde geliştirilmiştir. Android Studio, uygulama geliştirmek için resmi olarak kullanılan bir entegre geliştirme ortamıdır ve tüm Android cihazları için uygulama geliştirmeye olanak tanır.

Geliştirilen Android tabanlı enstrüman çalma uygulaması, MYO kol bandı kullanarak, kullanıcıya fiziksel bir piyano olmadan müzik çalma imkânı sunmaktadır. Özellikle hareket kısıtlı olan bireylerin ihtiyaçlarına odaklanan bu uygulama, aynı zamanda genel kullanıcı kitlesinin de rahatlıkla kullanabileceği bir arayüze sahiptir.

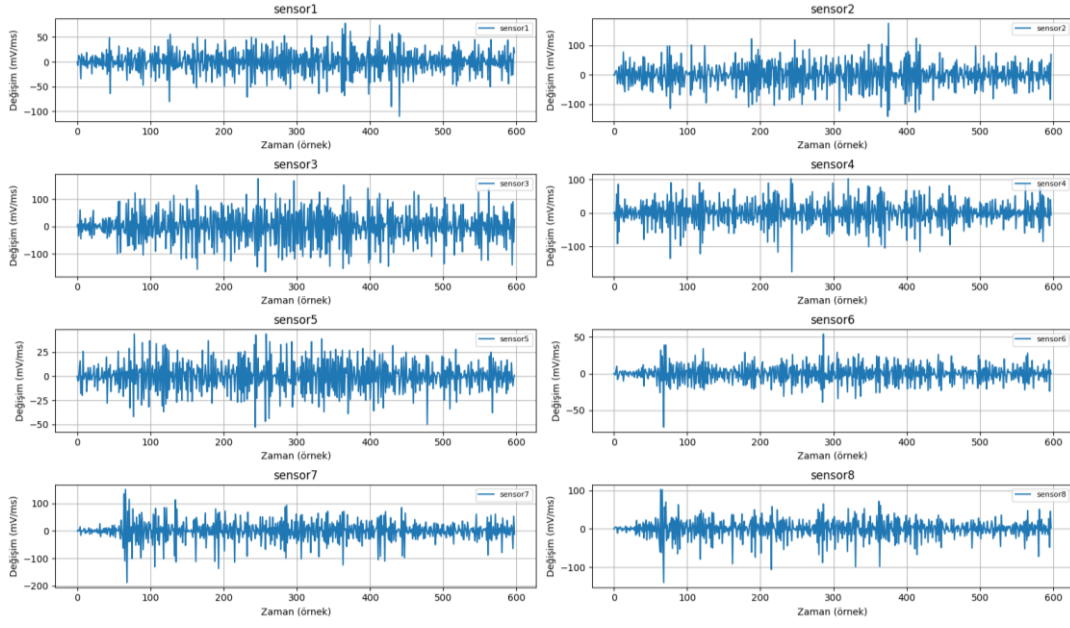
Şekil 4'te gösterilen uygulama, kullanıcıların "Başla" butonuna basmasıyla başlatılır. Kullanıcıdan başlangıçta tek elle ve çalışmaya dahil edilen 5 nota ile çalınabilen parça önerilerinden birini seçmesi istenir. Seçim yapıldıktan sonra piyano çalma arayüzüne geçilir. Kullanıcılar, seçtikleri parça için MYO kol bandı takılıyken parmak hareketleriyle, ekranda beliren numaraları takip ederek piyano çalma işlemini gerçekleştirirler. Uygulama, MYO kol bandını kullanarak kullanıcının parmak hareketlerini algılar ve bu hareketleri piyano notalarına dönüştürerek notalara uygun sesi çıkarır. Çalma işlemi tamamlandığında bitiş ekranı gösterilir ve kullanıcıya tamamlanma süresi bildirilir. Uygulama, hangi butona basıldığı bilgisini ve Python tarafından alınan anlık veri tahmin sonuçlarını API aracılığıyla uygulamaya ileterek işlevini sürdürür. API, Flask uygulaması tarafından JSON formatında bir yanıt döner ve bu yanıt, uygulama istemcisi tarafından kullanılır.



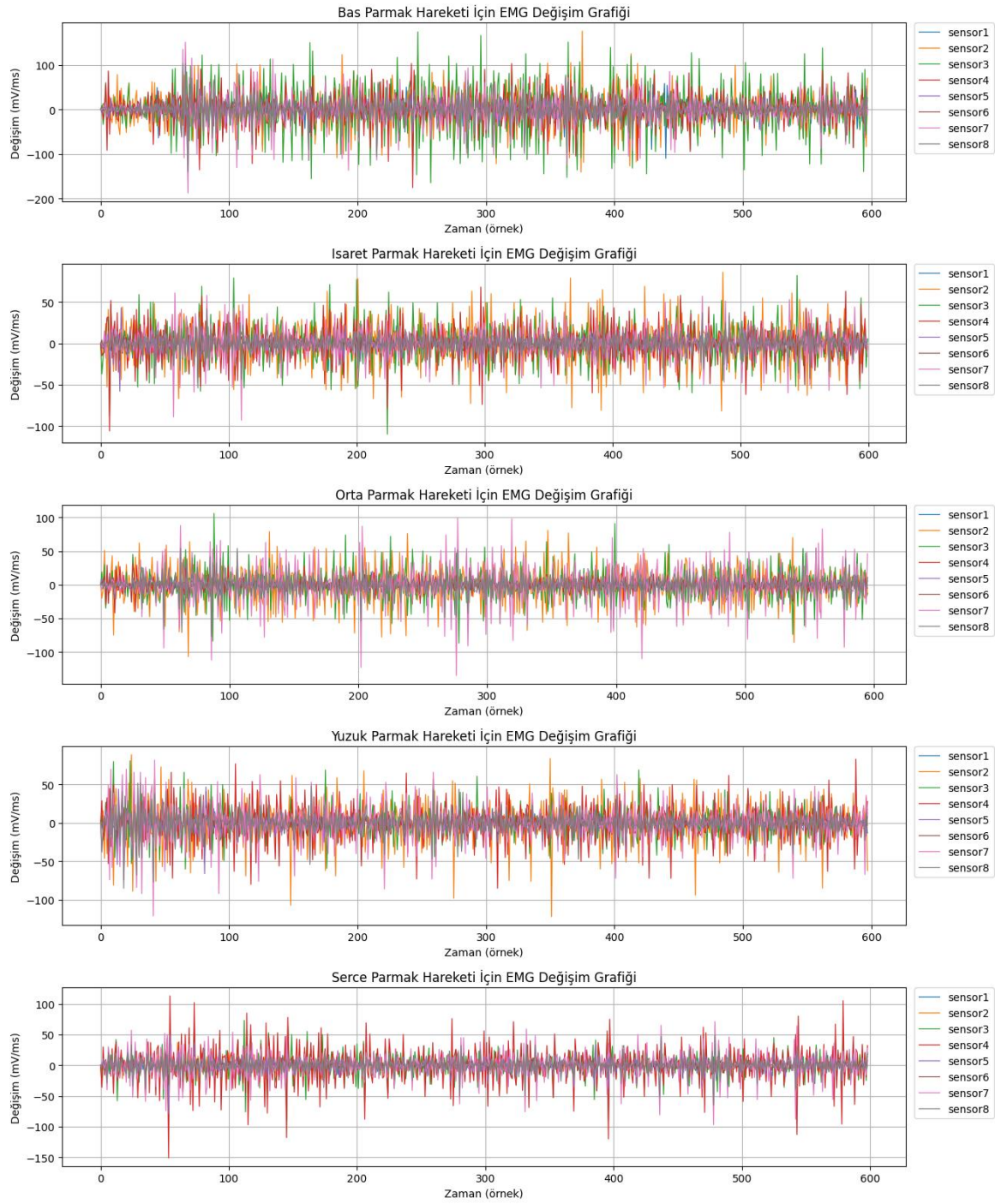
Şekil 4. Mobil piyano uygulama arayüzleri.

4. Deneysel Bulgular

Bu çalışmada, EMG sinyallerinden tahmin edilen parmak hareketlerine göre piyano çalma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda EMG sinyallerinden parmak hareketlerinin tahmin edilip sınıflandırılması için öncelikle SVM, GB ve RF algoritmaları kullanılarak eğitim yapılmıştır. Model eğitim ve test aşamasında 8 adet EMG kanalında kaydedilen, her bir harekete ait EMG sinyalleri ve Tablo 2’de verilen etiketler kullanılmıştır. Veri kümesi rastgele bir biçimde %80 eğitim, %20 test kümesi olarak ayrılmıştır. Ayrıca 5-k çapraz doğrulama testi uygulanmıştır. Şekil 5’te örnek olarak baş parmak hareketi için EMG sinyallerinin sensör bazlı değişimi, Şekil 6’da ise her bir parmak hareketi için tüm sensörlerin değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 5. Baş parmak hareketi için EMG sensör bazlı değişim grafikleri



Şekil 6. Her bir parmak hareketi için EMG sinyalleri değişim grafikleri.

Veri kümesi oluşturma aşamasında da belirtildiği üzere her bir parmak hareketi için 3 saniyelik EMG sinyali kaydedilmiş ve kullanılan Myo kol bandı saniyede 200 Hz örnekleme frekansına sahiptir. Her bir tekrar için elde edilen ham sinyal $[3 \text{ sn} \times 200 \text{ Hz}]$ olmak üzere 600 gözlem değeri içermektedir. Beş farklı parmak hareketinin her biri için 50 tekrar kaydedildiğinden, toplam gözlem değeri $[5 \text{ parmak hareketi} \times 50 \text{ tekrar} \times 600 \text{ gözlem}]$ olmak üzere 150.000'dir.

Kayan pencere yaklaşımı uygulanarak, her tekrarın 3 saniyelik sinyalinden %75 örtüşmeli, 200 örnek uzunluğunda pencereler çıkarılmış ve her bir tekrar için toplam 9 pencere üretilmiştir. Her bir

pencere için EMG sinyallerinden MAV, VAR, WL ve RMS olmak üzere dört temel öznitelik çıkarılmıştır. Bu işlem 8 EMG kanalı üzerinden gerçekleştirildiğinden, her pencere 32 boyutlu bir öznitelik vektörü ($[8 \text{ kanal} \times 4 \text{ öznitelik}] = 32$) ile temsil edilmiştir. Sonuç olarak, 50 tekrar için toplam pencere sayısı 2250 olmak üzere, 80:20 ayrılan eğitim ve test kümelerinin boyutu $[1800 \text{ gözlem} \times 32 \text{ öznitelik}]$ ve $[450 \text{ gözlem} \times 32 \text{ öznitelik}]$ 'dir. Ancak veri toplama esnasında bluetooth bağlantısındaki kopmalardan kaynaklanan veri kayıpları nedeniyle pencere sayısı dengeli hale getirmek için 1692:423 alınmıştır.

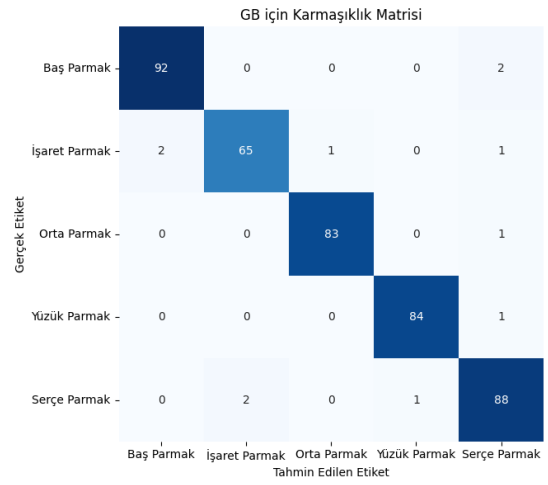
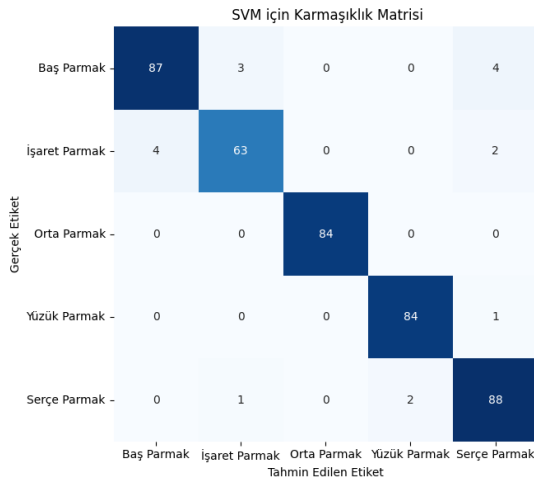
Tablo 5'te üç farklı algoritma ile gerçekleştirilen sınıflandırmanın doğruluk, kesinlik, hassasiyet ve F1-Skor sonuçları verilmiştir. SVM algoritması, eğitim ve test veri kümeleri arasında dengeli sonuçlar üretmiştir. Çapraz doğrulama sonucu elde edilen ortalama doğruluk değeri $95,33 \pm 1,07$ 'dir. Bununla birlikte eğitim doğruluğu $96,51$ iken, test doğruluğu $95,98$ olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde kesinlik, hassasiyet ve F1-skor değerleri de test kümesinde sırasıyla $95,99$, $95,88$ ve $96,52$ olup, modelin genelleme yeteneğinin yüksek olduğunu göstermektedir. GB algoritmasında ise çapraz doğrulama sonucu ortalama doğruluk değeri $95,39 \pm 0,44$ 'tür. Eğitim veri kümesinde tüm metriklerde 100 başarı sağlamış, bu durum modelin eğitim verisine tam anlamıyla uyum sağladığını göstermektedir. Ancak test veri kümesinde doğruluk değeri $97,40$, diğer metrikler ise sırasıyla $97,43$, $97,28$ ve $97,35$ olarak hesaplandığı görülmektedir. RF algoritması ise çapraz doğrulama sonucu ortalama doğruluk değeri $93,5 \pm 0,94$ 'tür. Eğitim kümesinde $98,70$ doğruluk sağlarken, test kümesinde $94,80$ doğruluk oranına ulaşmıştır. Kesinlik, hassasiyet ve F1-skor gibi diğer metriklerde de benzer bir dağılım gözlenmiştir. Sonuç olarak, üç algoritma da EMG verileri üzerinde yüksek sınıflandırma performansı sergilemiş olup, en yüksek doğruluk oranı test kümesinde GB algoritmasına aittir. Bu nedenle gerçek zamanlı test esnasında tahminleme için GB algoritması kullanılmıştır.

Tablo 5. SVM, GB ve RF algoritmalarının ön işlenmiş EMG verileri için doğruluk, kesinlik, hassasiyet ve F1-Skor değerleri.

	SVM		GB		RF	
	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test
<i>Doğruluk</i>	0,9651	0,9598	1,0000	0,9740	0,9870	0,9480
<i>Kesinlik</i>	0,9652	0,9599	1,0000	0,9743	0,9873	0,9472
<i>Hassasiyet</i>	0,9653	0,9588	1,0000	0,9728	0,9869	0,9473
<i>F1-Skor</i>	0,9652	0,9591	1,0000	0,9735	0,9871	0,9470

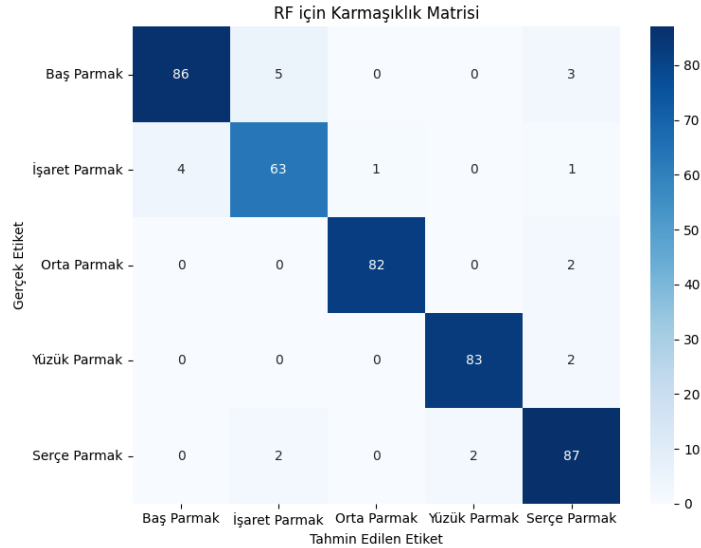
Şekil 7-9'de yer alan grafikler, üç farklı algoritmaya ait karmaşıklık matrisileri verilmiştir. SVM modeli genel olarak yüksek doğruluk göstermiştir. Baş parmak sınıfında 87 doğru sınıflandırmaya karşılık 7 örnek hatalı sınıflandırılmıştır. En başarılı sınıf orta parmak olup 100 'e yakın bir

doğrulukla 84 örneğin tamamı doğru sınıflanmıştır. Serçe parmak sınıfında ise 3 örnek diğer sınıflara karışmıştır. Bu durum, özellikle baş parmak ve serçe parmak sınıfları arasında karışıklığın nispeten daha fazla olduğunu göstermektedir. GB modeli, tüm sınıflarda oldukça yüksek doğruluk oranları sağlamıştır. Genel olarak, sınıflar arasında ayırt edicilik sağlanmış ve karışıklık seviyesi oldukça düşürülmüştür. Bu durum, GB modelinin sınıflar arası sınırları etkili şekilde öğrenebildiğini göstermektedir. RF modeli de genel olarak tatmin edici sonuçlar vermiştir. Ancak SVM ve GB modellerine kıyasla, özellikle baş parmak sınıfında 5 örneğin işaret parmak ile karıştığı gözlenmiştir. Bu durum, RF modelinde özellikle komşu sınıflar arasında karar sınırlarının biraz daha belirsiz kaldığını göstermektedir.



Şekil 7. SVM algoritmasının karmaşıklık matrisi.

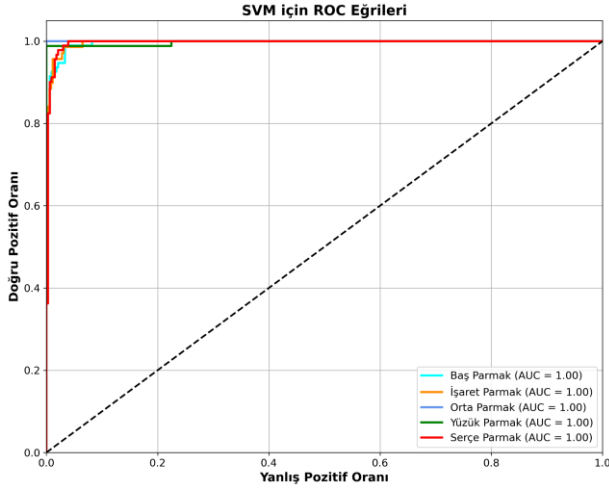
Şekil 8. GB algoritmasının karmaşıklık matrisi.



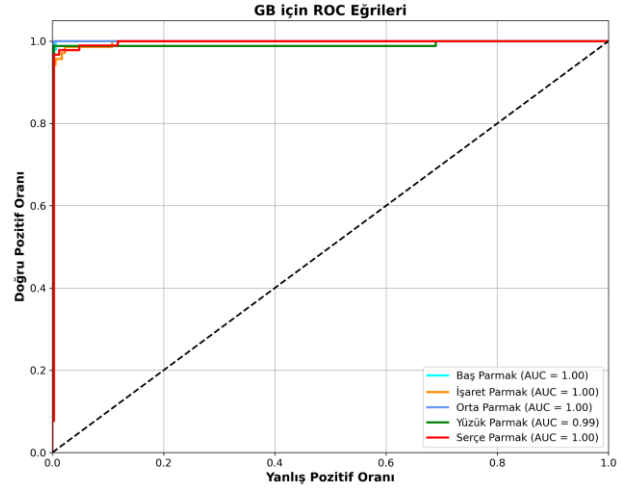
Şekil 9. RF algoritmasının karmaşıklık matrisi.

Şekil 10-12'de yer alan grafikler, üç farklı algoritmaya ait çok sınıflı ROC eğrilerini ve AUC değerlerini göstermektedir. SVM algoritması için AUC değerleri tüm parmak sınıflarında 1,00 olarak ölçülmüş, bu da modelin sınıflar arasındaki ayırım gücünün son derece yüksek olduğunu ortaya

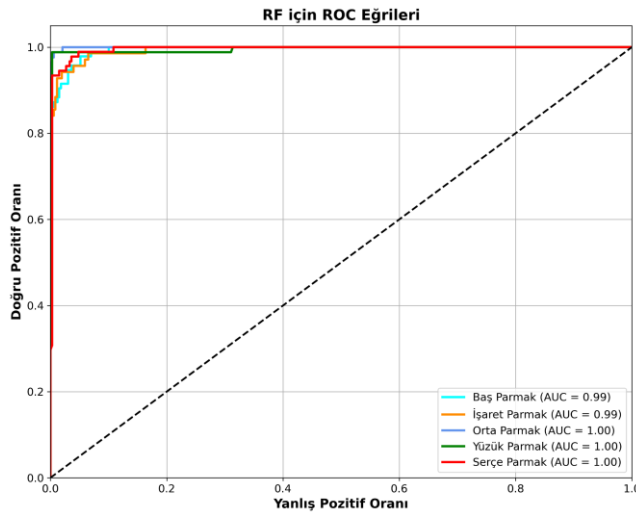
koymuştur. GB algoritmasında ise baş parmak, işaret parmak, orta parmak ve serçe parmak sınıflarında AUC değeri 1,00 olarak gerçekleşmişken, yüzük parmak için AUC değeri 0,99 olarak ölçülmüştür. RF algoritması ise orta, yüzük ve serçe parmak sınıflarında 1,00 AUC değerine ulaşırken, baş ve işaret parmak sınıflarında AUC değeri 0,99 olarak kalmıştır. Bu grafikler karşılaştırıldığında, üç modelin de sınıflar arasında oldukça yüksek ayırt ediciliğe sahip olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 10. SVM algoritmasının ROC eğrileri.



Şekil 11. GB algoritmasının ROC eğrileri.



Şekil 12. RF algoritmasının ROC eğrileri.

Gerçek zamanlı test sürecinde, sinyallerin sınıflandırılmasında en yüksek doğruluk oranını sağlayan GB algoritması tercih edilmiştir. EMG sensörlerinden elde edilen sinyaller, 1 saniyelik veri içeren bir kuyruk yapısında toplanmış ve bu yapı her 0,25 saniyede bir güncellenerek %75 örtüşmeli pencereler ile sürekli tahminleme gerçekleştirilmiştir. Her bir saniye için karar anında, Chung ve Benalcázar (2019) çalışmasında kullanılan Mod yaklaşımı kullanılarak, tüm pencerelerde en sık tahmin edilen etiket, sinyale ait nihai sınıf etiketi olarak belirlenmiştir. Belirlenen etiket, sistemin çalışması planlanan müzik parçasındaki bir sonraki notanın etiket değeri ile eşleştiği durumda,

uygulama tarafından bu nota çalınarak kullanıcıya sesli geri bildirim sağlanmıştır. Öte yandan, tahmin edilen etiket ile hedef nota uyuşmadığında, sistem tahmin sürecine devam etmiş ve doğru tahmin gerçekleşene kadar sınıflandırma yinelemiştir. Bu süreç, ilgili müzik parçasındaki tüm notalar başarıyla tahmin edilene dek sürdürülmüştür. Gerçek zamanlı deneysel çalışmada, parmak hareketlerinin gerçek zamanlı tahmin sürelerinin API üzerinden uygulamaya aktarılması baş, orta, yüzük ve serçe parmak için bir saniyenin altında (0,25-1 sn) bir sürede gerçekleşse de işaret parmağı nispeten daha geç tahmin edilmiş ve bu süre 1-2,5 saniyeyi bulmuştur.

5. Tartışma ve Sonuç

EMG sinyalleri ile jest tabanlı uygulamalar, işaret dili tanıma, rehabilitasyon ve protez kontrolü gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Ni ve ark., 2024). Özellikle jest tabanlı etkileşim, insan ile makineler arasında daha doğal etkileşime olanak sağlamaktadır. EMG sinyalleri aracılığıyla yapılan müzik enstrümanı kontrolü de bu doğal etkileşimin bir örneğidir. Literatürde çeşitli müzik enstrümanı (gitar (Karolus ve ark., 2018), piyano (Sapsanis ve ark., 2013)) ve uygulamalarının (Ni ve ark., 2024; Jensenius ve ark., 2017; Nymoen ve ark., 2015) EMG sinyalleri aracılığıyla kontrol edildiği çalışma bulunmaktadır.

Bu çalışmada, MİYA bağlamında kullanıcının fiziksel bir piyanoya temasta bulunması gerekmeden MYO kol bandından elde edilen EMG sinyalleri aracılığıyla ve kısıtlı parmak hareketleriyle basit piyano parçalarını çalmasına olanak sağlayacak bir arayüzün kontrolündeki performansına odaklanılmıştır. Bu amaçla öncelikle MYO kol bandı aracılığıyla elde edilen EMG sinyalleri kullanılarak bir veri kümesi oluşturulmuştur. Literatürde jest tanımda sıklıkla EMG sinyalleri (Fandaklı ve Okumuş, 2023) ve hareketlerin tanınmasında ise SVM (Rahman ve Nasor, 2024; Tepe ve Erdim, 2022; Karolus ve ark., 2018; Sapsanis, 2013; Tanaka ve Knapp, 2002), KNN (Tepe ve Erdim, 2022), ANN (Tepe ve Erdim, 2022), RF [Tanaka ve Knapp, 2002], LDA [Tanaka ve Knapp, 2002] ve derin öğrenme (Putro ve ark., 2024) modelleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada da yüksek doğruluk önemli olduğu için literatürde EMG sınıflandırmasında yaygın olarak kullanılan sınıflandırma algoritmalarından SVM, GB ve RF algoritmaları kullanılmış ve sınıflandırma sonuçları kıyaslanmıştır. Ön işleme sonrası kullanılan algoritmalarından GB %97,40 ile en yüksek doğruluk değerine sahip olduğu görülmüştür. Çalışmada daha sonra hazırlanan veri kümesi ile eğitilen model kullanılarak, MYO kol bandından gerçek zamanlı olarak alınan EMG verileri ile hareket tahminleri yapılarak kullanıcının geliştirilen uygulama arayüzü üzerinden piyano parçalarını çalması sağlanmıştır.

Tablo 6, önerilen modelin literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırılmasını sunmaktadır. Çalışmalar, farklı el ve parmak hareketlerini sınıflandırmak için çeşitli makine öğrenimi ve derin

öğrenme yöntemleri kullanmış olup, başarı oranları çevrimdışı ve gerçek zamanlı olarak değerlendirilmiştir. Önerilen modelde, 5 farklı parmak hareketini sınıflandırmak için GB algoritması ile diğer çalışmalarda (Rahman ve Nasor, 2024; Tepe ve Erdim, 2022) olduğu gibi yüksek doğruluk oranlarından birine ulaşmıştır. Gerçek zamanlı sınıflandırma da ise Zhang ve ark. (2019) çalışmasında ANN ile 5 farklı el hareketi için %98,7, Chung ve Benalcázar (2019) çalışmasında 5 farklı el hareketi ile $85,08 \pm 15,21$ gerçek zamanlı başarı sağlanmış olsa da Karolus ve ark. (2018) çalışmasında olduğu gibi bizim çalışmamızda da çevrimdışı performans yüksek olsa da gerçek zamanlı tahminde düşük kalmıştır. Gerçek zamanlı EMG sinyallerinin sınıflandırıldığı yüksek performanslı çalışmalarda (Chung ve Benalcázar, 2019; Zhang ve ark., 2019), genellikle Myo kol bandında ön tanımlı olan beş farklı el hareketi kullanılmıştır. Bizim ve gerçek zamanlı Karolus ve ark., (2018) çalışmasında ise gerçek hayatla uyumlu doğrudan bir enstrüman kullanımında ihtiyaç duyulan parmak hareketleri kullanılmıştır. Bu durum, Myo kol bandının hassas el ve parmak hareketlerini algılamadaki sınırlılıklarından kaynaklanıyor olabilir. Ayrıca, gerçek zamanlı tahminlerin 0,25 saniyede bir gerçekleştirilmesine rağmen, bağlantı kopmaları nedeniyle eksik veri alınması ya da tahmin sonuçlarının API aracılığıyla uygulamaya aktarılması sırasında yaşanan gecikmeler de performansı olumsuz etkileyebilmektedir. Buna karşın, çalışmamızda kullanılan modelin gerçek zamanlı tahmin süresi üzerinde yapılan iyileştirmeler, bu yaklaşımın ileri düzey gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılabilirliğine yönelik önemli bir potansiyel taşıdığını ortaya koymaktadır.

Tablo 6. Önerilen modelin diğer modellerle karşılaştırılması.

Çalışma	Hareket	Yöntem	Çevrimdışı Başarım	Gerçek Zamanlı Başarım
(Rahman ve Nasor, 2024)	7 farklı parmak hareketi	SVM	AUC: %95,29	-
(Tepe ve Erdim, 2022)	6 farklı parmak hareketi	ANN	%94 (EMG)	-
(Chung ve Benalcázar, 2019)	5 farklı el hareketi	ANN	-	$85,08 \pm 15,21$
(Zhang ve ark., 2019)	5 farklı el hareketi	ANN	-	%98,7
(Karolus ve ark., 2018)	Sol el akor hareketleri	SVM	F1 Skoru: 0,59-0,89	F1 skoru: 0,10-0,46
Bizim çalışmamız	5 farklı parmak hareketi	GB	%97,40	-

Bu çalışma ile MYO kol bandı gibi EMG tabanlı teknolojilerin kullanıcıların müzik yapma deneyimini interaktif hale getirebileceği ve doğrudan müzikal performans sergilemelerine olanak tanıyabileceği ortaya konulmuştur (Jensenius ve Lyons, 2017; Nymoen ve ark., 2015). Ancak gerçek zamanlı tahminleme yapmada MYO kol bandının piyano çalma görevinde hassas parmak kas hareketlerin algılamada yetersiz kaldığı ve gecikmeler olduğu gözlemlenmiştir. Bunun çalışmaya dahil olan katılımcının fizyolojik yapısından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Myo kol bandı yerine (Aydoğan ve Aydın, 2023) çalışmasında olduğu gibi giyilebilir EMG sensörlerinin uygun konumlara yerleştirilerek parmak hareketlerinin daha hassas bir şekilde algılanması gerçek zamanlı deneysel çalışmalarda daha başarılı sonuçlar verebilir. Bunun yanı sıra yüksek kaliteli EMG sinyalleri için vücudun farklı bölgelerinde bulunan kaslardan sinyallerin alınması, eğitimin başarılı olmasına ve doğruluğun yüksek çıkmasına olanak sağlayabilir (Ni ve ark., 2024). Bununla birlikte sınıflandırma sonuçlarının uygulamaya aktarımı sırasındaki gecikmenin de minimize edilmesi, uygulamanın performansını arttıracaktır. Çalışmanın bir diğer kısıtı, sinyallerin gürültüden kolay etkilenme potansiyeline sahip olması ve gerçek ortamda sinyal kaybının kolay bir şekilde yaşanmasıdır (Ni ve ark., 2024). Bu da EMG sinyalleri aracılığıyla gerçek zamanlı enstrüman kontrolünü zorlaştırmaktadır. Gelecek çalışmalarda, öncelikle veri kümesi genişletilerek veri sayısı ve çeşitliliği artırılabilir. Kaydedilen EMG sinyallerine çeşitli gürültü giderme teknikleri (örneğin bant geçiren filtreleme, adaptif filtreleme) uygulanarak sinyal kalitesi artırılabilir ve böylece gerçek zamanlı testlerde daha yüksek doğruluk elde edilebilir. Ayrıca, cinsiyet, elektrot yerleşimi ve kas anatomisi gibi bireysel faktörler göz önünde bulundurularak katılımcı-bağımlı değerlendirmeler yapılabilir. Bu tür kişiye özel modeller, bireysel varyasyonları daha iyi öğrenerek, modelin performansı artırılabilir. Bununla birlikte EMG sensörleri içeren ve kolun farklı bölgelerine yerleştirilebilen sensörler kullanılarak daha kaliteli sinyal toplanabilir ve hassas parmak hareketlerinin daha iyi ve hızlı algılanması sağlanabilir, böylelikle gerçek hayata daha yakın gerçek zamanlı tahminleme gerçekleştirilebilir. Son olarak her iki kola yerleştirilen iki Myo kol bandı ile iki kol ve bilek hareketleriyle kontrol edilebilen farklı müzik enstrümanları (bateri, gitar vb.) üzerinde de gerçek zamanlı deneysel çalışmalar gerçekleştirilebilir.

Teşekkür

1919B012334786 proje nolu bu çalışma 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir.

Yazarların Katkısı

Eda Çetin ve İlayda Kaya, tasarımın oluşturulması, literatür araştırması, deneylerin hazırlanması ve gerçekleştirilmesi, veri toplama, model oluşturma, mobil uygulamanın geliştirilmesi, sonuçların analiz edilmesi ve makale taslağının oluşturulması konularında katkı sunmuşlardır. Kübra Erat ve Pınar Onay Durdu, fikrin geliştirilmesi, tasarımın oluşturulması, deneylerin hazırlanması, literatür araştırması, kullanılan malzemelerin temini, yöntem tasarımı, eleştirel inceleme, yazım denetimi ve makalenin içerik açısından kontrol edilmesi konularında katkıda bulunmuşlardır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

Kaynaklar

- Arozi, M., Ariyanto, M., Kristianto, A., and Setiawan, J. D. (2020). EMG signal processing of Myo armband sensor for prosthetic hand input using RMS and ANFIS. In *2020 7th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)* (pp. 36-40), Semarang, Indonesia, doi:10.1109/ICITACEE50144.2020.9239169.
- Atau, T., Musical technical issues in using interactive instrument technology with applications to the BioMuse. In *Proceedings of 1993 International Computer Music Conference, Tokio, Japan, 124–126, September 10-15*, pp. 124–126.
- Aydoğan, İ., and Aydın, E. A. (2023). Wearable Electromyogram Design for Finger Movements Based Real-Time Human-Machine Interfaces. *Politeknik Dergisi*, 26(2), 973-981, doi:10.2339/politeknik.1117947.
- Biau, G., and Scornet, E. (2016). A random forest guided tour. *Test*, 25(2), 197-227, doi:10.48550/arXiv.1511.05741
- Boostani, R., and Moradi, M. H. (2003). Evaluation of the forearm EMG signal features for the control of a prosthetic hand. *Physiological measurement*, IOP Publishing, 24(2), 309, doi:10.1088/0967-3334/24/2/307.
- Chalard, A., Belle, M., Montané, E., Marque, P., Amarantini, D., and Gasq, D. (2020). Impact of the EMG normalization method on muscle activation and the antagonist-agonist co-contraction index during active elbow extension: Practical implications for post-stroke subjects. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 51, 102403, doi:10.1016/j.jelekin.2020.102403.
- Chen, T., and Guestrin, C. (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* (pp. 785-794), San Francisco, California, USA, doi:10.48550/arXiv.1603.02754.
- Chung, E. A., and Benalcázar, M. E. (2019). Real-time hand gesture recognition model using deep learning techniques and EMG signals. In *2019 27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)* (pp. 1-5), A Coruna, Spain, doi:10.23919/EUSIPCO.2019.8903136.
- Donnarumma, M., Caramiaux, B., and Tanaka, A. (2013). Muscular Interactions Combining EMG and MMG sensing for musical practice. In: *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression* (pp. 1–4) Dajeon, Seoul, Korea, doi:10.5281/zenodo.1178504.

- Düzenli, M., Salur, K., Erat, K., and Durdu, P. O. (2023). Turkish Sign Language Recognition by Using Wearable MYO Armband. In: García Márquez, F.P., Jamil, A., Eken, S., Hameed, A.A. (eds), *International Conference on Computing, Intelligence and Data Analytics ICCIDA 2022* (pp. 344–357). Lecture Notes in Networks and Systems (Cham: Springer International Publishing), 643, Kocaeli, Turkey, doi:10.1007/978-3-031-27099-4_27.
- Erdem, C., Lan, Q., and Jensenius, A. R. (2020). Exploring relationships between effort, motion, and sound in new musical instruments. *Human Technology*, 16(3), 310-347, doi: 10.17011/ht/urn.202011256767.
- Fandaklı, S. A., and Okumuş, H. (2023). Comparison of artificial neural networks with other machine learning methods in foot movement classification. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 13(1), 153-171, doi:10.31466/kfbd.1214950.
- Friedman, J. H. (2001). Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *Annals of statistics*, 1189-1232, doi:10.1214/aos/1013203451.
- Jensenius A. R., Gonzalez Sanchez V. E., Zelechowska, A., and Bjerkestrand, K. A. V. (2017). Exploring the Myo controller for sonic microinteraction, In *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression* (pp. 442-445), Copenhagen, Denmark, doi: 10.5281/zenodo.1176308.
- Kamen, G., and Kinesiology, E. (2004). Research methods in biomechanics. *Human Kinetics Publ: Champaign*, IL, USA.
- Kandemir, G. (2013). *Design and implementation of a device to control a robotic arm by EMG signal*. Yüksek Lisans Tezi. Middle East Technical University, Ankara, Türkiye.
- Karjalainen, M., Mäki-Patola, T., Kanerva, A., & Huovilainen, A. (2006). Virtual air guitar. *Journal of the Audio Engineering Society*, 54(10), 964-980.
- Karolus, J., Schuff, H., Kosch, T., Wozniak, P. W., and Schmidt, A. (2018). EMGuitar: Assisting Guitar Playing with Electromyography. In *Proceedings of the 2018 Designing Interactive Systems Conference (DIS '18)* (pp. 651–655). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, doi:10.1145/3196709.3196803.
- Khushaba, R. N., Kodagoda, S., Takruri, M., & Dissanayake, G. (2012). Toward improved control of prosthetic fingers using surface electromyogram (EMG) signals. *Expert Systems with Applications*, 39(12), 10731-10738, doi:10.1016/j.eswa.2012.02.192.
- Kilian, A., Karolus, J., Kosch, T., Schmidt, A., and Woźniak, P. W. (2021). EMPiano: Electromyographic Pitch Control on the Piano Keyboard. *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp.1-4), Yokohama, Japan, doi: 10.1145/3411763.3451556.
- Knapp, R. B., & Lusted, H. S. (1990). A bioelectric controller for computer music applications. *Computer music journal*, 14(1), 42-47, doi:10.2307/3680115.
- Lee D. E., (2017). *Electromyogram-based Interface for Musical Performance*. Yüksek Lisans Tezi, Ewha Womans University, Güney Kore.
- Mani, S., and Rao, M. (2021). Feasibility study of using myoband for learning electronic keyboard. In *2020 25th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)* (pp. 10196-10202), Milan, Italy, doi: 10.1109/ICPR48806.2021.9412954.
- Miranda, E. R., and Wanderley, M. M. (2006). *New digital musical instruments: control and interaction beyond the keyboard*, Vol. 21. AR Editions, Inc.
- Natekin, A., and Knoll, A. (2013). Gradient boosting machines, a tutorial. *Frontiers in neurorobotics*, 7(21), doi:10.3389/fnbot.2013.00021.
- Ni, S., Al-qaness, M. A., Hawbani, A., Al-Alimi, D., Abd Elaziz, M., and Ewees, A. A. (2024). A survey on hand gesture recognition based on surface electromyography: Fundamentals, methods, applications, challenges and future trends. *Applied Soft Computing*, 112235, doi:10.1016/j.asoc.2024.112235.
- Nymoen, K., Haugen, M. R., and Jensenius, A. R. (2015). Mumyo—evaluating and exploring the myo armband for musical interaction. In *NIME 2015: Proceedings of the international conference on New Interfaces for Musical Expression* (pp. 215-218), Baton Rouge, LA, USA, doi: 10.5281/zenodo.1179150.
- Pakarinen, J., Puputti, T., and Välimäki, V. (2008). Virtual slide guitar. *Computer Music Journal*, 32(3), 42-54. JSTOR, doi:10.1162/comj.2008.32.3.42.
- Powers, D. M. W., (2020). Evaluation: From precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness & correlation. *International Journal of Machine Learning Technology*. 2:1 (2011), 37-63, doi:10.48550/arXiv.2010.16061.
- Putro, N. A. S., Avian, C., Prakosa, S. W., Mahali, M. I., and Leu, J.-S. (2024). Estimating finger joint angles by surface EMG signal using feature extraction and transformer-based deep learning model. *Biomedical Signal Processing and Control*, 87, 105447, doi:10.1016/j.bspc.2023.105447.

- Rahman, K. M., and Nasor, K. M. (2024). Classification of Finger Movements Using Multi-channel EMG and Machine Learning. In: Kumar Jain, P., Nath Singh, Y., Gollapalli, R.P., Singh, S.P. (eds) *Advances in Signal Processing and Communication Engineering (ICASPACE 2023)* (pp. 439-451), Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1157. Springer, Singapore, doi:10.1007/978-981-97-0562-7_33.
- Reaz, M. B. I., Hussain, M. S., and Mohd-Yasin, F. (2006). Techniques of EMG signal analysis: Detection, processing, classification and applications. *Biological Procedures Online*, 8(1), 11-35, doi:10.1251/bpo115.
- Rigatti, S. J. (2017). Random forest. *Journal of Insurance Medicine*, 47(1), 31-39, doi:10.17849/in-sm-47-01-31-39.1.
- Sapsanis, C. (2013). *Recognition of basic hand movements using electromyography*. Yüksek Lisans Tezi. University of Patras, Greece.
- Sapsanis, C., Georgoulas, G., Tzes, A., and Lymberopoulos, D. (2013). Improving EMG based classification of basic hand movements using EMD. In *2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)* (pp. 5754-5757), Osaka, Japan, doi:10.1109/EMBC.2013.6610858.
- Tamani, J. E., Cruz, J. C. B., Cruzada, J. R., Valenzuela, J., Chan, K. G., and Deja, J. A. (2018). Building Guitar Strum Models for an Interactive Air Guitar Prototype. In *Proceedings of the 4th International Conference on Human-Computer Interaction and User Experience in Indonesia, CHIUXID '18* (pp. 18-22), Yogyakarta, Indonesia, doi: 10.1145/3205946.3205972.
- Tanaka, A., and Knapp, R. B. (2002). Multimodal interaction in music using the electromyogram and relative position sensing. Paper presented at *International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME)*, Dublin, Ireland.
- Tanaka, A., ve Ortiz, M. (2017). Gestural musical performance with physiological sensors, focusing on the electromyogram. In *The Routledge companion to embodied music interaction* (pp. 420-428). 1st Edition, Routledge, doi: 10.4324/9781315621364-46.
- Tanaka, A., Sèdes, A., Bonardi, A., Whitmarsh, S., Fierro, D., and Di Maggio, F. (2023). Brain-Body Digital Musical Instrument Work-in-Progress. In *ISEA 2023 - 28th International Symposium on Electronic Art, Le Cube Garges; Ecole Nationale Supérieure des Arts Décoratifs; Forum des Images*, Paris, France, doi:hal-04259596.
- Tepe, C., and Erdim, M. (2022). Classification of surface electromyography and gyroscopic signals of finger gestures acquired by Myo armband using machine learning methods. *Biomedical Signal Processing and Control*, 75, 103588, doi:10.1016/j.bspc.2022.103588.
- URL-1: <https://www.bbc.com/news/science-environment-18196349> (Erişim Tarihi: 14 Ağustos 2024).
- URL-2: <https://teachablemachine.withgoogle.com/> (Erişim Tarihi: 14 Ağustos 2024).
- URL-3: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.preprocessing.StandardScaler.html> (Erişim Tarihi: 10 Şubat 2025).
- Zhang, Z., Yang, K., Qian, J., & Zhang, L. (2019). Real-time surface EMG pattern recognition for hand gestures based on an artificial neural network. *Sensors*, 19(14), 3170, doi:10.3390/s19143170.

Forecasting the Tobacco Market in Türkiye with Artificial Neural Networks

Aysel TOPŞİR^{1*}, Ferdi GÜLER²

Abstract

This study aims to forecast the future dynamics of tobacco policies in Türkiye using artificial neural networks. Tobacco production, area harvested, and yield data from 1961 to 2022 were comprehensively analyzed to understand the complex relationships among these variables. The results indicate that, while tobacco production and harvested area are expected to decline gradually between 2023 and 2027, yield will significantly increase. This trend reflects the positive impact of technological advancements and effective agricultural policies. Time series forecasting was conducted using DeepDenT software. These forecasts provide valuable insights for the sustainability and strategic planning of tobacco farming. In addition to forecasting, the study applied the linear Granger causality test to assess relationships between the variables. However, no statistically significant causality was found, suggesting that tobacco production is influenced by complex, non-linear dynamics. This implies that conventional linear models may be insufficient to capture the true nature of the production process. Overall, the study offers critical insights into long-term trends in tobacco agriculture and contributes to policy development. It supports producers in making informed, strategic decisions and enhances understanding of the sector's sustainability and economic stability. Thus, the study offers a new perspective on optimizing production through data-driven approaches and advanced modeling.

Keywords: Forecasting, Analyzing Tobacco, Artificial Neural Networks.

Türkiye'de Tütün Piyasasının Yapay Sinir Ağları ile Tahmin Edilmesi

Öz

Bu çalışma, Türkiye'deki tütün politikalarının gelecekteki dinamiklerini yapay sinir ağları kullanarak öngörmeyi amaçlamaktadır. 1961–2022 yılları arasındaki tütün üretimi, hasat alanı ve verim verileri, bu değişkenler arasındaki karmaşık ilişkileri anlamak amacıyla kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Sonuçlar, 2023 ile 2027 yılları arasında tütün üretimi ve hasat alanının kademeli olarak azalmasının beklendiğini, buna karşılık verimin önemli ölçüde artacağını göstermektedir. Bu eğilim, teknolojik gelişmelerin ve etkili tarım politikalarının olumlu etkilerini yansıtmaktadır. Zaman serisi tahminleri derin dendritik yapay sinir ağları (DeepDenT) yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu tahminler, tütün tarımının sürdürülebilirliği ve stratejik planlaması açısından değerli bilgiler sunmaktadır. Tahminlerin yanı sıra, çalışmada değişkenler arasındaki ilişkileri değerlendirmek amacıyla doğrusal Granger nedensellik testi uygulanmıştır. Ancak, istatistiksel olarak anlamlı bir nedensellik bulunamamıştır; bu durum, tütün üretiminin karmaşık ve doğrusal olmayan dinamiklerden etkilendiğini göstermektedir. Bu da geleneksel doğrusal modellerin üretim sürecinin gerçek doğasını yeterince yansıtamayabileceğini ima etmektedir. Genel olarak, bu çalışma tütün tarımındaki uzun vadeli eğilimlere dair kritik bulgular sunmakta ve politika geliştirme süreçlerine katkı sağlamaktadır. Üreticilerin bilinçli ve stratejik kararlar almalarına destek olmakta ve sektörün sürdürülebilirliği ile ekonomik istikrarına ilişkin anlayışı derinleştirmektedir. Böylece, veri temelli yaklaşımlar ve ileri düzey modelleme teknikleriyle üretim süreçlerinin optimize edilmesine yönelik yeni bir bakış açısı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Öngörü, Tütün Analizi, Yapay Sinir Ağları.

¹Yıldız Technical University, Department of Industrial Engineering, İstanbul, Türkiye, aysel.topsir@std.yildiz.edu.tr

²Giresun University, Department of Statistics, Giresun, Türkiye, ferdiiguler@gmail.com

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Introduction

Türkiye holds a significant position in global tobacco production. Tobacco cultivation, especially concentrated in the Aegean and Black Sea regions, makes a substantial contribution to the country's economy and agriculture. In recent years, fluctuations have been observed in the harvested tobacco areas and production volumes. The primary causes of these changes include agricultural policies, global market conditions, and climate change. The efficiency of Türkiye's tobacco production can vary considering these factors, making it increasingly important to forecast future production levels. Tobacco farming holds a crucial place worldwide. For instance, in Türkiye, tobacco production is predominantly based on family labor (Bilir et al., 2010). However, in recent years, the cultivation areas have been shrinking, and younger generations show less interest in this activity (Gumus and Gumus, 2005). Particularly, oriental tobacco produced in Türkiye is recognized for its high quality in global markets and is in demand (Karabacak, 2017). Despite this, Türkiye's position in tobacco production has declined over the past few years (Karabacak, 2017). Although tobacco production in Türkiye has decreased, tobacco consumption remains high in certain regions, contributing to the global problem of the harmful health effects of tobacco use.

While Türkiye was an important tobacco producer and exporter, it began importing tobacco in 1989 (Gumus and Gumus, 2005). The increasing tobacco consumption and changes in cigarette demand have turned Türkiye into a significant tobacco importer (Gumus and Gumus, 2005). Alongside this, rising tobacco use is a leading risk factor for several non-communicable diseases, including cancer, respiratory diseases, and cardiovascular diseases (Asi and Gozum, 2020). Globally, more than 8 million people die each year due to tobacco consumption, with most of these deaths directly attributable to tobacco use (Asi and Gozum, 2020). Tobacco products remain one of the most critical global health issues and are a focal point of health policies in many countries (Pesen et al., 2021). Tobacco uses and production are part of an international problem, with economic, social, and health-related impacts. Therefore, anti-tobacco policies continue to be a critical focus at both national and international levels (Pesen et al., 2021). Estimating future trends in tobacco production is particularly important for producers, as such forecasts play a crucial role in managing supply-demand balance, pricing, and trade policies. With increasing fluctuations in production and global market conditions, advanced forecasting methods have become necessary in recent years. In this context, artificial neural networks have emerged as a powerful tool for handling nonlinear data and providing forecasts for complex production processes.

Machine learning (ML) has recently been effectively utilized across various domains, including bioinformatics (Agraz et al., 2024), scientific ML (Agraz, 2024), energy studies (Magazzino et al., 2021), weather prediction (Shi et al., 2015), and forecasting (Voyant et al., 2017). Time series

forecasting problems have been solved using modern methods like artificial neural networks (Alpaslan et al., 2012). Although ANNs offer significant advantages for forecasting problems, determining their architectural structures remains a debated issue (Alpaslan et al., 2012). Incorporating such models into time series forecasting, especially for economic and social contexts such as tobacco consumption predictions, has become quite common in recent years (Erilli et al., 2010). Studies using ANNs for nonlinear predictions have achieved notable success (Erilli et al., 2010).

Over the last few years, deep learning models have come under consideration for their ability to detect complex relationships and long-distance dependencies. Variants of recurrent neural networks (RNNs) (long short-term memory (LSTM) gated recurrent unit (GRU)), convolutional neural networks (CNNs), and transformer models have been suggested for multivariate time series data processing. For both univariate and multivariate, single-step or multi-step time series forecasting (TSF) situations, these models have been shown to improve accuracy (Liu and Wang, 2024). Zhang et al. (2020) used machine learning methods such as backpropagation neural networks (BPNN) and random forests (RF) with hyperspectral imaging to predict tobacco yields and detect diseases. The study concluded that these methods significantly improved the accuracy of yield predictions and allowed for the early detection of diseases. Celik (2020) compared artificial neural networks and the multiplicative decomposition method to model and forecast tobacco production in Türkiye. In this study, years were used as input parameters, while tobacco production quantity was used as the output parameter. The results showed that the ANN model yielded better results with lower mean squared error (MSE) and mean absolute error (MAE) values. It was forecasted that by 2025, tobacco production would increase by 101.53% compared to 2019. Chen et al. (2024) used machine learning models based on spatial data and external variables to predict tobacco yields. In their study, models such as ARIMAX, ANN, and support vector regression (SVR) were compared. The inclusion of spatial data and external variables enhanced the accuracy of yield predictions, and the results demonstrated that these models hold significant potential for the management of tobacco production.

In this study, data on tobacco production, area harvested, and yield between 1961 and 2022 are analyzed to provide forecasts for the next five-year period. These three variables are used to create forecasting models employing artificial neural networks with lagged data. The linear Granger causality test identifies linear relationships between variables in time series data (Sameshima and Baccala, 2016). This test evaluates the extent to which variables are related to each other and whether these relationships are linear in nature, as reflected in model performance (i.e., root mean squared error (RMSE) values). In this study, the linear Granger causality test was applied based on the RMSE error metric provided by the DeepDenT application to determine whether there are linear relationships among the variables production, area harvested and yield. This approach contributes to understanding

how the model operates, and which variables may have stronger influences on one another. This approach aims to enhance our understanding of the factors influencing tobacco production processes and to contribute to more evidence-based agricultural policies and more realistic forecasts.

Ultimately, this study will enable a better assessment of changes in production processes, aiding both producers and policymakers in making more strategic decisions. By optimizing agricultural planning and resource use, it is expected that the tobacco sector and agricultural policies will become more resilient to economic uncertainties.

This study includes sections that enhance the understanding of tobacco production dynamics. The first section addresses the reasons behind the fluctuations in tobacco production in Türkiye, along with the general literature on tobacco production and forecasting in tobacco production, as well as the overall objectives of the study. The second section presents the materials and methods, detailing the data sources and techniques used. The third section elaborates on the findings and their significance, while the fourth section discusses the results and their implications in detail. This structure supports the study's objectives regarding the tobacco market in Türkiye and, accordingly, the forecasting targets related to tobacco production, area harvested, and yield.

2. Materials and Methods

2.1. Dataset

This study aims to present trends in the Turkish tobacco market by utilizing data on tobacco production, area harvested, and yield from 1961 to 2022. It seeks to explore the relationship between these three variables and to forecast the expectations for production, area harvested, and yield for the years 2023-2027 through predictive modeling. The data used in this study were obtained from secondary sources provided by reliable institutions such as the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (Anonymous, 2021) and the Turkish Statistical Institute (TurkStat) (Anonymous, 2022). The key subjects of analysis in the dataset are annual tobacco production, the total area planted with tobacco, and yield per hectare in Türkiye. While the data on tobacco production help explain the fluctuations over the years, agricultural policy, climate change, and conditions in the international market are among other factors considered in evaluating these changes. The data on harvested tobacco areas illustrate how much land is used for tobacco production and how this area has changed over time. Tobacco yield represents production per hectare, which is a crucial factor in measuring agricultural yield. Future production trends have been forecasted through time series analyses based on historical data, and the pairwise relationships between these three variables have been examined using artificial neural networks. In the analyses conducted in this study, the automatic

forecasting method based on DeepDenT, an open-access MATLAB application of a deep dendritic ANN proposed by Egrioglu and Bas (2024), was used as the automatic forecasting method.

The data presented in Table 1 detail the annual changes in tobacco production, area harvested, and fluctuations in yield. This table allows for an examination of the long-term trends in tobacco production and the interrelationships between these variables. These data were utilized in the forecasting model as training data (1961-2010, 80%), validation data (2011-2016, 10%), and test data (2017-2022, 10%).

Table 1. Historical data on tobacco production, harvested area, and yield in Türkiye (1961–2022).

Years	Production	Area Harvested	Yield
1961	101407	140625	7211
1962	89793	149346	6012
2022	82250	75051	10959

2.2. Forecasting

Forecasting is defined as the process of predicting the future values of a variable based on past and present data (Ataseven, 2013). Accurate forecasts play a critical role, especially in decision-making processes, as successful predictions enhance the accuracy of decisions and the efficiency of outcomes. This has led to an increasing interest in forecasting models (Ataseven, 2013). Time series forecasting using artificial neural networks has been widely applied in the literature (Alpaslan et al., 2012).

Time series are the fundamental building blocks of forecasting studies; however, in recent years, more flexible and effective methods have made significant contributions to this field. At this point, artificial neural networks have emerged as a powerful tool in forecasting models, offering flexibility and the capacity to operate without strict prerequisites (Guner et al., 2012). Additionally, a time series is a sequence formed by arranging observed values of any event in chronological order (Kaynar and Tastan, 2009). Time series analysis, on the other hand, is a method that aims to model the stochastic process that provides the structure of the observed series and make predictions about the future using past observations (Kaynar and Tastan, 2009). These methods allow for the careful analysis of past data and the identification of future trends (Benli and Yıldız, 2015). Among the most frequently used methods in time series analysis are simple exponential smoothing, Holt's linear trend method, and ARIMA models introduced by Box and Jenkins (Benli and Yıldız, 2015). There are numerous studies in the literature demonstrating the success of feedforward ANN models for time series forecasting (Guler et al., 2017). The flexible structure and data processing capabilities of ANNs provide significant contributions to time series analyses (Allende et al., 2002). Deep learning-based

approaches such as LSTM, GRU, and transformer are commonly applied in time series forecasting (Alizadeh and Nourani, 2024; Xiao et al., 2024; Si et al., 2024).

2.2.1 DeepDenT Application

Deep networks such as CNN, LSTM and GRU are commonly used because of their modular nature that can be constructed easily using libraries. However, in recent history, shallow ANNs implemented using different models of neurons and architectures are being found to result in more favorable prediction results over deep networks. The deep dendritic artificial neural network (DeepDenT) used in this study develops a new dendritic cell structure that can process multiple inputs and outputs such as LSTM and GRU cells (Egrioglu and Bas, 2024).

The model employed in our study is based on the DeepDenT-based automatic forecasting method proposed by Bas and Egrioglu (2024). In this method, the structure of the lagged variables (univariate or multivariate) is automatically determined by the algorithm with the help of partial autocorrelation coefficients and input significance tests. As stated in Steps 2 and 4, the model considers all statistically significant lagged variables during the forecasting process. Therefore, the model does not rely solely on a single-lag assumption. All meaningful structures, including multiple lags, were automatically evaluated by the algorithm.

In the study, the DeepDenT application automatically performs the forecasting process after splitting the data into training (80%), validation (10%), and test (10%) sets. The model is trained using the training data and validated using the validation set. Subsequently, the trained model is evaluated on the test set to obtain the final test results. The application provides only the time series error metrics for the test data as output. The software processes the test data based on the model that yields the best performance on the training and validation sets. The DeepDenT selects the best-performing model according to its validation performance and conducts forecasting accordingly. The algorithmic steps of the DeepDenT application are as follows (Bas and Egrioglu, 2024):

Algorithm 1. Automatic “DeepDenT” Algorithm

Step 1. The stationarity of the time series is examined. If the time series is found to be non-stationary, stationarity is achieved through differencing. Initially, it is assessed whether the non-stationarity arises from seasonality. If the following condition holds, the series is seasonally differenced using Equation (1).

$$|ACF_m| > 1.645 \sqrt{\frac{1+2(ACF_1+\sum_{i=2}^{m-1} ACF_i^2)}{n}} \quad (1)$$

$$Z_t = (1 - B^s)^D x_t \quad (2)$$

In Equation (2), s represents the seasonal period. After examining the non-stationarity caused by seasonality, non-stationarity stemming from trend is analyzed using unit root tests. The augmented Dickey-Fuller test is performed on the time series. If a unit root is detected, differencing is carried out using Equation (3).

$$Z_t = (1 - B)^d Z_t \quad (3)$$

Step 2. The lagged variables to be utilized in modeling the time series with DeepDenT are determined using the partial autocorrelation coefficients computed for the series and the corresponding standard errors of these coefficients.

Step 3. The deep neural network is trained using the lagged variables identified in Step 2.

Step 4. Important lagged variables are identified by performing an input significance analysis on the “DeepDenT” artificial neural network.

Step 5. “DeepDenT” is executed using the significant lagged variables identified in Step 4, and the process returns to Step 3.

Step 6. Predictions are generated by the trained “DeepDenT” model and then inverse-transformed based on the pre-processing steps applied earlier.

2.3. Artificial Neural Networks

Artificial neural networks can be defined as structures inspired by the human brain, consisting of weighted connections that are linked together and perform parallel information processing (Ozkan, 2011). In other words, ANNs are computer systems developed to autonomously and automatically perform the learning and discovery capabilities of the human brain (Guner et al., 2022). Moreover, ANNs can be considered the most powerful problem-solving technique capable of processing uncertain, incomplete, and non-normally distributed information (Zorlutuna and Bercan, 2019).

Figure 1 shows a typical artificial neuron, which consists of inputs, weights, a summation function, an activation function, and outputs.

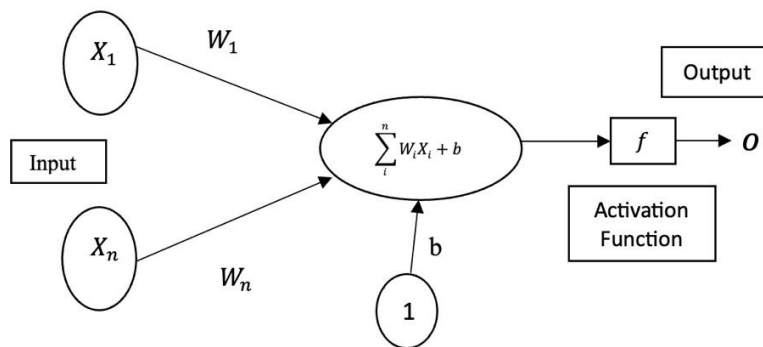


Figure 1. Artificial neural cell.

Time series forecasting with ANNs is used in many fields, and the success of forecasting performance is crucial for implementing the correct policies. This importance has led to increased interest and diversification of forecasting models (Altan, 2008). The six basic steps to be followed when conducting forecasting using ANNs with time series data are as follows (Guner et al., 2012):

Step 1. Structuring the data: This involves splitting the data into validation, training, and test sets, filling in missing values, and organizing the data in an appropriate format.

Step 2. Preprocessing the dataset: Primarily, the data is scaled to the range $[0,1]$ through transformation as shown in Equation (4). Here, X_i represents the input values.

$$x'_i = \frac{X_i - \text{Min}(X_i)}{\text{Max}(X_i) - \text{Min}(X_i)} \quad (4)$$

Step 3. Modeling: This is the process where the optimal algorithm is selected for data analysis, and this algorithm is trained on the data. In this step, the model learns from the data to create a function, which is then evaluated for accuracy using the test data. The model's accuracy is achieved by minimizing errors, and cross-validation techniques are typically used to test the model's generalization capability.

Step 4. Calculating the optimal weight values: When creating the ANN model, the learning algorithm described in Step 3 is run on the training data to find the optimal weight values. Using these weights, the model's output predictions are then calculated.

Step 5. Evaluating performance metrics: The ANN model's predictions (forecasts) on the test data are produced. Based on the differences between the actual values of the test data and the predicted values, the specified performance metric is calculated.

Step 6. Forecasting: Using the optimal weight values determined in Step 4, future predictions are generated.

3. Findings and Discussion

The study analyzes Türkiye's tobacco production, area harvested, and yield data between 1961 and 2022. Using artificial neural networks, the future levels of production, area harvested, and yield are forecasted. The data were obtained from reliable institutions such as FAO and TurkStat. The study projects a decline in both production areas and area harvested, but an increase in yield. Initially, the performances of time series forecasting models applied to production, area harvested, and yield were listed using various error metrics. In addition, the linear Granger causality test was applied to examine whether there are statistically significant linear relationships among the variables - production, area harvested, and yield - based on the RMSE values provided by the DeepDenT application. The test results, as shown in Table 4, indicated no significant linear causality between these variables at the 5% significance level. This suggests that past values of one variable do not significantly help in forecasting another within this model framework, supporting the independence of variable-specific forecasting structures.

Significant fluctuations occurred in Türkiye's tobacco policies between 1961 and 2022, with supply and demand shocks affecting production, area harvested, and yield during different periods. This study analyzes Türkiye's tobacco production processes using artificial neural networks and provides forecasts for the 2023-2027 period. These forecasts will be valuable for sustainability and planning in tobacco production.

As a result of our time series analysis, the fluctuations in tobacco production over the years and the possible causes of these fluctuations have been examined. The forecasts we made using the time series model provide important insights into future tobacco production and yield levels. In Table 2, the forecast results for the years were calculated and listed using the DeepDenT application, a freely accessible deep dendritic artificial neural network MATLAB application (Egrioglu ve Bas, 2024). According to the forecasts presented in Table 2, a gradual decrease in tobacco production and area harvested is projected between 2023 and 2027, while an increase in yield is expected. This suggests

that despite the decline in tobacco production and the area allocated for cultivation, yield may increase due to effective agricultural policies and advancing technology.

Table 2. Forecasted values for tobacco production, harvested area, and yield in Türkiye (2023–2027), based on DeepDenT model.

Forecasting of Years	Production	Area Harvested	Yield
2023	80471.35	68877.08	11111.07
2024	78374.09	62703.19	11203.65
2025	76699.89	56528.57	11253.34
2026	74628.92	50354.66	11281.32
2027	72637.27	44180.76	11325.71

In Figure 2, the annual values of tobacco data for production, area harvested, and yield between 1961 and 2022, as well as the forecast results for 2023 to 2027, are presented in a line graph. The forecast results, shown in red in the graph, predict a decrease in production and area harvested, while yield is expected to increase.

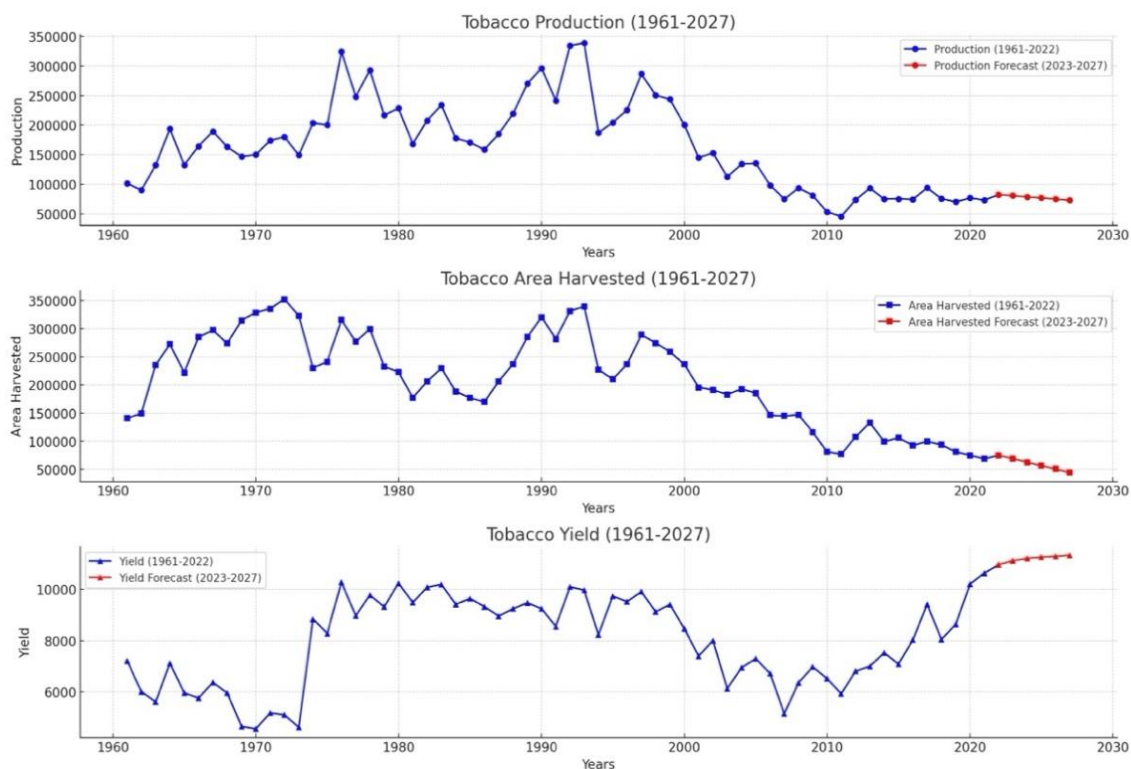


Figure 2. Annual values (1961–2022) and five-year forecasts (2023–2027) for tobacco production, harvested area, and yield in Türkiye.

As a result of these analyses, Table 3 lists the performances of the time series forecasting models applied to tobacco production, area harvested, and yield, using various error metrics such as root mean squared error, mean absolute percentage error (MAPE), symmetric mean absolute percentage error (SMAPE), mean absolute scaled error (MASE), and relative inverse mean absolute error

(REIMAE). It is observed that the area harvested exhibits the lowest values in both absolute MASE and MAPE rates and shows the best performance in error metrics compared to the other two variables. In contrast, the model appears to be more prone to errors in the forecasts for production. Although the yield forecasts are generally good, it is evident that there are still areas for improvement. The forecasting model provides significant improvements over basic models, but more advanced methods may be needed, particularly to minimize errors in production and yield forecasts.

Table 3. Performance metrics of the DeepDenT model for forecasting tobacco production, harvested area, and yield in Türkiye (test results for 2017–2022).

	RMSE	MAPE	SMAPE	MASE	REIMAE
Prdouction	12528.15	0.9581698	0.3886642	0.190768	2.034409
Area Harvested	7870.927	0.735053	0.1973015	0.12322	4.498653
Yield	1064.195	0.8663718	0.3882123	0.660289	0.959894

Table 4 presents the results of the linear Granger causality test. This test investigates linear causal relationships between time series. If the p-values in the Granger statistics are above 0.05, it indicates that one variable does not have a linear effect on the other, suggesting no direct relationship between these variables. According to Table 4, there is not statistically significant (linear) causal relationship between production, area harvested, and yield. These results indicate that the past values of one variable do not have a meaningful impact on predicting the future values of another. This suggests that external factors (e.g., climatic conditions, market dynamics) are more decisive in tobacco production.

Table 4. Results of the linear Granger causality test performed in R for tobacco production, harvested area, and yield.

	F Test	P-Value
Production / AreaHarvest	0.9657	0.3870
Area Harvested / Production	1.1635	0.3199
Yield / AreaHarvest	1.3180	0.2759
Area Harvested / Yield	0.6030	0.5507
Yield / Production	1.0144	0.3692
Production / Yield	1.1722	0.3172

4. Conclusions and Recommendations

The results of this study provide valuable insights into the trends and dynamics of tobacco production in Türkiye. Based on tobacco production, area harvested, and yield data between 1961 and 2022, the forecasts for 2023-2027 in Table 2 were calculated using single-lag time series models. According to the forecast results, a decrease in production and area harvested is expected, while an increase in yield is projected. Table 3 presents the forecasting model results for production, area

harvested and yield, validated through several error measures. Metrics such as RMSE, MAPE, SMAPE, MASE, and REIMAE offer complementary insights into the accuracy and reliability of the forecasts. Lower values in these metrics indicate better model performance. Among the three variables, the most accurate predictions were obtained for harvested area, while production forecasts exhibited relatively higher error rates.

In the future, more advanced ANN models, such as complex networks (CN), are planned to be used to make tobacco production forecasts more accurate and reliable (Mata, 2020). CN is an approach that, through complex and multi-layered structures, can model nonlinear relationships more effectively and has been successful with larger datasets. ANN models have effectively captured the nonlinear patterns in time series data, particularly for the area harvested and yield. However, production forecasts exhibited higher errors, suggesting that more complex or refined models may be necessary to improve accuracy in this area.

Limitations of the DeepDenT tool used in this study are some of the main limitations. The software does not report error rates for training and validation sets automatically when training the model, thus making it difficult to quantify the model's capacity to generalize and to detect potential overfitting. Moreover, the software lacks the functionality for manual adjustment of the lag structure. This limitation restricts the researcher's flexibility in defining the model's architecture. It is hard to reproduce the research owing to such limitations and reduces methodological transparency.

As shown in Table 4, the results of the linear Granger causality test conducted between production, area harvested, and yield indicate that there is no statistically significant linear causality among these variables at the 5% significance level. According to the test results, no direct linear causality relationship was found among the three variables. This suggests that these variables may be influenced by external factors not included in the current models (e.g., climatic conditions, market dynamics, agricultural policies).

Overall, the findings emphasize the potential of ANN and machine learning models in agricultural forecasting, while also underscoring the need for continuous refinement and exploration of additional factors that may influence production trends. This information can assist policymakers and stakeholders in developing strategies to improve land use efficiency and agricultural yield in the tobacco sector. Future studies should consider incorporating external economic and environmental variables to improve model accuracy and provide a more comprehensive understanding of the factors affecting tobacco production.

Acknowledgements

The authors would like to thank Assoc. Prof. Melih AĞRAZ and Prof. Dr. Erol EĞRİOĞLU for their valuable guidance and contributions throughout this study.

Authors' Contributions

All authors jointly contributed to the conception, data analysis, model development, and manuscript preparation.

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

- Agraz, M., Goksuluk, D., Zhang, P., Choi, B. R., Clements, R., Choudhary, G., and Karniadakis, G. (2024). ML-GAP: Machine Learning-Enhanced Genomic Analysis Pipeline with Autoencoders and Data Augmentation. *Frontiers in Genetics*, 15, 1442759.
- Agraz, M. (2024). Evaluating single multiplicative neuron models in physics-informed neural networks for differential equations. *Scientific Reports*, 14(1), 19073.
- Alizadeh, M. J., and Nourani, V. (2024). Multivariate GRU and LSTM models for wave forecasting and hindcasting in the southern Caspian Sea. *Ocean Engineering*, 298, 117193.
- Allende, H., Moraga, C., Salas, R. (2002). Artificial neural networks in time series forecasting: A comparative analysis. *Kybernetika*, 38(6), 685-707.
- Alpaslan, F., Egrioglu, E., Aladag, C. H., Tiring, E. (2012). Forecasting the lowest and highest gold prices using artificial neural networks. *Journal of Statistical Research*, 9(2), 12-19.
- Altan, S. (2008). An alternative approach for forecasting exchange rate performance using artificial neural networks. *Journal of Gazi University Faculty of Economics and Administrative Sciences*, 10(2), 141-160.
- Anonymous, (2021). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available from: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- Anonymous, (2022). Turkish Statistical Institute. Available from: <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=92&locale=tr>.
- Ataseven, B. (2013). Forecasting modeling with artificial neural networks. *Journal of Proposal*, 10(39), 101-115.
- Asi, E., Gozum, S. (2020). Reactions to policies on tobacco products and their implications in Turkey. *Journal of Anatolian Nursing and Health Sciences*, 23(2), 319-330.
- Bas, E., and Egrioglu, E. (2024, September 5–6). *A new automatic forecasting method based on deep dendritic artificial neural network*. The 18th International Days of Statistics and Economics, Prague, Czech

- Republic, pp. 24–31. https://msed.vse.cz/msed_2024/article/msed-2024-778-paper.pdf.
- Benli, Y. K., Yıldız, A. (2015). Forecasting gold prices using time series methods and artificial neural networks. *Journal of Dumlupınar University Social Sciences*, (42).
- Bilir, N., Cakir, B., Dagli, E., Erguder, T., Onder, Z. (2010). Tobacco control policies in Turkey. World Health Organization Report. Available from: URL: <http://www.euro.who.int/documentE93038>.
- Celik, S. (2020). Estimation modelling of tobacco production in Turkey: comparative analysis of artificial neural networks and multiplicative decomposition methods. *International Journal of Trend in Research and Development*, 7(4), 154-187.
- Chen, G., Jiang, S., Chen, D. (2024). Enhanced tobacco yield prediction using spatial information and exogenous variable-driven machine learning models. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(9), 2401.
- Egrioglu, E., and Bas, E. (2024). A new deep neural network for forecasting: Deep dendritic artificial neural network. *Artificial Intelligence Review*, 57(7), 171.
- Erilli, N. A., Egrioglu, E., Yolcu, U., Aladag, C. H., Uslu, V. R. (2010). Forecasting inflation in Turkey using a hybrid approach of feed-forward and feedback artificial neural networks. *Journal of Dogus University*, 11(1), 42-55.
- Guler, D., Saner, G., Naseri, Z. (2017). Forecasting the import volumes of oilseed crops using ARIMA and artificial neural network methods. *Journal of Balkan and Near Eastern Social Sciences*, 3(1), 60-70.
- Gumus, A. H., Gumus, S. G. (2005). Current practices and future of the tobacco sector in Turkey. *Journal of Agricultural Economics*, 11(1 and 2), 81-89.
- Guner Tosunoglu, N., Keskin Benli, Y. (2012). Forecasting of Morgan Stanley Capital International Turkey Index using artificial neural networks. *Ege Academic Review*, 12(4).
- Guner, S. N., Demir, H. U. (2022). Forecasting iron and steel imports using artificial neural networks and time series methods. *Journal of Sakarya Economics*, 11(3), 389-397.
- Karabacak, K. (2017). Tobacco farming and its geographical distribution in Turkey. *Journal of Geographical Sciences*, 15(1), 27-48.
- Kaynar, O., Tastan, S. (2009). Comparison of MLP artificial neural networks and ARIMA models in time series analysis. *Journal of Erciyes University Faculty of Economics and Administrative Sciences*, (33).
- K. Sameshima and L. A. Baccala, *Methods in Brain Connectivity Inference Through Multivariate Time Series Analysis*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2016.
- Liu, X., and Wang, W. (2024). Deep time series forecasting models: A comprehensive survey. *Mathematics*, 12(10), 1504.
- Magazzino, C., Mele, M., and Schneider, N. (2021). A machine learning approach on the relationship among solar and wind energy production, coal consumption, GDP, and CO2 emissions. *Renewable Energy*, 167, 99-115.
- Mata, A. S. D. (2020). Complex networks: a mini-review. *Brazilian Journal of Physics*, 50, 658-672.
- Ozkan, F. (2011). An alternative approach to exchange rate forecasting with artificial neural networks. *Journal of Eskisehir Osmangazi University, Faculty of Economics and Administrative Sciences*, 2.
- Pesen, S. F., Karadogan, S., Akbulut, A. (2021). A general overview of tobacco use and tobacco control policies in the world and Turkey. *Turkey Health Literacy Journal*, 2(3), 191-196.
- Shi, X., Chen, Z., Wang, H., Yeung, D. Y., Wong, W. K., and Woo, W. C. (2015). Convolutional LSTM network: A machine learning approach for precipitation nowcasting. *Advances in neural information processing systems*, 28.
- Si, Y., Nadarajah, S., Zhang, Z., and Xu, C. (2024). Modeling opening price spread of Shanghai Composite Index based on ARIMA-GRU/LSTM hybrid model. *PLOS ONE*, 19(3), e0299164.
- Voyant, C., Notton, G., Kalogirou, S., Nivet, M. L., Paoli, C., Motte, F., and Fouilloy, A. (2017). Machine learning methods for solar radiation forecasting: A review. *Renewable energy*, 105, 569-582.
- Xiao, J., Bi, S., and Deng, T. (2024). Comparative analysis of LSTM, GRU, and Transformer models for stock price prediction. *Manuscript submitted for publication*.
- Zhang, M., Wang, J., Li, X. (2020). Tobacco yield prediction and disease detection using hyperspectral imaging and machine learning methods (BPNN, RF). *Journal of Agricultural Engineering and Remote Sensing*, 35(2), 123-135.
- Zorlutuna, S., Bircan, H. (2019). Comparison of time series analysis and artificial neural network methods in forecasting the number of tourists coming to Turkey. *Journal of Cumhuriyet University Faculty of Economics and Administrative Sciences*, 20(2), 164-185.

Bir Bina İçi LoRaWAN Ağında SNR ile RSSI İlişkisinin MATLAB Eğri Uydurma Yöntemi Yardımıyla Regresyon Analizi

Ömer YILDIZ^{1*} , Sait Eser KARLIK² 

Öz

Günümüzde şehirler hızla büyümektedir. Artan nüfus, kent merkezlerindeki kaynakların daha verimli kullanılması gerekliliğini ortaya çıkarırken; bu durum akıllı şehir ve nesnelerin interneti kavramlarını beraberinde getirmiştir. Yaşam alanlarında düşük maliyetli, kablosuz ve uzaktan veri alışverişi ile kaynak yönetimi, takibi, performans analizi ve optimizasyonu yapmaya imkân sağlayan nesnelerin interneti uygulamaları, LoRaWAN'ı karşımıza çıkarmaktadır. LoRaWAN teknolojisi, uzak mesafe iletişimde düşük altyapı maliyeti, düşük pil tüketimi, kolay kurulum ve genişleyebilir ağ yapısı özelliği sayesinde yaygınlaşmıştır. LoRaWAN ağ planlamasında, RSSI, SNR ve SF değerleri ağ verimliliği için önem arz eder. Bu çalışmada, bir bina içi LoRaWAN ağından elde edilen veriler ve MATLAB eğri uydurma yöntemi kullanılarak SNR ile RSSI ilişkisinin analizi gerçekleştirilmiştir. Eğri uydurmada, polinom, Fourier ve Gauss regresyon modelleri incelenmiştir. Uyum iyiliği parametreleri açısından, ağ verilerine en yüksek uyumu sağlayan eğrinin denkleminin 9. dereceden bir polinom ile ifade edilebildiği gözlenmiştir. SF parametresinin SF7 değerinde sabit olduğu durumda, SNR ile RSSI arasındaki ilişkiyi tanımlamak için ağ verilerine uydurulan eğrilerin uyum iyiliği karşılaştırması yapıldığında; R^2 değeri, polinom regresyon modeli kullanıldığında 0.9362, Fourier regresyon modeli kullanıldığında 0.8459, Gauss regresyon modeli kullanıldığında ise 0.8572 olarak belirlenmiştir. RMSE değerleri ise, polinom regresyon modelinde 0.2440, Fourier regresyon modelinde 0.3895 ve Gauss regresyon modelinde 0.3828 olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: LoRaWAN, RSSI, SNR, SF, Eğri uydurma.

Regression Analysis of SNR and RSSI Relation in an Indoor LoRaWAN Network with MATLAB Curve Fitting Method

Abstract

Today, cities are growing rapidly. While increasing population reveals the requirement for more efficient use of resources in urban centers; this situation has brought along concepts of smart city and internet of things. Internet of things applications, which enable resource management, tracking, performance analysis and optimization with low-cost, wireless and remote data exchange in living spaces, bring us LoRaWAN. LoRaWAN technology has become widespread thanks to its low infrastructure cost, low battery consumption, easy installation and expandable network structure in long haul communication. In LoRaWAN network planning, RSSI, SNR and SF values are important for network efficiency. In this study, the relation between SNR and RSSI is analyzed using data obtained from an indoor LoRaWAN network and MATLAB curve fitting method. In curve fitting, polynomial, Fourier and Gaussian regression models are analyzed. In terms of goodness-of-fit parameters, it is observed that the equation of the curve with the highest fit to the network data can be obtained with a 9th order polynomial. When the goodness-of-fit comparison of curves fitted to the network data in order to define the relation between SNR and RSSI for the case where the SF parameter is constant at SF7 is made, the R^2 value is determined as 0.9362 when polynomial regression model is used, as 0.8459 when Fourier regression model is used, and as 0.8572 when Gaussian regression model is used. RMSE values are found as 0.2440 in polynomial regression model, 0.3895 in Fourier regression model and 0.3828 in Gaussian regression model.

Keywords: LoRaWAN, RSSI, SNR, SF, Curve fitting.

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği, Bursa, Türkiye, 511905009@ogr.uludag.edu.tr

²Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye, ekarlik@uludag.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

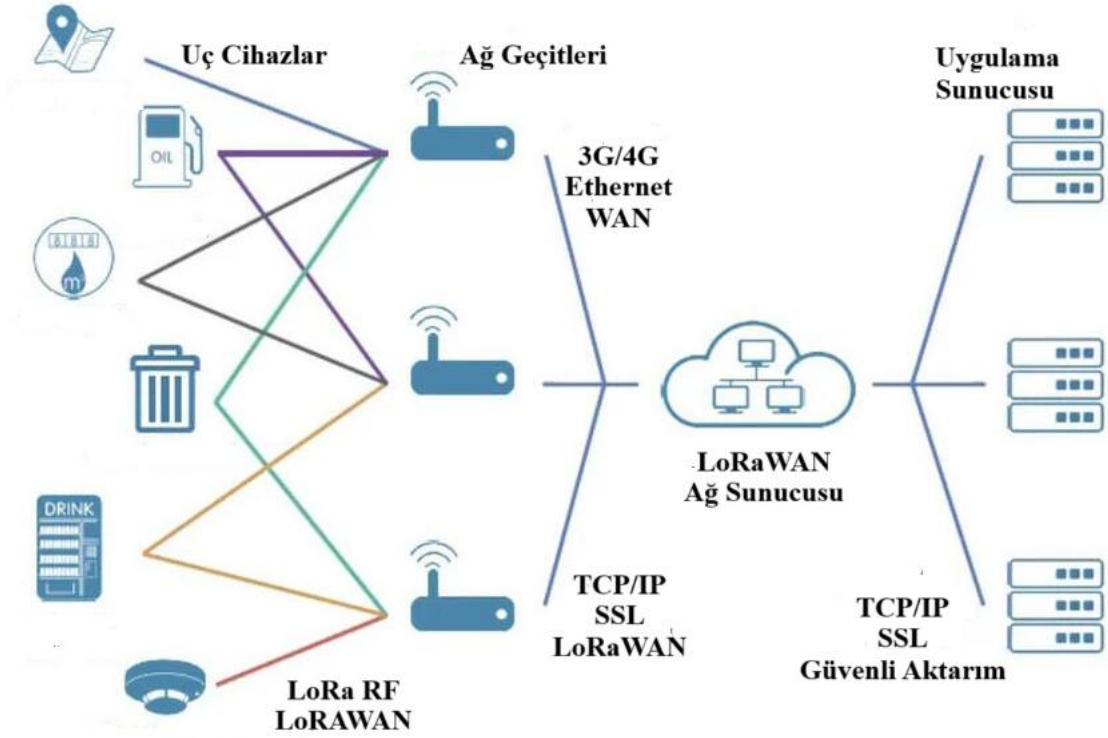
1. Giriş

Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT) kavramı gittikçe önem kazanmaktadır. Forbes raporuna göre Dünya üzerinde 2025 yılında 75 milyar bağlantılı cihazın olması beklenmektedir (Newman, 2019). IoT, tasarım, yönetim, bakım, veri, bulut ve bağlantı başlıklarını yeniden tanımlamaktadır. IoT ile, algılanan verinin uzak cihaz ve sunuculara aktarımı kolaylaşırken; sistem verimliliği artmaktadır (Chaudhari ve Zennaro, 2020). Genel olarak, IoT uygulamaları, ölçeklenebilir ağlar üzerindeki çeşitli uygulamalar için enerji tasarruflu ve düşük karmaşıklığa sahip düğümler gerektirir. Şu anda, kablosuz teknolojilerden IEEE 802.11 kablosuz yerel alan ağları (Wireless Local Area Networks, WLANs), IEEE 802.15.1 Bluetooth, IEEE 802.15.3 ZigBee, düşük hızlı kablosuz kişisel alan ağları (Low Rate Wireless Personal Area Networks, LR-WPANs) ve benzerleri, kısa menzilli ortamlarda, algılama amaçlı uygulamalarda kullanılmaktadır (Chaudhari ve Zennaro, 2020). Buna karşılık, kablosuz hücresel 4G ve 5G gibi teknolojiler uzun menzil ihtiyacını karşılamaktadır (Chaudhari ve Zennaro, 2020). WLAN ve Bluetooth yüksek hızlı veri iletişimi için tasarlanırken; ZigBee ve LR-WPAN, yerel ortamlarda kablosuz algılama uygulamaları için tasarlanmış olup uzun mesafelerde düşük veri hızı uygulamaları için kullanılır. 4G ve 5G teknolojileri, ağırlıklı olarak, kablosuz algılama uygulamaları için değil, ses ve veri iletişimi için tasarlanmıştır. Bu teknolojiler, bazı ülkelerde şu veya bu şekilde algılama için kullanılsa da, kablosuz iletişimde kullanılan performans ölçütleri açısından, performansları, sensör ağları için kabul edilebilir seviyelerde olmayabilmektedir (Chaudhari ve Zennaro, 2020). Bu nedenle, bu tür gereksinimleri desteklemek için, düşük güçlü geniş alan ağları (Low Power Wide Area Networks, LPWANs) adı verilen yeni bir IoT ağ yapısı geliştirilmiştir. LPWAN, geniş kapsama alanı, düşük güç tüketimi, düşük veri hızları ve uzun pil ömrü sağlayan kablosuz IoT iletişim teknolojisi (URL-1, 2018).

Uzun menzilli geniş alan ağı (Long Range Wide Area Network, LoRaWAN), LPWAN teknolojilerinden biri olup günümüzde 23'ten fazla ülkede 170 adet ticari ağ operatörü tarafından kullanılmaktadır (URL-2, 2022). LoRaWAN, Uluslararası Haberleşme Birliği (International Telecommunication Union, ITU) tarafından ITU-T Y.4480 koduyla 2021 yılında uluslararası bir haberleşme standardı olarak tanımlanmıştır (URL-3, 2021).

Şekil 1'de gösterilen mimariye (URL-4, 2024) sahip LoRaWAN haberleşme ağında, farklı işlevlere sahip uç cihazlar, yukarı yönlü iletimde, mesaj paketlerini LoRa kablosuz ara yüzü aracılığıyla ağ geçidine iletmektedir. Ağ geçidi, bu mesaj paketlerini kablolu veya kablosuz iletim yöntemleri kullanarak LoRaWAN ağ sunucusuna ve uygulama sunucusuna aktarır (URL-5, 2024). LoRaWAN ağ sunucuları, kendilerine ulaşan mesaj paketlerini, türlerine göre (katılım, sorgu, uygulama) işler ve gerektiğinde aşağı yönlü bir yanıt oluşturarak sisteme iletir. LoRaWAN ağındaki uç cihazlar, donanım takibi, su sayacı takibi, hayvan takibi, sağlık verisi takibi vb. uygulamalar için

kullanılabilmektedir (Alipio ve Bures, 2024). LoRaWAN ağında, A, B ve C sınıfı olmak üzere, üç tür uç cihaz bulunmaktadır (Alipio ve Bures, 2024).



Şekil 1. LoRaWAN ağ mimarisi.

LoRaWAN haberleşme protokolünde, performans ölçüm parametrelerinden yayılım faktörü (Spreading Factor, SF), işaret-gürültü oranı (Signal-to-Noise Ratio, SNR) ve alınan işaret gücü göstergesi (Received Signal Strength Indicator, RSSI) oldukça önemlidir. Ağ kurulumlarında, uç cihaz ile ağ geçidi arasındaki mesafe ne kadar uzak olursa uç cihazın kullanacağı SF değeri o kadar yüksek olur. SF parametresinin aldığı her değere göre diğer parametrelerin alabileceği alt sınır değerler Tablo 1’de verilmiştir (Lee ve ark., 2011). LoRaWAN ağ sunucusu, uç cihaz mesajlarındaki SF, SNR ve RSSI parametrelerini de kayıt altına alır.

Tablo 1. SF parametresinin değerine göre LoRaWAN parametrelerinin alt sınır değerleri.

SF	ToA (s)	SNR (dB)	RSSI (dBm)
7	0.057	-6	-123
8	0.103	-9	-126
9	0.185	-12	-129
10	0.371	-15	-132
11	0.660	-17.5	-134.5
12	1.319	-20	-137

RSSI; kablosuz ortamdan geçtikten sonra alıcıya ulaşan işaretin güç seviyesini gösterir. LoRaWAN cihazı veya ağ geçidi tarafından alınan işaretin gücünü belirlemede kullanılır. SNR; alınan işaret gücünün iletişim kanalındaki gürültü gücüne oranıdır. LoRaWAN'da veri iletiminin kalitesini ve güvenilirliğini belirleyen önemli bir parametredir. Pil/enerji verimliliği; IoT cihazlar için önemli olup LoRaWAN cihazların, pille çalışırken, genellikle uzun süre çalışması beklenir. Pil ömrü; ağın enerji tüketimini en aza indirme ve cihazın çalışma ömrünü en üst düzeye çıkarma konusundaki verimliliğini değerlendirmek için önemli bir metriktir. Havada kalma süresi (Time on Air, ToA); bir LoRaWAN iletiminde, verinin kablosuz ortamdaki gönderim süresini ifade etmekte olup pil ömrünü ve ağ kapasitesini etkiler. Gecikme; bir paketin cihazdan ağ geçidine veya ağ geçidinden cihaza gitmesi için geçen süreyi ifade eder. Düşük gecikme, gerçek zamanlı veya zaman açısından kritik uygulamalar için gereklidir. Doğruluk; LoRaWAN ağı içindeki bir uç cihazın coğrafi konumunu belirlemedeki hassasiyet açısından kritik bir faktördür (Alipio ve Bures, 2024).

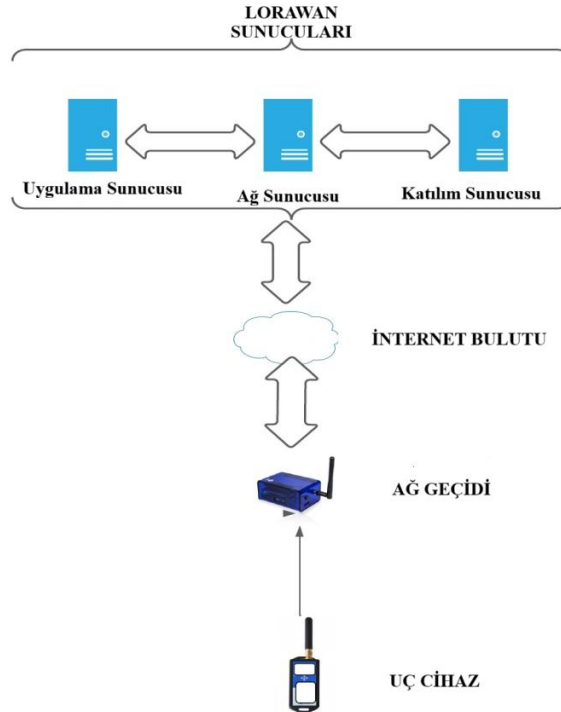
Literatürde SF, SNR ve RSSI parametrelerinin dikkate alındığı ve incelendiği çalışmalar mevcuttur. Örnek çalışmalardan bazılarında, kurulan ağdaki SF, SNR ve RSSI değerleri analiz edilmiştir (Silveira ve ark., 2021, Alkhazmi ve ark., 2023). Bir diğer araştırmada ise, SNR ve işlem hacmi (throughput) incelenirken, sadece SF ve SNR ilişkisi ile elde edilen veriler analiz edilmektedir (Purnama ve Nashiruddin, 2019). Geo-konum kapsamındaki başka bir çalışmada ise, RSSI, SNR ve paket iletim başarı oranına göre adaptif SF ataması için bir algoritma geliştirilmiştir (Ahmed ve Annamalai, 2023). Benzer bir diğer araştırmada ise, RSSI kullanılarak konum belirleme uygulamaları çalışılmış; işaret üzerindeki çevresel etkenlerin analizi ile uzun ve kısa mesafelerdeki yol kaybı etkileri incelenmiştir (Moradbeikie ve ark., 2023). RSSI odaklı bir başka çalışma ise, akıllı şehir uygulamalarından olan akıllı park için geliştirilmiş bir LoRaWAN uygulamasını içermektedir (Santana ve ark., 2023). LoRaWAN'ın sualtı sistemlerinde kullanımına odaklanan bir diğer araştırmada, SF, SNR, RSSI ve paket kaybı arasındaki ilişki incelenmiştir (Damayanti ve ark., 2024). LoRaWAN performans analizleri yalnızca açık alanlarla sınırlı kalmayıp, ormanlık alanlarda da gerçekleştirilmiş; bu bağlamda, SF, SNR, RSSI ve paket iletim oranı parametrelerinin mesafe ile ilişkisi değerlendirilmiştir (Sharma ve ark., 2022). Deneysel çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen bir diğer araştırmada ise, bir yerleşkede LoRa kullanılarak SF, SNR, RSSI ve paket iletim oranlarının görüş açısının mevcut olduğu ve olmadığı senaryolara göre nasıl değiştiği analiz edilmiştir (Kaur ve ark., 2024). Atıfta bulunulan yukarıdaki çalışmaların yanısıra, yapılan kapsamlı literatür analizi sonucunda, SF, SNR, RSSI ve paket kaybı ilişkilerinin eğri uydurma regresyon modelleri ile analiz edildiği ve ağ verimliliğin bu çerçevede incelendiği bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu makalede, sabit SF değeri ve kabul edilebilir paket kayıp oranı için, SNR ve RSSI değerleri arasındaki ilişkinin tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, MATLAB eğri uydurma aracı (Curve Fitting Toolbox) kullanılarak, regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sayesinde,

LoRaWAN için önemli olan performans parametreleri arasındaki ilişki ile ilgili yeni bir çıktı elde edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Şekil 2’de gösterildiği gibi, 1 adet ağ geçidi ve 1 adet uç cihaz ile birlikte bina içi ortamda kurulan LoRaWAN ağında, SF, RSSI, SNR performans parametreleri ve paket kaybı değerleri üzerinden incelemeler yapılmıştır. Testleri gerçeklemek için kurulan sistem bileşeni, Şekil 3 ile verilen LoRaWAN uç cihazından oluşmaktadır. LoRaWAN uç cihazı ile ağ geçidi bir binanın aynı katında bulunmaktadır. Uç cihaz, periyodik zaman aralıklarıyla, yukarı yönde, LoRa kablosuz arayüzü ile ağ geçidine mesaj paketleri göndermektedir. Ağ geçidi ise kablosuz internet üzerinden internete bağlanmakta, bulutta çalışan ağ sunucuları ile uçtan uca ağ tasarımı tamamlanmaktadır. Uç cihaz, ağ geçidi ve diğer sistem parametreleri buluttaki sunucu sistemlerinde tanımlanmıştır. Kurulum sonrası sistemin ürettiği ve ağ sunucusu tarafından kayıt altına alınan SF, SNR, RSSI değerleri ve paket iletim sayıları belirlenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan veri seti, kurulan LoRaWAN ağından elde edilen bu sistem kayıtlarından oluşmaktadır.



Şekil 2. Kurulan LoRaWAN ağının mimarisi.



Şekil 3. LoRaWAN uç cihazı.

Ağdaki uç cihaza ait teknik özellikler Tablo 2 ile verilmiştir (URL-6, URL-7, 2024). Ağ geçidi için RAK Wireless markasının Şekil 4’te verilen ürünü kullanılmış olup teknik özellikleri Tablo 3’te açıklanmıştır (URL-8, 2024). Ağ sunucusu olarak The Things Network yapısı kullanılmıştır (URL-9, 2024).

Tablo 2. Uç cihaz teknik özellikleri.

Özellik	Açıklama
LoRaWAN versiyonu	LoRaWAN 1.0.2 – Sınıf A
LoRaWAN çıkış gücü	14 dBm (maksimum)
LoRaWAN alıcı hassasiyeti	-146 dBm (minimum)
Pil ömrü	3 yıl
Çalışma sıcaklıkları	-40° C - 80° C
Boyutlar	35 x 85 x 33 mm
Frekans	EU868 MHz



Şekil 4. LoRaWAN ağ geçidi.

LoRaWAN uç cihazının kurulumuna ait foto Şekil 5’te verilmiştir. Bina içinde kurulan LoRaWAN ağından elde edilen 67 günlük veriler kayıt altına alınmıştır.

Tablo 3. Ağ geçidi teknik özellikleri.

Özellik	Açıklama
LoRaWAN versiyonu	LoRaWAN 1.0.2 – Sınıf A
LoRaWAN çıkış gücü	27 dBm (maksimum)
LoRaWAN alıcı hassasiyeti	-142 dBm (minimum)
Besleme değerleri	DC 5V / 2.5 A
Çalışma sıcaklıkları	-10° C - 65° C
Boyutlar	66 x 96 x 47 mm
Frekans	EU868 MHz

**Şekil 5.** Uç Cihaz kurulumu.

Kaydedilen veriler analiz edilerek aralarındaki ilişki MATLAB eğri uydurma aracı ile incelenmiştir. MATLAB eğri uydurma aracı, birden fazla değişkenin aralarındaki ilişkiyi formüle etmeye yarayan bir araçtır. Veri analizi yapılmasına, verilerin işlenmesine, aday modellerin karşılaştırılmasına ve aykırı değerlerin kaldırılmasına olanak tanır. Sağlanan doğrusal ve doğrusal olmayan model kitaplığı kullanılarak, regresyon analizi yapılabilir veya özel denklemler belirlenebilir. Bu araç, ayrıca, spline, interpolasyon ve yumuşatma gibi parametrik olmayan modelleme tekniklerini destekler. Bir uyum oluşturduktan sonra, çizim, interpolasyon ve ekstrapolasyon için çeşitli son işlem yöntemleri uygulanabilir; güven aralıkları tahmin edilebilir (URL-10, 2024). Uç cihaz ile ilgili elde edilen veriler, eğri uydurma aracında analiz edilmiştir. Tablo 4, eğri uydurma aracında bulunan uyum iyiliği (Goodness-of-Fit, GoF) parametrelerini ve açıklamalarını göstermektedir (URL-11, 2024).

Tablo 4. MATLAB eğri uydurma aracının uyum iyiliği parametreleri.

Parametre	Açılımı
RMSE	Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Square Error)
R^2	R-Kare (R-Square)
Adj- R^2	Düzeltilmiş R-Kare (Adjusted R-Square)
SSE	Karesel Hataların Toplamı (Sum of Squared Errors)

RMSE: n skaler gözlemden oluşan gerçek dizi A ve bir tahmin dizisi F söz konusu iken, RMSE (1) ile tanımlanır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |A_i - F_i|^2} \quad (1)$$

RMSE için en iyi değer 0 olup, çıkan sonuç 0 değerine ne kadar yakın ise veri seti ile eğri sonucu arasındaki uyum o kadar doğrudur (URL-12, 2024).

R^2 ve Adj- R^2 : Uyum, bir istatistik geçerlilik barındırmak zorundadır ve bu iki değer, uyumun verilerin varyasyonunu açıklamada ne kadar başarılı olduğunu gösterir. Başka bir deyişle R^2 , gözlenen değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki korelasyon katsayısının karesidir. Çoklu korelasyon katsayısının karesi ve belirleme katsayısı olarak da adlandırılır. R^2 , regresyonun kareler toplamı (Sum of Squares of Regression, SSR) ile toplam kareler toplamının (Total Sum of Squares, SST veya TSS) oranı olarak tanımlanır (URL-13, 2024).

SSR ,

$$SSR = \sum_{i=1}^n w_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (2)$$

ile hesaplanır. Burada, w_i , i . ağırlık katsayısı; $\hat{y}_i$, i . tahmin edilen değer ve $\bar{y}$ gözlenen değerlerin ortalamasıdır (URL-13, 2024).

SST ,

$$SST = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y})^2 \quad (3)$$

ile belirlenir. Burada y_i i . gözlenen değerdir (URL-13, 2024).

(2) ve (3) denklemleri göz önüne alındığında, R^2 ,

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (4)$$

ile ifade edilir. (4) formülündeki SSE ,

$$SSE = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5)$$

ile elde edilir. Burada, SSE değerinin 0'a yakın olması (dolayısıyla R^2 'nin 1 değerine yaklaşması), hatanın az ve uyum iyiliğinin yüksek olduğu anlamını taşır.

Adj- R^2 ,

$$R^2_{adj} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \frac{SSE}{SST} \quad (6)$$

ile hesaplanır (URL-12, 2024). Burada, n gözlem sayısı ve p regresyon katsayısı değeridir. Örneğin, doğrusal bir uyum için p değeri 2'dir. Adj- R^2 , 0 ile 1 arasında değer alabilir. Adj- R^2 değeri 1'e ne kadar yakın ise uyum o kadar iyidir (URL-13, 2024).

3. Bulgular ve Tartışma

Kurulan iç ortam LoRaWAN ağından elde edilen veri seti hakkındaki bilgiler, Tablo 5 ile verilmiştir.

Tablo 5. Kurulan LoRaWAN ağından elde edilen veri seti hakkındaki bilgiler.

Veri Türü	Değer
Kayıt Süresi (Gün)	67
Tarih Aralığı	23.07.2024-27.09.2024
SF	7
Başarıyla İletilen Paket Sayısı (Adet)	165
Başarıyla İletilen Paket/Gönderilen Toplam Paket (Adet/Adet)	165/194
Paket İletim Başarı Oranı (%)	%85.05
Ortalama SNR (dB)	7.46
Ortalama RSSI (dBm)	-96.43

Tablo 1'de belirtildiği gibi 7-12 arasında değişen değerler alabilen SF, sistem tarafından otomatik olarak atanmakta olup kullanıcı tercihiyle belirlenmemektedir. Kurulan ağda, ağ geçidi ile uç cihaz arasındaki mesafenin yakın olması ve kayıt süresince bu mesafenin sabit kalması nedeniyle, SF sürekli olarak 7 değerini almıştır. Uç cihazdan gönderilen toplam 194 mesajdan 165'i ağ sunucusuna ulaşarak değerlendirmeye alınmıştır. Kablosuz iletişimde meydana gelebilecek yol kayıplarının, iletim hatalarının, uç cihazdan ya da ağdan kaynaklanan çeşitli aksaklıkların bu duruma neden olduğu düşünülmektedir. Ağda yalnızca tek bir uç cihaz bulunduğundan, paket iletim başarı oranına yönelik karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirilmemiştir. Ağ sunucusuna ulaşan 165 adet mesajdan elde edilen RSSI ve SNR ortalama değerlerinin yanısıra paket iletim başarı oranı da Tablo 5'te sunulmuştur.

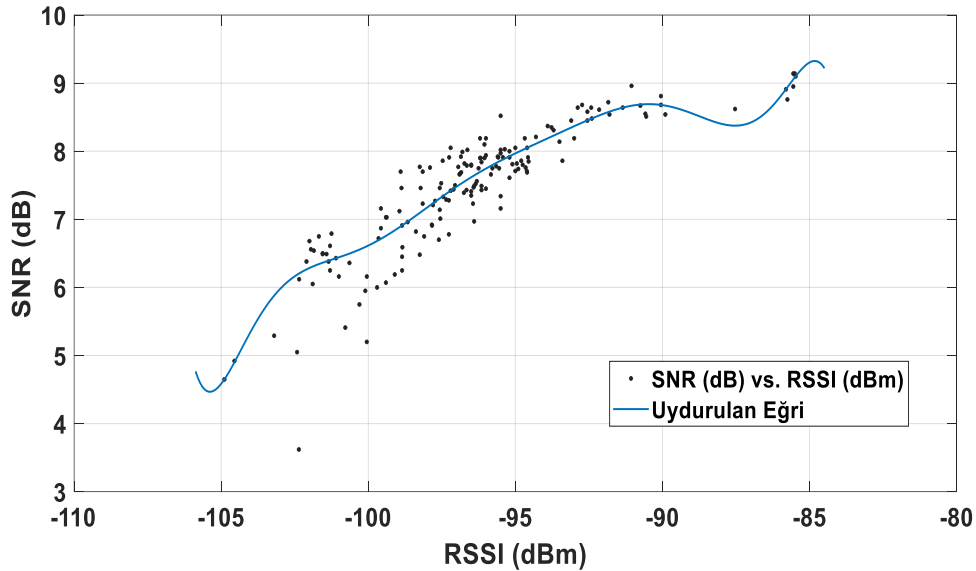
Tablo 6, veri setindeki RSSI ve SNR değerlerinden elde edilen minimum, maksimum, ortalama, medyan, mod ve değişim aralığı gibi istatistiki verileri göstermektedir.

Tablo 6. Veri setindeki RSSI ve SNR değer dağılımından elde edilen istatistiki veriler.

	RSSI (dBm)	SNR (dB)
Minimum	-104.9	3.62
Maksimum	-85.47	9.14
Ortalama	-96.43	7.46
Medyan	-96.5	7.69
Mod	-95.5	7.91
Değişim Aralığı	19.43	5.52

Veri setinden elde edilen değerler, MATLAB üzerinde eğri uydurma yöntemi ile analiz edilmiştir. Bu analiz sayesinde, iç ortamda kurulu bir LoRaWAN ağında, SNR ile RSSI arasındaki ilişki regresyon modelleri ile incelenmiş ve formüle edilmiştir. Bu ilişkilerin gösterildiği grafikler Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8 ile verilmiştir.

Şekil 6’da, siyah noktalar, ağdan elde edilen RSSI ve SNR değerlerini; mavi renkli eğri ise, SNR ve RSSI değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren, eğri uydurma yöntemi ile belirlenen ve polinom regresyon modeline karşılık gelen eğriyi göstermektedir. Şekil 6’da verilen eğrinin, ağ verileriyle uyum iyiliğini belirten parametreler Tablo 7’de sunulmuştur.



Şekil 6. SNR ve RSSI arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (polinom regresyon modeli).

Tablo 7. SNR-RSSI eğrisinin uyum iyiliği parametreleri (polinom regresyon modeli için).

Parametre	Değer
SSE	9.2273
R^2	0.9362
Adj- R^2	0.9325
RMSE	0.2440

Şekil 6'daki, SNR ve RSSI ilişkisini gösteren eğrinin denklemi

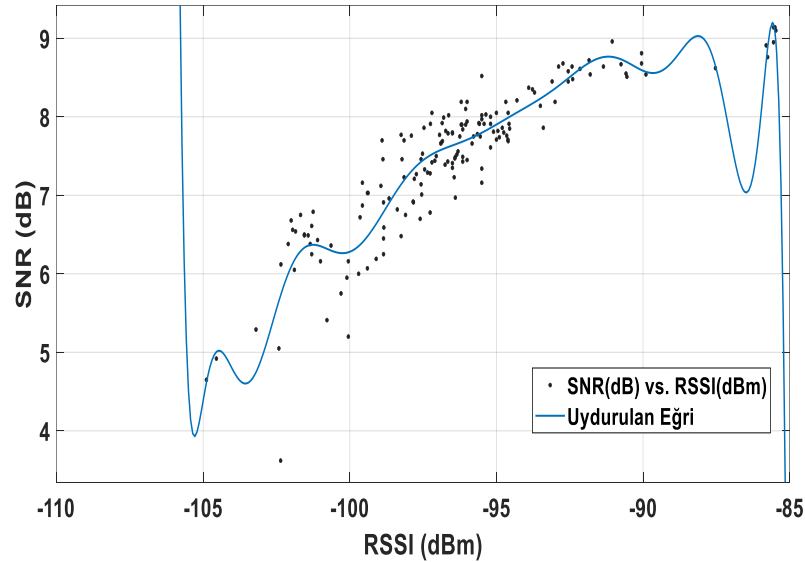
$$SNR = \sum_{i=0}^9 p_i \cdot (RSSI)^i \quad (7)$$

şeklinde olup p_i katsayıları Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Polinom regresyon modeli ile elde edilen eğri denkleminin katsayıları.

Katsayı	Değer
p_0	7.6365
p_1	0.9796
p_2	-0.3390
p_3	0.0073
p_4	0.2945
p_5	-0.0938
p_6	-0.0969
p_7	0.0304
p_8	0.0086
p_9	-0.0026

Denklem (7) ve Tablo 8'den görüldüğü üzere, SNR-RSSI ilişkisini veren polinom, MATLAB eğri uyduma aracının izin verdiği en yüksek derece olan 9. dereceden polinomdur. Daha düşük dereceli polinomlar denendiğinde, R^2 ve RMSE değerlerinin, 9. dereceden polinom sonuçlarına kıyasla daha düşük uyumluluğu işaret eden sonuçlar verdiği görülmüştür.



Şekil 7. SNR ve RSSI arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (Fourier regresyon modeli).

Şekil 7'de, siyah noktalar, ağdan elde edilen RSSI ve SNR değerlerini; mavi renkli eğri ise, SNR ve RSSI değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren, eğri uydurma yöntemi ile belirlenen ve Fourier

regresyon modeline karşılık gelen eğriyi göstermektedir. Şekil 7’de verilen eğrinin, ağ verileriyle uyum iyiliğini belirten parametreler Tablo 9’da sunulmuştur.

Tablo 9. SNR-RSSI eğrisinin uyum iyiliği parametreleri (Fourier regresyon modeli için).

Parametre	Değer
SSE	22.3050
R ²	0.8459
Adj-R ²	0.8280
RMSE	0.3895

Şekil 7’deki, SNR ve RSSI ilişkisini gösteren eğrinin denklemi

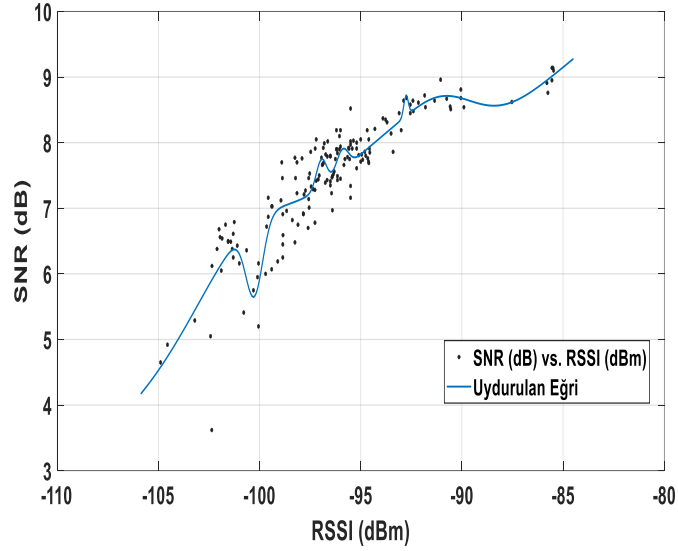
$$SNR = \sum_{i=0}^8 a_i \cdot \cos(i \cdot w \cdot RSSI) + b_i \cdot \sin(i \cdot w \cdot RSSI) \quad (8)$$

şeklinde olup a_i , b_i ve w katsayıları Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 10. Fourier regresyon modeli ile elde edilen eğri denkleminin katsayıları.

Katsayı	Değer
a_0	1.2930×10^9
a_1	0
b_1	-4.5538×10^{10}
a_2	-4.9115×10^9
b_2	6.4413×10^{10}
a_3	7.3008×10^9
b_3	-5.3613×10^{10}
a_4	-5.8801×10^9
b_4	3.0508×10^{10}
a_5	3.0106×10^9
b_5	-1.2101×10^{10}
a_6	-9.8711×10^8
b_6	3.2308×10^9
a_7	1.9107×10^8
b_7	-5.2535×10^8
a_8	-1.6742×10^7
b_8	3.9488×10^7
w	0.0539

Şekil 8’de, siyah noktalar, ağdan elde edilen RSSI ve SNR değerlerini; mavi renkli eğri ise, SNR ve RSSI değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren, eğri uydurma yöntemi ile belirlenen ve Gauss regresyon modeline karşılık gelen eğriyi göstermektedir. Şekil 8’de verilen eğrinin, ağ verileriyle uyum iyiliğini belirten parametreler Tablo 11’de sunulmuştur.



Şekil 8. SNR ve RSSI arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (Gauss regresyon modeli).

Tablo 11. SNR-RSSI eğrisinin uyum iyiliği parametreleri (Gauss regresyon modeli için).

Parametre	Değer
SSE	20.6652
R^2	0.8572
Adj- R^2	0.8339
RMSE	0.3828

Tablo 12. Gauss regresyon modeli ile elde edilen eğri denkleminin katsayıları.

Katsayı	Değer
a_1	2.8521
b_1	-97.9110
c_1	5.3457
a_2	0.6790
b_2	-91.0085
c_2	2.4514
a_3	0.3169
b_3	-92.7618
c_3	0.1547
a_4	0.3311
b_4	-95.9062
c_4	0.4149
a_5	0.4341
b_5	-96.9416
c_5	0.3629
a_6	-1.1318
b_6	-100.2621
c_6	0.5948
a_7	-1.4335
b_7	-97.4803
c_7	3.2396
a_8	13.0624
b_8	-60.3599
c_8	41.2263

Şekil 8’deki, SNR ve RSSI ilişkisini gösteren eğrinin denklemi,

$$SNR = \sum_{i=1}^8 a_i \cdot e^{\left(\frac{RSSI-b_i}{c_i}\right)^2} \quad (9)$$

şeklinde olup a_i , b_i ve c_i katsayıları Tablo 12’de verilmiştir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, bir bina içi LoRaWAN ağından elde edilen SF, SNR ve RSSI verileri kullanılarak, MATLAB eğri uydurma yöntemi ile SNR ve RSSI arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu ilişkiyi tanımlayan ampirik denklemler, polinom, Fourier ve Gauss regresyon modelleri kullanılarak türetilmiştir. SNR-RSSI ilişkisinin, $R^2=0.9362$ ve $RMSE=0.2440$ ile ağdan elde edilen verilere en yüksek uyum iyiliği gösteren 9. dereceden bir polinom ile ifade edilebildiği belirlenmiştir. Regresyon modellerinden elde edilen karşılaştırmalı uyum iyiliği sonuçları Tablo 13’te verilmiştir.

Tablo 13. Polinom, Fourier ve Gauss regresyon modellerinden elde edilen karşılaştırmalı uyum iyiliği sonuçları.

Regresyon modeli	SSE	R^2	Adj- R^2	RMSE
Polinom	9.2273	0.9362	0.9325	0.2440
Fourier	22.3050	0.8459	0.8280	0.3895
Gauss	20.6652	0.8572	0.8339	0.3828

Elde edilen sonuçlar, bina içi LoRaWAN ağlarında sabit SF durumlarında SNR-RSSI ilişkisini modellemeyi amaçlayan çalışmalar için referans olma özelliğindedir. Ayrıca, sabit SF değerli ve kabul edilebilir paket kayıp oranlı (bu çalışmada tespit edilen % 15 ve altındaki oranlara sahip) iç ortam ağ planlamalarında, bu çalışmada elde edilen eğri formüllerinin referans alınabileceği değerlendirilmektedir.

Gelecekteki çalışmalarda, çoklu uç cihazların bulunduğu LoRaWAN ağlarına odaklanılarak, elde edilecek büyük veri setleri ile,

- değişken SF değerleri altında, SF-SNR-RSSI ilişkilerini tanımlayan ve uyum iyiliği daha yüksek eğri denklemlerinin türetilmesi
- makine öğrenmesi yöntemleri ile yüksek doğruluklu parametre/performans tahminleme çalışmalarının yapılması
- paket iletim hata oranlarının detaylı analizlerinin yapılması

hedeflenmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından, FGA-2023-1297 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

Yazarların Katkısı

Ömer YLDIZ: Kavramsallaştırma, metodoloji, biçimsel analiz, araştırma, veri toplama, görselleştirme, makale taslak yazımı.

Sait Eser KARLIK: Proje yönetimi, kavramsallaştırma, metodoloji, araştırma, makale taslak yazımını gözden geçirme ve düzenleme.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, makalenin değerlendirme sürecini etkileyebilecek herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkarları bulunmadığını onaylamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Ahmed, S. T., ve Annamalai, A., (2023, Mayıs). Improving Geo-Location Performance of LoRa with Adaptive Spreading Factor, *2023 IEEE 13th Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE)*, (s. 386-391), Penang, Malaysia. <https://doi.org/10.1109/ISCAIE57739.2023.10165296>
- Alipio, M., ve Bures, M., (2024). Current testing and performance evaluation methodologies of LoRa and LoRaWAN in IoT applications: Classification, issues, and future directives, *Internet of Things*, 25, 101053. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.101053>
- Alkhazmi, E. H., Elkawafi, S. M., Aldarrat, A. A., Abbas, M. A., Abubakr, H., ve Shamatah, H.A., (2023, Aralık). Analysis of Real-World LoRaWAN Network Performance Across Outdoor and Indoor Scenarios, *2023 IEEE 11th International Conference on Systems and Control (ICSC)*, (s. 329-334), Sousse, Tunisia. <https://doi.org/10.1109/ICSC58660.2023.10449775>
- Chaudhari, B., ve Zennaro, M., (2020). *LPWAN technologies for IoT and M2M applications: Introduction to low-power wide-area networks*. Elsevier Inc. Academic Press.
- Damayanti, S. D., Suryanegara M. ve Hayati N., (2024, Temmuz). LoRaWAN for Underwater System: Early Results from Performance Testing on the Swimming Pool, *2024 7th International Conference on Communication Engineering and Technology (ICCET)*, (s. 47-53), Tokyo, Japan. <https://doi.org/10.1109/ICCET62255.2024.00015>
- Kaur, G., Balyan, V., Gupta, S.H., (2024). Experimental analysis of low-duty cycle campus deployed IoT network using LoRa technology, *Results in Engineering*, 23, 102844. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102844>.

- Lee, S., Lee, J., Park, H.-S., ve Choi, J.-K., (2021). A novel fair and scalable relay control scheme for Internet of Things in LoRa-based low-power wide-area networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(7), 5985-6001. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3034185>
- Moradbeikie, A., Keshavarz, A., Rostami, H., Paiva, S., ve Lopes, S. I., (2023). A cost-effective LoRaWAN-based IoT localization method using fixed reference nodes and dual-slope path-loss modeling, *Internet of Things*, 24, 100990. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100990>
- Newman, D., (2019). Return on IoT: Dealing with the IoT skills gap, Retrieved from Forbes Web site: <https://www.forbes.com/sites/danielnewman/2019/07/30/return-on-iot-dealing-with-the-iot-skills-gap/>
- Purnama, A. A. F., ve Nashiruddin, M. I., (2019, Aralık). Designing LoRaWAN Internet of Things Network for Advanced Metering Infrastructure (AMI) in Surabaya and Its Surrounding Cities, *2019 International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)*, (s. 194-199) Yogyakarta, Indonesia. <https://doi.org/10.1109/ISRITI48646.2019.9034571>
- Silveira, J. D. F., Veloso, A. F. da S., Júnior, J. V. dos R., Soares, A. C. B., ve Rabêlo, R. A. L., (2021, Ekim). A New Low-Cost LoRaWAN Power Switch for Smart Farm Applications, *2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, (s. 3330-3335) Melbourne, Australia. <https://doi.org/10.1109/SMC52423.2021.9659076>
- Santana, J. R., Sotres, P., Pérez, J., Sánchez, L., Lanza, J., Muñoz, L., (2023). Assessing LoRaWAN radio propagation for smart parking service: An experimental study, *Computer Networks*, 235, 109962. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109962>
- Sharma, A., Kapoor, D. S., Nayyar, A., Qureshi, B., Singh, K. J., ve Thakur, K., (2022). Exploration of IoT nodes communication using LoRaWAN in forest environment, *Computers, Materials and Continua*, 71(3), 6239-6256. <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.024639>.
- URL-1: Internet Engineering Task Force (IETF), Low-power wide area network (LPWAN) overview, 2018. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8376>, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-2: LoRa Alliance® achieves 66% growth in public LoRaWAN® networks over past 3 years, LoRa Alliance®, 2022. <https://resources.lora-alliance.org/home/lora-alliance-achieves-66-growth-in-public-lorawan-networks-over-past-3-years>, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-3: ITU-T Y.4480 (11/2021), Low power protocol for wide area wireless networks. <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.4480-202111-I>, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-4: LoRa: Kablosuz Haberleşmenin Yükselen Yıldızı. <https://gsl.com.tr/lora-kablosuz-haberlesmenin-yukselen-yildizi.html>, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024)
- URL-5: LoRaWAN® network architecture. <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-6: Skysens motion acceleration monitoring device. https://store.gsl.com.tr/class/INNOVAEditor/assets/Motion_Module_SKYMOT1_ACC_Datasheet_v1_04.pdf, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-7: RN2483 Low-power long range LoRa® technology transceiver module, Microchip Corporation. <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/OTH/ProductDocuments/DataSheets/RN2483-Low-Power-Long-Range-LoRa-Technology-Transceiver-Module-DS50002346F.pdf>, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-8: RAK7246G WisGate Developer D0 Gateway Datasheet. <https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisGate/RAK7246G/Datasheet/>, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-9: The Things Network. <https://www.thethingsnetwork.org/>, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-10: Curve fitting toolbox. https://www.mathworks.com/help/curvefit/index.html?s_tid=CRUX_lftnav, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-11: Goodness of fit. https://www.mathworks.com/help/ident/ref/goodnessoffit.html?s_tid=doc_ta, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-12: RMSE. https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/rmse.html?s_tid=doc_ta, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-13: Evaluating goodness of fit. <https://www.mathworks.com/help/curvefit/evaluating-goodness-of-fit.html>, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).

Bir Hidrolik Motor Takozunun Taguchi Yöntemi ile Deneysel Olarak İncelenmesi

Zeliha KAMIŞ KOCABIÇAK^{1*} 

Öz

Bu çalışmada hidrolik motor takoz kuvvetini etkileyen dört parametre ve bu parametrelerin her biri için iki seviye belirlenerek Taguchi L16 ortogonal dizisine göre deney tasarımı (DoE) oluşturulmuştur. Deney tasarımına göre montajı yapılan her bir takoz 0-30 Hz frekans aralığında ± 1.5 mm titreşim genliğinde test edilmiş ve bu testlerden elde edilen dinamik direngenlik ve faz açısı değerleri kullanılarak her bir takoz için frekansa bağlı takoz kuvvet eğrileri elde edilmiştir. 0-30 Hz frekans aralığında ortaya çıkan titreşimler yol ve rölanti kaynaklı titreşimler olduğu için bu frekans aralığında kuvvetin mümkün olduğu kadar büyük olması istenir. Bu nedenle elde edilen kuvvet eğrilerinden her bir takoz kombinasyonu için en büyük kuvvet değeri belirlenmiş ve deney tasarımına eklenmiştir. S/N analizi uygulanarak en büyük kuvvet için deney tasarımındaki en uygun parametre kombinasyonu ve ANOVA analizi ile de parametrelerin etki yüzdeleri hesaplanmıştır. Sonrasında regresyon analizi ile parametrelere bağlı bir analitik denklem önerilmiştir. Bu denklem yardımı ile deney tasarımında bulunmayan kesit alanı daha büyük olan bir takoz için maksimum kuvvet hesaplanmış, hesaplanan kuvvet deney verilerinden elde edilen kuvvet ile karşılaştırılarak sonucun birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrolik motor takozu, Takoz kuvveti, Taguchi, ANOVA.

Experimental Investigation of a Hydraulic Engine Mount by Taguchi Method

Abstract

In this study, four parameters affecting the hydraulic engine mount force and two levels for each were determined, and a design of experiment (DoE) was created according to the Taguchi L16 orthogonal array. Each mount assembled according to the DoE was tested at a vibration amplitude of ± 1.5 mm in the frequency range of 0-30 Hz, and the dynamic stiffness and phase angle values obtained from these tests were used to obtain frequency-dependent mount force curves for each mount. Since the vibrations occurring in the frequency range of 0-30 Hz are road and idle induced vibrations, it is desired that the force is as large as possible in this frequency range. Therefore, the maximum force value for each mount combination was determined from the obtained force curves and added to the DoE. S/N analysis was applied, and the most suitable parameter combination in the DoE for the maximum force was obtained. The effect percentages of the parameters were calculated using ANOVA analysis. Then, an analytical equation, depending on the parameters, was proposed by regression analysis. With the equation, the maximum force was calculated for a mount with a larger cross-sectional area that was not included in the DoE, and the calculated force was compared with the force obtained from the experimental data, and it was determined that the results were close to each other.

Keywords: Hydraulic engine mount, Mount force, Taguchi, ANOVA.

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye, zkamis@uludag.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Taşıtlar sürüş sırasında yol ve motordan kaynaklanan titreşimlere maruz kalırlar. Taşıtlarda kullanılan motor takozları motoru şasiye sabitler, titreşimleri sönümleyerek gürültüyü azaltır, motor etrafındaki yapıları ve parçaları korur ve konforu artırır. Motor takozları genellikle kauçuk-metal birleşimi şeklindedir ve farklı motor tipleri ve uygulamaları için farklı tasarımlara sahiptir. Kullanım amacına ve sürüş konforuna göre motor takozları kauçuk, hidrolik, yarı aktif ve aktif takozlar olarak sınıflandırılabilir (Marzbani ve ark., 2014; Yu ve ark. 2001).

Hidrolik motor takozları, farklı frekanslarda ayarlanabilen sönümleme özellikleri sayesinde sürüş konforuna katkı sağladığı için taşıtlarda en yaygın kullanılan takoz türüdür. Kauçuk motor takozlarından farklı olarak, hidrolik motor takozlarında alt ve üstte bulunan iki odacık arasında hareket eden hidrolik akışkan yer alır (Şekil 1). İç kanal veya ayırıcı aracılığıyla odacıklar arasında hareket eden hidrolik akışkanın hareketine bağlı olarak farklı frekans aralıklarında farklı sönümleme özellikleri elde edilir (Marzbani ve ark., 2014; Shangguan ve Lu, 2004,). Hidrolik motor takozlarının tasarım yapısına göre kullanılan kauçuk yapısı, takozdaki akışkan hacmi, akışkanın geçtiği iç kanal kesit alanı ve ayırıcı özellikleri takozun sönümleme performansını etkiler. Bu parametreler göz önünde bulundurulduğunda, aynı dış gövdeye sahip takozun çeşitli üretim alternatifleri olabilir. Hidrolik motor takozu için seçilecek parametre kombinasyonu deney tasarımı (DoE) ile incelenebilir. Hidrolik motor takozlarında yüksek genlikli titreşimlerin ($\pm 1-2$ mm) meydana geldiği düşük frekans aralığında (0-30 Hz) takoz kuvveti mümkün olduğu kadar yüksek olmalıdır (Marzbani ve ark., 2014; Yu ve ark. 2001; Kocabıçak ve Açar, 2024).

Hidrolik motor takozları üzerine literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar iki ana kategoriye ayrılır. Birinci kategori, doğrusal ve doğrusal olmayan model yaklaşımları kullanılarak düşük ve yüksek frekanslarda hidrolik motor takozlarının dinamik davranışının elde edilmesiyle ilgilidir (Christopherson ve Jazar, 2006; Zhang ve ark. 2009; Liu ve ark., 2021). İkinci kategori, hidrolik motor takozlarının araç sürüş konforu üzerindeki etkisinin araştırılması üzerinedir (Hung ve ark., 2021). Her iki kategori de tasarım, modelleme ve optimizasyon çalışmalarını içerir. Tasarım çalışmaları genellikle modelleme ve optimizasyon çalışmaları ile birlikte yürütülmüştür ve bu çalışmalarda ayırıcı (Christopherson ve ark., 2012; Fallahi ve ark. 2021) ve tasarım parametrelerine (Garmaroudi ve Mosayebi 2017) odaklanılmıştır. Aynı zamanda, bazı optimizasyon çalışmaları taşıt sürüş konforunu iyileştirmeyi (Rasekhipour ve Ohadi 2011), bazıları da takozun belirli frekanslardaki davranışını belirlemeyi (Christopherson ve Jazar, 2005; Ahn ve ark., 2005) amaçlamıştır. Hidrolik motor takozu için deney tasarımı (DoE) uygulaması literatürde mevcuttur (Cyril ve Manikandan, 2023; Kocabıçak ve Açar, 2024; Kocabıçak ve Açar, 2025). Taguchi tabanlı deney tasarımı (DoE) uygulamaları, özellikle son yıllarda farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Arslanoğlu ve

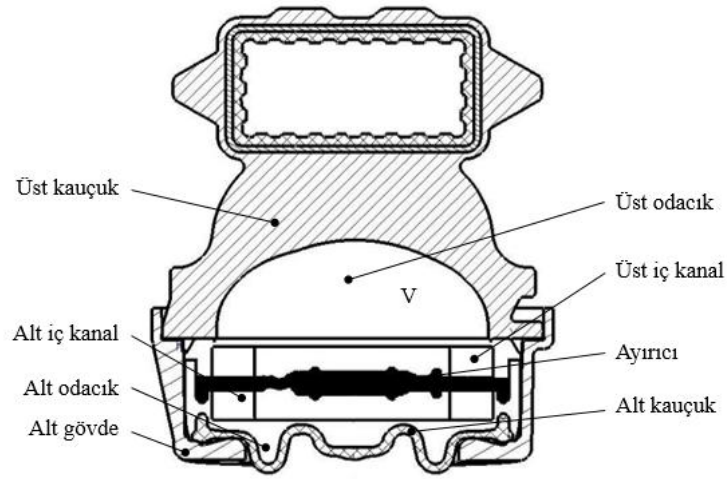
Yiğit, 2016; Kocabıçak ve Demir, 2020; Demir ve Kocabıçak, 2021; Turan ve ark., 2024). Kocabıçak ve Açar, 2024 dinamik direngenlik ve faz açısı değerlerini dikkate alarak en uygun parametreleri belirlemek amacıyla gri ilişki analizi ile birlikte Taguchi deney tasarımını (DoE) hidrolik motor takozlarında uygulamıştır. Ancak hidrolik motor takozları için yüksek takoz kuvveti elde etmek amacıyla deney tasarım uygulaması literatürde yer almamaktadır.

Bu çalışmada hidrolik motor takoz kuvvetini etkileyen iç kanal kesit alanı, kauçuk malzeme sertleşme katsayısı, ayırıcı sertliği ve akışkan hacmi tasarım parametresi olarak belirlenmiş. Aynı dış gövde için takozun üretilebilirliği de dikkate alınarak bu parametreler için iki seviye belirlenmiş ve dört parametre ve iki seviyeye göre Taguchi L16 ortogonal dizisine göre deney tasarımı oluşturulmuştur. Deney tasarımına göre montajı yapılan hidrolik motor takozları 0-30 Hz frekans aralığında ± 1.5 mm titreşim genliğinde test edilmiştir. Testlerden ölçülen dinamik direngenlik ve faz açısı değerlerine göre deneysel olarak belirlenen takoz kuvvetinin tepe değerleri deney tasarımında referans değer olarak belirlenmiştir. Deney tasarımında takoz kuvveti için “daha büyük-daha iyi” performans kriterine göre sinyal/gürültü (S/G) analizi yapılmış ve bu analize göre en uygun parametre kombinasyonu belirlenmiştir. Sonrasında varyans analizi (ANOVA) ile her bir parametrenin takoz kuvvetine etki oranları tespit edilmiştir. Son bölümde regresyon analizi yapılarak takoz kuvveti için analitik bir denklem önerilmiş ve bu denklemin deney tasarımında bulunmayan farklı takoz için takoz kuvvetini doğru olarak hesapladığı gösterilmiştir.

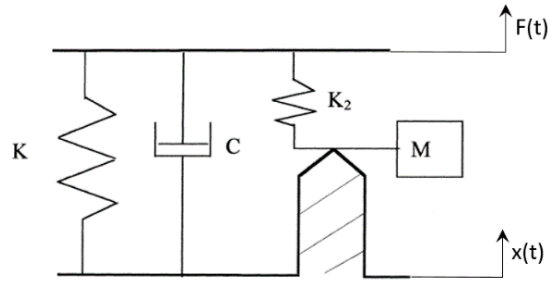
2. Hidrolik Motor Takozu

Hidrolik motor takozlarında kauçuk-metal yapıya ilave olarak hidrolik akışkan yer alır (Şekil 1) ve takozdaki akışkan hareketi nedeniyle farklı frekanslarda farklı sönümlenme özellikleri ortaya çıkar. Hidrolik akışkan takozun uyarılma genliğine bağlı olarak iç kanal yada ayırıcı üzerinden transfer edilir. Ayırıcı üzerinden olan akış daha düşük direnç kuvveti oluştururken, iç kanal üzerinden olan akış daha yüksek direnç kuvveti oluşturur. Bu nedenle hidrolik motor takozlarında düşük frekanslarda ortaya çıkan yüksek genlikli titreşimlerde iç kanal etkisi ile yüksek sönümlenme kuvveti elde edilirken, yüksek frekanslarda oluşan küçük genlikli titreşimlerde ayırıcı ile düşük sönümlenme kuvveti elde edilir. Hidrolik motor takozunun dinamik davranışı takozun yapısal parametrelerine bağlı olarak değişir (Yu ve ark., 2001).

Hidrolik motor takozu mekanik modeli Şekil 2’ de verilmiştir. Hidrolik motor takozlarında ortaya çıkan $x(t)$ yer değiştirmesine karşılık $F(t)$ takoz kuvveti elde edilir. Şekil 2’ den görüldüğü gibi kauçuk malzemenin sönüm, C ve yaylanma, K özelliğine ilave olarak takozun içerisindeki akışkan hareketini dikkate almak için akış yolundaki akışkan kütlesi, M ve kauçuk odacıklardaki hacimsel esnemeyi temsil eden elastomerik bir yay elemanı, K_2 fiziksel modele eklenmiştir (Yu ve ark., 2001).



Şekil 1. Hidrolik motor takozu (Kocabıçak ve Açar, 2024)



Şekil 2. Hidrolik motor takozu mekanik modeli (Yu ve ark., 2001)

Newton' un İkinci Hareket Yasası' na göre hidrolik motor takozuna uygulanan $x(t)$ girişine karşılık elde edilen takoz kuvveti aşağıdaki gibidir:

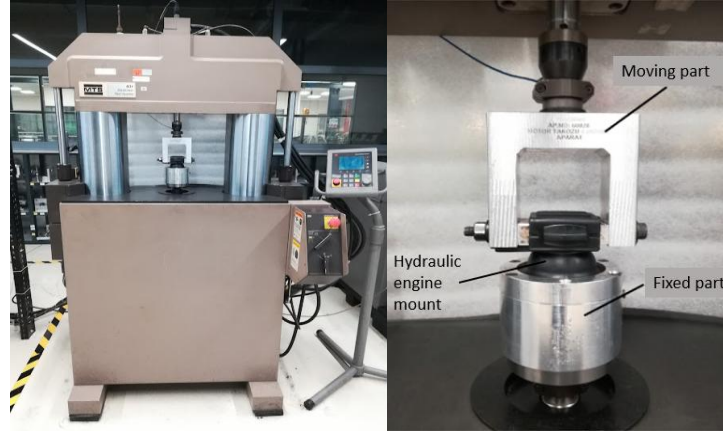
$$F(t) = K_r x(t) + C_r \dot{x}(t) \quad (1)$$

Burada K_r takozun dinamik direngenliği, C_r eşdeğer sönüm katsayısıdır.

Takozun titreşim sönümleme performansını analiz etmek için takozu sinüzoidal bir giriş uygulanarak frekans cevabı analizi yapılmalıdır ($x(t) = X \sin(\omega t)$). Frekans cevabı analizi için 1 nolu denklemin laplace dönüşümü alınıp $s=j\omega$ yerine yazılır. Sisteme sinüzoidal giriş uygulandıktan sonra sistem geçici durum hali ortadan kalkıp kalıcı durum haline ulaştığında belli bir genlik ve faz farkı ile yine sinüzoidal takoz kuvveti elde edilir.

$$F(j\omega) = K_r X(j\omega) + j\omega C_r X(j\omega) \quad (2)$$

Bu çalışmada Şekil 3’ teki 1000 Hz kapasiteli MTS 831.50 servohidrolik elastomer test cihazı kullanılmıştır. 0-30 Hz frekans aralığında, ± 1.5 mm titreşim genliğinde farklı tasarım kombinasyonundaki hidrolik takozlar test edilmiş ve takozların frekansa bağlı dinamik direngenlik ve faz açısı değerleri elde edilmiştir (Kocabıçak ve Açar, 2025). Bu deneysel sonuçlardan takoz kuvvetleri hesaplanmış ve frekansa bağlı kuvvet grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen grafiklerden en büyük kuvvet değerleri belirlenerek deney tasarımında kullanılmıştır.



Şekil 3. MTS 831.50 servohidrolik elastomer test cihazı

3. Taguchi Yöntemi

Taguchi yöntemi, ortogonal dizileri kullanan bir deneysel tasarım yöntemidir (Arslanoğlu ve Yiğit, 2016; Kocabıçak ve Demir, 2020; Demir ve Kocabıçak, 2021; Turan ve ark., 2024; Kocabıçak ve Açar, 2024). Bu çalışmada Taguchi yöntemi kullanılarak yapılan analiz çalışmaları ile 0-30 Hz frekans aralığında $\pm 1,5$ mm titreşim genliği için en büyük takoz kuvveti sağlayan en uygun parametre kombinasyonunun belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla takozun sönüm özelliklerine etki eden iç kanal kesit alanı, A, kauçuk malzemenin dinamik sertleşme katsayısı, η , ayırıcı sertliği, HS_d , ve akışkan hacmi, V, olmak üzere dört farklı parametre ve her parametre için takoz bileşenlerinin üretilebilirliği dikkate alınarak iki farklı seviye belirlenmiştir (Tablo 1). Dört parametre ve iki seviye için Taguchi L16 ortogonal dizisine göre oluşturulan deney tasarımı Tablo 2’ de verilmiştir.

Tablo 1. Hidrolik motor takozu tasarım parametreleri ve seviyeleri

Parametre	Seviye 1	Seviye 2
İç kanal kesit alanı, A (mm ²)	37.5	66.5
Dinamik sertleşme katsayısı, η (-)	1.7	2.2
Ayırıcı sertliği, HS_d (shA)	50	58
Akışkan hacmi, V (mm ³)	22256	44512

Tablo 2. Taguchi L16 DoE ortogonal dizisi

Deney No	Parametre			
	A (mm ²)	η (-)	HS _d (shA)	V (mm ³)
1	37.5	1.7	50	22256
2	37.5	1.7	50	44512
3	37.5	1.7	58	22256
4	37.5	1.7	58	44512
5	37.5	2.2	50	22256
6	37.5	2.2	50	44512
7	37.5	2.2	58	22256
8	37.5	2.2	58	44512
9	66.5	1.7	50	22256
10	66.5	1.7	50	44512
11	66.5	1.7	58	22256
12	66.5	1.7	58	44512
13	66.5	2.2	50	22256
14	66.5	2.2	50	44512
15	66.5	2.2	58	22256
16	66.5	2.2	58	44512

Taguchi yönteminde, deneysel sonuçlar sinyal/gürültü oranına (S/G) çevrilerek analiz yapılır. S/G oranını analiz etmek için bir performans kriteri seçilir. “Daha küçük-daha iyi”, “daha büyük-daha iyi” ve “nominal-en iyi” olmak üzere üç tip parametre vardır (Arslanoğlu ve Yiğit, 2016). Bu çalışmada, takoz kuvveti için “daha büyük-daha iyi” seçilmiş ve bu kriter için S/G oranı aşağıdaki denkleme göre hesaplanmıştır:

$$S / G = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

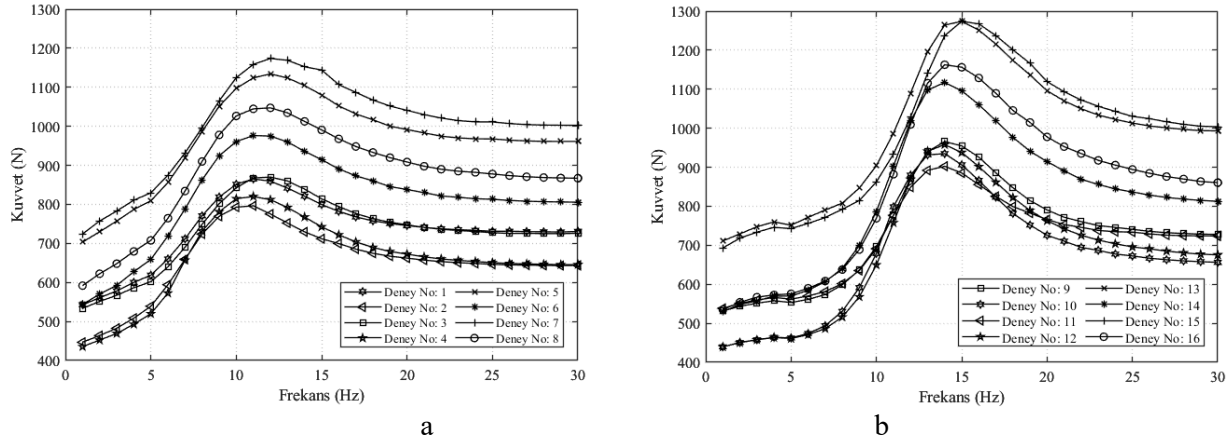
Burada y_i , i. deneydeki deneysel değer, n ise deney sayısıdır (n=16).

4. Bulgular ve Tartışma

4.1. Deneysel Sonuçlar

Hidrolik motor takozlarının Tablo 2’ de verilen deney tasarımına göre aynı dış gövde içerisinde montajı yapılmış ve MTS 831.50 servohidrolik elastomer test cihazı ile 0-30 Hz frekans aralığında, $\pm 1,5$ mm titreşim genliğinde test edilmiştir. Dinamik testlerde frekansa bağlı dinamik direngenlik ve faz açısı eğrileri elde edilmiştir (Kocabıçak ve Açar, 2024; Kocabıçak ve Açar, 2025). Bu çalışmada deneysel olarak ölçülen dinamik direngenlik ve faz açısı değerleri kullanılarak Şekil 2’ de verilen hidrolik motor takozu mekanik modeline göre her bir deney kombinasyonu için eşdeğer sönümleme

ve yay katsayısı değerleri belirlenmiş ve bu değerler kullanılarak frekansa bağlı takoz kuvveti eğrileri Şekil 4' teki gibi elde edilmiştir. Şekil 4' ten görüldüğü gibi takoz kuvveti eğrileri frekansla doğrusal olmayan biçimde değişmektedir. Yüksek frekans bölgesinde takozun maruz kaldığı küçük genlikli titreşimlerde elde edilen takoz kuvveti kauçuk malzeme özelliklerine bağlıdır ve frekansla doğrusal olarak değişmektedir (Kocabıçak, 2025).



Şekil 4. Deneysel verilerden hesaplanan takoz kuvvetleri (a: Deney no:1-8, b: Deney no: 9-16)

4.2. Sinyal/Gürültü (S/N) Analizi

Bu çalışmada Şekil 4' te verilen eğrilerinden her bir takoz kombinasyonu için hidrolik motor takoz kuvvetlerinin tepe değerleri (F_{max}) belirlenmiş ve bu değerlere göre deney tasarımının S/G analizi yapılmıştır. Kuvvet tepe değerleri ve hesaplanan S/G oranları Tablo 3' teki gibi elde edilmiştir.

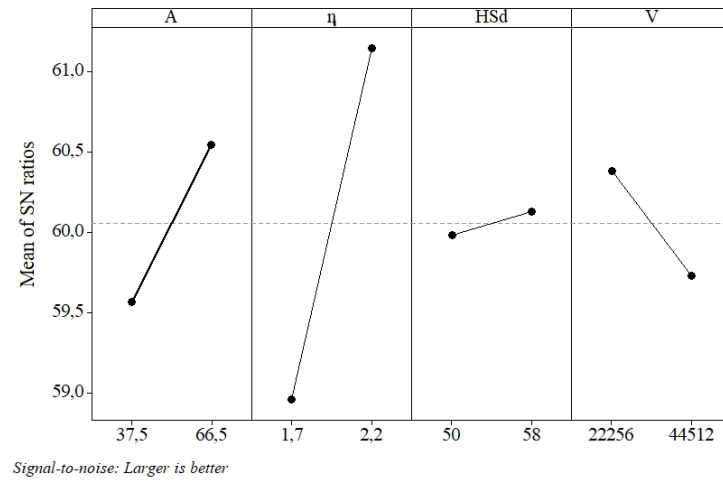
Tablo 3. Maksimum takoz kuvveti ve S/G oranları

Deney No	F_{max} (N)	S/G (dB)
1	865.10	58.7413
2	796.41	58.0227
3	869.85	58.7889
4	820.08	58.2771
5	1134.24	61.0941
6	976.36	59.7922
7	1173.85	61.3923
8	1047.33	60.4017
9	965.90	59.6986
10	934.93	59.4156
11	902.54	59.1093
12	957.91	59.6265
13	1274.11	62.1041
14	1116.98	60.9609
15	1274.06	62.1038
16	1162.79	61.3100

S/G oranlarının ortalama değerleri Şekil 5 ve Tablo 4'te verilmiştir. Parametre seviyelerinde en büyük S/G oranları optimum performansı sağlar (Arslanoğlu ve Yiğit, 2016). Tablo 4' e göre optimum kombinasyon $A=66.5 \text{ mm}^2$, $\eta=2.2$, $HS_d=58 \text{ shA}$, $V=22256 \text{ mm}^3$ olduğunda elde edilmektedir. Parametrelerin önem sırası ise $\eta > A > V > HS_d$ ' dir. Şekil 5' ten görüldüğü gibi A, η ve HS_d ' yi artırmak takoz kuvvetini artırırken, V' yi artırmak takoz kuvvetini azaltmaktadır.

Table 4. S/G oranları

Seviye	A	η	HS_d	V
1	59.56	58.96	59.98	60.38
2	60.54	61.14	60.13	59.73
Fark	0.98	2.18	0.15	0.65
Sıralama	2	1	4	3



Şekil 5. S/G oranları

4.3. Varyans Analizi (ANOVA)

Varyans analizi (ANOVA), her parametrenin istenen çıktılara olan yüzdelik katkısını değerlendirmek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir (Arslanoğlu ve Yiğit, 2016). Bu çalışmada hidrolik motor takozu tasarım parametrelerinin takoz kuvvetini hangi oranda etkilediğini belirlemek amacıyla ANOVA uygulanmış ve analiz sonuçları Tablo 5' teki gibi elde edilmiştir. Analizin R-Sq değeri %93,98 olarak belirlenmiş olup, bu da sonuçların güvenilir olduğunu göstermektedir.

Tablo 5' den görüldüğü gibi ANOVA sonuçları, dinamik sertleşme katsayısının, η , hidrolik motor takoz kuvveti üzerinde %72,25' lik bir katkı oranıyla en etkili parametre olduğunu ortaya koymuştur. Dolayısıyla hidrolik motor takozunda kullanılan kauçuk malzeme takoz kuvvetini büyük oranda etkilemektedir ve kritik öneme sahiptir. İç kanal kesit alanı, A, %14.15' lik bir katkı oranıyla ikinci, akışkan hacmi, V, %7.22 katkı oranıyla üçüncü etkili parametredir. Ayırıcı sertliğinin, HS_d

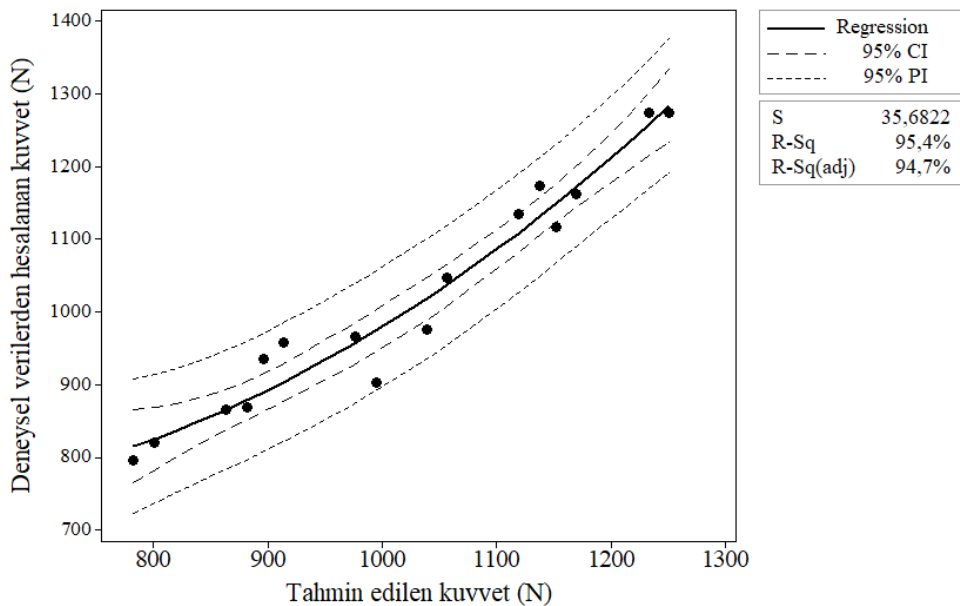
(%0.36) etkisi oldukça düşüktür. Sonuç olarak, hidrolik motor takoz kuvvetinin uygun kauçuk malzeme kullanarak, iç kanal boyutlandırmasını doğru yaparak ve uygun miktarda akışkan kullanarak artırılabilceği tespit edilmiştir.

Table 5. ANOVA sonuçları

Kaynak	A	η	HS _d	V	Hata	Toplam
Serbestlik	1	1	1	1	11	15
Kareler	51302	261888	1303	26152	21813	362458
Katkı	14.15%	72.25%	0.36%	7.22%	6.02%	100.00%
Kareler ort.	51302	261888	1303	26152	1983	
F-Değer	25.87	132.06	0.66	13.19		
P-Değer	0.000	0.0000	0.435	0.004		

4.4. Regresyon Analizi

Regresyon analizi, bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri tahmin etmek için kullanılan bir modelleme ve analiz yöntemidir (Nas ve Özbek, 2020). Bu çalışmada, parametrelere bağlı olarak maksimum kuvveti veren bir analitik ifade elde etmek amacıyla regresyon analizi uygulanmıştır. İlk olarak tahmin edilen takoz kuvveti ile deneysel olarak hesaplanan takoz kuvveti ikinci dereceden regresyon kullanılarak modellenmiştir (Şekil 6). Şekil 6' dan görüldüğü gibi, tahmin edilen değerler ile deneysel sonuçlar arasında oldukça iyi bir uyum bulunmaktadır. Örneğin, Deney No: 15'te, hesaplanan kuvvet 1274.06 N iken tahmin edilen kuvvet 1251.04 N' dur. Analizin R-Sq değeri %95.4 olarak belirlenmiştir ve bu da modelin güvenilir ve tahminde başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. İkinci dereceden regresyon modeli

İkinci dereceden regresyon modeline göre tasarım parametrelerine bağlı olarak (A , η , HS_d , V) elde edilen analitik denklem aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$F = -184 + 3.905 A + 511.7 \eta + 2.26 HS_d - 0.00363 V \quad (4)$$

Deney tasarımında bulunmayan daha büyük iç kanal kesit alanına sahip bir takoz için deneysel sonuçlardan hesaplanan takoz kuvveti ile analitik denklemden hesaplanan kuvvet değerleri Tablo 6’da verilmiş ve her iki kuvvetin oldukça yakın değerde olduğu tespit edilmiştir. Önerilen analitik denklemin deney tasarımında olmayan takoz kombinasyonları için de takoz kuvvetini hesaplamak amacıyla kullanılabileceği ortaya konmuştur.

Tablo 6. Deney tasarımında yer almayan takozun kuvvet değerleri

Takoz Parametreleri	Deneyisel verilerden hesaplanan kuvvet	Analitik denklem ile hesaplanan kuvvet	% Hata
$A=79.5 \text{ mm}^2$ $\eta=2.2$ $HS_d=58 \text{ shA}$ $V=44512 \text{ mm}^3$	1225.3 N	1221.7 N	0.3

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada hidrolik motor takoz kuvvetini etkileyen dört farklı tasarım parametresi ve takozun üretilebilirliği göz önünde bulundurularak bu parametreler için iki farklı seviye belirlenmiştir. Dört parametre ve iki seviye için Taguchi L16 ortogonal dizisine göre deney tasarımı oluşturulmuştur. Aynı dış gövde içiğinde deney tasarımındaki on altı farklı kombinasyondaki takozun montajı yapılarak her biri $\pm 1.5 \text{ mm}$ titreşim genliğinde ve 0-30 Hz frekans aralığında test edilmiştir. Testlerde frekansa bağlı olarak elde edilen dinamik direngenlik ve faz açısı değerleri kullanılarak takozun ürettiği kuvvet hesaplanmış ve her bir kombinasyon için frekansa bağlı kuvvet eğrileri elde edilmiştir. Bu eğrilerden elde edilen kuvvetlerin tepe değerleri deney tasarımı için referans değer olarak belirlenmiştir. 0-30 Hz frekans aralığındaki titreşimler yol ve rölanti kaynaklı yüksek genlikli titreşimler olduğundan bu frekans aralığında takoz kuvvetinin mümkün olduğu kadar büyük olması istenir. Bu nedenle deney tasarımına göre kuvvetin tepe değerlerinin “daha büyük-daha iyi” performans kriterine göre S/G analizi yapılmıştır. Analiz sonucuna göre takoz parametreleri için $A=66,5 \text{ mm}^2$, $\eta=2,2$, $HS_d=58 \text{ shA}$, $V=22256 \text{ mm}^3$ optimum kombinasyon olarak belirlenmiştir. Parametrelerin önem sırası ise $\eta > A > V > HS_d$ olarak tespit edilmiştir. Sonrasında parametrelerin etki yüzdelerini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. ANOVA sonucunda, kauçuğun kimyasal yapısına bağlı olan dinamik sertleşme katsayısı, η , %72.25’ lik katkı oranıyla en etkili

parametre olarak belirlenmiştir. İkinci ve üçüncü etkili parametreler ise %14.15' lik katkı oranıyla iç kanal kesit alanı, A ve %7.22' lik katkı oranıyla akışkan hacmidir, V. Ayırıcı sertliği, HS_d, nin katkı oranı oldukça düşük olup %0.36' dır. Bir sonraki aşamada, regresyon analizi uygulanarak yaklaşık takoz kuvvetini hesaplayabilmek için tasarım parametrelerine bağlı analitik denklem önerilmiştir. Denklemin doğruluğunu göstermek için, deney tasarımında bulunmayan daha büyük iç kanal kesit alanına sahip bir takoz için formül yardımıyla hesaplanan kuvvet deneysel verilerden hesaplanan kuvvet ile karşılaştırılmış ve iki sonucun birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, mevcut bir takoz için elde edilen deneysel verilerle yeni takoz kombinasyonları (örneğin, diğer malzeme, diğer alan vb.) için takoz kuvvetinin belirlenebileceği gösterilmiştir. Çalışma hidrolik motor takozunda elde edilen kuvvete bağlı olarak deney tasarımı uygulaması açısından yenilik sunmaktadır. İleriki çalışmalarda farklı takoz tipleri için de analizler genişletilerek deney yapmaksızın hidrolik motor takozu dinamik özelliklerinin belirlenmesi mümkün olabilir.

Teşekkür

Yazar, deneysel çalışmaların yürütüldüğü Bayrak Lastik A.Ş. firmasına katkılarından dolayı teşekkürlerini sunmaktadır.

Yazarların Katkısı

Çalışmanın tüm süreçleri yazar Zeliha Kamış Kocabıçak tarafından yürütülmüştür.

Çıkar Çatışması Beyanı

Bilinen herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Ahn, Y. K., Song, J. D., Yang, B., Ahn, K. K., ve Morishita, S., (2005). Optimal Design of Nonlinear Hydraulic Engine Mount. *Journal of Mechanical Science and Technology (KSME Int J)*, 19(3), 768-777. doi:10.1007/BF02916125
- Arslanoğlu, N., ve Yigit, A., (2016). Experimental investigation of radiation effect on human thermal comfort by Taguchi method. *Applied Thermal Engineering*, 92, 18-23. doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.09.070

- Christopherson, J., ve Jazar, G. N., (2005). Optimization of classical hydraulic engine mounts based on RMS method. *Shock and Vibration*, 12(2), 119-147. doi:10.1155/2005/653945
- Christopherson, J., ve Jazar, G. N., (2006). Dynamic behavior comparison of passive hydraulic engine mounts. Part 1: Mathematical analysis. *Journal of Sound and Vibration*, 290 (3-5), 1040-1070. doi:10.1016/j.jsv.2005.05.008
- Christopherson, J., Manifalah, M., ve Jazar R.N., (2012). Suspended Decoupler: A New Design of Hydraulic Engine Mount. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2012, 11. doi:10.1155/2012/826497
- Cyril, S., ve Manikandan, H., (2023). Optimization of engine and transmission mounting system for a V6 front wheel drive vehicle. *Materials Today Proceedings*, 72(4), 2564-2568. doi:10.1016/j.matpr.2022.10.028
- Demir, U., ve Kocacıçak, Z.K., (2021). Performance assessments of the material for the traction motor cores of an electric racing kart. *Materials Testing*, 63(6), 519-528. doi:10.1515/mt-2020-0085
- Fallahi, F., Shabani, R., Rezazadeh, G., ve Tariverdilo, S., (2021). A modified design for hydraulic engine mount to improve its vibrational performance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(23), 6724-6736. doi:10.1177/09544062211000081
- Garmaroudi M. A., ve Mosayebi, J., (2017). Design and Optimization of Engine Mount. *International Journal on Energy Conversion (IRECON)*, 5(4), 112-121. doi:10.15866/irecon.v5i4.13754
- Hung, T. T., Quynh, L. V., Ha, D. V., Huan, C. C., Cuong, B. V., ve Tan, H. A., (2021). A comparison of vehicle ride comfort performance of hydraulic engine mount system with rubber engine mount system. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 16(23), 2610-2619.
- Kocacıçak, Z.K., ve Demir, U., (2020). Design and optimization of an electromechanical actuator for the latch of a foldable vehicle seat. *Materials Testing*, 62(7), 749-755. doi: 10.3139/120.111539
- Kocabicak, Z. K., ve Acar, Z., (2024). Taguchi-based grey relational analysis on multiple damping characteristics of a hydraulic engine mount. *Arabian Journal for Science and Engineering*, doi:10.1007/s13369-024-09510-8
- Kocabicak, Z. K., ve Acar, Z., (2025). Optimal hydraulic engine mount parameters using design of experiment (DoE) and response surface methodology. *Materials Testing*, 67(4), 728-736. doi:10.1515/mt-2024-0422
- Kocabicak, Z. K., (2025). Experimental investigation of a hydraulic engine mount by Taguchi method. *International of Simulation Modelling*, 24(2), 203-212. doi: 10.2507/IJSIMM24-2-710
- Liu, Y., Guan, X., Lu, P., ve Guo, R., (2021). Simulation research on dynamic characteristics of hydraulic mount. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 34(49), 1-9. doi:10.1186/s10033-021-00571-6
- Marzbani, H., Jazar, R. N., ve Fard, M., (2014). Hydraulic engine mounts: a survey. *Journal of Vibration and Control*, 20(10), 1439-1463. doi:10.1177/1077546312456724
- Nas, E., ve Özbek, N.A., (2020). Optimization the machining parameters in turning of hardened hot work tool steel using cryogenically treated tools. *Surface Review and Letters*, 27(5), 1950177. doi:10.1142/S0218625X19501774
- Rasekhipour, Y., ve Ohadi, A., (2011). Optimization of hydraulic engine mounts through simplified and full vehicle models, *Proceedings of the World Congress on Engineering-WCE 2011*, London, U.K.
- Shangguan W., ve Lu, Z., (2004). Experimental study and simulation of a hydraulic engine mount with fully coupled fluid-structure interaction finite element analysis model, *Computers and Structures*, 82(22), 1751-1771. doi:10.1016/j.compstruc.2004.05.017
- Turan, M.K., Topçu, E.E., ve Karpat, F., (2024). Modelling and Investigation of a Driver Seat Suspension with Negative Stiffness Structure. *International Journal of Simulation Modelling*, 23(2), 275-286. doi:10.2507/IJSIMM23-2-684
- Yu, Y., Naganathan, N. G., ve Dukkipati, R. V., (2001). A literature review of automotive vehicle engine mounting systems. *Mechanism and Machine Theory*, 36(1), 123-142. doi:10.1016/S0094-114X(00)00023-9
- Zhang, Y., Shangguan, W., ve Fang, Z., (2009). Parameter identifications of the hydraulic mount. *International Technology and Innovation Conference 2009 (ITIC 2009)*, Xi'an, China. doi:10.1049/cp.2009.1452.

Determination the Environmental Performance of Biogas Production from Cattle Manure via Life Cycle Assessment

Alp ÖZDEMİR^{1*} 

Abstract

This study aims to evaluate the environmental impacts of biogas production from cattle manure in an anaerobic digestion plant (ADP) using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology. The LCA analysis adopts a cradle-to-gate system boundary, with the functional unit defined as “1 m³ of biogas produced” in the ADP. Life cycle inventory data for this functional unit was obtained from the Ecoinvent database (v3.10). Life cycle impact assessment were carried out using two methods: CML-IA v3.10 and ReCiPe 2016 Midpoint (H) v1.09, within the licensed SimaPro 9.6.0 PhD software. A sensitivity analysis was also performed to examine the influence of varying transportation distances for cattle manure collection on the overall environmental impacts. The LCA analysis results indicate that operational activities in the ADP and the associated energy requirements significantly contribute to impact categories such as GWP, AP, and EP. Furthermore, it has been observed that the construction phase of the ADP has significant impacts on all ecotoxicity impact categories examined in the CML-IA and ReCiPe impact assessment method. The sensitivity analysis highlights that increasing the renewables energy source usage in the electricity generation mix profile has reduction effect on environmental impacts. Finally, relevant practitioners need to focus on reducing greenhouse gas emissions and ecotoxicity impacts to improve the environmental sustainability performance of biogas production systems.

Keywords: Anaerobic digestion, Biogas production, Cattle manure, Life Cycle Assessment.

Sığır Gübresinden Biyogaz Üretiminin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ile Çevresel Performansının Belirlenmesi

Öz

Bu çalışma, sığır gübresinden anaerobik çürütme tesisinde (AÇT) biyogaz üretiminin çevresel etkilerini Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA) yöntemi kullanarak değerlendirmeyi amaçlar. Çalışmanın sistem sınırları, hammadde temininden biyogaz üretimine kadar olan süreci kapsayan beşikten-kapıya yaklaşımıyla belirlenmiş olup, çalışmanın fonksiyonel birimi “1 m³ biyogaz üretimi”dir. Bu fonksiyonel birim için yaşam döngüsü envanteri verileri, Ecoinvent v.3.10 veri tabanı kullanılarak elde edilmiştir. Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi, CML-IA v3.10 ve ReCiPe 2016 Midpoint (H) v1.09 değerlendirme yöntemleri ile lisanslı SimaPro 9.6.0 PhD yazılımında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, sığır gübresi teminindeki taşıma mesafelerindeki değişimlerin genel çevresel etkiler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla bir duyarlılık analizi yapılmıştır. LCA analiz sonuçları, AÇT’deki operasyonel faaliyetlerin ve ilgili enerji gereksinimlerinin, küresel ısınma potansiyeli, asidifikasyon potansiyeli ve ötrofikasyon potansiyeli gibi etki kategorilerine önemli ölçüde katkıda bulunduğunu göstermektedir. Ayrıca, AÇT’nin inşaat aşamasının CML-IA ve ReCiPe etki değerlendirme yönteminde incelenen tüm eko toksisite etki kategorileri için önemli etkilere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Duyarlılık analizi, yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki karışım profilinin artırılmasının belirli çevresel etkileri azaltıcı etkisi olduğunu göstermektedir. Son olarak, ilgili uygulayıcıların biyogaz üretim sistemlerinin çevresel sürdürülebilirlik performansını iyileştirmek için sera gazı emisyonlarının ve eko toksisite etkilerinin azaltılmasına odaklanması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Anaerobik çürütme, Biyogaz üretimi, Sığır gübresi, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi.

¹Eskişehir Technical University, Department of Environmental Engineering, Engineering Faculty, Eskişehir, Türkiye, alpozdemir@eskisehir.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Introduction

The demand for livestock products has experienced a two-fold increase over the past four decades, primarily driven by rapid global population growth (Han et al., 2023). This surge in demand has also led to significant rise in manure production. Between 2016 and 2019, over 1.4 billion tons of manure were generated annually by the European Union and United Kingdom (Köninger et al., 2021). Globally, the livestock industry accounts for approximately 20% of nitrous oxide, methane, and fluorinated compound emissions. Of these, livestock manure contributes roughly 45% of total N_2O emissions and nearly 50% of global ammonium emissions (Alba-Reyes et al., 2024).

Improper manure management causes additional environmental issues such as soil contamination from heavy metals, nutrient leaching, and pathogen proliferation beyond greenhouse gas emissions. These challenges underscore the importance of sustainable manure management, as specified in European Union (EU) legislation. Addressing these concerns not only mitigates environmental risks but also opens opportunities for valorizing livestock manure, particularly in renewable energy generation. Reducing dependency on fossil fuels-which currently supply approximately 80% of global energy demand (URL-1), is crucial for achieving long-term energy sustainability, mitigating climate change, and transitioning to a low-carbon economy. Fossil fuel-based energy production is a major contributor to carbon dioxide emissions, which drive climate change and underscore the urgent need for a transition to sustainable energy alternatives.

From this motivation, the EU has committed to ambitious renewable energy targets through initiatives like the Paris Climate Agreement and the European Green Deal, aiming for a minimum 42.5% share of renewable energy by 2030 (URL-2). Biogas production from organic waste, including livestock manure offers a promising pathway for achieving these targets. By means of the Anaerobic Digestion (AD) process, biogas is an important biofuel, is flammable gas that can be produced which is mainly composed of CH_4 , (50%–80%), CO_2 (25%–50%), nitrogen (0%–10%), hydrogen sulfide (H_2S) (0%–3%), hydrogen (0%–1%), oxygen (0%–2%), NH_3 (0%–3%), and traces of siloxanes (Kaynarca and Onay, 2024; Fernandes et al., 2023). This process not only mitigates environmental impacts associated with manure management but also contributes to circular economy principles and multiple Sustainable Development Goals including Climate Action and Affordable and Clean Energy.

To evaluate environmental impacts of the production of biogas, LCA methodology has been utilized. Certain LCA studies on biogas production systems have been conducted in Europe and worldwide. These studies provide a solid knowledge base for both policymakers and engineers to enhance the efficiency of such systems and reduce their environmental impacts. Other hand, several studies have evaluated the environmental impacts of biogas production from different substances via AD processes using LCA methodology. For instance, Van Stappen et al. (2016) analysed the

environmental implications of treating various organic wastes, including algae (Wei et al., 2023), sludge (Poeschl et al., 2012a), and co-digestion of different substrates (Poeschl et al., 2012b). However, these studies often focus on specific feedstocks or isolated aspects of the AD process. Comprehensive evaluations that identify environmental hotspots across the entire life cycle of biogas production are still limited, particularly regarding cattle manure, which constitutes a significant portion of AD feedstocks (Tufaner and Avşar, 2019). Additionally, the reviewed studies (Hijazi et al., 2016; Paolini et al., 2018; Elizabeth Sinsuw et al., 2024) on the LCA of biogas production in AD plants, mainly focus on impact categories such as global warming potential, cumulative energy demand, acidification potential, eutrophication potential, and ozone layer depletion. However, among them only a few studies assess human toxicity and ecotoxicity categories within scope of the different impact assessment methods.

This study aims to address these gaps by conducting a detailed evaluation of the environmental impacts associated with biogas production from cattle manure. Two different life cycle impact assessment methods as CML-IA and ReCiPe Midpoint, were applied to identify critical environmental hotspots of the AD process. The CML-IA v3.10 method includes eleven different impact categories, while the ReCiPe 2016 Midpoint (H) v1.09 method consists of eighteen impact categories. Additionally, this study examines the compatibility and differences between the two methodologies and evaluates the impact of varying electricity generation mix profile for operation of anaerobic digestion plant (ADP) through sensitivity analysis. This comprehensive approach aimed to provide actionable insights for optimizing the sustainability of biogas production.

2. Materials and Methods

In this study, LCA methodology was employed to evaluate environmental impacts of biogas production in AD plant. The study follows the LCA framework outlined in ISO 14040 (2006a) and ISO14044 (2006b) standards, which consists of four steps: goal and scope definition, life cycle inventory, life cycle impact assessment and interpretation. The LCA analysis was conducted using the PhD licensed version of SimaPro 9.6.0 software program.

2.1. Goal and Scope Definition

This study aims to conduct an environmental assessment of biogas production from a life cycle perspective. Regarding this objective, the contribution of processes to the environmental performance in anaerobic digestion processes was determined using two different life cycle impact assessment methods. Subsequently, the compatibility of these assessment methods, considering various impact

categories, was discussed. Additionally, a sensitivity analysis was conducted to assess the effects of changes in transportation distance.

Figure 1 shows the system boundaries considered in this study. The system boundaries start from raw materials acquisition and energy production, covering the construction phase of ADP. In this study, livestock manure is considered as the feedstock which is collected from farms and transported to the plant facility, where it is used to produce biogas during the operation of the ADP. The operational phase includes manure storage, anaerobic fermentation, and the storage of digestate after fermentation. Biogas is assumed to be the main output. However, the utilization of biogas and further use of the digestate are not included within the system boundaries due to the scope of the study. The functional unit for this study was chosen as 1 cubic meter (m^3) of biogas produced, due to the system boundary ending at biogas production.

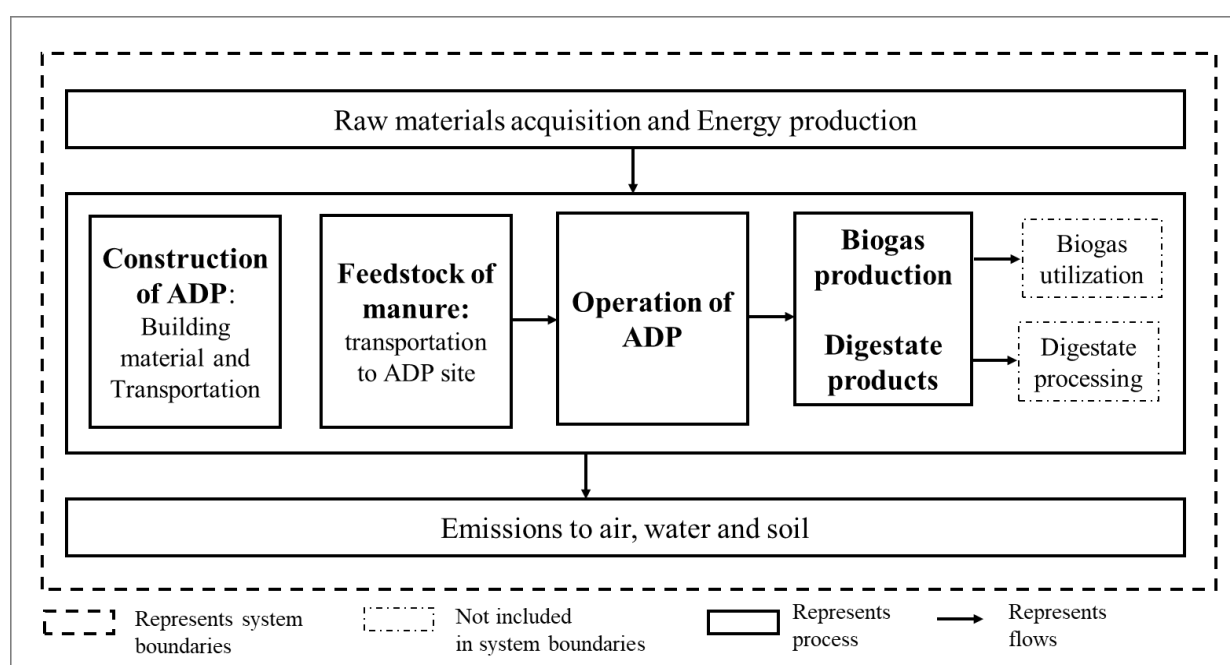


Figure 1. The system boundary of the study.

2.2. Life Cycle Inventory

The life cycle inventory for 1 m^3 biogas production were occurred and detail given in Table 1. The input data of the biogas production is mainly contributed by the transportation of manure, the infrastructure of the ADP (for instance, required construction materials within the installation stage) and operation of the plant (such as required the electricity and the heat energy consumption). The storage of the substrate before the AD process is assumed to be an undercover system. Additionally, the data of outputs are considered emissions to air. These emissions (ammonia, biogenic based carbon

dioxide, dinitrogen monoxide, hydrogen sulphide, biogenic based methane was calculated according to the below Eqs. (1)-(4).

$$ES_{NH_3} = 17/14 \times C(N_{TOT}) \times 62\% EF_1 \times P_1 \quad (1)$$

Here, the emission of NH_3 means that the ammonia emissions in kg ES_{NH_3} /t of wet substrates, $C(N_{TOT})$ is the mean total nitrogen content of the substrate in kg N/t of wet substrate. In this study, this value is assumed about 3.45 based on the manure. EF_1 represents emission factor for ammonia, as 13.5%, P_1 value is the percentage of the time that the substrate is stored at the biogas producers, and its value assumed as 10% (Dauriat et al., 2012).

$$ES_{CO_2} = 44/11 \times C(C) \times EF_2 \times P_2 \quad (2)$$

Here, ES_{CO_2} represents in kg carbon dioxide emissions kg CO_2 /t of wet substrates, $C(C)$ is the mean carbon content of the substrate in kg C/t of wet substrate, EF_2 is the carbon dioxide emission factor, and it is assumed 7%. Besides, the carbon dioxide emission is calculated by considering a basis of the methane emission, and it assumed that 30% of the carbon is released in the form of methane and 70% in the form of carbon dioxide based on Frischknecht et al. (2007).

$$ES_{N_2O} = 44/28 \times C(N_{TOT}) - (14/17) \times ES_{NH_3} EF_3 \times P_1 \quad (3)$$

Where, emission of N_2O in kg N_2O /t of wet substrates, $C(N_{TOT})$ is the mean total nitrogen content of the substrates in kg N_2O /t of wet substrates. Here it is calculated 3.45 kg N/t of wet substrate based on the manure. EF_3 is 0.5% is nitrous oxide emission factor from (Dauriat et al., 2012; URL-3).

$$ES_{CH_4} = 0.670 \times B_0 \times C(OM) \times EF_4 \times P_1 \quad (4)$$

Here, ES is the methane emissions in kg CH_4 /ton of wet substrate, B_0 is assumed as 0.345 is the substrate methane emissions potential in m^3 methane/kg organic material (OM), $C(OM)$ means that the average organic matter content of the substrate in kg OM/ton of wet substrate, this value is calculated about 65 based on the manure substrate. EF_4 is the methane emission factor.

These emissions of CO_2 , CH_4 , NH_3 , and N_2O to the air, resulting from the storage of the substrates before the anaerobic digestion process as well as from the storage of the digestate after the anaerobic digestion process, leads to environmental impact. The values of these emissions were calculated based on the literature study by Dauriat et al. (2012) and data obtained from the Ecoinvent database v3.10 (URL-3). In this study, the operation and infrastructure of the ADP were mainly gathered from the Ecoinvent database v3.10 (URL-3). Hence, the digestate was assumed that carbon content, non-fossil of have 0.45 kg C/kg dry mass, with a dry mass of 1.18 kg. The biogas, which is sourced from the anaerobic digestion of manure, is a non-fossil fuel with a net calorific value of 22.73

MJ. This calorific value of the biogas only considers for the methane content excluding the H₂S presence in it (URL-3). The operating temperature was assumed as 35°C, which is the optimal temperature for the mesophilic range.

The plant was considered that its lifetime is almost 20 years. Hence, the total production volume of gas in the plant is expected to 5E+07 m³ and this plant is assumed constructed with a concrete fermentation system. The pit is 90 m³ and the fermenter has a capacity of about 500 m³, this plant was assumed with a methane recovery system and detailed information is available datasheet in Ecoinvent database v3.10 (URL-4).

In the case of electrical energy consumption, the electricity was assumed from a mixed-generated electricity profile, for its contribution of various energy sources to electricity generation. The electricity profile is composed of a mix of resources, including 20% hard coal, 17% lignite coal, 22% natural gas, 20.5% hydropower, 11% wind, 6% solar, and 3.5% geothermal. The background of electricity generation mix profile data was obtained a specific dataset in Ecoinvent database v3.10 “Electricity low voltage (TR) market for electricity”. The transportation of manure was assumed to cover 5 km from the collection site to the AD plant. This freight transportation is assumed to conducted by a lorry with a capacity of 7.5-16 metric tons, operating with EURO6 standards.

Table 1. The life cycle inventory for 1m³ biogas production.

Process	Amount	Unit	Remark
Anaerobic digestion plant	2.86E-07	product	Detail information are available at URL-4
Manure from cattle, liquid	32.72	kg	Assumed as substrate materials
Manure from cattle, solid	4.46	kg	
Electrical energy consumption	0.16	kWh	This amount assumed with a fixed factor per m ³ biogas produced
Heat energy	3.47	MJ	
Transport	185.92	kg.km	Transportation of manure.
Ammonia	1.75E-03	kg	Calculated based on eq.1
Carbon dioxide	7.09E-02	kg	Biogenic emission, and it calculated based on eq.2
Dinitrogen monoxide	2.49E-04	kg	Calculated based on eq.3
Hydrogen sulphide	4.13E-05	kg	Dauriat et al. (2012)
Methane, biogenic	1.98E-02	kg	Calculated based on eq.4

In this study, CML-IA v3.10 and ReCiPe 2016 Midpoint (H) v1.09 methods were employed to calculate environmental impacts corresponding to biogas production. These methods are widely recognized for their comprehensive and reliable assessment of various environmental impact categories, providing a robust framework for evaluating the sustainability of biogas production processes. The hierarchist perspective is based on the scientific consensus about impact mechanisms' time frame and plausibility. These both methods are available in the library of SimaPro 9.6.0 PhD licensed version. Characterization and normalization results of both methods were collected and interpreted in the following sections. In the CML-IA v3.10 method includes eleven different impact

categories as abiotic depletion potential for fossil fuels and elements (ADP_{ff} and ADP_e), global warming potential (GWP_{100}), ozone layer depletion potential (ODP), human toxicity potential (HTP), freshwater aquatic ecotoxicity (FAETP), marine aquatic ecotoxicity (MAETP), terrestrial ecotoxicity (TEP), photochemical oxidation potential (POP) acidification potential (AP), eutrophication potential (EP). Other hand, ReCiPe 2016 Midpoint (H) v1.09 method also consists eighteen impact categories such as global warming potential (GWP), ozone depletion potential (ODP), ionizing radiation potential (IRP), particulate matter formation potential (PMFP), photochemical oxidant formation potential ecosystems (EOFP), photochemical oxidant formation potential: humans (HOFP), terrestrial acidification potential (TAP), freshwater eutrophication potential (FEP), marine eutrophication potential (MEP), human toxicity cancer and non-cancer potential (HTPc and HTPnc), terrestrial ecotoxicity potential (TETP), freshwater ecotoxicity potential (FETP), marine ecotoxicity potential (METP), land use potential (LUP), water consumption potential (WCP), mineral resource scarcity potential (SOP), fossil fuel potential (FFP). The normalization results were considered for CML-IA v3.10 and ReCiPe 2016 Midpoint (H) v1.09, EU25 and World (2010) H, respectively.

Sensitivity analysis is a significant aspect of LCA, because it helps identify how variations in key parameters impact the overall environmental and energy performance of a system. Sensitivity analysis examines different scenarios to provide insights into the robustness and reliability of LCA results under varying conditions. In biogas production systems, electrical energy mix generation profile is a significant factor influencing greenhouse gas emissions, toxicities, and fossil fuel resource consumption. Therefore, assessing the impact of electricity generation during the transition from fossil fuels to renewable sources offers valuable guidance for optimizing environmental performance in biogas plants. In this study, a sensitivity analysis was conducted to examine the impact of producing the mix electricity used in the operation of the ADP plant from different fossil and renewable energy sources. In the sensitivity analysis, electricity generation mix profile I consisted of a combination of energy sources, including 18% hard coal, 15% lignite coal, 17% natural gas, 25% hydropower, 13% wind, 8% solar, and 4% geothermal. Electricity generation mix profile II included 14% hard coal, 13% lignite coal, 13% natural gas, 30% hydropower, 15% wind, 10% solar, and 5% geothermal. In electricity generation mix profile III, the energy sources considered 10% hard coal, 10% lignite coal, 10% natural gas, 33% hydropower, 18% wind, 13% solar, and 6% geothermal.

3. Findings and Discussion

The characterization and normalization results of 1 m³ of biogas produced in the ADP process were obtained using the CML-IA v3.10 and ReCiPe 2016 Midpoint (H) v1.09 methodologies, which

are widely recognized frameworks for life cycle impact assessment. These characterization and normalization results are given in Table 2. Table 2 shows that impact categories, such as GWP100 – GWP; AP – TAP; and have a consistent and comparable results across both methods. This compatibility means that the reliability of the methodologies in evaluating key environmental impacts and provides a solid basis for interpreting and comparing the environmental performance of biogas production processes. Other hand, the results of the ecotoxicity impact category show difference in both assessment method. This is because each method considers different time horizons in the HTP – HTPc and HTPnc impact category (Monteiro et al., 2021) and different geographical scopes in the TEP – TETP impact category (Carvalho et al., 2019).

Table 2. The characterization and the normalization results 1 m³ biogas production in the CML-IA and the ReCiPe imethods.

Impact category	Characterization results			Normalization results	
	CML-IA	ReCiPe	Unit	CML-IA	ReCiPe
ADP _e	1.3E-06	n.a. ^a	kg Sb eq.	1.5E-14	n.a. ^a
ADP _{ff}	4.1E+00	n.a.	MJ	1.3E-13	n.a.
GWP ₁₀₀	9.7E-01	1.1E+00	kg CO ₂ eq.	1.9E-13	1.4E-04
ODP	4.5E-09	2.9E-06	kg CFC-11 eq.	5.1E-17	4.8E-05
HTP	1.0E+00	n.a.	kg 1,4-DB eq.	1.3E-13	n.a.
FAETP	6.3E-02	n.a.	kg 1,4-DB eq.	1.2E-13	n.a.
METP	3.7E+02	n.a.	kg 1,4-DB eq.	3.1E-12 ^b	n.a.
TEP	8.5E-03	n.a.	kg 1,4-DB eq.	1.8E-13	n.a.
POP	2.3E-04	n.a.	kg C ₂ H ₄ eq.	2.7E-14	n.a.
AP	3.9E-03	n.a.	kg SO ₂ eq.	1.4E-13	n.a.
EP	8.5E-04	n.a.	kg PO ₄ ³⁻ eq.	6.4E-14	n.a.
IRP	n.a.	5.2E-04	kBq Co-60 eq.	n.a.	1.2E-06
EOFP	n.a.	8.6E-04	kg NOx eq.	n.a.	4.1E-05
PMFP	n.a.	1.5E-03	kg PM _{2.5} eq.	n.a.	6.0E-05
HOFP	n.a.	9.3E-04	kg NOx eq.	n.a.	5.1E-05
TAP	n.a.	4.3E-03	kg SO ₂ eq.	n.a.	1.1E-04
FEP	n.a.	1.7E-05	kg P eq.	n.a.	2.7E-05
MEP	n.a.	3.2E-06	kg N eq.	n.a.	1.3E-06
TETP	n.a.	4.3E+00	kg 1,4-DCB	n.a.	9.0E-05
FETP	n.a.	2.8E-04	kg 1,4-DCB	n.a.	1.2E-05
METP	n.a.	4.6E-03	kg 1,4-DCB	n.a.	2.8E-05 ^b
HTPc	n.a.	1.2E-03	kg 1,4-DCB	n.a.	n.a.
HTPnc	n.a.	7.3E-02	kg 1,4-DCB	n.a.	n.a.
LUP	n.a.	7.9E-02	m ² a crop eq.	n.a.	1.4E-04
SOP	n.a.	9.9E-04	kg Cu eq.	n.a.	4.8E-05
FFP	n.a.	9.7E-02	kg oil eq.	n.a.	n.a.
WCP	n.a.	1.7E-03	m ³	n.a.	n.a.

^a n.a means that this impact category is not applicable to the applied impact assessment method.

^b n.i means that not included. During the calculation impact percentage of impact categories in the normalization results, MAETP impact category excluded in total assessment due to its uncertainties (Shen and Patel, 2010).

The normalization results were calculated to transform impact categories into unitless values, facilitating a meaningful comparison between them. These normalization results indicate that impact categories with a percentage greater than 5% were selected for further analysis, particularly focusing on process contributions and inventory pollutants or substances. As a result, the impact categories ADP_{ff}, GWP100, TEP, AP, and EP were chosen for in-depth analysis within the CML-IA v3.10 method. In contrast, the ReCiPe 2016 Midpoint (H) v1.09 method highlighted the need for a more detailed investigation of the GWP, PMFP, HOFP, TAP, TETP, HTP_c, and FFP impact categories, as these also showed significant contributions to the overall environmental performance.

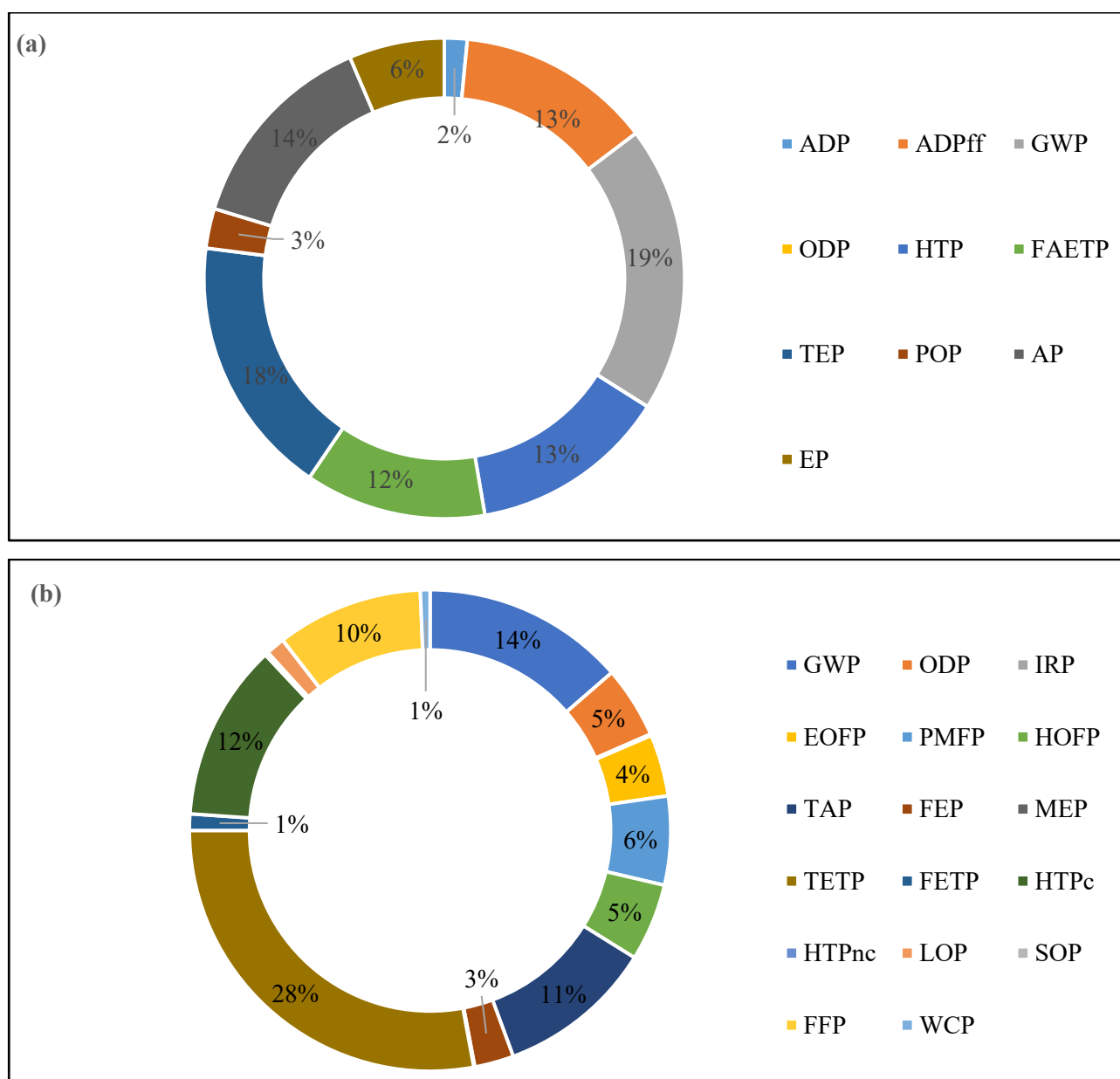


Figure 2 (a-b). Impact percentages based on the normalization results in (a) CML-IA method, (b) ReCiPe method.

The impacts of processes in biogas production have detailed analysed and the process

contribution of this production illustrated in Figure 3 (a) and Figure 3(b) for CML-IA and ReCiPe methods, respectively. The effects on the ADP_{ff} impact category occurred due to electricity and heat energy production, as well as the transportation of manure, which involved the use of fossil fuel sources such as oil, gas, and coal. The biogas production in CML-IA impact assessment method, there are important impacts from the operation of ADP on GWP₁₀₀, AP, and EP impact categories due to its emissions. In the GWP, CH₄ (biogenic) and N₂O are primarily occurring from operation of the ADP, CO₂ fossil derives from the energy production for electricity and heat in both methods. For AP category, NH₃ substance is the main contributor pollutant due to operation of the ADP, whereas SO₂ and NO_x are chiefly occurred from electricity production based on fossil fuels in particularly coals. Like AP category, EP impact is resulted from NH₃ and N₂O pollutants from operation of the ADP and nitrogen oxides to air due to electricity. The construction of the anaerobic digester, energy (heat and electricity) production, and transportation processes have similarly contributed to ecotoxicity impact categories, including HTP, FAETP, and TEP. It was found that these impacts primarily result from indirect processes, particularly related to the consumption of coke coal for produce pig iron in the background. Additionally, the substances of cobalt (II), anthracene and chromium (III) were significant impact to these three categories, respectively.

Figure 3(b) also shows the process details analysed for seven different impact categories. As seen previously in the CML-IA method, the operation of the ADP has a remarkable direct effect on impact categories such as GWP, TAP, and PMFP. The responsible pollutants in these categories, as identified in the ReCiPe method, were found to be similar to those in the CML-IA method. It has been observed that in PMFP impact category, PM_{2.5} and SO₂ pollutants primarily result from the electrical and heat energy production process, while NH₃ emissions derived from the operation of the ADP. Besides, NO_x emissions were considered to play important role in the HOFp impact category from both energy production processes. In particular, the main gas emissions of NH₃ and NO_x were found to be responsible for this impact, because their presence in the environment might be led to change in pH levels and nutrient balance. The construction of the ADP process has high impact on TETP and HTPnc impact categories. Other process such as manure transportation has remarkable impact on TETP due to brake wear emissions mainly from cobalt (II) and copper. Additionally, antimony and zinc ions contribute to the TETP impact category. The background data for the HTPnc impact category showed that chromium (IV) and nickel emissions are the main contributors to the HTPnc impact, resulting from the construction of the ADP plant (pig iron production process) and electricity generation (based on lignite coal). For the last investigated impact category, FFP, the consumption of oil, gas, and hard coal during energy production and transportation processes demonstrated a significant impact. This finding was also observed in ADP_{ff} impact category in the CML-IA method.

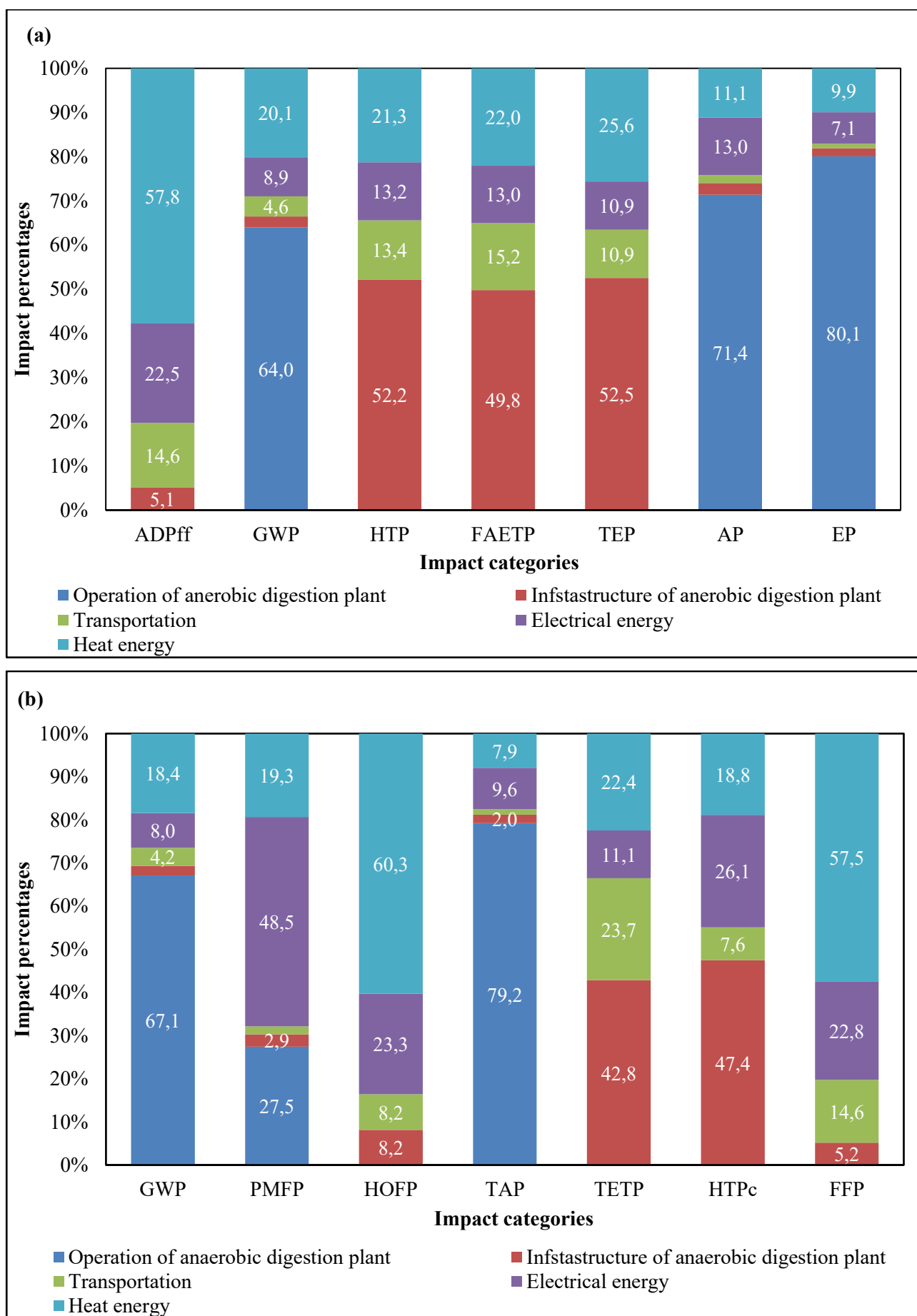


Figure 3 (a-b). Process contribution of biogas production (a) in CML-IA method (b) in ReCiPe method.

The characterization results for 1 m³ of biogas production, obtained using the CML-IA and ReCiPe methods in this study, were compared with those from existing literature. The comparison exhibits notable variations due to high specificity of the LCA results, which are influenced by factors such as local conditions, plant scale, annual gas production volume, energy sources, study motivations, scope, and system boundaries. For instance, Elizabeth Sinsuw et al. (2023) reported a GWP of 0.018 kg CO₂ eq per m³ of produced biogas under specific conditions. On the other hand, Garfi al. (2019) observed significantly higher GWP values ranging from 4.83 to 5.93 kg CO₂ eq. for small scale digesters. These differences can be linked to variations in the system boundaries and operational scales. When the results of each related study are compared to one another, each case provides a clearer understanding of the contextual factors influencing biogas LCA outcomes.

On the other hand, decreasing dependency on fossil fuels is crucial for transitioning to a low-carbon application. Therefore, understanding the environmental impacts of biogas compared to natural gas production is essential. Marconi and Rosa (2023) reported that substituting fossil natural gas with biomethane can reduce emissions from natural gas systems by 11%, corresponding to an annual decrease of 1.1 Gt CO₂-eq. worldwide.

In the sensitivity analysis, the obtained results of the analysis are illustrated in Table 3. As the share of renewable energy sources increases in the electricity generation mix, there is a noticeable decline in ADP_{ff}, GWP, TAP, EP, PMFP, HOFPP and FFP are resulting from the environmental benefits of transitioning from fossil fuels to cleaner energy sources. The sensitivity analysis results reveal that the reduction of coal and natural gas in the electricity mix contributes significantly to lowering the environmental footprint across multiple impact categories, demonstrating the importance of decarbonizing electricity production in biogas systems.

Table 3. The characterization results of sensitivity analysis of 1 m³ biogas production

Impact category	Unit	CML-IA			ReCiPe		
		I	II	III	I	II	III
ADP _{ff}	MJ	5.1E+00	4.2E+00	3.2E+00	n.a	n.a	n.a
GWP ₁₀₀	kg CO ₂ eq.	4.8E-01	4.0E-01	3.0E-01	n.a	n.a	n.a
HTP	kg 1,4-DB eq.	8.3E-01	8.1E-01	7.9E-01	n.a	n.a	n.a
FAETP	kg 1,4-DB eq.	5.0E-02	4.9E-02	4.8E-02	n.a	n.a	n.a
TEP	kg 1,4-DB eq.	5.7E-03	5.5E-03	5.4E-03	n.a	n.a	n.a
AP	kg SO ₂ eq.	2.9E-03	2.4E-03	1.9E-03	n.a	n.a	n.a
EP	kg PO ₄ ³⁻ eq.	3.4E-04	2.9E-04	2.2E-04	n.a	n.a	n.a
GWP	kg CO ₂ eq.	n.a	n.a	n.a	4.9E-01	4.0E-01	3.1E-01
PMFP	kg PM _{2.5} eq.	n.a	n.a	n.a	4.2E-03	3.6E-03	2.8E-03
HOFPP	kg NO _x eq.	n.a	n.a	n.a	1.2E-03	1.0E-03	7.7E-04
TAP	kg SO ₂ eq.	n.a	n.a	n.a	2.3E-03	2.0E-03	1.5E-03
TETP	kg 1,4-DB eq.	n.a	n.a	n.a	2.9E+00	2.9E+00	2.8E+00
HTPc	kg 1,4-DB eq.	n.a	n.a	n.a	1.9E-03	1.6E-03	1.4E-03
FFP	kg oil eq.	n.a	n.a	n.a	1.2E-01	9.9E-02	7.6E-02

n.a means that this impact category is not applicable to the applied impact assessment method.
Abbreviation terms of I, II, and III represents electricity generation mix profile I, II and III, respectively.

4. Conclusions and Recommendations

There is significant importance in evaluating, monitoring, and reporting the environmental impacts of biogas production, to improve biogas plants' sustainability performance. From this motivation, this study aimed to evaluate the environmental impacts of biogas production in ADP within cradle-to-grave system boundaries using the CML-IA and the ReCiPe impact assessment methods. The important findings of LCA analysis in this study are summarized:

- The operation of the ADP process has significant impacts on the GWP, AP, and EP, representing almost 64%, 71% and 81% of the total impacts, respectively, due to direct release of emissions such as methane, carbon dioxide, and dinitrogen monoxide.
- Electrical and heat energy production account for approximately 41% and 37% of the impacts on ADP_{ff} and TEP, respectively.
- The construction of the ADP process has significant impact on ecotoxicity categories such as HTP, FAETP and TEP.
- The transportation of manure significantly has a significant impact on the TETP and FFP impact categories compared to other impact categories with having about %24 and 15%, respectively.
- The characterization results for impact categories such as GWP₁₀₀-GWP; AP-TAP HTP-HTPc plus HTPnc; AP-TAP in both methods indicated that these categories have compatibility. However, the results of the ecotoxicity categories in both impact assessment methods showed less compatibility, as these methods cover different time horizons and geographical scope.

While the findings clearly demonstrate that the operation of the ADP contributes dominantly to GWP, AP, and EP deeper analysis of how these impacts scale at the national and global levels is crucial. For instance, CH₄ and N₂O emissions from ADP operations not only affect local air quality but also contribute to climate change on a global scale, emphasizing the need for policies that address these emissions in both developing and developed countries. The study's identification of energy production as a significant contributor to several impact categories underscores the importance of transitioning to renewable energy sources, which would have far-reaching benefits globally in reducing carbon footprints. Additionally, the global implications of transporting manure, particularly its contribution to the toxicity categories, suggest that international logistics must be reevaluated. Finally, while the construction and operation of ADPs have substantial local impacts, these findings could be expanded to highlight the need for sustainable practices in infrastructure development and energy production, both nationally and globally, to minimize environmental harm and promote a circular economy. Regarding with these benefits, to achieves a more sustainable method of biogas production utilizing manure, it is important to evaluate the considering comprehensive different environmental impact categories contributed by each stage of the biogas production process and this

study is trying to fill the gap. Additionally, the LCA analysis outcomes emphasize the importance of stakeholders primarily focusing on reducing greenhouse gas emissions and toxicities to improve environmental sustainability performance. In the next application in macro/micro levels of ADPs, improving the efficiency of anaerobic digestion processes might be prioritized to increase biogas yield and process stability. Utilizing biogas for energy production rather than releasing it into the atmosphere can enhance the environmental performance of this system and serve as a useful energy source, offering a sustainable alternative to conventional fossil fuel power generation.

Funding Support

There is no funding source.

Authors' Contributions

The author has completed all the article independently.

Statement of Conflicts of Interest

The author declares that there is no conflict of interest.

Statement of Research and Publication Ethics

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

References

- Alba-Reyes, Y., Hermida-García, F. O., Pedraza-Garciga, J., López-González, L. M., Espinosa-Negrín, A. M., Carbonell-Sorí, L., & Barrera, E. L. (2024). Economic and environmental assessment of a biogas-based pressurized grid in a livestock farm: A case study in a cuban context. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140288.
- Carvalho, F.S., Fornasier, F., Leitao, J.O.M., Moraes, J.A.R., Schneider, R.C.S. 2019. Life cycle assessment of biodiesel production from solaris seed tobacco, *Journal of Cleaner Production*, 230 1085–1095.
- Fernandes, D. J., Ferreira, A. F., & Fernandes, E. C. (2023). Biogas and biomethane production potential via anaerobic digestion of manure: a case study of Portugal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188, 113846.
- Garfí, M., Castro, L., Montero, N., Escalante, H., & Ferrer, I. (2019). Evaluating environmental benefits of low-cost biogas digesters in small-scale farms in Colombia: A life cycle assessment. *Bioresource technology*, 274, 541-548.
- Han, Z., Han, C., Shi, Z., Li, J., & Luo, E. (2023). Rebuilding the crop-livestock integration system in China- Based on the perspective of circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 393, 136347.

- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H. J., Bauer, C., Doka, G., Dones, R., ... and Nemecek, T. Swiss Centre for Life Cycle Inventories A joint initiative of the ETH domain and Swiss Federal Offices Life Cycle Inventories of Bioenergy Data v2.0 (2007). [Online]. Available: www.esu-services.ch
- Shen, L., and Patel, M.K. 2010. LCA Single Score Analysis of Man-Made Cellulose Fibres. *Lenzinger Berichte*, 88, 60-66
- ISO, 2006a. ISO 14040:2006-Environmental Management, Life Cycle Assessment, Principles and Framework. Geneva: International Organization for Standardization (ISO), <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- ISO, 2006b. ISO 114044:2006, Environmental Management, Life Cycle Assessment, Requirements and Guidelines. Geneva: International Organization for Standardization (ISO). <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- Kaynarca, H., & Onay, Ö. (2024). Sarıcakaya İlçesinin Güneş ve Biyogaz Enerji Potansiyelinin Hesaplanması. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 14(3), 1006-1028.
- Köninger, J., Lugato, E., Panagos, P., Kochupillai, M., Orgiazzi, A., & Briones, M. J. (2021). Manure management and soil biodiversity: Towards more sustainable food systems in the EU. *Agricultural Systems*, 194, 103251.
- Marconi, P., and Lorenzo R. 2023. Role of biomethane to offset natural gas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187, 113697.
- Monteiro, N.B.R., Moita Neto, J.M., da Silva, E.A. 2021. Environmental assessment in concrete industries, *Journal of Cleaner Production*, 327, 129516.
- Poeschl, M., Ward, S., & Owende, P. (2012). Environmental impacts of biogas deployment–Part I: life cycle inventory for evaluation of production process emissions to air. *Journal of Cleaner Production*, 24, 168-183.
- Poeschl, M., Ward, S., & Owende, P. (2012). Environmental impacts of biogas deployment–Part II: life cycle assessment of multiple production and utilization pathways. *Journal of Cleaner Production*, 24, 184-201.
- Sinsuw, A. A. E., Chen, T. H., Dokmaingam, P., Suriandjo, H. S., & Chu, C. Y. (2024). Life cycle assessment of environmental impacts for two-stage anaerobic biogas plant between commercial and pilot scales. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 58-70.
- Tufaner F., and Avşar Y. 2019. Economic analysis of biogas production from small scale anaerobic digestion systems for cattle manure. *Environmental Research & Technology*, 2, 6–12.
- URL-1: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics>. (Date Accessed: 16 November 2024)
- URL-2: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets_en (Date Accessed: 22 November 2024)
- URL-3: <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/15352/export> (Date Accessed: 07 November 2024).
- URL-4: <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/dataset/1984/export> (Date Accessed: 10 October 2024).
- Van Stappen, F., Mathot, M., Decruyenaere, V., Lories, A., Delcour, A., Planchon, V., ... & Stilmant, D. (2016). Consequential environmental life cycle assessment of a farm-scale biogas plant. *Journal of environmental management*, 175, 20-32.
- Wei, C., Xu, Y., Xu, L., Liu, J., & Chen, H. (2023). Comparative life-cycle assessment of various harvesting strategies for biogas production from microalgae: Energy conversion characteristics and greenhouse gas emissions. *Energy Conversion and Management*, 289, 117188.

Repurposing Pheophorbide a as an Antiviral Molecule for Human Papillomavirus type 16

Ragıp Soner SİLME^{1*} 

Abstract

The emergence of human papillomavirus (HPV) among the human population in different regions of the world has heightened the interest for new treatment methods. Molecular docking is a reliable and predictive method for screening of new potential antiviral molecules against pathogens. The retrieved 42 high-quality whole-genome sequences of HPV were analyzed in search of a stable region which is exist in the genome. The protein encoded by this stable region was targeted for protein-ligand interaction. Consequently, a target constant region which is responsible for encoding the C-terminal domain (monomer) of the HPV45 oncoprotein E7 (PDB: 2ewl) with various regulatory functions for the virus was detected. A ligand "Pheophorbide a ($C_{35}H_{36}N_4O_5$)" interacts with this protein, which could be used against HPV. Pheophorbide a has also been commercially used for cancer treatments due to its anti-proliferative effects and photosensitizer property in photodynamic therapy. This possible antiviral property of Pheophorbide a should be tested on other high-risk and low-risk Papillomaviruses since the E7 oncoprotein also plays a central role in many other HPV types. The predictive results need confirmation with further clinical and *in vitro* studies. The findings will provide new insights into HPV-human cell interactions, induced immunity, and new methods for HPV treatment.

Keywords: Antiviral, Anticancer, HPV, Human papillomavirus, Pheophorbide a.

Feoforbid a'nın İnsan Papilloma Virüsü Tip 16'ya Karşı Kullanımı

Öz

Dünyanın farklı bölgelerindeki insan popülasyonunda insan papillomavirüsünün (HPV) ortaya çıkması, yeni tedavi yöntemlerine olan ilgiyi artırmıştır. Moleküler yerleştirme, patojenlere karşı yeni potansiyel antiviral moleküllerin taranması için güvenilir ve öngörücü bir yöntemdir. Yüksek kaliteli 42 HPV tüm genom dizisi, genomda sabit bir bölgenin varlığı açısından analiz edildi. Bu sabit bölge tarafından kodlanan protein, protein-ligand etkileşimi için analiz edildi. Sonuç olarak, virüs bünyesinde çeşitli düzenleyici işlevlere sahip HPV45 oncoprotein E7'nin C-terminal domaini (monomer) (PDB: 2ewl) proteinini kodlamaktan sorumlu bir sabit bölge tespit edildi. HPV'ye karşı kullanılabilecek bir ligand olan "Feoforbid a'nın ($C_{35}H_{36}N_4O_5$)" bu proteinle etkileşime girdiği öngörülmüştür. Feoforbid a, fotodinamik terapide anti-proliferatif etkileri ve fotosensitizör özelliği nedeniyle ticari olarak kanser tedavilerinde de kullanılmaktadır. Feoforbid a'nın bu kuvvetle muhtemel antiviral özelliği, E7 onkoproteinini birçok farklı HPV tipinde de merkezi bir rol oynadığı için, diğer yüksek riskli ve düşük riskli Papillomavirüsler üzerinde test edilmelidir. Bu sonuçların daha ileri klinik ve *in vitro* çalışmalar ile doğrulanması gerekmektedir. Bulgular, HPV-insan hücre etkileşimleri, indüklenen bağışıklık ve HPV tedavisinde geliştirilecek yöntemler konusunda yeni fikirler sağlayabilir.

Anahtar Kelimeler: Antiviral, Antikanser, HPV, İnsan papilloma virüsü, Feoforbid a.

¹Istanbul University, Center for Research and Practice in Biotechnology and Genetic Engineering, Istanbul, Turkey, rsoner@istanbul.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Introduction

Human papillomaviruses (HPVs) are small, non-enveloped DNA viruses that are ubiquitously present in nature and constitute a diverse viral family, encompassing both benign and highly carcinogenic variants (Van Doorslaer et al., 2018). HPVs primarily replicate within the surface layers of squamous epithelia, particularly at the junctions between squamous epithelial cells and the columnar epithelium of the cervix. This replication can disrupt normal squamous cell proliferation, resulting in abnormal epithelial growth (Leeman et al., 2020). As non-lytic infections, HPVs typically do not provoke a robust immune response or inflammation because they do not activate Toll-like receptors or natural killer cells (Brendle et al., 2014).

To date, > 170 HPV types have been identified, with > 40 of these linked to infections in the female reproductive tract and cervical lesions (Layman et al., 2020). HPV types are divided into high-risk and low-risk groups according to their pathogenic potential. Low-risk types, such as HPV6, HPV11, and HPV30, are associated with benign lesions, including lower-grade squamous intraepithelial lesions and genital warts. In contrast, high-risk strains like HPV16, HPV18, and HPV58 are mainly responsible for causing more severe squamous intraepithelial lesions and cervical cancer (Yang et al., 2020).

In Europe, cervical cancer ranks as the second most common cause of death for young women, with approximately 24,400 deaths reported each year (IARC, 2012). HPV can be present in various anatomical sites, including the genital and urinary tracts, as well as the throat and mouth (Bosch and Muñoz, 2002). Several cofactors have been identified in the development of cervical cancer, including prolonged use of oral contraceptives, sexually transmitted infections, and smoking; however, their influence is considered minor compared with the role of persistent HPV infection (Moscicki et al., 2020). About 43% of vulvar tumors, 70% of vaginal tumors, and 100% of cervical tumors are linked to HPV (Lowy and Schiller, 2012). Although HPV is primarily spread through sexual activity, instances of non-sexual transmission methods, including perinatal vertical transmission and physical contact, have also been documented (Syrjänen and Puranen, 2000).

Some international pharmaceutical companies have developed various HPV vaccines based on virus-like particles derived from the L1 major capsid protein (Brisson et al., 2020). Although these vaccines have become part of government vaccination programmes in over 100 countries (Schiller et al., 2012; Gupta et al., 2017; Wang et al., 2020; WHO, 2022), there are some concerns about their side effects, and their long-term effects are unknown (Brotherton et al., 2008; Sutton et al., 2009; Wildemann et al., 2009; Slade et al., 2009; Mendoza Plasencia et al., 2010; DiMario Jr et al., 2010; Chang et al., 2011; Rossi et al., 2011; Ward et al., 2019; Hineno and Ikeda, 2021). Therefore, new alternative HPV treatment methods are also necessary.

In this study, the unvarying regions of human papillomavirus type 16 were investigated in 42 various genome sequences available in the NCBI database. This study aims to identify stable regions within the viral genome to enable predictions of protein structure and conduct docking analysis to determine a suitable molecule that interacts with this HPV protein to mitigate its virulence (Figure 1).

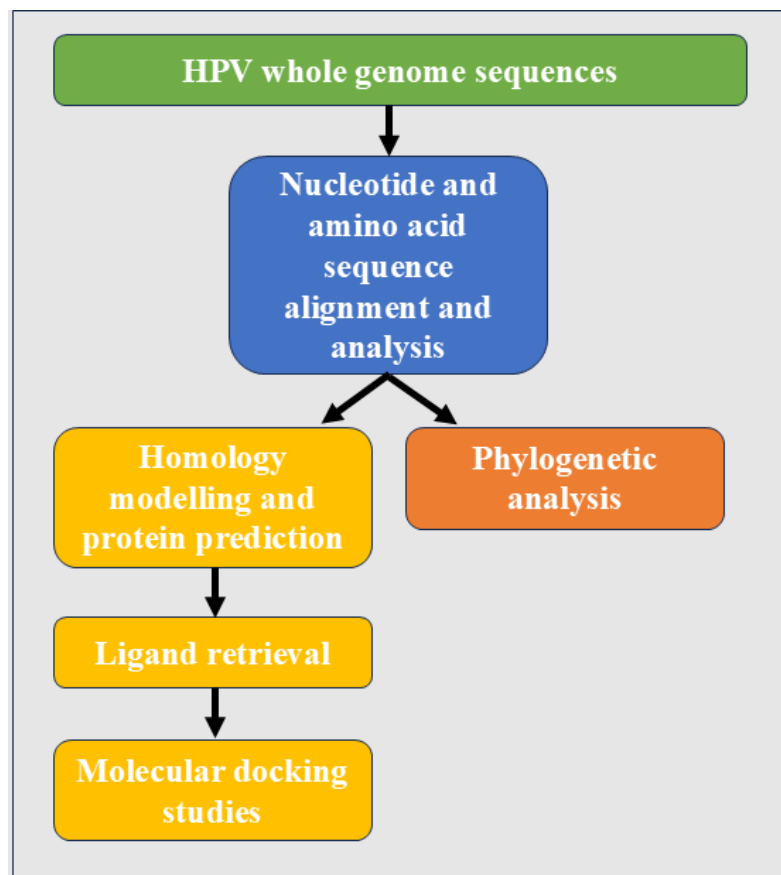


Figure 1. The flowchart of bioinformatic studies.

2. Materials and Methods

2.1. Genome Sources

A total of 42 complete HPV type 16 genome sequences were retrieved from the NCBI virus database (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/labs/virus/vssi/#/>) (taxid:333760) as of August 13, 2024. The dataset included only complete genomes with high coverage from geographically diverse countries. The genomes are listed in Table 1 (Supplementary data S1).

2.2. Nucleotide and Amino Acid Sequence Alignment and Analysis

The sequences were examined, and common regions among all genomes were identified based on the results of pairwise alignment using Progressive-MAUVE from the Geneious software (Geneious Prime® 2024.0.7, Biomatters Ltd., Auckland, New Zealand) (Supplementary data S2) (Baysal et al., 2021a).

Every unvarying genomic region was removed from complete sequences and analyzed with the protein similarity programme of the NCBI database via BlastX. The acquired FASTA sequence was transformed into a protein sequence utilizing the ExPASy proteomics server (<https://web.expasy.org/translate/>) (Gasteiger et al., 2003) and then loaded to the I-TASSER (Iterative Threading ASSEmbly Refinement) server of Michigan University, US (<https://zhanglab.ccmb.med.umich.edu/I-TASSER>) for protein prediction (Yang et al., 2015; Baysal et al., 2021a).

2.3. Phylogenetic Analysis

HPV sequences were aligned by using Geneious software (Geneious Prime® 2024.0.7). In order to build phylogenetic tree for the recent genomes, the Tamura-Nei-parameters genetic distance model and the Neighbor-Joining were selected with sorted topologies.

2.4. Homology Modelling and Protein Prediction

The homology models for the target protein, predicted by the ITASSER server system, were obtained from the Protein Data Bank (PDB) (www.rcsb.org) (Table 2). Protein sequences were aligned, and homology modeling was conducted using the ExPASy proteomics server to obtain more structural information (Schwede et al., 2003).

Table 1. The 42 selected whole-genome sequences of human papillomavirus type 16 were used for MAUVE analysis. “-” represents unknown. RefSeq; Reference Sequence. The sequences are listed alphabetically by country of origin.

NCBI Accession Number	Country of Origin	Isolation Source	Bp Length	Collection/Submission Date
K02718.1	-	Human invasive cervical carcinoma	7904	1985/1994
KU053823.1	USA	<i>Homo sapiens</i>	7905	-/2015
HM057182.1	Amazonian-Brazil	<i>Homo sapiens</i>	7915	2007/2010
HQ644234.1	Asia	<i>Homo sapiens</i>	7905	-/2010
KP874717.1	Brazil	<i>Homo sapiens</i>	7847	-/2015
KU298880.1	Brazil	Cervicovaginal smears	7906	-/2015
KC935953.1	China	Cervical cancer	7906	2012/2013
KF954093.1	China	<i>Homo sapiens</i>	7906	2013/2013
MT783409.1	China	Vaginal secretions	7908	2016/2020
MK484705.1	China	Perianal tumor tissue	7912	2018/2019
EU918764.1	China: Gansu province	<i>Homo sapiens</i>	7904	2007/2008
MH892050.1	China: Northeast region	<i>Homo sapiens</i>	7905	2017/2018
MW320358.1	China: Northeast region	<i>Homo sapiens</i>	7909	2017/2020
FJ006723.1	China: Xinjiang province	Uygur cervical cancer patient	7963	2006/2008
JN565302.1	Croatia	<i>Homo sapiens</i>	7973	2001/2011
AF534061.1	East Asia	Cervicovaginal Cells	7905	-/2002
EU118173.1	Germany	<i>Homo sapiens</i>	7906	-/2007
KY883659.1	India	Cervical specimen	7906	2016/2017
KU684311.1	India	Cervical carcinoma	7916	2011/2016
LC511105.1	Japan	Invasive cervical cancer	7688	-/2019
LC456180.1	Japan	Cervix	7904	-/2019
LC193821.1	Japan	<i>Homo sapiens</i>	7905	-/2016
LC368952.1	Japan	<i>Homo sapiens</i>	7905	-/2018
LC718895.1	Japan	<i>Homo sapiens</i>	7905	2021/2022
LC786753.1	Japan	<i>Homo sapiens</i>	7905	2021/2023
AB889488.1	Japan	<i>Homo sapiens</i>	7906	-/2013
LC647437.1	Japan	<i>Homo sapiens</i>	7906	-/2021
LR861897.1	Luxembourg	Cervical swap	7906	2015/2020
MN961210.1	Mexico	Cervical brushing for liquid-based cytology	7908	-/2020
KX947269.1	Nepal	Cervical samples	7906	2014/2016
KY549156.1	Netherlands	<i>Homo sapiens</i>	7905	2008/2017
OQ911727.1	Pakistan	Oropharynx from patient with head and neck squamous cell carcinoma	7171	2017/2023
OP971046.1	South Africa	Vaginal secretion	7886	2017/2022
KY994539.1	Sweden	Tonsillar carcinoma	7904	2014/2017
KF880690.1	Sweden	Tonsillar carcinoma	7906	2011/2013
FJ610146.1	Thailand	<i>Homo sapiens</i>	7906	2008/2009
JQ004092.1	Thailand	<i>Homo sapiens</i>	7911	2010/2011
OP711986.1	Togo	<i>Homo sapiens</i>	7904	2017/2022
OP751552.1	United Kingdom	<i>Homo sapiens</i>	7908	2016/2022
AF125673.1	USA	<i>Homo sapiens</i>	7904	1995/1999
AY686579.1	USA	<i>Homo sapiens</i>	7906	-/2004
NC_001526.4 (RefSeq)	USA	Invasive cervical carcinoma	7906	1985/2000

2.5. Ligand Retrieval

The structure of Pheophorbide a ($C_{35}H_{36}N_4O_5$) was retrieved from the PubChem database (<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>). The docking calculations were performed using this structure. The ligand's 3D structure was subsequently obtained from the PubChem Compound database in SDF format. The ligand parameters were analyzed using the PRODRG online server

(<http://prodr2.dyndns.org/cgi-bin/prodr2.cgi>) (Schüttelkopf and Van Aalten, 2004). The shape complementarity principle was applied with clustering RMSD 4.0 for docking calculations.

2.6. Molecular Docking Studies

Homology modelling and protein prediction analysis have directed us to test the gene responsible for C-terminal domain (monomer) of the HPV45 oncoprotein E7 (PDB: 2ewl), with the ligand. The flexible docking study was conducted using AutoDock v 4.0 (Trott and Olson, 2010). The interaction analysis of protein-ligand complexes and their amino acid positions with bond distances were calculated and visualized using PyMol. Molecular docking simulation results were also confirmed using the protein dock server SWISSDOCK (<http://www.swissdock.ch/docking>) within protein receptors and ligand interactions (Grosdidier et al., 2011). Pymol software was used to gain insight into their all-binding preferences within the active site of the receptor.

Table 2. Homology modelling of the C-terminal domain of the HPV45 oncoprotein E7 using ITASSER (<https://zhanglab.ccmb.med.umich.edu/I-TASSER>) considering the specific sequence. *The highest PDB hit was 2ewlA.

Rank	PDB Hit	Identity 1	Identity 2	Coverage	Norm. Z-score
1*	2ewlA	0.37	0.24	0.55	1.25
2	7evaC	0.07	0.13	0.89	0.76
3	2ewl	0.38	0.24	0.57	5.09
4	2ewl	0.38	0.24	0.57	3.50
5	2ewlA	0.36	0.24	0.56	2.79
6	2ewl	0.38	0.24	0.53	5.26
7	2ewlA	0.38	0.24	0.57	1.13
8	2ewlA	0.38	0.24	0.57	2.29
9	8fw5G	0.11	0.24	0.96	0.52
10	2f8bA	0.38	0.24	0.57	2.35

3. Findings and Discussion

3.1. Nucleotide and Amino Acid Sequence Alignment and Analysis

Our findings indicated significant mutational alterations across the entire genomes, except for the segment between 100 to 850 bp, which remains a consistently stable region within the whole sequences (Figure 2).

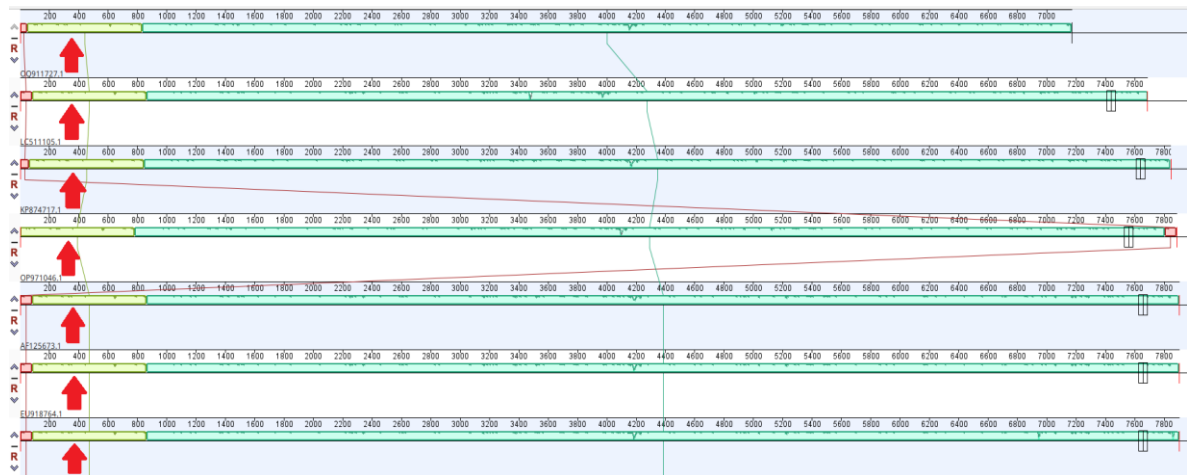


Figure 2. Progressive MAUVE analysis presented a stable region shown in light green-yellow (marked with red arrow) among all HPV genomes.

3.2. Phylogenetic Tree

The phylogenetic tree based on maximum likelihood reveals two primary clades; one branch with 5 sequences (Figure 3-a) and another branch with 37 sequences (Figure 3-b) with several clusters. Only within b group there is geographically similar within 15 sequences which belong to Asian countries (Figure 3-b1). The rest of viral genome sequences exhibited geographical difference and distributed in phylogenetic tree. Figure 3 presents the genetic diversity of HPV 16 sequences from geographically diverse countries of the world.

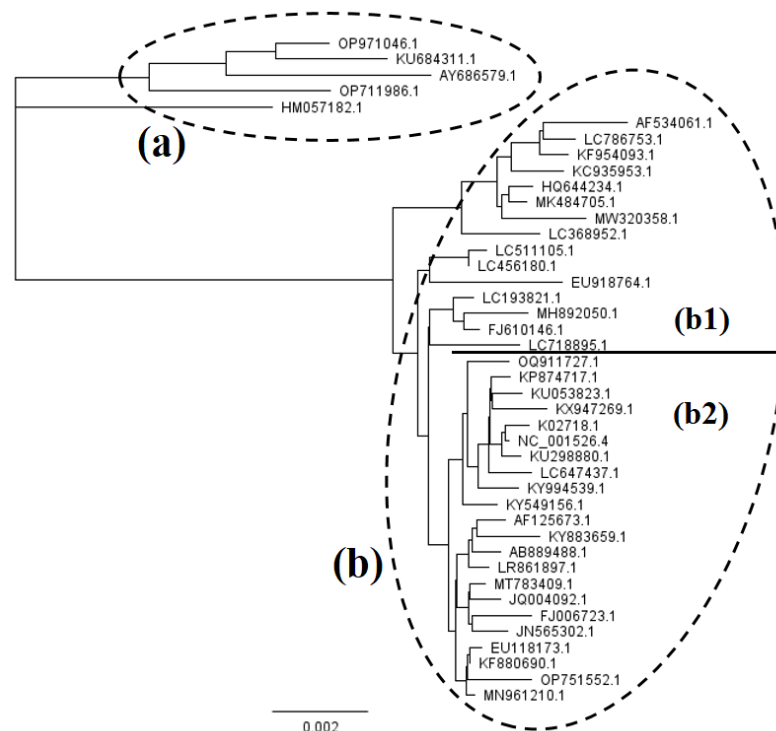


Figure 3. The phylogenetic tree of HPV represents 2 main branches, labeled as (a) and (b). Geographic comparison results show two groups among (b): (b1) genomes sequences from Asian countries and (b2) various sequences from different countries. Group (a) also includes geographically diverse countries.

3.3. Homology Modelling and Protein Prediction

The aligned sequences of the excised uniform regions displayed that the 750-bp fragment contained the C-terminal domain of the HPV45 oncoprotein E7, featuring consistently unvarying sequences (Figure 2). These stable sequences were selected as a template for further protein structural predictions (Figure 2). The results of the submitted sequence converted to amino acid sequence using the ExPASy proteomics server (<https://web.expasy.org/translate>) were structurally very close to the C-terminal domain of the HPV45 oncoprotein E7 (www.rcsb.org/structure/2ewl) (Ohlenschläger et al., 2006) as a target protein according to I-TASSER analysis, and its ligand was determined as Chlorophyll a. Pheophorbide a ($C_{35}H_{36}N_4O_5$), a small molecule, and Chlorophyll a derivative, which is commercially produced and widely used for anticancer studies, was selected as a ligand for molecular docking analysis (Supplementary data S3-S4).

3.4. Molecular Docking Studies

For docking analysis of Pheophorbide a with the C-terminal domain of the HPV45 oncoprotein E7 (PDB: 2ewl), the ligand structure of Pheophorbide a retrieved from the PubChem database, was analyzed (Figure 2, 4, 5). The docking of the HPV45 oncoprotein E7 with the target molecule Pheophorbide a was examined concerning the following factors: (a) amino acids that interact and (b) atoms of the ligand and protein that participate in hydrogen bonding. The SWISSDOCK server results confirmed the outputs obtained from AutoDock software calculations (Figure 5) Clustering histogram of protein and ligand interaction was given in table 3. Number of multi-member conformational clusters found 3 (1, 2 and 7), out of 15 runs (Supplementary data S3-S4).

Table 3. Clustering histogram of protein-ligand interaction. The lowest binding energy was found -7.17 kcal/mol which shows higher interaction between HPV45 oncoprotein E7 and Pheophorbide a.

Cluster Rank	Lowest Binding Energy	Run	Mean Binding Energy	Number in Clusters	Histogram					
					5	10	15	20	25	30 35
					:	l	:	l	:	l :
1	-7.17	10	-6.23	4	####					
2	-6.75	6	-6.00	4	####					
3	-6.56	4	-6.56	1	#					
4	-6.35	7	-6.35	1	#					
5	-5.77	3	-5.77	1	#					
6	-5.45	15	-5.45	1	#					
7	-5.29	11	-5.18	2	##					
8	-5.25	14	-5.25	1	#					

MHGDTPTLHEYMLDLQPETTDLYCYEQLNDSSE
 EEDEIDGPAGQAEPDRAHYNIVTFCKCDSTLRL
 CVQSTHVDIRTLEDLLMGTLGIVCPICSQKP

Figure 4. The results of submitted sequence were converted to amino acid sequence using the ExPASy proteomics server (<https://web.expasy.org/translate>) for structural analysis using the I-TASSER server.

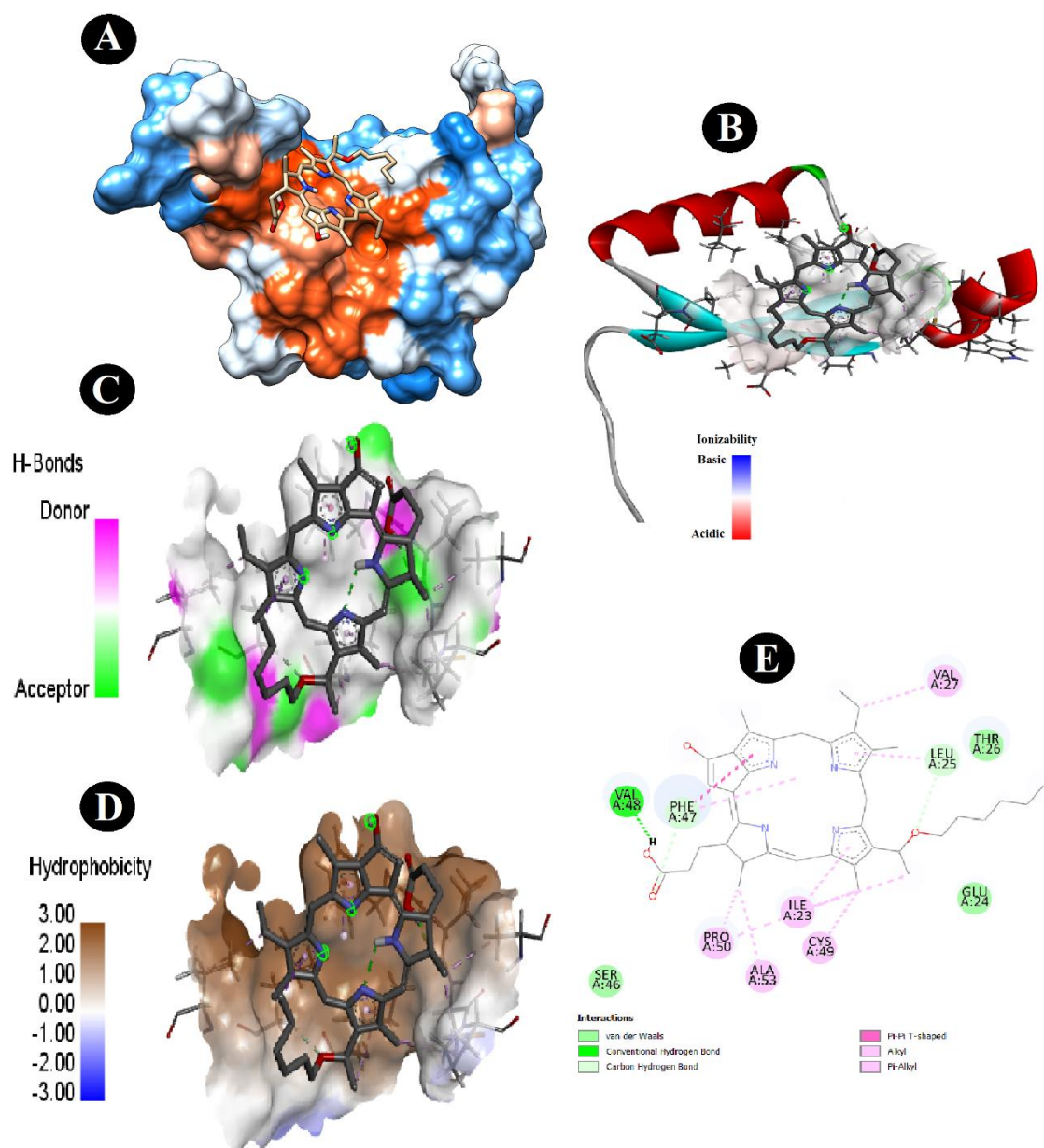


Figure 5. Visualization depicts docking analysis of Pheophorbide a binding with crystal structure of HPV45 oncoprotein E7 (PDB: 2ew1) (A) hydrophobicity surface 3D representation (B) interaction of Pheophorbide a with HPV45 oncoprotein E7 (C) visualization of hydrogen bond (D) visualization of hydrophobic interaction (E) 2D representation describes the bindings of Pheophorbide a with the active site of HPV45 oncoprotein E7.

Papillomaviruses constitute a diverse group of DNA viruses characterized by circular, double-stranded DNA genomes approximately 8 kilobases (kb) that are organized into three general regions. The upstream regulatory region (URR) contains sequences crucial for control of transcriptional and replicative processes. The early region encodes genes such as *E6*, *E7*, *E1*, *E2*, *E4*, and *E5*, which primarily contribute to enzymatic functions. The structural region encodes the *L1* capsid protein and *L2*, which plays a role in viral DNA packaging. HPVs are categorized according to the genetic similarity of their genomes, with new HPV types recognized as those whose *L1* open reading frame shows less than 90% similarity to established types. So far, more than 90 HPV genotypes have been completely characterized (de Villiers et al., 2004; Layman et al., 2020). Intratypic variants and subtypes are defined as HPVs that differ by less than 10% in their *L1* DNA sequences (Bernard and Apt, 1994; de Villiers et al., 2004). HPVs play a causal role in the development of cervical cancer (CC) and its precursor lesions (IARC, 1995; Clifford et al., 2003a; 2003b; Muñoz et al., 2003). Among the high-risk HPV types linked to cervical cancer, HPV16 is the most prevalent, being detected in approximately 50% of CC cases (Bosch et al., 1995; Muñoz et al., 2003). Multiple variants of HPV16 have been identified across diverse geographic regions and ethnic groups (Ho et al., 1991; Icenogle et al., 1991; Yamada et al., 1997; Picconi et al., 2003). Despite their genetic similarity, five distinct phylogenetic branches of HPV16 variants have been classified based on geographic origin: European, Asian, Asian-American, African-1, and African-2 (Chan et al., 1992; Ho et al., 1993). Subsequent sequence analyses of additional genomic regions, such as *E6*, *L2*, and *L1* have further refined and supported this phylogenetic framework (Yamada et al., 1995). In this study, phylogenetic analysis revealed two primary branches, denoted as (a) and (b). Within branch (b), two subgroups were identified, of which only subgroup (b1) demonstrated geographic alignment with Asian countries (Figure 3).

Although HPV16 variants have been extensively studied in the context of phylogenetics, with detailed descriptions of molecular variations in the *E2*, *L2*, *L1*, URR, and especially the *E6* region (Giannoudis et al., 2001), genetic variation stability of genes within the same lineage or isolate has received limited attention. Giannoudis et al. (2001) has indicated that HPV16 variants exhibit notable differences in biological properties *in vitro*, which may contribute to variations in pathogenicity, carcinogenic potential, and possibly immunogenicity. Additionally, specific HPV16 variants are linked to varying risks of cervical cancer development (Xi et al., 1997; Villa et al., 2000; Berumen et al., 2001; Hildesheim et al., 2001). Recent studies have highlighted the presence of diversifying selection in the *E6* and *E7* oncogenes (DeFilippis et al., 2002), yet the evolutionary processes affecting the whole genome, the coevolutionary relationships between various HPV16 genes, and their biological consequences are still not fully understood.

Among the evolutionary basis of the entire genome, some genes emerge as the sole segment displaying a uniform sequence, distinct from the remaining portion of the genome. The proteins encoded by these regions could be considered as a target point for the purpose of targeted drug design, as described in “*Baysal’s hypothesis*” (Silme, 2024), and the results from previous studies also confirmed this hypothesis (Baysal et al., 2021a; b; Baysal and Silme, 2021; Abdul Ghafoor et al., 2024).

The conserved region of HPV 16 which was determined to be responsible for coding the C-terminal domain (monomer) of the HPV45 oncoprotein E7 through Progressive-MAUVE analysis in this study. HR-HPVs encode three oncogenes, *E5*, *E6*, and *E7* (Münger et al., 1989; Leechanachai et al., 1992), and among these, *E7* appears to be the main driver of cervical carcinogenesis (Riley et al., 2003). The E7 oncoprotein is primarily recognized for its interaction with and degradation of the pRb tumor suppressor protein (Münger et al., 2001). It also associates with other cellular proteins involved in cell cycle regulation, transcriptional repression, and tumor suppression (Münger et al., 2001; Avvakumov et al., 2003; Bernat et al., 2003). In murine models, the combination of HPV16 E7 and exogenous estrogen has been shown to be sufficient to induce high-grade cervical dysplasia and cervical cancer (Herber et al., 1996; Riley et al., 2003; Chung et al., 2008), while causing significant alterations in the expression of numerous cellular genes (Cortés-Malagón et al., 2013). Moreover, sustained expression of fully functional viral oncoproteins E6 and E7 is essential for maintaining extrachromosomal forms of HPV DNA (Thomas et al., 1999). These oncoproteins contribute to creating a cellular environment favorable for HPV persistence by circumventing cellular checkpoints that would otherwise hinder the long-term retention of extrachromosomal DNA (Thomas et al., 1999; Howley and Lowy, 2001; Garner-Hamrick et al., 2004). Viral oncogenes have the capacity to disrupt cell-cycle control checkpoints by interfering with the regulatory mechanisms of cyclins, cyclin-dependent kinases (CDKs), and CDK inhibitors (Zerfass-Thome et al., 1996; Funk et al., 1997; Jones et al., 1997).

This study exhibited the molecule that interacts with E7 protein is Chlorophyll a and Pheophorbide a. These molecules could suppress the E7 oncoprotein, resulting in dysfunction of HPVs’ replication machinery. Previous studies have shown that various HPV subtypes can coexist within the same tissue in clinical specimens, implying that co-infection occurrences may be relatively common (Kulmala et al., 2006). Since the E7 oncoprotein also plays a central role in many other HPV types, this possible antiviral property of Pheophorbide a should be tested on other high-risk and low-risk Papillomaviruses.

Chlorophylls are prominent bioactive compounds known for their significant health benefits, including anti-inflammatory and anti-cancer properties (Ferruzzi and Blakeslee, 2007; Tagauov et al., 2023). Chlorophylls have several beneficial effects, one of which is their strong antioxidant properties

that help reduce oxidative damage to DNA and lipid peroxidation by lowering reactive oxygen species levels and chelating metal ions (Shelton and Vincent, 1963; Pangestuti and Kim, 2011; Hsu et al., 2013; Tagauov et al., 2023). Notably, Chlorophyll a and its metabolites accumulate in specific tissues, such as the liver and gut, suggesting that these organs could be particularly influenced by their positive biological activity (Szczygieł et al., 2008; Xodo et al., 2012).

The chemical nature of porphyrin allows Chlorophylls to function as hydrogen donors, stopping the oxidative chain reaction (Endo et al., 1985). Pheophorbide a is a derivative of Chlorophyll a (Chen et al., 2009). Interestingly, the porphyrin structure of these two molecules and human blood cell hemoglobin are similar (Figure 6).

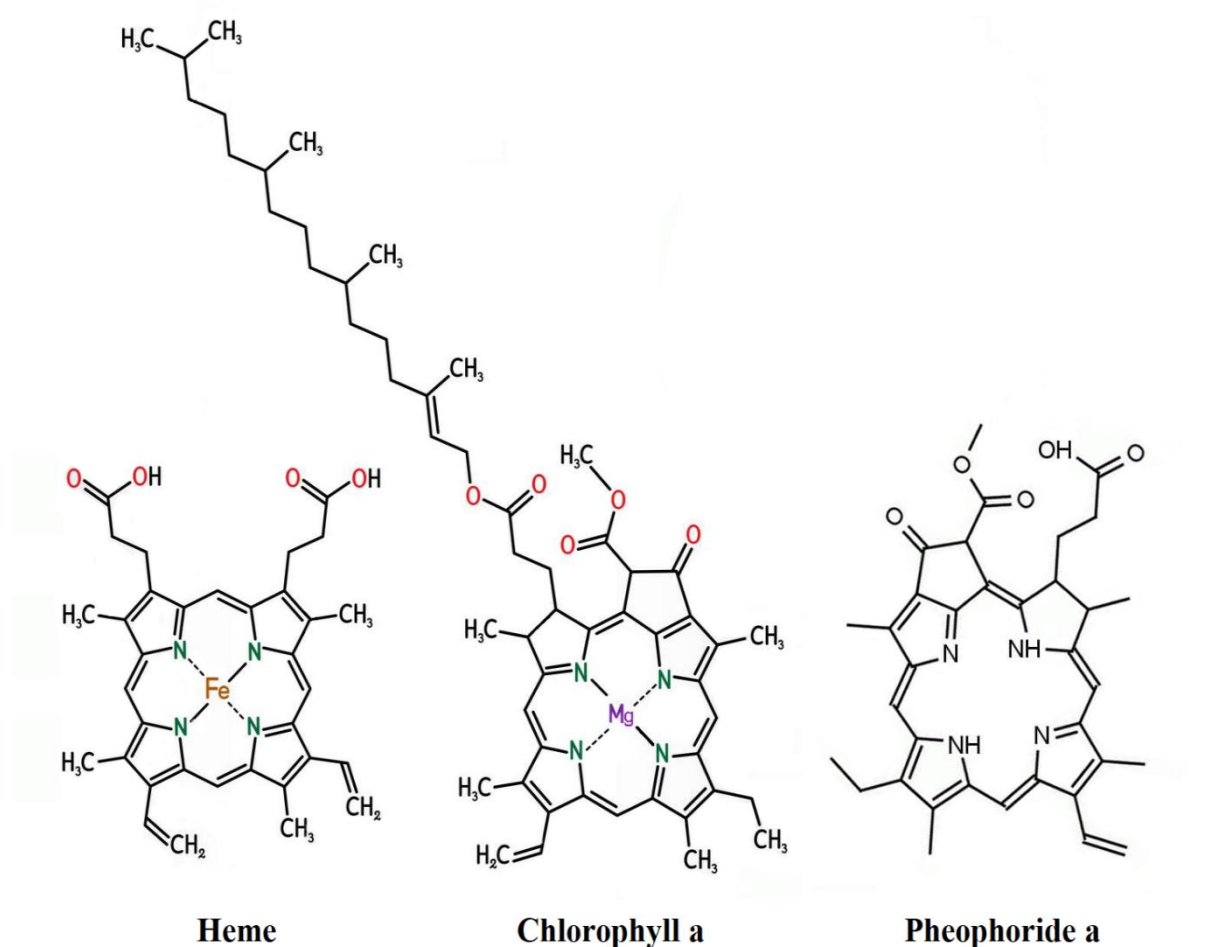


Figure 6. Chemical structure comparison of Heme, Chlorophyll a and Pheophorbide a.

Previous studies have indicated that Pheophorbide a could induce significant anti-proliferative effects in several human cancer cell lines (Chen et al., 2009; Yoon et al., 2014; Saide et al., 2020), and is used as a photosensitizer in photodynamic therapy (Roeder et al., 1990; Busch et al., 2009; Wang et al., 2014). These studies combined with the results of present study suggest that Pheophorbide a could be a promising candidate for treatment of HPV 16.

Pheophorbide may be produced through the breakdown of consumed plant material (Saide et al., 2020). It has been found that mitochondria from both worms (*Caenorhabditis elegans*) and mice can utilize this molecule through a process known as ad hoc photoheterotrophy (Xu et al., 2014). The metabolical production of this substance in human body should be studied in further studies to understand its possible stimulating effect on the immune system.

In addition to cervical cancers, anogenital, head, and neck cancers are also strongly associated with HPV infection (Brianti et al., 2017; Egawa, 2023). A recent study by Kim et al. (2022) identified Pheophorbide a in *Eupatorium perfoliatum* extract as a novel lymphatic vascular activator that is crucial for maintaining tissue fluid homeostasis and immune surveillance. As shown in figure 6, Pheophorbide a has a similar structure to that of human blood hemoglobin and it not only could stop the replication cycle of HPV but also influence the lymphatic system to stop metastasis that could result in other types of cancer. Further studies are required to understand and confirm its mechanisms of action.

As mentioned above, Pheophorbide a is a derivative of chlorophyll a (Chen et al., 2009; Saide et al., 2020). Chlorophylls are natural pigments commonly found in the human diet, and gaining prominence due to the consumers' increasing preference for natural and health-conscious lifestyle choices. These studies mentioned in the discussion lead us to a quote by Linus Pauling; "*You can trace every sickness, every disease and every ailment to a mineral deficiency*". From this perspective, this statement can be generalized to deficiency of nutritional elements, vitamins and their derivatives, which is complimentary with the "*food as medicine*" philosophy of Hippocrates (Lucock, 2004). The results of this study and previous studies (WHO, 1990; 2003; Baysal and Silme, 2021; Baysal et al., 2021a; 2021b; 2024; Abdul Ghafoor et al., 2024; Silme, 2024) also suggest the feasibility of this approach. Further studies combined with genomics and pharmaceutical techniques on various diseases could widen our understanding of nutritional medicine that states the interconnectedness of human health and the nutrition.

4. Conclusion and Recommendation

This study identified a stable region in the HPV genome, specifically the HPV45 oncoprotein E7, which plays a critical regulatory role in the virus. The molecular docking analysis highlighted Pheophorbide a ($C_{35}H_{36}N_4O_5$) as a potential antiviral molecule that could interact with this target protein, suggesting its possible use in HPV treatment. Given that Pheophorbide a is already used in cancer therapies, its application in HPV treatment represents a promising avenue for future research. Further clinical and *in vitro* validation of these findings could yield valuable insights into human cell-HPV interactions and provide us a new tool for HPV treatments.

Acknowledgments

This article is dedicated to HPV patients. The author gratefully thanks to Prof. Dr. Ömür Baysal for his comments and suggestions. The sequence data of this study are openly available in the NCBI database. Supplementary materials are available online: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.28028489>

Authors' Contributions

The author has completed the article alone.

Statement of Conflicts of Interest

The author has no conflict of interest to declare.

Statement of Research and Publication Ethics

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

References

- Abdul Ghafoor, N., Kırboğa, K. K., Baysal, Ö., Süzek, B. E., and Silme, R. S. (2024). Data mining and molecular dynamics analysis to detect HIV-1 reverse transcriptase RNase H activity inhibitor. *Molecular Diversity*, 28(4), 1869-1888. <https://doi.org/10.1007/s11030-023-10707-6>
- Avvakumov, N., Torchia, J., and Mymryk, J. S. (2003). Interaction of the HPV E7 proteins with the pCAF acetyltransferase. *Oncogene*, 22(25), 3833-3841. <https://doi.org/10.1038/sj.onc.1206562>
- Baysal, Ö., Abdul Ghafoor, N., Silme, R. S., Ignatov, A. N., and Kniazeva, V. (2021b). Molecular dynamics analysis of N-acetyl-D-glucosamine against specific SARS-CoV-2's pathogenicity factors. *PloS One*, 16(5), e0252571. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252571>
- Baysal, Ö., and Silme, R. S. (2021). Utilization from computational methods and omics data for antiviral drug discovery to control of SARS-CoV-2. In V. Kumar (Ed.), *Origin and impact of COVID-19 pandemic originating from SARS-CoV-2 infection across the globe*, (pp. 1-15). London, UK: IntechOpen Limited. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98319>
- Baysal, Ö., Genç, D., Silme, R. S., Kırboğa, K. K., Çoban, D., Ghafoor, N. A., Tekin, L., and Bulut, O. (2024). Targeting breast cancer with N-Acetyl-D-Glucosamine: integrating machine learning and cellular assays for promising results. *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry*, vol. 24, no. 5, pp. 334-347. <https://doi.org/10.2174/0118715206270568231129054853>
- Baysal, Ö., Silme, R. S., Karaaslan, İ. Ç., and Ignatov, A. N. (2021a). Genetic uniformity of a specific region in SARS-CoV-2 genome and repurposing of N-acetyl-d-glucosamine. *Fresenius Environmental Bulletin*, 30(3), 2848-2857. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4621319>
- Bernard, H. U., and Apt, D. (1994). Transcriptional control and cell type specificity of HPV gene expression. *Archives of Dermatological Research*, 130(2), 210-215.

- Bernat, A., Avvakumov, N., Mymryk, J. S., and Banks, L. (2003). Interaction between the HPV E7 oncoprotein and the transcriptional coactivator p300. *Oncogene*, 22(39), 7871-7881. <https://doi.org/10.1038/sj.onc.1206896>
- Berumen, J., Ordoñez, R. M., Lazcano, E., Salmeron, J., Galvan, S. C., Estrada, R. A., Yunes, E., Garcia-Carranca, A., Gonzalez-Lira, G., and Madrigal-de la Campa, A. (2001). Asian-American variants of human papillomavirus 16 and risk for cervical cancer: a case-control study. *Journal of the National Cancer Institute*, 93(17), 1325-1330. <https://doi.org/10.1093/jnci/93.17.1325>
- Bosch, F. X., and Muñoz, N. (2002). The viral etiology of cervical cancer. *Virus Research*, 89(2), 183-190. [https://doi.org/10.1016/s0168-1702\(02\)00187-9](https://doi.org/10.1016/s0168-1702(02)00187-9)
- Bosch, F. X., Manos, M. M., Muñoz, N., Sherman, M., Jansen, A., Peto, J., Schiffman, M. H., Moreno, V., Kurman, R., and Shah, K. V. (1995). Prevalence of human papillomavirus in cervical cancer: a worldwide perspective. *Journal of the National Cancer*, 87(11), 796-802. <https://doi.org/10.1093/jnci/87.11.796>
- Brendle, S. A., Bywaters, S. M., and Christensen N. D. (2014). Pathogenesis of infection by human papillomavirus. In M. K. Ramírez-Fort, F. Khan, P. L. Rady, and S.K. Tyingvol (Eds.), *Current Problems in Dermatology* (pp. 47-57). S. Karger AG, vol. 45. <https://doi.org/10.1159/000355963>
- Brianti, P., De Flammineis, E., and Mercuri, S. R. (2017). Review of HPV-related diseases and cancers. *New Microbiologica*, 40(2), 80-85.
- Brisson, M., Kim, J. J., Canfell, K., Drolet, M., Gingras, G., Burger, E. A., Martin, D., Simms, K. T., Bénard, É., Boily, M.-C., Sy, S., Regan, C., Keane, A., Caruana, M., Nguyen, D. T. N., Smith, M. A., Laprise, J.-F., Jit, M., Alary, M., Bray, F., Fidarova, E., Elsheikh, F., Bloem, P. J. N., Broutet, N., and Hutubessy, R. (2020). Impact of HPV vaccination and cervical screening on cervical cancer elimination: a comparative modelling analysis in 78 low-income and lower-middle-income countries. *The Lancet*, 395(10224), 575-590. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30068-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30068-4)
- Brotherton, J. M., Gold, M. S., Kemp, A. S., McIntyre, P. B., Burgess, M. A., Campbell-Lloyd, S., and on behalf of the New South Wales Health HPV Adverse Events Panel. (2008). Anaphylaxis following quadrivalent human papillomavirus vaccination. *Canadian Medical Association Journal*, 179, 525-533. <https://doi.org/10.1503/cmaj.080916>
- Busch, T., Cengel, K. A., and Finlay, J. (2009). Pheophorbide a as a photosensitizer in photodynamic therapy: In vivo considerations. *Cancer Biology & Therapy*, 8(6), 540-542. <https://doi.org/10.4161/cbt.8.6.8067>
- Chan, S. Y., Ho, L., Ong, C. K., Chow, V., Drescher, B., Dürst, M., ter Meulen, J., Villa, L., Luande, J., Mğaya, H. N., and Bernard, H.-U. (1992). Molecular variants of human papillomavirus type 16 from four continents suggest ancient pandemic spread of the virus and its coevolution with humankind. *Journal of Virology*, 66(4), 2057-2066. <https://doi.org/10.1128/jvi.66.4.2057-2066.1992>
- Chang, J., Campagnolo, D., Vollmer, T. L., and Bompreszi, R. (2011). Demyelinating disease and polyvalent human papilloma virus vaccination. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 82(11), 1296-1298. <https://doi.org/10.1136/jnnp.2010.214924>
- Chen, K., Preuß, A., Hackbarth, S., Wacker, M., Langer, K., and Röder, B. (2009). Novel photosensitizer-protein nanoparticles for Photodynamic therapy: Photophysical characterization and *in vitro* investigations. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 96(1), 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2009.04.006>
- Chung, S.-H., Wiedmeyer, K., Shai, A., Korach, K. S., and Lambert, P. F. (2008). Requirement for estrogen receptor α in a mouse model for human papillomavirus-associated cervical cancer. *Cancer Research*, 68(23), 9928-9934. <https://doi.org/10.1158/0008-5472.can-08-2051>
- Clifford, G. M., Smith, J. S., Aguado, T., and Franceschi, S. (2003a). Comparison of HPV type distribution in high-grade cervical lesions and cervical cancer: a meta-analysis. *British Journal of Cancer*, 89(1), 101-105. <https://doi.org/10.1038/sj.bjc.6601024>
- Clifford, G. M., Smith, J. S., Plummer, M., Munoz, N., and Franceschi, S. (2003b). Human papillomavirus types in invasive cervical cancer worldwide: a meta-analysis. *British Journal of Cancer*, 88(1), 63-73. <https://doi.org/10.1038/sj.bjc.6600688>
- Cortés-Malagón, E. M., Bonilla-Delgado, J., Díaz-Chávez, J., Hidalgo-Miranda, A., Romero-Cordoba, S., Üren, A. Celik, H., McCormick, M., Munguía-Moreno, J. A., Ibarra-Sierra, E., Escobar-Herrera, J., Lambert, P. F., Mendoza-Villanueva, D., Bermudez-Cruz, R. M., and Gariglio, P. (2013). Gene expression profile regulated by the HPV16 E7 oncoprotein and estradiol in cervical tissue. *Virology*, 447(1-2), 155-165. <https://doi.org/10.1016/j.virol.2013.08.036>
- de Villiers, E. M., Fauquet, C., Broker, Bernard, T. R., H. U., and zur Hausen, H. (2004). Classification of papillomaviruses. *Virology*, 324(1), 17-27. <https://doi.org/10.1016/j.virol.2004.03.033>

- DeFilippis, V. R., Ayala, F. J., and Villarreal, L. P. (2002). Evidence of diversifying selection in human papillomavirus type 16 E6 but not E7 oncogenes. *Journal of Molecular Evolution*, 55(4), 491-499. <https://doi.org/10.1007/s00239-002-2344-y>
- DiMario Jr., F. J., Hajjar, M., and Ciesielski, T. (2010). A 16-year-old girl with bilateral visual loss and left hemiparesis following an immunization against human papilloma virus. *Journal of Child Neurology*, 25(3), 321-327. <https://doi.org/10.1177/0883073809349322>
- Egawa, N. (2023). Papillomaviruses and cancer: commonalities and differences in HPV carcinogenesis at different sites of the body. *International Journal of Clinical Oncology*, 28, 956-964. <https://doi.org/10.1007/s10147-023-02340-y>
- Endo, Y., Usuki, R., and Kaneda, T. (1985). Antioxidant effects of chlorophyll and pheophytin on the autoxidation of oils in the dark. II. The mechanism of antioxidative action of chlorophyll. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 62(9), 1387-1390. <https://doi.org/10.1007/BF02545965>
- Ferruzzi, M. G., and Blakeslee, J. (2007). Digestion, absorption, and cancer preventative activity of dietary chlorophyll derivatives. *Nutrition Research*, 27(1), 1-12. <http://doi.org/10.1016/j.nutres.2006.12.003>
- Funk, J. O., Waga, S., Harry, J. B., Espling, E., Stillman, B., and Galloway, D. A. (1997). Inhibition of CDK activity and PCNA-dependent DNA replication by p21 is blocked by interaction with the HPV-16 E7 oncoprotein. *Genes & Development*, 11(16), 2090-2100. <https://doi.org/10.1101/gad.11.16.2090>
- Garner-Hamrick, P. A., Fostel, J. M., Chien, W. M., Banerjee, N. S., Chow, L. T., Broker, T. R., and Fisher, C. (2004). Global effects of human papillomavirus type 18 E6/E7 in an organotypic keratinocyte culture system. *Journal of Virology*, 78(17), 9041-9050. <https://doi.org/10.1128/jvi.78.17.9041-9050.2004>
- Gasteiger, E., Gattiker, A., Hoogland, C., Ivanyi, I., Appel, R. D., and Bairoch, A. (2003). ExPASy: the proteomics server for in-depth protein knowledge and analysis. *Nucleic Acids Research*, 31(13), 3784-3788. <https://doi.org/10.1093/nar/gkg563>
- Giannoudis, A., and Herrington, C. S. (2001). Human papillomavirus variants and squamous neoplasia of the cervix. *Journal of Pathology*, 193(3), 295-302. [https://doi.org/10.1002/1096-9896\(2000\)9999:9999%3C::aid-path809%3E3.0.co;2-c](https://doi.org/10.1002/1096-9896(2000)9999:9999%3C::aid-path809%3E3.0.co;2-c)
- Grosdidier, A., and Zoete, V., and Michielin, O. (2011). SwissDock, protein-small molecule docking web service based on EADock DSS. *Nucleic Acids Research*, 39(suppl_2), W270-W277. <https://doi.org/10.1093/nar/gkr366>
- Gupta, G., Glueck, R., and Patel, P. R. (2017). HPV vaccines: Global perspectives. *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, 13(6), 1-4. <https://doi.org/10.1080/21645515.2017.1289301>
- Herber, R., Liem, A., Pitot, H., and Lambert, P. F. (1996). Squamous epithelial hyperplasia and carcinoma in mice transgenic for the human papillomavirus type 16 E7 oncogene. *Journal of Virology*, 70(3), 1873-1881. <https://doi.org/10.1128/jvi.70.3.1873-1881.1996>
- Hildesheim, A., Schiffman, M., Bromley, C., Wacholder, S., Herrero, R., Rodriguez, A., Bratti, M. C., Sherman, M. E., Scarpidis, U., Lin, Q. Q., Terai, M., Bromley, R. L., Buetow, K., Apple, R. J., and Burk, R. D. (2001). Human papillomavirus type 16 variants and risk of cervical cancer. *Journal of the National Cancer Institute*, 93(4), 315-318. <https://doi.org/10.1093/jnci/93.4.315>
- Hineno, A., and Ikeda, S. I. (2021). A long-term observation on the possible adverse effects in Japanese adolescent girls after human papillomavirus vaccination. *Vaccines (Basel)*, 9(8), 856. <https://doi.org/10.3390/vaccines9080856>
- Ho, L., Chan, S. Y., Burk, R. D., Das, B. C., Fujinaga, K., Icenogle, J. P., Kahn, T., Kiviat, N., Lancaster, W., Mavromara-Nazos, P., Labropoulou, V., Mitrani-Rosenbaum, S., Norrild, B., Pillai, M. R., Stoerker, J., Syrjaenen, K., Syrjaenen, S., Tay, S-K., Villa, L. L., Wheeler, C. M., Williamson, A-L., and Bernard, H-U. (1993). The genetic drift of human papillomavirus type 16 is a means of reconstructing prehistoric viral spread and the movement of ancient human populations. *Journal of Virology*, 67, 6413-6423. <https://doi.org/10.1128/jvi.67.11.6413-6423.1993>
- Ho, L., Chan, S. Y., Chow, V., Chong, T., Tay, S. K., Villa, L. L., and Bernard, H. U. (1991). Sequence variants of human papillomavirus type 16 in clinical samples permit verification and extension of epidemiological studies and construction of a phylogenetic tree. *Journal of Clinical Microbiology*, 29(9), 1765-1772. <https://doi.org/10.1128/jcm.29.9.1765-1772.1991>
- Howley, P. M., and Lowy, D. R. (2001). Papillomaviruses and their replication. In D. M. Knipe, P. M. Howley, D. E. Griffin, R. A. Lamb, M. A. Martin, B. Roizman, and S. E. Straus (Eds.), *Fields Virology*, 4th ed., (pp. 2197-2229). Philadelphia, Pa: Lippincott Williams & Wilkins.
- Hsu, C., Chao, P., Hu, S., and Yang, C. (2013). The antioxidant and free radical scavenging activities of chlorophylls and pheophytins. *Food and Nutrition Sciences*, 4(8A), 1-8. <http://dx.doi.org/10.4236/fns.2013.48A001>

- IARC-International Agency for Research on Cancer. (1995). Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, vol. 64, Human papillomaviruses, Lyon, France: International Agency for Research on Cancer. Retrieved from <https://publications.iarc.fr/82>
- IARC-International Agency for Research on Cancer. (2012). Globocan 2012: Estimated Cancer Incidence, Mortality and Prevalence Worldwide in 2012. Retrieved from <http://publications.iarc.fr/Databases/Iarc-Cancerbases/GLOBOCAN-2012-Estimated-Cancer-Incidence-Mortality-And-Prevalence-Worldwide-In-2012-V1.0-2012>
- Icenogle, J. P., Sathya, P., Miller, D. L., Tucker, R. A., and Rawls, W. E. (1991). Nucleotide and amino acid sequence variation in the L1 and E7 open reading frames of human papillomavirus type 6 and type 16. *Virology*, 184(1), 101-107. [https://doi.org/10.1016/0042-6822\(91\)90826-w](https://doi.org/10.1016/0042-6822(91)90826-w)
- Jones, D. L., Alani, R. M., and Munger, K. (1997). The human papillomavirus E7 oncoprotein can uncouple cellular differentiation and proliferation in human keratinocytes by abrogating p21Cip1-mediated inhibition of cdk2. *Genes & Development*, 11(16), 2101-2111. <https://doi.org/10.1101/gad.11.16.2101>
- Kim, J., Gousopoulos, E., Faleschini, T. M., Hamburger, M., Potterat, O., and Detmar, M., (2022). Pheophorbide a identified in an *Eupatorium perfoliatum* extract is a novel lymphatic vascular activator. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 147, 112664. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2022.112664>
- Kulmala, S. M., Syrjänen, S. M., Gyllenstein, U. B., Shabalova, I. P., Petrovichev, N., and Tosi, P. (2006). Early integration of high copy HPV16 detectable in women with normal and low grade cervical cytology and histology. *Journal of Clinical Pathology*, 59(5), 513-517. <https://doi.org/10.1136/jcp.2004.024570>
- Layman, H., Rickert, K. W., Wilson, S., Aksyuk, A. A., Dunty, J. M., Natrakul, D., Swaminathan, N., and DelNagro, C. J. (2020). Development and validation of a multiplex immunoassay for the simultaneous quantification of type-specific IgG antibodies to E6/E7 oncoproteins of HPV16 and HPV18. *PLoS One*, 15(3), e0229672. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229672>
- Leechanachai, P., Banks, L., Moreau, F., and Matlashewski, G. (1992). The E5 gene from human papillomavirus type 16 is an oncogene which enhances growth factor-mediated signal transduction to the nucleus. *Oncogene*, 7(1), 19-25.
- Leeman, A., Jenkins, D., Del Pino, M., Ordi, J., Torné, A., Doorbar, J., Meijer, C. J. L. M., van Kemenade, F. J., and Quint, W. G. V. (2020). Expression of p16 and HPV E4 on biopsy samples and methylation of FAM19A4 and miR124-2 on cervical cytology samples in the classification of cervical squamous intraepithelial lesions. *Cancer Medicine*, 9(7), 2454-2461. <https://doi.org/10.1002/cam4.2855>
- Lowy, D. R., and Schiller, J. T. (2012). Reducing HPV-associated cancer globally. *Cancer Prevention Research (Phila)*, 5(1), 18-23. <https://doi.org/10.1158/1940-6207.CAPR-11-0542>
- Lucock, M. (2004). Is folic acid the ultimate functional food component for disease prevention? *BMJ*, 328(7433), 211-214. <https://doi.org/10.1136/bmj.328.7433.211>
- Mendoza Plasencia, Z., González López, M., Fernández Sanfiel, M. L., and Muñiz Montes, J. R. (2010). Acute disseminated encephalomyelitis with tumefactive lesions after vaccination against human papillomavirus. *Neurología*, 25(1), 58-59. [https://doi.org/10.1016/S0213-4853\(10\)70023-2](https://doi.org/10.1016/S0213-4853(10)70023-2)
- Moscicki, A.-B., Schiffman, M., and Franceschi, S. (2020). The natural history of human papillomavirus infection in relation to cervical cancer. In D. Jenkins and F. X. Bosch (Eds.), *Human Papillomavirus*, (pp. 149-160). Cambridge, MA, USA: Academic Press.
- Münger, K., Basile, J. R., Duensing, S., Eichten, A., Gonzalez, S. L., Grace, M., and Zacny, V. L. (2001). Biological activities and molecular targets of the human papillomavirus E7 oncoprotein. *Oncogene*, 20(54), 7888-7898. <https://doi.org/10.1038/sj.onc.1204860>
- Münger, K., Phelps, W., Bubb, V., Howley, P., and Schlegel, R. (1989). The E6 and E7 genes of the human papillomavirus type 16 together are necessary and sufficient for transformation of primary human keratinocytes. *Journal of Virology*, 63(10), 4417-4421. <https://doi.org/10.1128/jvi.63.10.4417-4421.1989>
- Muñoz, N., Bosch, F. X., de Sanjosé, S., Herrero, R., Castellsagué, X., Shah, K. V., Snijders, P. J., Meijer, C. J., and International Agency for Research on Cancer Multicenter Cervical Cancer Study Group. (2003). Epidemiologic classification of human papillomavirus types associated with cervical cancer. *The New England Journal of Medicine*, 348(6), 518-527. <https://doi.org/10.1056/nejmoa021641>
- Ohlenschläger, O., Seiboth, T., Zengerling, H., Briese, L., Marchanka, A., Ramachandran, R., Baum, M., Korbas, M., Meyer-Klaucke, W., Dürst, M., and Görlach, M. (2006). Solution structure of the partially folded high-risk human papilloma virus 45 oncoprotein E7. *Oncogene*, 25(44), 5953-5959. <https://doi.org/10.1038/sj.onc.1209584>

- Pangestuti, R., and Kim, S-K. (2011). Biological activities and health benefit effects of natural pigments derived from marine algae. *Journal of Functional Foods*, 34, 255-266. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2011.07.001>
- Picconi, M. A., Alonío, L. V., Sichero, L., Mbayed, V., Villa, L. L., Gronda, J., Campos, R., and Teyssié, A. (2003). Human papillomavirus type-16 variants in Quechua aboriginals from Argentina. *Journal of Medical Virology*, 69(4), 546-552. <https://doi.org/10.1002/jmv.10343>
- Riley, R. R., Duensing, S., Brake, T., Münger, K., Lambert, P. F., and Arbeit, J. M. (2003). Dissection of human papillomavirus E6 and E7 function in transgenic mouse models of cervical carcinogenesis. *Cancer Research*, 63(16), 4862-4871.
- Roeder, B., Naether, D., Lewald, T., Braune, M., Nowak, C., and Freyer, W. (1990). Photophysical properties and photodynamic activity in vivo of some tetrapyrroles. *Biophysical Chemistry*, 35(2-3), 303-312. [https://doi.org/10.1016/0301-4622\(90\)80017-2](https://doi.org/10.1016/0301-4622(90)80017-2)
- Rossi, M., Bettini, C., and Pagano, C. (2011). Bilateral papilledema following human papillomavirus vaccination. *Journal of Medical Cases*, 2(5), 222-224. <https://doi.org/10.4021/jmc256w>
- Saïde, A., Lauritano, C., and Ianora, A. (2020). Pheophorbide a: State of the Art. *Marine Drugs*, 18(5), 257. <https://doi.org/10.3390/md18050257>
- Schiller, J. T., and Castellsagué, X., and Garland, S. M. (2012). A review of clinical trials of human papillomavirus prophylactic vaccines. *Vaccine*, 30(Suppl 5), F123-138. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2012.04.108>
- Schüttelkopf, A. W., and Van Aalten, D. M. F. (2004). PRODRG: a tool for high-throughput crystallography of protein-ligand complexes. *Acta Crystallographica Section D*, 60(8), 1355-1363. <https://doi.org/10.1107/s0907444904011679>
- Schwede, T., Kopp, J., Guex, N., and Peitsch, M. C. (2003). SWISS-MODEL: An automated protein homology-modeling server. *Nucleic Acids Research*, 31(13), 3381-3385. <https://doi.org/10.1093/nar/gkg520>
- Shelton, J.R., and Vincent, D.N. (1963). Retarded autoxidation and the chain-stopping action of inhibitors. *Journal of the American Chemical Society*, 85(16), 2433-2439. <https://doi.org/10.1021/ja00899a021>
- Silme, R. S. (2024). Screening for a stable region in the T7 phage genome and repurposing Riboflavin as an anti-phage molecule. Zenodo. Retrieved from <https://doi.org/10.5281/zenodo.11608950>
- Slade, B. A., Leidel, L., Vellozzi, C., Woo, E. J., Hua, W., Sutherland, A., Izurieta, H. S., Ball, R., Miller, N., Braun, M. M., Markowitz, L. E., and Iskander, J. (2009). Postlicensure safety surveillance for quadrivalent human papillomavirus recombinant vaccine. *The Journal of the American Medical Association*, 302(7), 750-757. <https://doi.org/10.1001/jama.2009.1201>
- Sutton, I., Lahoria, R., Tan, I., Clouston, P., and Barnett, M. (2009). CNS demyelination and quadrivalent HPV vaccination. *Multiple Sclerosis Journal*, 15, 116-119. <https://doi.org/10.1177/1352458508096868>
- Syrjänen, S., and Puranen, M. (2000). Human papillomavirus infections in children: the potential role of maternal transmission. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine*, 11(2), 259-274. <https://doi.org/10.1177/10454411000110020801>
- Szczygieł, M., Urbńska, K., Jurecka, P., Stawoska, I., Stochel, G., and Fiedor, L. (2008). Central metal determines pharmacokinetics of chlorophyll-derived xenobiotics. *Journal of Medicinal Chemistry*, 51(15), 4412-4418. <https://doi.org/10.1021/jm7016368>
- Tagauov, Y. D., Abu-Elsaoud, A. M., Abdrassulova, Z. T., Tuleukhanov, S. T., Salybekova, N. N., Tulindinova, G., and Al-Abkal, F. (2023). Improvement of blood parameters of male rats exposed to different injection doses of liquid chlorophyll. *Cureus*, 15(3), e36044. <https://doi.org/10.7759/cureus.36044>
- Thomas, J. T., Hubert, W. G., Ruesch, M. N., and Laimins, L. A. (1999). Human papillomavirus type 31 oncoproteins E6 and E7 are required for the maintenance of episomes during the viral life cycle in normal human keratinocytes. *Proceedings of the National Academy of Sciences U. S. A.*, 96(15), 8449-8454. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.15.8449>
- Trott, O., and 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>
- Van Doorslaer, K., Chen, Z., Bernard, H. U., Chan, P. K. S., DeSalle, R., Dillner, J., Forslund, O., Haga, T., McBride, A. A., Villa, L. L., Burk, R. D., and ICTV Report Consortium. (2018). Virus Taxonomy Profile: *Papillomaviridae*. *Journal of General Virology*, 99(8), 989-990. <https://doi.org/10.1099/jgv.0.001105>

- Villa, L. L., Sichero, L., Rahal, P., Caballero, O., Ferenczy, A., Rohan, T., and Franco, E. L. (2000). Molecular variants of human papillomavirus types 16 and 18 preferentially associated with cervical neoplasia. *Journal of General Virology*, 81(12), 2959-2968. <https://doi.org/10.1099/0022-1317-81-12-2959>
- Wang, K-K., Li, J., Kim, B-J., Lee, J-H., Shin, H-W., Ko, S-H., Lee, W-Y., Lee, C-H., Jung, S. H., and Kim, Y-R. (2014). Photophysical properties of Pheophorbide-a derivatives and their photodynamic therapeutic effects on a tumor cell line *in vitro*. *International Journal of Photoenergy*, 2014(1), 793723. <https://doi.org/10.1155/2014/793723>
- Wang, R., Pan, W., Jin, L., Huang, W., Li, Y., Wu, D., Gao, C., Ma, D., and Liao, S. (2020). Human papillomavirus vaccine against cervical cancer: Opportunity and challenge. *Cancer Letters*, 471, 88-102. <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2019.11.039>
- Ward, D., Thorsen, N. M., Frisch, M., Valentiner-Branth, P., Mølbak, K., and Hviid, A. (2019). A cluster analysis of serious adverse event reports after human papillomavirus (HPV) vaccination in Danish girls and young women, September 2009 to August 2017. *Eurosurveillance*, 24(19), 1800380. <https://doi.org/10.2807/1560-7917.ES.2019.24.19.1800380>
- WHO. (1990). Diet, nutrition, and the prevention of chronic diseases. Report of a WHO Study Group. World Health Organization Technical Report Series, 797, pp. 1-204. Retrieved from [https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/39426/WHO_TRS_797_\(part1\).pdf?sequence=1](https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/39426/WHO_TRS_797_(part1).pdf?sequence=1)
- WHO. (2003). Diet, nutrition, and the prevention of chronic diseases. Report of a WHO Study Group. World Health Organization Technical Report Series, 916, pp. 1-160. Retrieved from https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/42665/WHO_TRS_916.pdf?sequence=1
- WHO. (2022). WHO HPV Vaccine Global Market Study. Retrieved from <https://www.who.int/publications/m/item/who-hpv-vaccine-global-market-study-april-2022>
- Wildemann, B., Jarius, S., Hartmann, M., Regula, J. U., and Hametner, C. (2009). Acute disseminated encephalomyelitis following vaccination against human papilloma virus. *Neurology*, 72, 2132-2133. <https://doi.org/10.1212/WNL.0b013e3181aa53bb>
- Xi, L. F., Koutsky, L. A., Galloway, D. A., Kuypers, J., Hughes, J. P., Wheeler, C. M., Holmes, K. K., and Kiviat, N. B. (1997). Genomic variation of human papillomavirus type 16 and risk for high grade cervical intraepithelial neoplasia. *Journal of the National Cancer Institute*, 89(11), 796-802. <https://doi.org/10.1093/jnci/89.11.796>
- Xodo, L. E., Rapozzi, V., Zacchigna, M., Drioli, S., and Zorzet, S. (2012). The chlorophyll catabolite pheophorbide a as a photosensitizer for the photodynamic therapy. *Current Medicinal Chemistry*, 19(6), 799-807. <https://doi.org/10.2174/092986712799034879>
- Xu, C., Zhang, J., Mihai, D. M., and Washington, I. (2014). Light-harvesting chlorophyll pigments enable mammalian mitochondria to capture photonic energy and produce ATP. *Journal of Cell Science*, 127(2), 388-399. <https://doi.org/10.1242/jcs.134262>
- Yamada, T., Manos, M. M., Peto, J., Greer, C. E., Munoz, N., Bosch, F. X., and Wheeler, C. M. (1997). Human papillomavirus type 16 sequence variation in cervical cancers: a worldwide perspective. *Journal of Virology*, 71(3), 2463-2472. <https://doi.org/10.1128/jvi.71.3.2463-2472.1997>
- Yamada, T., Wheeler, C. M., Halpern, A. L., Stewart, A. C., Hildesheim, A., and Jenison, S. A. (1995). Human papillomavirus type 16 variant lineages in United States populations characterized by nucleotide sequence analysis of the E6, L2, and L1 coding segments. *Journal of Virology*, 69, 7743-7753. <https://doi.org/10.1128/jvi.69.12.7743-7753.1995>
- Yang, J., Wang, W., Wang, Z., Wang, Z., Wang, Y., Wang, J., Zhao, W., Li, D., and Liu, H. (2019). Prevalence, genotype distribution and risk factors of cervical HPV infection in Yangqu, China: a population-based survey of 10086 women. *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, 16(7), 1645-1652. <https://doi.org/10.1080/21645515.2019.1689743>
- Yang, J., Yan, R., Roy, A., Xu, D., Poisson, J., and Zhang, Y. (2015). The I-TASSER Suite: Protein structure and function prediction. *Nature Methods*, 12(1), 7-8. <https://doi.org/10.1038/nmeth.3213>
- Yoon, H., Oh, S., Kim, S., Yoon, J., and Ahn, S. (2014). Pheophorbide a-mediated photodynamic therapy induces autophagy and apoptosis via the activation of MAPKs in human skin cancer cells. *Oncology Reports*, 31(1), 137-144. <https://doi.org/10.3892/or.2013.2856>
- Zerfass-Thome, K., Zwerschke, W., Mannhardt, B., Tindle, R., Botz, J. W., and Jansen-Durr, P. (1996). Inactivation of the cdk inhibitor p27KIP1 by the human papillomavirus type 16 E7 oncoprotein. *Oncogene*, 13(11), 2323-2330.

Decision-Making Method That Prioritizes User Ranking by Using Intuitionistic Fuzzy Soft Set

Gözde YAYLALI UMUL^{1*} 

Abstract

Decision-making holds significant importance in real life applications. To manage uncertainties in practical applications, soft sets, fuzzy sets and fuzzy soft sets are commonly used nowadays. Also, the effectiveness of intuitionistic fuzzy soft sets has been highlighted in numerous studies. In daily life, considering users priorities in decisions always affects the decision, for this reason, user priority ranking is important in a decision-making algorithm. This study aims to address decision-making problems by using fuzzy soft set (FSS) and intuitionistic fuzzy soft set (IFSS) frameworks. A key distinction of this work is its consideration of user priority rankings, which are integrated into the decision-making algorithms. This paper introduces two algorithms for decision-making: first one based on fuzzy soft sets and the second one based on intuitionistic fuzzy soft sets. Both approaches enable a user to select an object from a group of multi-attribute objects by considering priority ranking of the user for the attributes, thereby identifying the most suitable choice.

Keywords: Fuzzy set, Fuzzy soft set, Intuitionistic fuzzy soft set, Decision making.

Sezgisel Bulanık Esnek Küme Kullanarak Kullanıcı Sıralamasını Önceliklendiren Karar Verme Yöntemi

Öz

Karar verme, gerçek yaşam uygulamalarında önemli bir yere sahiptir. Pratik uygulamalarda belirsizlikleri yönetmek için günümüzde esnek kümeler, bulanık kümeler ve bulanık esnek kümeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca sezgisel bulanık esnek kümelerin etkinliği çok sayıda çalışmada vurgulanmıştır. Günlük yaşamda, kararlarda kullanıcıların önceliklerini dikkate almak her zaman kararı etkiler, bu nedenle bir karar verme algoritmasında kullanıcı öncelik sıralaması önemli bir yere sahiptir. Bu çalışma, bulanık esnek küme (FSS) ve sezgisel bulanık esnek küme (IFSS) çerçevelerini kullanarak karar verme problemlerini ele almayı amaçlamaktadır. Bu çalışmanın temel farkı, karar verme algoritmalarına entegre edilen kullanıcı öncelik sıralamalarını dikkate almasıdır. Bu makale karar verme için iki algoritma tanıtmaktadır: birincisi bulanık esnek kümelere dayalı ve ikincisi sezgisel bulanık esnek kümelere dayalıdır. Her iki yaklaşım da kullanıcının nitelikler için öncelik sıralamasını dikkate alarak çok nitelikli nesnelerden oluşan bir gruptan bir nesne seçmesini ve böylece en uygun seçeneği belirlemesini sağlar.

Anahtar Kelimeler: Bulanık küme, Bulanık esnek küme, Sezgisel bulanık esnek küme, Karar verme.

¹Muğla Sıtkı Koçman University, Department of Mathematics and Faculty of Science, Muğla, Türkiye, gozdeyaylali@mu.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Introduction

Decision-making plays an essential role in various real-world applications, including medical diagnoses, industrial management and more. Nonetheless, the natural uncertainty and vagueness involved in such cases frequently makes decision making a challenging task. With the aim of resolving these challenges, various mathematical tools have been developed over time, including fuzzy set theory introduced by Zadeh in 1965 (Zadeh, 1965) and later extended to soft set theory by Molodtsov in 1999 (Molodtsov, 1999). These fundamental theories have contributed extensively to the area, presenting approaches to manage uncertain data effectively. Maji et al. (2001) built upon the foundations of fuzzy set and soft set theories by combining them presenting the notion of fuzzy soft set theory, which enhancing decision-making in uncertain situations. Subsequent advancements came with Atanassov's intuitionistic fuzzy sets (Atanassov, 1986), which expanded a new dimension to fuzzy sets by integrating degrees of membership and non-membership, offering a more comprehensive approach to modelling uncertainty. Through the combination of intuitionistic fuzzy set and soft set theories, Yong-jie et al. (2010) established the concept of intuitionistic fuzzy soft set (IFSS).

Recent studies have highlighted the potential of IFSS in various applications. Building upon this Jiang et al. (2011) extended the adjustable approach for decision-making based on fuzzy soft sets and developed an adjustable method for decision making using IFSSs through the level soft sets of IFSSs. Similarly, a decision-making approach utilizing entropy weights based on IFSSs was presented by Yang and Qian (2013). Additionally, Das and Kar (2014) proposed a group decision-making method in medical science, utilizing operations grounded in IFSSs. Also an innovative multi-criteria ranking method grounded in IFSSs is generalized by Zhao et al. (2017). Moreover, a group decision-making (GDM) framework for medical diagnosis was developed in (Hu et al. 2019), utilizing a new similarity measure of IFSSs to assign expert weights. Continuing this progression, Adithya, et al. (2024) proposed the concept of circular IFSS theory, which integrates circular intuitionistic fuzzy sets with soft set theory and applied a decision-making problem. More recently, Saqlain and Saeed (2024) brought forward similarity metrics for multi-polar interval-valued intuitionistic fuzzy soft sets (mPIVIFSS). Additionally, some recent decision-making studies employing IFSSs for medical diagnosis models are illustrated in (Masmali et al., 2024) and (Chen and Liu, 2024). A decision-making algorithm using energy of interval-valued hesitant fuzzy soft sets was introduced in (Stojanovic et al., 2025). Two adaptive machine learning approaches utilizing soft decision-making via intuitionistic fuzzy parametrized intuitionistic fuzzy soft matrices were given in (Memiş et al., 2025). Moreover, the circular intuitionistic fuzzy EDAS approach was introduced to manage decision-making challenges within automotive industry in (Imran and Ullah, 2025).

Certainly, the studies conducted using soft set and fuzzy soft set theories are not limited to those mentioned above. For instance, an adjustable approach for fuzzy soft set-based decision-making was proposed and the application of weighted fuzzy soft sets was explored in (Feng et al., 2010). Furthermore the studies in (Polat et al., 2019), (Yaylalı Umul et al., 2021) and (Yaylalı Umul, 2025) developed decision making methods using graphs and intervals on soft sets respectively. Additionally, (α, β) -cuts and its properties in bipolar fuzzy soft set was introduced in (Dalkılıç, 2021). A decision-making algorithm based on bipolar soft rough classes was introduced in (Dalkılıç and Demirtaş, 2022). The topological structure of virtual fuzzy parametrized fuzzy soft sets were examined in (Dalkılıç, 2022). Also some hybrid set types were introduced, which were consisting of combination of fuzzy sets and soft sets and a decision making algorithm was given in (Dalkılıç and Demirtaş, 2023). More recently, Demirtaş et al. (Demirtaş et al., 2024) have introduced various algorithms based on the soft set theory to address decision-making problems involving different types of uncertainties. Dalkılıç and Cangul (2024) were examined decision-making processes that require determining the interactions between objects in two distinct universe set and they presented two decision-making algorithms based on binary soft set. Moreover, a decision-making algorithm based on bipolar fuzzy soft set, with the application on medical diagnosis, was given in (Demirtaş and Dalkılıç, 2024).

In the line with the above mentioned, in this study, two different decision making methods are presented using the concepts of fuzzy soft set and intuitionistic fuzzy soft set. What makes both of these methods different from the previous methods is that, they present the most suitable decision object to the user by considering the ranking of user. In daily life, considering our priorities in our decisions always affects our decisions, for this reason, user priority ranking is important in a decision making algorithm. Thus, by presenting these decision-making algorithms, it is aimed to fill this gap in the literature.

Since the first algorithm is written using only fuzzy soft set, second one is designed similarly to the first algorithm and written using intuitionistic fuzzy soft set. In this study, the features of multi-attribute objects are evaluated as parameter sets of fuzzy and intuitionistic fuzzy soft sets, and the priority ranking of user in object attributes is taken into consideration.

In the second section, the foundational definitions underlying the study are provided and in the third section, some new definitions for the algorithms are introduced, the algorithms are explained and examples are included. Also comparisons with several decision-making cases from the literature are included.

2. Materials and Methods

In this section the foundational definitions underlying the study are provided.

Definition 2.1: (Molodtsov, 1999) Let Y be an initial universe, Ψ be a set of parameters and $X \subseteq \Psi$. A pair (Γ, X) is called a soft set over Y where $\Gamma: X \rightarrow P(Y)$ is a set-valued function and $P(Y)$ is a set of all subsets of Y .

A soft set (Γ, X) is shown as $(\Gamma, X) = \{(\psi, \Gamma(\psi)) : \psi \in X\}$ in some studies and sometimes $(\psi, \Gamma(\psi))$ is written as $\Gamma(\psi)$ just for making a shorter notation.

Definition 2.2: (Zadeh, 1965) A fuzzy set A in Y is defined by a characteristic function $\mu_A: Y \rightarrow [0,1]$ such that

$$A = \{(\gamma, \mu_A(\gamma)) : \gamma \in Y, \mu_A(\gamma) \in [0,1]\}$$

Definition 2.3: (Maji et al., 2004) Let $\wp(Y)$ denotes the set of all fuzzy sets in Y and let Ψ be a parameter set. A pair (Γ, Ψ) is called a fuzzy soft set over Y if $\Gamma: \Psi \rightarrow \wp(Y)$ such that

$$(\Gamma, \Psi) = \{(\psi, \Gamma(\psi)) : \psi \in \Psi, \Gamma(\psi) \in \wp(Y)\}.$$

Definition 2.4: (Atanassov, 1986) An intuitionistic fuzzy set A on universe Y is defined as $A = \{(\gamma, \mu_A(\gamma), \nu_A(\gamma)) : \gamma \in Y, \mu_A(\gamma), \nu_A(\gamma) \in [0,1]\}$ where $\mu_A: Y \rightarrow [0,1]$ and $\nu_A: Y \rightarrow [0,1]$ with $0 \leq \mu_A(\gamma) + \nu_A(\gamma) \leq 1$ for all $\gamma \in Y$. The values $\mu_A(\gamma)$ and $\nu_A(\gamma)$ represents the degree of membership and non-membership values of γ to A respectively.

Definition 2.5: (Xui, 2010) Let Y be an initial universe Ψ be a set of parameters and $\text{IFS}(Y)$ denoted the intuitionistic fuzzy power set of Y and $X \subseteq \Psi$. A pair (Γ, Ψ) is called intuitionistic fuzzy soft set where $\Gamma: X \rightarrow \text{IFS}(Y)$.

An intuitionistic fuzzy soft set is a parameterized family of intuitionistic fuzzy subsets of Y . For all $\psi \in X$, $\Gamma(\psi)$ is an intuitionistic fuzzy set on Y such that,

$$\{(\psi, \Gamma(\psi)) : \Gamma(\psi) = \{(\gamma, \mu_A(\gamma), \nu_A(\gamma)) : \gamma \in Y, \mu_A(\gamma), \nu_A(\gamma) \in [0,1]\}\}$$

In this study, we have multi-attribute decision objects and features of these objects are evaluated as a parameter set of FSS and IFSS.

3. Findings and Discussion

In this section, two algorithms for decision making are given, first one is based on fuzzy soft set and second is based on intuitionistic fuzzy soft set. In the both methods one user decides to choose an object where there are multiple objects with multi-attributes and user has a priority ranking in the attributes of the objects. Both methods determine the most suitable decision object among multi-attribute items by taking user priority rankings into account.

Following definitions are going to be used in the both algorithms.

Definition 3.1: Let we have a relation on a parameter set Ψ . Priority ranking value of a parameter $\psi \in \Psi$ is defined by the number of how many times a parameter precedes another parameter in a relation and denoted by p_ψ .

Definition 3.2: Let we have a relation on a parameter set Ψ . Non-prioritization value of a parameter $\psi \in \Psi$ is defined by the number of how many times a parameter comes after other parameters in a relation and denoted by np_ψ .

Definition 3.3: Let $(\Gamma, \Psi) = \{(\psi, \Gamma(\psi)) : \psi \in \Psi, \Gamma(\psi) \in \wp(Y)\}$ be a fuzzy soft set and p_ψ be a priority ranking value of a parameter ψ . Priority ranking degree of an element $\gamma \in Y$ with respect to the parameter $\psi \in \Psi$ is defined as $P_\psi(\gamma) = p_\psi \cdot \mu_A(\gamma)$, where $\mu_A(\gamma)$ is the membership degree of γ .

Definition 3.4: Let $(\Gamma, \Psi) = \{(\psi, \Gamma(\psi)) : \psi \in \Psi, \Gamma(\psi) \in \wp(Y)\}$ be a fuzzy soft set and np_ψ be a non-prioritization value of a parameter ψ . Non-prioritization degree of an element $\gamma \in Y$ with respect to the parameter $\psi \in \Psi$ is defined as $NP_\psi(\gamma) = np_\psi \cdot \mu_A(\gamma)$, where $\mu_A(\gamma)$ is the membership degree of γ .

Definition 3.5: Let $(\Gamma, \Psi) = \{(\psi, \Gamma(\psi)) : \psi \in \Psi, \Gamma(\psi) \in \wp(Y)\}$ be a fuzzy soft set; p_ψ and np_ψ be a priority ranking and non-prioritization values of a parameter ψ ; $P_\psi(\gamma)$ and $NP_\psi(\gamma)$ be a priority ranking degree and a non-prioritization degree of an element $\gamma \in Y$ with respect to the parameter $\psi \in \Psi$. Score function for a FSS is a function from Y to $\mathbb{R}^2$, defined as, for each element $\gamma \in Y$, $S(\gamma) = (S_1(\gamma), S_2(\gamma))$ where,

$$S_1(\gamma) = \sum_{\psi \in \Psi} p_\psi \cdot \mu_A(\gamma) = \sum_{\psi \in \Psi} P_\psi(\gamma) \text{ and}$$

$$S_2(\gamma) = \sum_{\psi \in \Psi} np_\psi \cdot \mu_A(\gamma) = \sum_{\psi \in \Psi} NP_\psi(\gamma), \text{ i.e.,}$$

$$S: Y \rightarrow \mathbb{R}^2,$$

$$S(\gamma) = (S_1(\gamma), S_2(\gamma)) = (\sum_{\psi \in \Psi} P_\psi(\gamma), \sum_{\psi \in \Psi} NP_\psi(\gamma)).$$

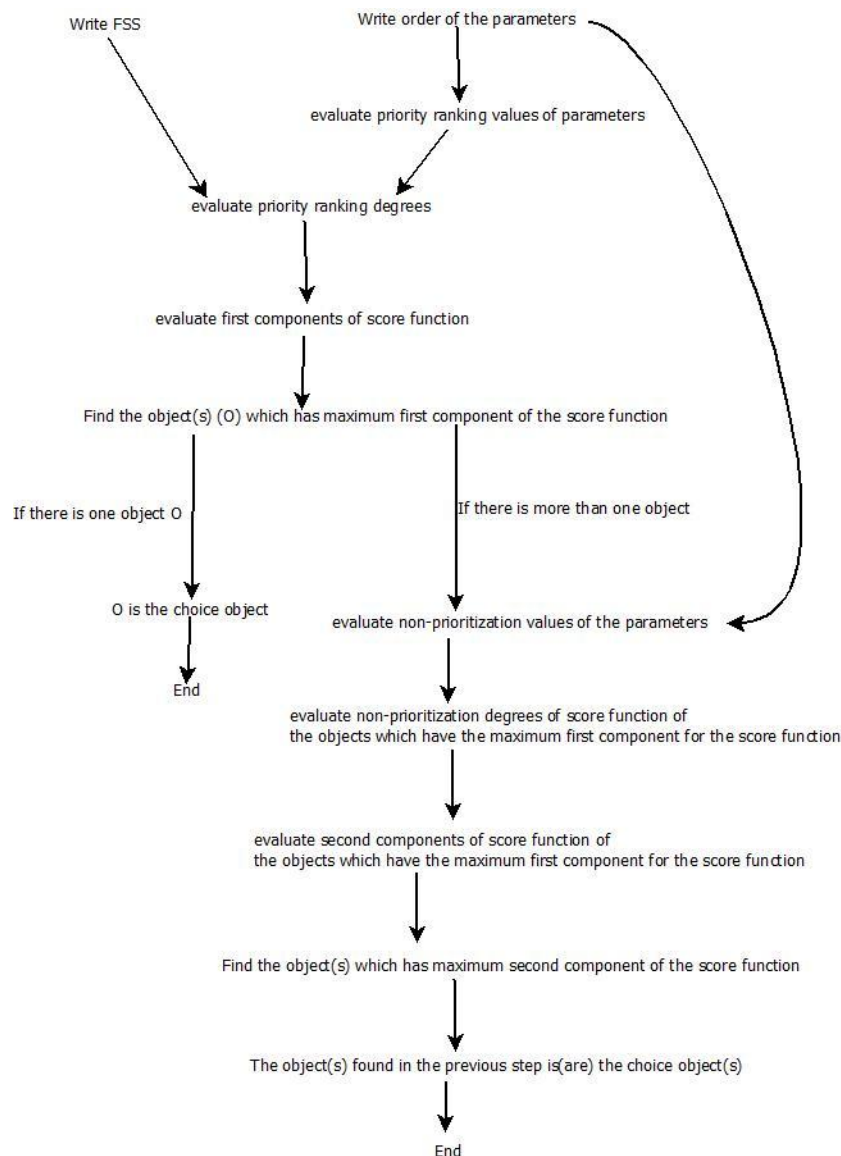
3.1. Decision Making Method based on fuzzy soft set

In this method, in a fuzzy soft set, the membership degrees of desired objects are determined based on how effectively the objects meet the required properties and the properties of the objects is the set of parameter of FSS. In the first method, the decision is derived based on the membership degrees of FSS and the ordered of properties of the objects.

The following is the steps of the algorithm based on fuzzy soft set which considers user priority rankings in the selection of multi-attribute objects.

Algorithm based on fuzzy soft set**Step 1.** Write fuzzy soft set (Γ, Ψ) .**Step 2.** Give the order of the parameters.**Step 3.** Find priority ranking value p_ψ for all parameters $\psi \in \Psi$.**Step 4.** Find non-prioritization values np_ψ for all $\psi \in \Psi$.**Step 5.** Find priority ranking degree of elements of the universal set with respect to the parameters.**Step 6.** Find non-prioritization degree of elements of the universal set with respect to the parameters.**Step 7.** Evaluate score function $S(\gamma) = (S_1(\gamma), S_2(\gamma))$ for all $\gamma \in Y$.**Step 8.** Choice object is the object is γ_c where $S_1(\gamma_c) = \max\{S_1(\gamma): \gamma \in Y\}$. If there is more than one γ_c then choice object is γ_{co} where

$$S_2(\gamma_{co}) = \max\{S_2(\gamma_c): \gamma_c \in \{\gamma_c: S_1(\gamma_c) = \max\{S_1(\gamma): \gamma \in Y\}\}.$$

**Figure 1.** Flowchart of the Algorithm 1 of the decision-making method based on FSS.

Pseudo-code for steps of Algorithm 1 is as follow:

Step 1. Write fuzzy soft set $(\Gamma, \Psi) = \{(\psi, \Gamma(\psi)) : \psi \in \Psi, \Gamma(\psi) \in \wp(Y)\}$.

Input the parameter set : $\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n\}$.

Input the universal set: $Y = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m\}$.

Step 2. Write the order of the parameters.

Step 3.

For (i=1, i<=n, i++)

$$p_{\psi_i} = 0$$

For (j=1, j<=n, j++)

$$(\text{If } \psi_i \geq \psi_j, \text{ then } p_{\psi_i} = p_{\psi_i} + 1)$$

Step 4.

For (i=1, i<=n, i++)

$$np_{\psi_i} = 0$$

For (j=1, j<=n, j++)

$$(\text{If } \psi_i \leq \psi_j, \text{ then } np_{\psi_i} = np_{\psi_i} + 1)$$

Step 5.

For (j=1, j<=m, j++)

For (i=1, i<=n, i++)

$$P_{\psi_i}(\gamma_j) = p_{\psi_i} \cdot \mu_A(\gamma_j)$$

Step 6.

For (j=1, j<=m, j++)

For (i=1, i<=n, i++)

$$NP_{\psi_i}(\gamma_j) = np_{\psi_i} \cdot \mu_A(\gamma_j)$$

Step 7.

For (j=1, j<=m, j++)

$$S_1(\gamma_j) = \sum_{\psi \in \Psi} P_{\psi}(\gamma_j) \text{ and } S_2(\gamma_j) = \sum_{\psi \in \Psi} NP_{\psi}(\gamma_j).$$

Step 8.

$$S_1(\gamma_c) = S_1(\gamma_1)$$

For (j=1, j<=m, j++)

$$\text{If } S_1(\gamma_c) \leq S_1(\gamma_j), \text{ then } S_1(\gamma_c) = S_1(\gamma_j).$$

For (j=1, j<=m, j++)

$$(\text{count}=0$$

$$\text{Maxset}=\emptyset$$

$$\text{If } S_1(\gamma_j) = S_1(\gamma_c), \text{ count=count+1, add } \gamma_j. \text{ to Maxset.})$$

If $\text{count}=1$, then choice object is γ_c .

If $\text{count}>1$, $S_2(\gamma_{co})$ =first element of Maxset

$(\text{count}_1=0$

$\text{Maxset}_2 = \emptyset$

For ($k=1$, $k \leq \text{count}$, $k++$)

If $S_2(\gamma_{co}) \leq S_2(\gamma_k)$, then $S_2(\gamma_{co}) = S_2(\gamma_k)$.

$\text{count}_1 = \text{count}_1 + 1$

add γ_k to Maxset_2)

If $\text{count}_1=1$, then choice object is γ_{co} .

If $\text{count}_1>1$, choice objects are element of Maxset_2 .

Example 3.6: Let $\Psi = \{\psi_1: \text{CPU}, \psi_2: \text{Memory}, \psi_3: \text{Harddisk}, \psi_4: \text{GPU}\}$ be a parameter set and $Y = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4\}$ be an initial universe of computers that taken into consideration. The features of computers given in the following Table 1.

Table 1. Attributes of computer that taken into the consideration.

	ψ_1 :CPU (Central Processing Unit)	ψ_2 : Memory	ψ_3 : Harddisk	ψ_4 : GPU (graphics processing unit)
γ_1	i5 1235U	32 GB	128 GB SSD	RTX 4050
γ_2	i3 1215U	16 GB	256 GB SSD	RTX 4090
γ_3	i7 13650HX	4 GB	1 TB SSD	RTX 3060
γ_4	i9 14900HX	8 GB	512 GB SSD	RTX 2050

Then according to the Table 1, fuzzy soft set (Γ, Ψ) can be defined as follows

$$\Gamma(\psi_1) = \left\{ \frac{\gamma_1}{0,2}, \frac{\gamma_2}{0,1}, \frac{\gamma_3}{0,5}, \frac{\gamma_4}{0,7} \right\},$$

$$\Gamma(\psi_2) = \left\{ \frac{\gamma_1}{0,9}, \frac{\gamma_2}{0,5}, \frac{\gamma_3}{0,1}, \frac{\gamma_4}{0,3} \right\},$$

$$\Gamma(\psi_3) = \left\{ \frac{\gamma_1}{0,1}, \frac{\gamma_2}{0,2}, \frac{\gamma_3}{0,6}, \frac{\gamma_4}{0,4} \right\},$$

$$\Gamma(\psi_4) = \left\{ \frac{\gamma_1}{0,4}, \frac{\gamma_2}{0,8}, \frac{\gamma_3}{0,2}, \frac{\gamma_4}{0,1} \right\}.$$

Let for the user the most important thing in the computer is its Harddisk, additionally, memory and GPU have the same importance for this user but they are important than CPU. After this priority ranking of the user the relation on Ψ is $\{(\psi_1, \psi_1), (\psi_2, \psi_2), (\psi_3, \psi_3), (\psi_4, \psi_4), (\psi_2, \psi_1), (\psi_3, \psi_1), (\psi_4, \psi_1), (\psi_3, \psi_2), (\psi_4, \psi_2), (\psi_2, \psi_4), (\psi_3, \psi_4)\}$.

Priority ranking values of parameters $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ are $p_{\psi_1} = 1, p_{\psi_2} = 3, p_{\psi_3} = 4, p_{\psi_4} = 3$.

Non-prioritization values of parameters $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ are $np_{\psi_1} = 4, np_{\psi_2} = 3, np_{\psi_3} = 1,$

$np_{\psi_4} = 3$.

Priority ranking degrees of elements Y with respect to the parameter ψ_1 are

$$P_{\psi_1}(\gamma_1) = 1.0, 2 = 0,2, P_{\psi_1}(\gamma_2) = 1.0, 1 = 0,1, P_{\psi_1}(\gamma_3) = 1.0, 5 = 0,5 \text{ and } P_{\psi_1}(\gamma_4) = 1.0, 7 = 0,7.$$

Priority ranking degrees of elements Y with respect to the parameter ψ_2 are

$$P_{\psi_2}(\gamma_1) = 3.0, 9 = 1,8, P_{\psi_2}(\gamma_2) = 3.0, 5 = 1,5, P_{\psi_2}(\gamma_3) = 3.0, 1 = 0,3 \text{ and } P_{\psi_2}(\gamma_4) = 3.0, 3 = 0,9.$$

Priority ranking degrees of elements Y with respect to the parameter ψ_3 are

$$P_{\psi_3}(\gamma_1) = 4.0, 1 = 0,4, P_{\psi_3}(\gamma_2) = 4.0, 2 = 0,8, P_{\psi_3}(\gamma_3) = 4.0, 6 = 2,4 \text{ and } P_{\psi_3}(\gamma_4) = 4.0, 4 = 1,6.$$

Priority ranking degrees of elements Y with respect to the parameter ψ_4 are

$$P_{\psi_4}(\gamma_1) = 3.0, 4 = 1,2, P_{\psi_4}(\gamma_2) = 3.0, 8 = 2,4, P_{\psi_4}(\gamma_3) = 3.0, 2 = 0,6 \text{ and } P_{\psi_4}(\gamma_4) = 3.0, 1 = 0,3.$$

Non-prioritization degree of elements Y with respect to the parameter ψ_1 are

$$NP_{\psi_1}(\gamma_1) = 4.0, 2 = 0,8, NP_{\psi_1}(\gamma_2) = 4.0, 1 = 0,4, NP_{\psi_1}(\gamma_3) = 4.0, 5 = 2, \\ NP_{\psi_1}(\gamma_4) = 4.0, 7 = 2,8.$$

Non-prioritization degree of elements Y with respect to the parameter ψ_2 are

$$NP_{\psi_2}(\gamma_1) = 3.0, 9 = 1,8, NP_{\psi_2}(\gamma_2) = 3.0, 5 = 1,5, NP_{\psi_2}(\gamma_3) = 3.0, 1 = 0,3, \\ NP_{\psi_2}(\gamma_4) = 3.0, 3 = 0,9.$$

Non-prioritization degree of elements Y with respect to the parameter ψ_3 are

$$NP_{\psi_3}(\gamma_1) = 1.0, 1 = 0,1, NP_{\psi_3}(\gamma_2) = 1.0, 2 = 0,2, NP_{\psi_3}(\gamma_3) = 1.0, 6 = 0,6, \\ NP_{\psi_3}(\gamma_4) = 1.0, 4 = 0,4.$$

Non-prioritization degree of elements Y with respect to the parameter ψ_4 are

$$NP_{\psi_4}(\gamma_1) = 3.0, 4 = 1,2, NP_{\psi_4}(\gamma_2) = 3.0, 8 = 2,4, NP_{\psi_4}(\gamma_3) = 3.0, 2 = 0,6, \\ NP_{\psi_4}(\gamma_4) = 3.0, 1 = 0,3.$$

Now let us evaluate the score function $S(\gamma_i) = (S_1(\gamma_i), S_2(\gamma_i))$ for $i = 1, 2, 3, 4$ where

$$S_1(\gamma_1) = 0,2 + 1,8 + 0,4 + 1,2 = 3,6$$

$$S_2(\gamma_1) = 0,8 + 1,8 + 0,1 + 1,2 = 3,9$$

$$S_1(\gamma_2) = 0,1 + 1,5 + 0,8 + 2,4 = 4,8$$

$$S_2(\gamma_2) = 0,4 + 1,5 + 0,2 + 2,4 = 3,5$$

$$S_1(\gamma_3) = 0,5 + 0,1 + 2,4 + 0,6 = 3,6$$

$$S_2(\gamma_3) = 2 + 0,1 + 0,6 + 0,6 = 3,3$$

$$S_1(\gamma_4) = 0,7 + 0,9 + 1,6 + 0,3 = 3,5$$

$$S_2(\gamma_4) = 2,8 + 0,9 + 0,4 + 0,3 = 4,4$$

According to the score function, γ_2 is the choice object. Therefore, for this users' priority rankings' the most suitable choice object is the computer γ_2 .

3.2. Decision Making Method based on intuitionistic fuzzy soft set

In this method, in intuitionistic fuzzy soft set, since the membership degrees of desired objects are determined based on how effectively the objects meet the required properties, the non-membership degrees of desired objects are determined based on how effectively the objects do not meet the required properties and the properties of the objects is the set of parameter of IFSS. In the second method, the decision is derived based on the membership and non-membership degrees of IFSS and the order of properties of the objects.

Following definitions are going to be used in the second algorithm.

Definition 3.7: Let $(\Gamma, \Psi) = \{(\psi, \Gamma(\psi)) : \psi \in \Psi, \Gamma(\psi) \in \text{IFS}(Y)\}$ be an intuitionistic fuzzy soft set and p_ψ be a priority ranking value of a parameter ψ . Nonmember priority ranking degree of an element $\gamma \in Y$ of the universal set with respect to the parameter ψ is $\tilde{P}_\psi(\gamma) = p_\psi \cdot v_A(\gamma)$, where $v_A(\gamma)$ is the non-membership degree of γ .

Definition 3.8: Let $(\Gamma, \Psi) = \{(\psi, \Gamma(\psi)) : \psi \in \Psi, \Gamma(\psi) \in \text{IFS}(Y)\}$ be an intuitionistic fuzzy soft set and np_ψ be a non-prioritization value of a parameter ψ . Nonmember non-prioritization degree of an element $\gamma \in Y$ of the universal set with respect to the parameter ψ is $\widetilde{NP}_\psi(\gamma) = np_\psi \cdot v_A(\gamma)$, where $v_A(\gamma)$ is the non-membership degree of γ .

Definition 3.9: Let $(\Gamma, \Psi) = \{(\psi, \Gamma(\psi)) : \psi \in \Psi, \Gamma(\psi) \in \text{IFS}(Y)\}$ be an intuitionistic fuzzy soft set; p_ψ and np_ψ be a priority ranking and a non-prioritization value of a parameter ψ ; $\tilde{P}_\psi(\gamma)$ and $\widetilde{NP}_\psi(\gamma)$ be a nonmember priority ranking degree and a nonmember non-prioritization degree of an element $\gamma \in Y$ of the universal set with respect to the parameter ψ . Score function for an IFSS is a function from Y to $\mathbb{R}^2$, defined as, for each element $\gamma \in Y$, $S(\gamma) = (S_{1_0}(\gamma), S_{2_0}(\gamma))$ where

$$S_{1_0}(\gamma) = S_1(\gamma) - \tilde{S}_1(\gamma),$$

$$S_1(\gamma) = \sum_{\psi \in \Psi} p_\psi \cdot \mu_A(\gamma) = \sum_{\psi \in \Psi} P_\psi(\gamma),$$

$$\tilde{S}_1(\gamma) = \sum_{\psi \in \Psi} p_\psi \cdot v_A(\gamma) = \sum_{\psi \in \Psi} \tilde{P}_\psi(\gamma)$$

and

$$S_{2_0}(\gamma) = S_2(\gamma) - \tilde{S}_2(\gamma),$$

$$S_2(\gamma) = \sum_{\psi \in \Psi} np_\psi \cdot \mu_A(\gamma) = \sum_{\psi \in \Psi} NP_\psi(\gamma),$$

$$\tilde{S}_2(\gamma) = \sum_{\psi \in \Psi} np_\psi \cdot v_A(\gamma) = \sum_{\psi \in \Psi} \widetilde{NP}_\psi(\gamma).$$

i.e.,

$$S: Y \rightarrow \mathbb{R}^2$$

$$S(\gamma) = (S_{1_0}(\gamma), S_{2_0}(\gamma)) = (\sum_{\psi \in \Psi} P_\psi(\gamma) - \sum_{\psi \in \Psi} \tilde{P}_\psi(\gamma), \sum_{\psi \in \Psi} NP_\psi(\gamma) - \sum_{\psi \in \Psi} \widetilde{NP}_\psi(\gamma)).$$

The following is the steps of the algorithm based on intuitionistic fuzzy soft set which considers user priority rankings in the selection of multi-attribute objects.

Algorithm based on intuitionistic fuzzy soft set

Step 1. Write intuitionistic fuzzy soft set (Γ, Ψ) .

Step 2. Give the order of the parameters.

Step 3. Find priority ranking value of parameters p_ψ for all $\psi \in \Psi$.

Step 4. Find non-prioritization values of parameters np_ψ for all $\psi \in \Psi$.

Step 5. Find priority ranking degree of elements of the universal set with respect to the parameters.

Step 6. Evaluate nonmember priority ranking degree of elements of the universal set with respect to the parameters.

Step 7. Find non-prioritization degree of elements of the universal set with respect to the parameters.

Step 8. Evaluate nonmember non-prioritization degree of elements of the universal set with respect to the parameters.

Step 9. Evaluate score function $S(\gamma) = (S_{1_0}(\gamma), S_{2_0}(\gamma))$ for all $\gamma \in Y$.

Step 10. Choice object is the object γ_c , where $S_{1_0}(\gamma_c) = \max\{S_{1_0}(\gamma): \gamma \in Y\}$. If there is more than one γ_c , then choice object is γ_{co} , where

$$S_{2_0}(\gamma_{co}) = \max\{S_{2_0}(\gamma): \gamma_c \in \{\gamma_c: S_{1_0}(\gamma_c) = \max\{S_{1_0}(\gamma): \gamma \in Y\}\}.$$

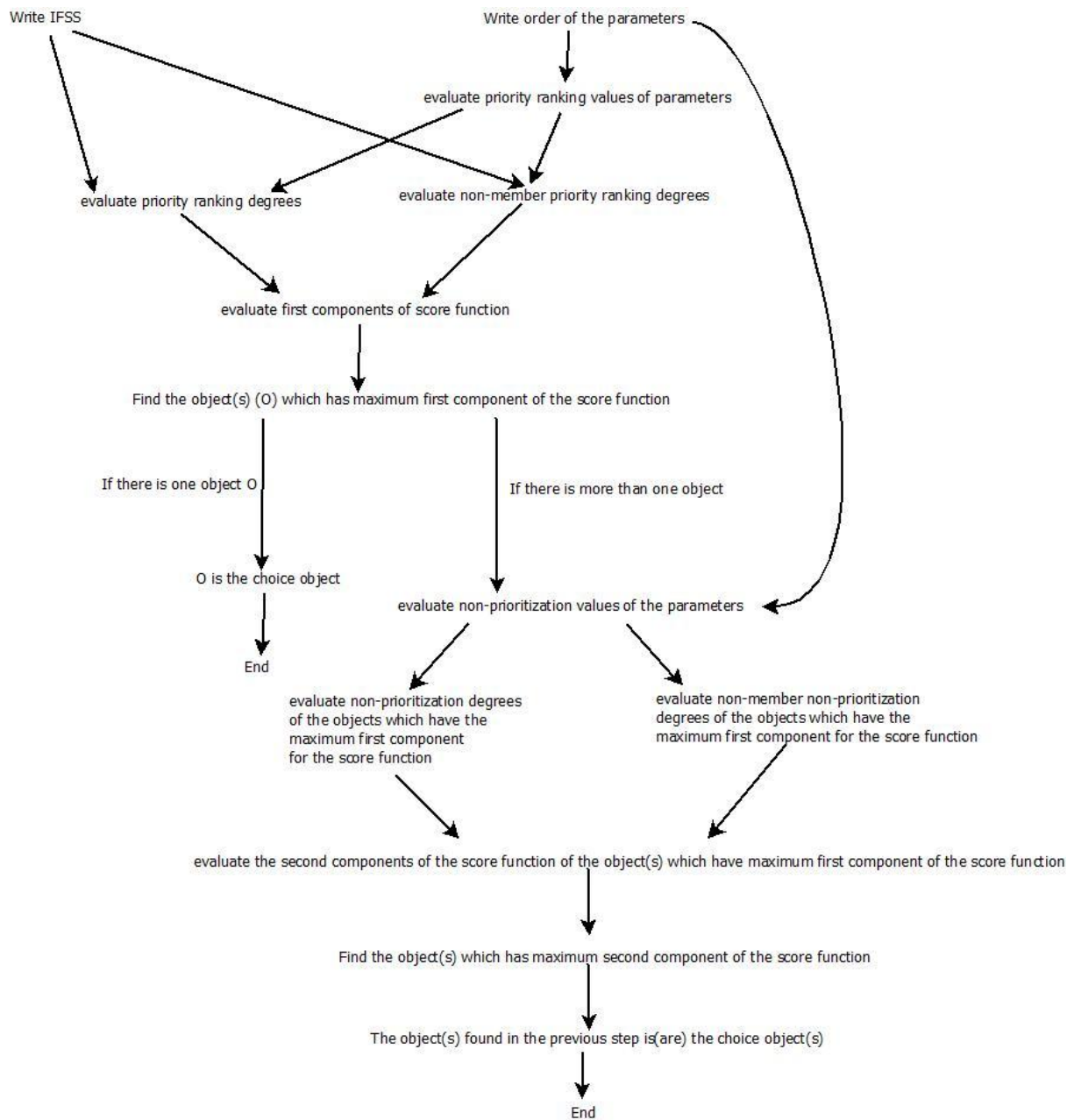


Figure 2. Flowchart of the Algorithm 2 of the decision-making method based on IFSS.

Pseudo-code of steps of Algorithm 2 is as follow:

Step 1. Write intuitionistic fuzzy soft set $(\Gamma, \Psi) = \{(\psi, \Gamma(\psi)) : \psi \in \Psi, \Gamma(\psi) \in \text{IFS}(Y)\}$.

Input the parameter set: $\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n\}$.

Input the universal set: $Y = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m\}$.

Step 2. Write the order of the parameters.

Step 3.

For $(i=1, i \leq n, i++)$

$$p_{\psi_i} = 0$$

(For $(j=1, j \leq n, j++)$)

(If $\psi_i \geq \psi_j$, then $p_{\psi_i} = p_{\psi_i} + 1$))

Step 4.

For (i=1, i<=n, i++)

$$np_{\psi_i} = 0$$

(For (j=1, j<=n, j++))

(If $\psi_i \leq \psi_j$, then $np_{\psi_i} = np_{\psi_i} + 1$))

Step 5.

For (j=1, j<=m, j++)

For (i=1, i<=n, i++)

$$P_{\psi_i}(\gamma_j) = p_{\psi_i} \cdot \mu_A(\gamma_j)$$

Step 6.

For (j=1, j<=m, j++)

For (i=1, i<=n, i++)

$$\tilde{P}_{\psi_i}(\gamma_j) = p_{\psi_i} \cdot v_A(\gamma_j)$$

Step 7.

For (j=1, j<=m, j++)

For (i=1, i<=n, i++)

$$NP_{\psi_i}(\gamma_j) = np_{\psi_i} \cdot \mu_A(\gamma_j)$$

Step 8.

For (j=1, j<=m, j++)

For (i=1, i<=n, i++)

$$\widetilde{NP}_{\psi_i}(\gamma_j) = np_{\psi_i} \cdot v_A(\gamma_j)$$

Step 9.

For (j=1, j<=m, j++)

$$S_1(\gamma_j) = \sum_{\psi \in \Psi} P_{\psi}(\gamma_j) \text{ and } \tilde{S}_1(\gamma_j) = \sum_{\psi \in \Psi} \tilde{P}_{\psi}(\gamma_j)$$

$$S_{1_0}(\gamma_j) = S_1(\gamma_j) - \tilde{S}_1(\gamma_j),$$

$$S_2(\gamma_j) = \sum_{\psi \in \Psi} NP_{\psi}(\gamma_j) \text{ and } \tilde{S}_2(\gamma_j) = \sum_{\psi \in \Psi} \widetilde{NP}_{\psi}(\gamma_j).$$

$$S_{2_0}(\gamma_j) = S_2(\gamma_j) - \tilde{S}_2(\gamma_j)$$

Step 10.

$$(S_{1_0}(\gamma_c) = S_{1_0}(\gamma_1)$$

For (j=1, j<=m, j++))

If $S_{1_0}(\gamma_c) \leq S_{1_0}(\gamma_j)$, then $S_{1_0}(\gamma_c) = S_{1_0}(\gamma_j)$.)

For (j=1, j<=m, j++))

(count=0

Maxset= $\emptyset$

If $S_{1_0}(\gamma_j) = S_{1_0}(\gamma_c)$, count=count+1, add γ_j to Maxset.)

If count=1, then choice object is γ_c .

If count>1,

$(S_{2_0}(\gamma_{co}) = \text{first element of Maxset}$

$count_1=0$

$Maxset_2 = \emptyset$

For (k=1, k<=count, k++)

(If $S_{2_0}(\gamma_{co}) \leq S_{2_0}(\gamma_k)$, then $S_{2_0}(\gamma_{co}) = S_{2_0}(\gamma_k)$.

$count_1=count_1 + 1$

add γ_k to $Maxset_2$)

If $count_1=1$, then choice object is γ_{co} .

If $count_1>1$, choice objects are element of $Maxset_2$.)

Example 3.10: Let us consider the same initial universe and the same parameter set in the Example 3.6, where user has the same priority ranking but now let us use intuitionistic fuzzy soft set to make decision. According to the Table 1, IFSS (Γ, Ψ) can be defined as follows.

$$\Gamma(\psi_1) = \left\{ \frac{\gamma_1}{0.2,0.6}, \frac{\gamma_2}{0.1,0.9}, \frac{\gamma_3}{0.5,0.3}, \frac{\gamma_4}{0.7,0.1} \right\},$$

$$\Gamma(\psi_2) = \left\{ \frac{\gamma_1}{0.9,0.1}, \frac{\gamma_2}{0.5,0.2}, \frac{\gamma_3}{0.1,0.5}, \frac{\gamma_4}{0.3,0.3} \right\},$$

$$\Gamma(\psi_3) = \left\{ \frac{\gamma_1}{0.1,0.9}, \frac{\gamma_2}{0.2,0.8}, \frac{\gamma_3}{0.6,0.2}, \frac{\gamma_4}{0.4,0.3} \right\},$$

$$\Gamma(\psi_4) = \left\{ \frac{\gamma_1}{0.4,0.3}, \frac{\gamma_2}{0.8,0.2}, \frac{\gamma_3}{0.2,0.4}, \frac{\gamma_4}{0.1,0.5} \right\}.$$

Priority ranking degrees and non-prioritization degrees of elements Y are same since the memberships values are same. So, let us evaluate non-member priority ranking degrees and nonmember non-prioritization degree of an elements Y with respect to the parameters.

Nonmember priority ranking degrees of elements Y with respect to the parameter ψ_1 are $\tilde{P}_{\psi_1}(\gamma_1) = 1.0,6 = 0.6$, $\tilde{P}_{\psi_1}(\gamma_2) = 1.0,9 = 0.9$, $\tilde{P}_{\psi_1}(\gamma_3) = 1.0,3 = 0.3$ and $\tilde{P}_{\psi_1}(\gamma_4) = 1.0,1 = 0.1$.

Nonmember priority ranking degrees of elements Y with respect to the parameter ψ_2 are $\tilde{P}_{\psi_2}(\gamma_1) = 3.0,1 = 0.3$, $\tilde{P}_{\psi_2}(\gamma_2) = 3.0,2 = 0.6$, $\tilde{P}_{\psi_2}(\gamma_3) = 3.0,5 = 1.5$ and $\tilde{P}_{\psi_2}(\gamma_4) = 3.0,3 = 0.9$.

Nonmember priority ranking degrees of elements Y with respect to the parameter ψ_3 are $\tilde{P}_{\psi_3}(\gamma_1) = 4.0,9 = 3.6$, $\tilde{P}_{\psi_3}(\gamma_2) = 4.0,8 = 3.2$, $\tilde{P}_{\psi_3}(\gamma_3) = 4.0,2 = 0.8$ and $\tilde{P}_{\psi_3}(\gamma_4) = 4.0,3 = 1.2$.

Nonmember priority ranking degrees of elements γ with respect to the parameter ψ_4 are

$$\tilde{P}_{\psi_4}(\gamma_1) = 3.0, 3 = 0, 9, \tilde{P}_{\psi_4}(\gamma_2) = 3.0, 2 = 0, 6, \tilde{P}_{\psi_4}(\gamma_3) = 3.0, 4 = 1, 2 \text{ and} \\ \tilde{P}_{\psi_4}(\gamma_4) = 3.0, 5 = 2, 5.$$

Nonmember non-prioritization degree of elements γ with respect to the parameter ψ_1 are

$$\tilde{NP}_{\psi_1}(\gamma_1) = 4.0, 6 = 2, 4, \tilde{NP}_{\psi_1}(\gamma_2) = 4.0, 9 = 3, 6, \tilde{NP}_{\psi_1}(\gamma_3) = 4.0, 3 = 1, 2 \text{ and} \\ \tilde{NP}_{\psi_1}(\gamma_4) = 4.0, 1 = 0, 4.$$

Nonmember non-prioritization degree of elements γ with respect to the parameter ψ_2 are

$$\tilde{NP}_{\psi_2}(\gamma_1) = 3.0, 1 = 0, 3, \tilde{NP}_{\psi_2}(\gamma_2) = 3.0, 2 = 0, 6, \tilde{NP}_{\psi_2}(\gamma_3) = 3.0, 5 = 1, 5 \text{ and} \\ \tilde{NP}_{\psi_2}(\gamma_4) = 3.0, 3 = 0, 9.$$

Nonmember non-prioritization degree of elements γ with respect to the parameter ψ_3 are

$$\tilde{NP}_{\psi_3}(\gamma_1) = 1.0, 9 = 0, 9, \tilde{NP}_{\psi_3}(\gamma_2) = 1.0, 8 = 0, 8, \tilde{NP}_{\psi_3}(\gamma_3) = 1.0, 2 = 0, 2 \text{ and} \\ \tilde{NP}_{\psi_3}(\gamma_4) = 1.0, 3 = 0, 3.$$

Nonmember non-prioritization degree of elements γ with respect to the parameter ψ_4 are

$$\tilde{NP}_{\psi_4}(\gamma_1) = 3.0, 3 = 0, 9, \tilde{NP}_{\psi_4}(\gamma_2) = 3.0, 2 = 0, 6, \tilde{NP}_{\psi_4}(\gamma_3) = 3.0, 4 = 1, 2 \text{ and} \\ \tilde{NP}_{\psi_4}(\gamma_4) = 3.0, 5 = 1, 5.$$

Now let us evaluate the score function $S(\gamma_i) = (S_{1_0}(\gamma_i), S_{2_0}(\gamma_i))$ for $i = 1, 2, 3, 4$, where

$$S_1(\gamma_1) = 0, 2 + 1, 8 + 0, 4 + 1, 2 = 3, 6$$

$$S_2(\gamma_1) = 0, 8 + 1, 8 + 0, 1 + 1, 2 = 3, 9$$

$$\tilde{S}_1(\gamma_1) = 0, 6 + 0, 3 + 3, 6 + 0, 9 = 5, 4$$

$$\tilde{S}_2(\gamma_1) = 2, 4 + 0, 3 + 0, 9 + 0, 9 = 4, 5$$

$$S_1(\gamma_2) = 0, 1 + 1, 5 + 0, 8 + 2, 4 = 4, 8$$

$$S_2(\gamma_2) = 0, 4 + 1, 5 + 0, 2 + 2, 4 = 3, 5$$

$$\tilde{S}_1(\gamma_2) = 0, 9 + 0, 6 + 3, 2 + 0, 6 = 5, 9$$

$$\tilde{S}_2(\gamma_2) = 3, 6 + 0, 6 + 0, 8 + 0, 6 = 5, 6$$

$$S_1(\gamma_3) = 0, 5 + 0, 1 + 2, 4 + 0, 6 = 3, 6$$

$$S_2(\gamma_3) = 2 + 0, 1 + 0, 6 + 0, 6 = 3, 3$$

$$\tilde{S}_1(\gamma_3) = 0, 3 + 1, 5 + 0, 8 + 1, 2 = 3, 8$$

$$\tilde{S}_2(\gamma_3) = 1, 2 + 1, 5 + 0, 2 + 1, 2 = 5, 1$$

$$S_1(\gamma_4) = 0, 7 + 0, 9 + 1, 6 + 0, 3 = 3, 5$$

$$S_2(\gamma_4) = 2, 8 + 0, 9 + 0, 4 + 0, 3 = 4, 4$$

$$\tilde{S}_1(\gamma_4) = 0,1 + 0,9 + 1,2 + 1,5 = 3,7$$

$$\tilde{S}_2(\gamma_4) = 0,4 + 0,9 + 0,3 + 1,5 = 3,1$$

$$S_{1_0}(\gamma_1) = 3,6 - 5,4 = -1,8 \text{ and } S_{2_0}(\gamma_1) = 3,9 - 4,5 = -0,6.$$

$$S_{1_0}(\gamma_2) = 4,8 - 5,3 = -0,5 \text{ and } S_{2_0}(\gamma_2) = 3,5 - 5,6 = -2,1.$$

$$S_{1_0}(\gamma_3) = 3,6 - 3,8 = -0,2 \text{ and } S_{2_0}(\gamma_3) = 3,3 - 5,1 = -1,8.$$

$$S_{1_0}(\gamma_4) = 3,5 - 3,7 = -0,2 \text{ and } S_{2_0}(\gamma_4) = 4,4 - 3,1 = 1,3.$$

According to the score function, γ_3 and γ_4 have maximum values for S_{1_0} and since

$$S_{2_0}(\gamma_4) \geq S_{2_0}(\gamma_3), \gamma_4 \text{ is the choice object.}$$

As can be seen from Examples 3.6 and 3.10, different results can be obtained in the same decision-making scenario using FSS and IFSS. While only the membership degrees are used in the method using FSS, the non-membership degrees are also added in the method applied using IFSS, and therefore a more realistic result is obtained for priority ranking of the user.

3.3. Analysis of the proposed method

In this section, some comparative examples are given. In these examples, the results obtained by applying the algorithms introduced in this study were compared with those obtained from some previous studies (Feng et al., 2010) and (Jiang et al., 2011). In Example 3.11, since there is FSS, the first algorithm was applied, yielding same result with previous study (Feng et al., 2010). In Example 3.12, the process started by considering there is FSS and applying the first algorithm. Also, the second algorithm is applied by considering there is IFSS in Example 3.12. The result obtained without ranking is same as the previous study (Jiang et al., 2011), whereas different results is obtained when ranking is applied.

In the examples below, comparisons were made by obtaining results by applying the algorithms given in this study to examples which are taken from two different studies in the literature. One can find details of the FSS in Example 3.11 from the example given in (Feng et al., 2010) and details of the IFSS in Example 3.12 from the Example 1 and Example 4 in (Jiang et al., 2011).

Example 3.11: Let us try to apply the presented algorithm in this paper, to an example mentioned at (Feng et al., 2010) for an illustration of a weighted fuzzy soft set based decision making. Let us use weights of parameters to obtain the priority ranking. Since weight of e_1 is 0.9, weight of e_2 is 0.6, and weight of e_3 is 0.6, priority ranking of parameters is $e_1 \geq e_2 = e_3$. Therefore, priority ranking values of parameters e_1, e_2, e_3 are $p_{e_1} = 3$, $p_{e_2} = 2$ and $p_{e_3} = 2$ and non-prioritization

values of parameters e_1, e_2, e_3 are $np_{e_1} = 1$, $np_{e_2} = 2$ and $np_{e_3} = 2$ by using the weights of parameters.

Priority ranking degrees of elements of U with respect to the parameter e_1 are

$$P_{e_1}(h_1) = 3.0, 4 = 1, 2, P_{e_1}(h_2) = 3.0, 6 = 1, 8, P_{e_1}(h_3) = 3.0, 5 = 1, 5, P_{e_1}(h_4) = 3.0, 9 = 2, 7 \text{ and } P_{e_1}(h_5) = 3.0, 3 = 0, 9.$$

Priority ranking degrees of elements of U with respect to the parameter e_2 are

$$P_{e_2}(h_1) = 2.1 = 1, 2, P_{e_2}(h_2) = 2.0, 5 = 1, P_{e_2}(h_3) = 2.0, 5 = 1, P_{e_2}(h_4) = 2.0, 5 = 1 \text{ and } P_{e_2}(h_5) = 2.0, 7 = 1, 4.$$

Priority ranking degrees of elements of U with respect to the parameter e_3 are

$$P_{e_3}(h_1) = 2.0, 5 = 1, P_{e_3}(h_2) = 2.0, 6 = 1, 2, P_{e_3}(h_3) = 2.0, 8 = 1, 6, P_{e_3}(h_4) = 2.0, 2 = 1, 4 \text{ and } P_{e_3}(h_5) = 2.0, 9 = 1, 8.$$

Non-prioritization degree of elements of U with respect to the parameter e_1 are

$$NP_{e_1}(h_1) = 1.0, 4 = 0, 4, NP_{e_1}(h_2) = 1.0, 6 = 0, 6, NP_{e_1}(h_3) = 1.0, 5 = 0, 5, NP_{e_1}(h_4) = 1.0, 9 = 0, 9 \text{ and } NP_{e_1}(h_5) = 1.0, 3 = 0, 3.$$

Non-prioritization degree of elements of U with respect to the parameter e_2 are

$$NP_{e_2}(h_1) = 2.1 = 1, 2, NP_{e_2}(h_2) = 2.0, 5 = 1, NP_{e_2}(h_3) = 2.0, 5 = 1, NP_{e_2}(h_4) = 2.0, 5 = 1 \text{ and } NP_{e_2}(h_5) = 2.0, 7 = 1, 4.$$

Non-prioritization degree of elements of U with respect to the parameter e_3 are

$$NP_{e_3}(h_1) = 2.0, 5 = 1, NP_{e_3}(h_2) = 2.0, 6 = 1, 2, NP_{e_3}(h_3) = 2.0, 8 = 1, 6, NP_{e_3}(h_4) = 2.0, 2 = 1, 4 \text{ and } NP_{e_3}(h_5) = 2.0, 9 = 1, 8.$$

Now let us evaluate the score function $S(h_j) = (S_1(h_j), S_2(h_j))$ for $j = 1, 2, 3, 4, 5$ where

$$S_1(h_1) = 1, 2 + 2 + 1 = 2, 4 \text{ and } S_2(h_1) = 0, 4 + 2 + 1 = 3, 4.$$

$$S_1(h_2) = 1, 8 + 1 + 1, 2 = 4 \text{ and } S_2(h_2) = 0, 6 + 1 + 1, 2 = 2, 8.$$

$$S_1(h_3) = 1, 5 + 1 + 1, 6 = 4, 1 \text{ and } S_2(h_3) = 0, 5 + 1 + 1, 6 = 3, 1.$$

$$S_1(h_4) = 2, 7 + 1 + 0, 4 = 4, 1 \text{ and } S_2(h_4) = 0, 9 + 1 + 0, 4 = 2, 3.$$

$$S_1(h_5) = 0, 9 + 1, 4 + 1, 8 = 4, 1 \text{ and } S_2(h_5) = 0, 3 + 1, 4 + 1, 8 = 3, 5.$$

According to the score function, h_5 is the choice object, also we obtain same choice object with (Feng et al., 2010) for this decision-making problem.

Example 3.12: Let us apply presented algorithms to the example mentioned at (Jiang et al., 2011, (Example 1 and Example 4)). Since no priority ranking was assigned to the parameters in (Jiang et al., 2011), let us solve the same problem by considering that decision maker has a priority ranking on parameters as $\varepsilon_4 = \varepsilon_5 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3 \geq \varepsilon_1$. Therefore, priority ranking values of parameters

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5$ are $p_{\varepsilon_1} = 1, p_{\varepsilon_2} = 3, p_{\varepsilon_3} = 2, p_{\varepsilon_4} = 5$ and $p_{\varepsilon_5} = 5$ and non-prioritization values of parameters $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5$ are $np_{\varepsilon_1} = 5, np_{\varepsilon_2} = 3, np_{\varepsilon_3} = 4, np_{\varepsilon_4} = 2$ and $np_{\varepsilon_5} = 2$.

Priority ranking degrees of elements U with respect to the parameter ε_1 are

$P_{\varepsilon_1}(h_1) = 1.0, 9 = 0,9, P_{\varepsilon_1}(h_2) = 1.0, 7 = 0,7, P_{\varepsilon_1}(h_3) = 1.0, 8 = 0,8, P_{\varepsilon_1}(h_4) = 1.0, 5 = 0,5$ and $P_{\varepsilon_1}(h_5) = 1.0, 6 = 0,6, P_{\varepsilon_1}(h_6) = 1.0, 7 = 0,7$.

Priority ranking degrees of elements U with respect to the parameter ε_2 are

$P_{\varepsilon_2}(h_1) = 3.0, 8 = 2,4, P_{\varepsilon_2}(h_2) = 3.0, 7 = 2,1, P_{\varepsilon_2}(h_3) = 3.0, 6 = 1,8, P_{\varepsilon_2}(h_4) = 3.0, 4 = 1,2, P_{\varepsilon_2}(h_5) = 3.0, 8 = 2,4$ and $P_{\varepsilon_2}(h_6) = 3.0, 5 = 1,5$.

Priority ranking degrees of elements U with respect to the parameter ε_3 are

$P_{\varepsilon_3}(h_1) = 2.0, 6 = 1,2, P_{\varepsilon_3}(h_2) = 2.0, 5 = 1, P_{\varepsilon_3}(h_3) = 2.0, 4 = 0,8, P_{\varepsilon_3}(h_4) = 2.0, 7 = 1,4, P_{\varepsilon_3}(h_5) = 2.0, 8 = 1,6$ and $P_{\varepsilon_3}(h_6) = 2.0, 6 = 1,2$.

Priority ranking degrees of elements U with respect to the parameter ε_4 are

$P_{\varepsilon_4}(h_1) = 5.0, 4 = 2, P_{\varepsilon_4}(h_2) = 5.0, 9 = 4,5, P_{\varepsilon_4}(h_3) = 5.0, 7 = 3,5, P_{\varepsilon_4}(h_4) = 5.0, 7 = 3,5, P_{\varepsilon_4}(h_5) = 5.0, 8 = 4$ and $P_{\varepsilon_4}(h_6) = 5.0, 8 = 4$.

Priority ranking degrees of elements U with respect to the parameter ε_5 are

$P_{\varepsilon_5}(h_1) = 5.0, 9 = 4,5, P_{\varepsilon_5}(h_2) = 5.0, 4 = 2, P_{\varepsilon_5}(h_3) = 5.0, 8 = 4, P_{\varepsilon_5}(h_4) = 5.0, 7 = 3,5, P_{\varepsilon_5}(h_5) = 5.0, 4 = 2$ and $P_{\varepsilon_5}(h_6) = 5.0, 2 = 1$.

Nonmember priority ranking degrees of elements U with respect to the parameter ε_1 are

$\tilde{P}_{\varepsilon_1}(h_1) = 1.0, 1 = 0,1, \tilde{P}_{\varepsilon_1}(h_2) = 1.0, 2 = 0,2, \tilde{P}_{\varepsilon_1}(h_3) = 1.0, 2 = 0,2, \tilde{P}_{\varepsilon_1}(h_4) = 1.0, 4 = 0,4, \tilde{P}_{\varepsilon_1}(h_5) = 1.0, 3 = 0,3$ and $\tilde{P}_{\varepsilon_1}(h_6) = 1.0, 3 = 0,3$.

Nonmember priority ranking degrees of elements U with respect to the parameter ε_2 are

$\tilde{P}_{\varepsilon_2}(h_1) = 3.0, 1 = 0,3, \tilde{P}_{\varepsilon_2}(h_2) = 3.0, 1 = 0,3, \tilde{P}_{\varepsilon_2}(h_3) = 3.0, 3 = 0,9, \tilde{P}_{\varepsilon_2}(h_4) = 3.0, 6 = 1,8, \tilde{P}_{\varepsilon_2}(h_5) = 3.0, 2 = 0,6$ and $\tilde{P}_{\varepsilon_2}(h_6) = 3.0, 3 = 0,9$.

Nonmember priority ranking degrees of elements U with respect to the parameter ε_3 are

$\tilde{P}_{\varepsilon_3}(h_1) = 2.0, 2 = 0,4, \tilde{P}_{\varepsilon_3}(h_2) = 2.0, 2 = 0,4, \tilde{P}_{\varepsilon_3}(h_3) = 2.0, 5 = 1, \tilde{P}_{\varepsilon_3}(h_4) = 2.0, 3 = 0,6, \tilde{P}_{\varepsilon_3}(h_5) = 2.0, 2 = 0,4$ and $\tilde{P}_{\varepsilon_3}(h_6) = 2.0, 2 = 0,4$.

Nonmember priority ranking degrees of elements U with respect to the parameter ε_4 are

$\tilde{P}_{\varepsilon_4}(h_1) = 5.0, 5 = 2,5, \tilde{P}_{\varepsilon_4}(h_2) = 5.0, 1 = 0,5, \tilde{P}_{\varepsilon_4}(h_3) = 5.0, 1 = 0,5, \tilde{P}_{\varepsilon_4}(h_4) = 5.0, 2 = 1, \tilde{P}_{\varepsilon_4}(h_5) = 5.0, 1 = 0,5$ and $\tilde{P}_{\varepsilon_4}(h_6) = 5.0, 1 = 0,5$.

Nonmember priority ranking degrees of elements U with respect to the parameter ε_5 are

$\tilde{P}_{\varepsilon_5}(h_1) = 5.0, 1 = 0,1, \tilde{P}_{\varepsilon_5}(h_2) = 5.0, 5 = 2,5, \tilde{P}_{\varepsilon_5}(h_3) = 5.0, 1 = 0,5, \tilde{P}_{\varepsilon_5}(h_4) = 5.0, 1 = 0,5, \tilde{P}_{\varepsilon_5}(h_5) = 5.0, 5 = 2,5$ and $\tilde{P}_{\varepsilon_5}(h_6) = 5.0, 2 = 1$.

Firstly, let us apply the first algorithm to this example by considering only membership degrees and let us evaluate the first components of the score function just by using the membership degrees of the objects.

$$S_1(h_1) = 11, S_1(h_2) = 10,3, S_1(h_3) = 10,9, S_1(h_4) = 10,1, S_1(h_5) = 10,6 \text{ and } S_1(h_6) = 8,4.$$

According to these values choice object is h_1 , which is the same object evaluated in (Jiang et.al., 2011).

On the other hand, if we apply the second algorithm by considering both membership and non-membership degrees of IFSS, we need to evaluate the first component of the score function for IFSS where $S(h_j) = (S_{10}, S_{20})$ for $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$, where

$$S_1(h_1) = 0,9 + 2,4 + 1,2 + 2 + 4,5 = 11,$$

$$S_1(h_2) = 0,7 + 2,1 + 1 + 4,5 + 2 = 10,3,$$

$$S_1(h_3) = 0,8 + 1,8 + 0,8 + 3,5 + 4 = 10,9,$$

$$S_1(h_4) = 0,5 + 1,2 + 1,4 + 3,5 + 3,5 = 10,1,$$

$$S_1(h_5) = 0,6 + 2,4 + 1,6 + 4 + 2 = 10,6 \text{ and}$$

$$S_1(h_6) = 0,7 + 1,5 + 1,2 + 4 + 1 = 8,4.$$

$$\tilde{S}_1(h_1) = 0,1 + 0,3 + 0,4 + 2,5 + 0,1 = 3,4,$$

$$\tilde{S}_1(h_2) = 0,2 + 0,3 + 0,4 + 0,5 + 2,5 = 3,9,$$

$$\tilde{S}_1(h_3) = 0,2 + 0,9 + 1 + 0,5 + 0,5 = 3,1,$$

$$\tilde{S}_1(h_4) = 0,4 + 1,8 + 0,6 + 1 + 0,5 = 4,3,$$

$$\tilde{S}_1(h_5) = 0,3 + 0,6 + 0,4 + 0,5 + 2,5 = 4,3 \text{ and}$$

$$\tilde{S}_1(h_6) = 0,3 + 0,9 + 0,4 + 0,5 + 1 = 3,1.$$

$$\text{Thus } S_{10}(h_1) = 11 - 3,4 = 7,6, \quad S_{10}(h_2) = 10,3 - 3,9 = 6,4, \quad S_{10}(h_3) = 10,9 - 3,1 = 7,8, \\ S_{10}(h_4) = 10,1 - 4,3 = 5,8, S_{10}(h_5) = 10,6 - 4,3 = 6,3, \text{ and } S_{10}(h_6) = 8,4 - 3,1 = 5,3.$$

According to the score function, h_3 is the choice object, which is different from the choice object h_1 obtained in (Jiang et al., 2011). The difference in results arises because the method, that we proposed in this study, includes an ordering on the parameter set. In this example, if we want to order choice objects, the ordering will be in the form of $h_3, h_1, h_2, h_5, h_4, h_6$, which are written with the help of score function. A change in the priority ranking will lead to a change in result.

Let us apply presented algorithms to the same example mentioned at (Jiang et al., 2011, (Example 1 and Example 4)) but now let us solve the same problem by considering that decision maker has a priority ranking on parameters as $\varepsilon_4 = \varepsilon_5 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_1$. Thus, all parameters have same priority ranking values and non-prioritization values which is 5. Therefore, $p_{\varepsilon_1} = 5$, $p_{\varepsilon_2} = 5$, $p_{\varepsilon_3} = 5$, $p_{\varepsilon_4} = 5$, $p_{\varepsilon_5} = 5$ and $np_{\varepsilon_1} = 5$, $np_{\varepsilon_2} = 5$, $np_{\varepsilon_3} = 5$, $np_{\varepsilon_4} = 5$ and $np_{\varepsilon_5} = 5$. It can be thought of as if there is no priority ranking at all as in (Jiang et al., 2011).

Let us apply the second algorithm by considering both membership and non-membership degrees of IFSS. Firstly, we need to evaluate the first component of the score function for IFSS, where $S(h_j) = (S_{10}, S_{20})$ for $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$, where

$$S_1(h_1) = 4,5 + 4 + 3 + 2 + 4,5 = 18,$$

$$S_1(h_2) = 3,5 + 3,5 + 2,5 + 4,5 + 2 = 16,$$

$$S_1(h_3) = 4 + 3 + 2 + 3,5 + 4 = 16,5,$$

$$S_1(h_4) = 2,5 + 3 + 3,5 + 3,5 + 3,5 = 15,$$

$$S_1(h_5) = 3 + 4 + 4 + 4 + 2 = 17 \text{ and}$$

$$S_1(h_6) = 3,5 + 2,5 + 3 + 4 + 1 = 14.$$

$$\tilde{S}_1(h_1) = 0,5 + 0,5 + 1 + 1 + 0,5 = 3,5,$$

$$\tilde{S}_1(h_2) = 1 + 0,5 + 1 + 0,5 + 2,5 = 5,5,$$

$$\tilde{S}_1(h_3) = 1 + 1,5 + 2,5 + 0,5 + 0,5 = 6,$$

$$\tilde{S}_1(h_4) = 2 + 3 + 1,5 + 1 + 0,5 = 8,$$

$$\tilde{S}_1(h_5) = 1,5 + 1 + 1 + 0,5 + 1 = 5 \text{ and}$$

$$\tilde{S}_1(h_6) = 1,5 + 1,5 + 1 + 0,5 + 1 = 5,5.$$

Thus $S_{10}(h_1) = 18 - 3,5 = 14,5$, $S_{10}(h_2) = 16 - 5,5 = 10,5$, $S_{10}(h_3) = 16,5 - 6 = 10,5$, $S_{10}(h_4) = 15 - 8 = 7$, $S_{10}(h_5) = 17 - 5 = 12$, and $S_{10}(h_6) = 14 - 5,5 = 8,5$.

According to the score function, h_1 is the choice object, which is same with the choice object obtained in (Jiang et al., 2011). This arises because priority ranking values and non-prioritization values are taken same that means there is no priority ranking as in (Jiang et al., 2011).

When compared to previous studies on decision-making algorithm based on FSS and IFSS, it has been observed that user priority ranking was not considered. Therefore, this study introduces a novel approach by integrating user priority ranking on the parameter set into decision-making algorithms. The comparative analysis conducted on Example 3.11 and Example 3.12 supports the validity of the proposed methods. When we use weights of parameters to obtain the priority ranking in Example 3.11, the same choice object obtained with the previous studies. Also, as can be seen from Example 3.12, if a priority ranking is assigned to IFSS, the obtained choice object may differ from that of the previous studies. However, if the algorithm is applied without assigning a priority ranking to the IFSS, meaning priority ranking values and non-prioritization values are considered equal, the choice object remains the same as in the previous studies.

Furthermore, the primary distinction between the first and second algorithms is that the first used within FSS, whereas the second is used in IFSS. As a result, the first algorithm employs only the membership degree, while the second utilizes both the membership and non-membership degrees. As can be seen from the Example 3.6 and Example 3.10, even though there is same priority rankings

and same membership degrees, different choice objects are obtained by using Algorithm 1 and 2 because of the non-membership degree is used only in Algorithm 2.

In the proposed methods of this study, a large number of parameters may lead to complexity. This is because, with more parameters, the number of comparisons increases, which in turn leads to longer processing times. However, these comparisons are simple calculations made to obtain the most suitable choice object according to the user's priorities. In the proposed methods, if the priority ranking changes, the results will also change, as can be seen in Example 3.12. Additionally, if parameters are reduced or increased, both FSS and IFSS will change, and consequently, the results will also be changed.

The proposed methods can be used in real-world problems involving multi-attribute object selection, such as in economics, industry, engineering, and medicine, to obtain the most suitable choice object based on priority needs.

4. Conclusions and Recommendations

In this study, decision-making methods by using FSS and IFSS were given. These methods incorporate user priority rankings into the decision-making process and utilize them in the proposed algorithms. The attributes of multi-attribute objects were considered as the parameter sets of FSS and IFSS, and two decision-making methods were proposed based on the user's priority ranking of these attributes. The first method determined the most suitable decision object using only the membership degree, while the second method incorporated both membership and non-membership degrees to make the decision.

An example was provided to demonstrate the application of both methods, highlighting that the results may differ due to the influence of the non-membership degree on the outcome. Additionally, new definitions were introduced for use in algorithms and the methods were applied to examples from some studies in the literature.

For future studies, the presented algorithms can be integrated with experimental research using real-world data and computational methods. Moreover, future research could focus on developing the presented methods for group decision-making, in which multiple decision-makers are involved in selecting among multi-attribute objects, by considering the priority rankings on the parameter set of each member in the group to obtain consensus.

Acknowledgements

The author grateful to editor and referees for their valuable comments and suggestions.

Authors' Contributions

The author has completed the article alone.

Statement of Conflicts of Interest

There is no conflict of interest.

Statement of Research and Publication Ethics

This study complies with Research and Publication Ethics.

References

- Adiththa, U., Sunil, J.J., and Baiju, T., (2024) Circular Intuitionistic Fuzzy Soft Set Theoretic Approach to Decision Making Problems. *IEEE Access*, 12, 144818- 144836. 10.1109/ACCESS.2024.3472215.
- Atanassov, K., (1986). Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets Syst.*, 20, 87-96. [L]
[SEP]
- Chen H. and Liu Y., (2024). Group Decision-Making Method with Incomplete Intuitionistic Fuzzy Soft Information for Medical Diagnosis Model. *Mathematics* 2024, 12(12), 1823; <https://doi.org/10.3390/math12121823>
- Dalkılıç, O., (2021) (α, β) -cut and inverse (α, β) -cuts in bipolar fuzzy soft sets. *Commun. Fa. Sci. Univ. Ank. Ser. A1 Math. Stat.* 70, 582-599. DOI: 10.31801/cfsuasmas.770623.
- Dalkılıç, O., (2022) On topological structures of virtual fuzzy parametrized fuzzy soft sets. *Complex & Intelligent System*, 8, 337-348. <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00378-x>
- Dalkılıç, O. and Demirtaş, N. (2022) Decision analysis review on the concept of class for bipolar soft set theory. *Computational and Applied Mathematics* 41. <https://doi.org/10.1007/s40314-022-01922-2>.
- Dalkılıç, O. and Demirtaş, N., (2023) Novel hybrid soft set theories focusing on desicion makiers by considering the factors affecting the parameters. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*. <https://doi.org/10.1080/0952813X.2023.2259913>.
- Dalkılıç, O. and Cangul, I.N., (2024) Determining interactions between objects from different universes: (inverse) object interaction set for binay soft set. *Soft Computing* 28, 12869-12877. <https://doi.org/10.1007/s00500-024-10318-9>.
- Das S. and Kar S., (2014). Group decision making in medical system: an intuitionistic fuzzy soft set approach. *Appl Soft Comput* 24, 196–211. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.06.050>.
- Demirtaş, N., Dalkılıç, O., Riaz, M. and Al-Quran, A., (2024) Mathematical analysis o parameters belonging to the universe in the soft set theory with new distance measures. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems* 46, 3975-3985. 10.3233/JIFS-234481.
- Demirtaş, N. and Dalkılıç, O. (2024) Bipolar fuzzy soft set thepy applied to medical diagnosis. *Tur. J. Math. Comput. Sci.* 16(2), 314-324. DOI : 10.47000/tjmcs.1254943.
- Feng F., Young Bae Jun, Xiaoyan Liu and Lifeng Li, (2010). An Adjustable approach to fuzzy soft set based decision making. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 234, 10-20.
- Hu J., Pan L., Yang Y. and Chen H., (2019), A group medical diagnosis model based on intuitionistic fuzzy soft sets. *Appiedl Soft Computing Journal*, 77, 453–466. [L]
[SEP]
- Imran, R. and Ullah, K., (2025), Circular Intuitionistic Fuzzy EDAS Approach: A new Paradigm for Decision-Making in the Automotive Industry Sector. *Spectrum of Engineering and Management Sciences*, 3-1, 76-92. <https://doi.org/10.31181/sems31202537i>.

- Jiang Y., Tang Y. and Chen Q., (2011). An adjustable approach to intuitionistic fuzzy soft sets based decision making. *Appl Math Model* 35(2), 824–836. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.07.038>
- Khameneh A.Z., Kılıçman A. and Salleh A.R., (2018). Application of a preference relationship in decision-making based on intuitionistic fuzzy soft sets. *J Intell Fuzzy Syst*, 34(1), 123–139. [10.3233/JIFS-17089](https://doi.org/10.3233/JIFS-17089)
- Maji, P. K., Biswas R. and Roy A.R., (2001). Fuzzy soft sets, *J. Fuzzy Math.*, 9(3), 589-602. [10.1002/fuz.1001](https://doi.org/10.1002/fuz.1001)
- Maji, P.K., Roy A.R. and Biswas, R., (2004). On intuitionistic fuzzy soft sets. *J. Fuzzy Math.*, 12, 669–683. [10.1002/fuz.1001](https://doi.org/10.1002/fuz.1001)
- Masmali, I., Ahmad, A., Azeem, M., Koam, A.N.A. and Alharbi, R. (2024). TOPSIS Method Based on Intuitionistic Fuzzy Soft Set and Its Application to Diagnosis of Ovarian Cancer. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 17-161. <https://doi.org/10.1007/s44196-024-00537-1>
- Memiş, S., Erduran, F. Ş., Aydoğan, H., (2025). Adaptive machine learning approaches utilizing soft decision-making via intuitionistic fuzzy parametrized intuitionistic fuzzy soft matrices. *PeerJ Comput. Sci.* 11:e2703. [10.7717/peerj-cs.2703](https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2703).
- Molodtsov, D., (1999). Soft Set Theory-First Results, *Comput. Math. Appl.*, 37, 19-31.
- Polat, N., Yaylalı Umul, G., Tanay, B., (2019). A Method for Decision Making Problems by using Graph Representation of Soft Set Relations. *Intelligent Automation and Soft Computing*. 25(2), 305-311. <https://doi.org/10.31209/2018.100000006>
- Saqlain, M. and Saeed M., (2024). From Ambiguity to Clarity: Unraveling the Power of Similarity Measures in Multi-Polar Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Soft Sets. *Decision Making Advances*, 2 -1, 48-59. <https://doi.org/10.31181/dma21202421>
- Stojanovic, N., Lakovic, M. and Djurovic, L. (2025). Decision-making algorithm based on the energy of interval-valued hesitant fuzzy soft sets. *Neural Computing and Applications*. <https://doi.org/10.1007/s00521-025-11107-7>.
- Xui, Y., Suni, Y. and Li, D. (2010), *Intuitionistic Fuzzy soft set*. 2010 2nd International Workshop on Intelligent Systems and Applications, 22-23 May 2010. China, [10.1109/IWISA.2010.5473444](https://doi.org/10.1109/IWISA.2010.5473444)
- Yang Y.W. and Qian, T., 2013. Decision-making approach with entropy weight based on intuitionistic fuzzy soft set, *Ann. Fuzzy Math. Inform.*, 6 (2), 415-424. [10.1002/fuz.1001](https://doi.org/10.1002/fuz.1001)
- Yaylalı Umul, G., Polat, N., Tanay, B., (2021). A Soft Interval Based Decision Making Method and Its Computer Application. *Foundations of Computing and Decision Sciences*. 46, 273-296. [10.2478/fcds-2021-0018](https://doi.org/10.2478/fcds-2021-0018).
- Yaylalı Umul, G., (2025). A multi-attribute group decision-making algorithm based on soft intervals that considers the priority rankings of group members on attributes of objects, along with some applications. *AIMS Mathematics*, 10(3), 4709-4746. [10.3934/math.2025217](https://doi.org/10.3934/math.2025217).
- Zadeh, L.A., (1965). Fuzzy Sets, *Information and Contrrol*, 8, 338-353. [10.1016/S0019-6596\(65\)90047-8](https://doi.org/10.1016/S0019-6596(65)90047-8)
- Zhao, H., Ma, W. and Sun, B., (2017). A novel decision-making approach based on intuitionistic fuzzy soft sets. *Int. J. Mach. Learn. & Cyber.*, 8, 1107–1117. [10.1007/s13042-015-0481-z](https://doi.org/10.1007/s13042-015-0481-z)

Investigating the Potential of Natural Agents for Colorectal Cancer Treatment with Molecular Modeling

Eda ARABACI¹ , Nil SAZLI² , Deniz KARATAŞ^{3*} 

Abstract

Colorectal cancer occurs with the uncontrolled growth of cells in the inner part of the large intestine. The most important factor playing a role in the development of colorectal cancer is mutations in the adenomatous polyposis coli (APC) gene. Irinotecan and folinic acid, which are chemical drugs used in the chemotherapy treatment of colorectal cancer, have many side effects on the human body. For this reason, solutions are being sought with natural agents as alternatives to chemical drugs, using in silico environments where less costly and faster drug design can be done day by day. In addition to the drugs mentioned, this study modeled the interaction of withaferin A, epigallocatechin gallate (EGCG), and ganoderiol A with APC using molecular docking and dynamic simulations. In docking studies, the interaction energy results of withaferin A, (EGCG), and ganoderiol A are -8.5, -7.8, and -7.9 kcal/mol, respectively. In MD simulations, the average RMSD values of these three agents are 0.5 nm for withaferin A and ganoderiol A and 1.5 nm for the more branched, bulky EGCG. The modeling results reveal the therapeutic drug potential of natural agents on the APC gene associated with colorectal cancer and provide a basis for other studies.

Keywords: APC gene, Colorectal cancer, Molecular modeling, Natural agent.

Moleküler Modelleme ile Kolorektal Kansere Tedavisinde Doğal Ajanların Potansiyelinin Araştırılması

Öz

Kolorektal kanser, kalın bağırsağın iç kısmındaki hücrelerin kontrolsüz büyümesiyle oluşur. Kolorektal kanser gelişiminde rol oynayan en önemli faktör adenomatöz polipozis koli (APC) genindeki mutasyonlardır. Kolorektal kanserin kemoterapi tedavisinde kullanılan kimyasal ilaçlardan olan irinotekan ve folinik asit insan vücudu üzerinde birçok yan etkiye sahiptir. Bu nedenle kimyasal ilaçlara alternatif olarak doğal ajanlarla, her geçen gün daha az maliyetli ve daha hızlı ilaç tasarımı yapılabilen in silico ortamlarda çözümler aranmaktadır. Bahsedilen ilaçlara ek olarak, bu çalışmada withaferin A, epigallocatechin gallate (EGCG) ve ganoderiol A'nın APC ile etkileşimi moleküler yerleştirme ve dinamik simülasyonlar kullanılarak modellenmiştir. Yerleştirme çalışmalarında withaferin A, (EGCG) ve ganoderiol A'nın etkileşim enerjisi sonuçları sırasıyla -8,5, -7,8 ve -7,9 kcal/mol'dür. MD simülasyonlarında, bu üç ajanın ortalama RMSD değerleri withaferin A ve ganoderiol A için 0,5 nm ve daha dallanmış, hacimli EGCG için 1,5 nm'dir. Modelleme sonuçları, doğal ajanların kolorektal kanserle ilişkili APC geni üzerindeki terapötik ilaç potansiyelini ortaya koyabileceği ve diğer çalışmalar için bir temel sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: APC geni, Kolorektal kanser, Moleküler modelleme, Doğal ajan.

^{1,2,3}Manisa Celal Bayar University, Department of Bioengineering, Yunussemre, Manisa, Türkiye,
200323003@ogr.cbu.edu.tr 231208005@ogr.cbu.edu.tr deniz.karatas@cbu.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Introduction

Colorectal cancer, which is one of the most common types of cancer, occurs when cells in the large intestine grow and multiply abnormally (Siegel, Miller, & Jemal, 2020). One of the most effective factors in the occurrence of colorectal cancer is a gene mutation (Olkinuora, Peltomaki, Aaltonen, & Rajamaki, 2021). The gene mutation that causes colorectal cancer to progress is related to the APC gene (Shailes, Tse, Freitas, Silver, & Martin, 2022). APC abnormally activates the Wnt signaling pathway, leading to the progression of colorectal cancer (Chicurel, 2002; Polakis, 2007). The APC gene is found mutated in the majority of colorectal cancers, and these mutations usually occur in the early stages of cancer (Kinzler & Vogelstein, 1996). For this reason, it is very important to find alternative methods for the treatment of APC gene-related colorectal cancer (Peng et al., 2023). As with every type of cancer, there are many methods for the treatment of colorectal cancer, such as radiotherapy and chemotherapy (Gmeiner, 2024). While these methods help treat cancer, they also have many side effects on the human body, such as nausea, collapse of the immune system, and damage to the functions of vital organs (Li, Zhang, & Xu, 2023). In addition to these methods, the use of chemical drugs also has further side effects on the human body (Bontempo, De Masi, & Rigano, 2023). For this reason, finding natural alternative medicine agents with very few side effects is very important for human health.

Natural agents such as flavonoids, steroidal lactones, alkaloids, saponins and triterpenoids contain many bioactive substances such as antioxidants, anticancer and anti-inflammatory agents thanks to their different chemical structures. (Dar, Shahnawaz, Ahanger, & Majid, 2023). With these bioactive properties, they show therapeutic effects for many diseases, especially colorectal cancer. Natural agents have become very popular in recent years as they are used in the treatment of many diseases as an alternative to chemical drugs. The reason for this is that they have almost no side effects compared to chemical drugs (Chaachouay & Zidane, 2024). In addition, the fact that a natural agent has many bioactive properties such as antioxidant and anticancer effects offers a versatile treatment strategy for disease management. (Guru, Kar, Nayak, & Mohapatra, 2023).

The main reason for choosing natural agents Withaferin A, EGCG, and Ganoderiol A as ligands in this study is that they have mechanisms suitable for reducing the side effects of traditional chemotherapy and modulating damaged signaling pathways that cause cancer progression (Choi & Kim, 2015; Gao, Hirakawa, Min, Nakamura, & Hattori, 2005; Nasir et al., 2020). In addition, the chemical structure of each ligand is predicted to interact well with the APC gene, which is associated with colorectal cancer, through a molecular modeling approach. For example, withaferin A's steroidal lactone structure, EGCG's polyphenolic structure, and ganoderiol A's triterpenoid-bearing chemical structures are predicted to have the potential to establish strong hydrogen bonds and hydrophobic

interactions with the APC gene, and thus may be effective against colorectal cancer (Macharia, Kaposztas, & Bence, 2023; Wahnou et al., 2023). For these reasons, it establishes strong hydrogen bonds with the gene receptor, resulting in a strong interaction. The polyphenolic structure of EGCG and the triterpenoid structure of the ganoderiol A ligand have the potential to interact effectively with the APC gene by establishing hydrophobic interactions (Han et al., 2023; Macharia et al., 2023; Wahnou et al., 2023). For these reasons, these ligands were preferred for investigation within the scope of this study to examine the drug potential of natural agents, using as a reference chemical agents that have many side effects but are widely used as anticancer drugs on the market.

In this study, we aimed to reveal the anticancer properties of natural agents such as withaferin A, EGCG, and ganoderiol A, compared to chemical drugs such as folinic acid and irinotecan, by using molecular modeling approaches in the treatment of colorectal cancer associated with the APC gene using the crystal receptor structure with PDB ID 3AU3. Specifically, the binding abilities of natural agents to the APC protein were examined by molecular docking analyses, and the stability of the resulting receptor-ligand complexes was analyzed by molecular dynamics simulations. Since there is no study in the literature examining the effect of natural agents using a molecular modeling approach with the APC gene associated with colorectal cancer, this study is intended to form the basis of many future literature studies.

2. Materials and Methods

2.1. Protein Preparation

The 3D structure of the APC gene (PDB ID: 3AU3) was obtained from the RCSB Protein Data Bank (Figure 1). The protein structure was prepared using AutoDock Tools 1.5.7 by removing water molecules, adding polar hydrogen atoms, Kollman partial charges, and converting the file to the AD4 atom type .pdbqt format (G. M. Morris et al., 2009).

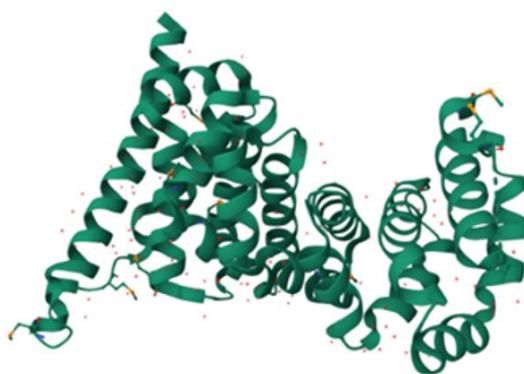


Figure 1. Crystal structure of APC protein (PDB ID: 3AU3).

2.2. Ligand Preparation

The 3D structures of several compounds were retrieved from the PubChem database and prepared for docking analysis. The natural products include withaferin A (CID:155887202), EGCG (CID: 65064), and ganoderiol A (CID: 100927467) shown in Figure 2. Additionally, two conventional drugs, irinotecan (CID: 60838) and folinic acid (CID: 135403648) shown in Figure 2 were also obtained. Using PyMOL (Molecular Graphics System, Version 2.0 Schrödinger, LLC.), the downloaded files were converted to the .pdb file format. Subsequently, Chimera Tools software was utilized to prepare the ligand files, which were finally written in .pdbqt format to facilitate the docking analysis (Pettersen et al., 2004).

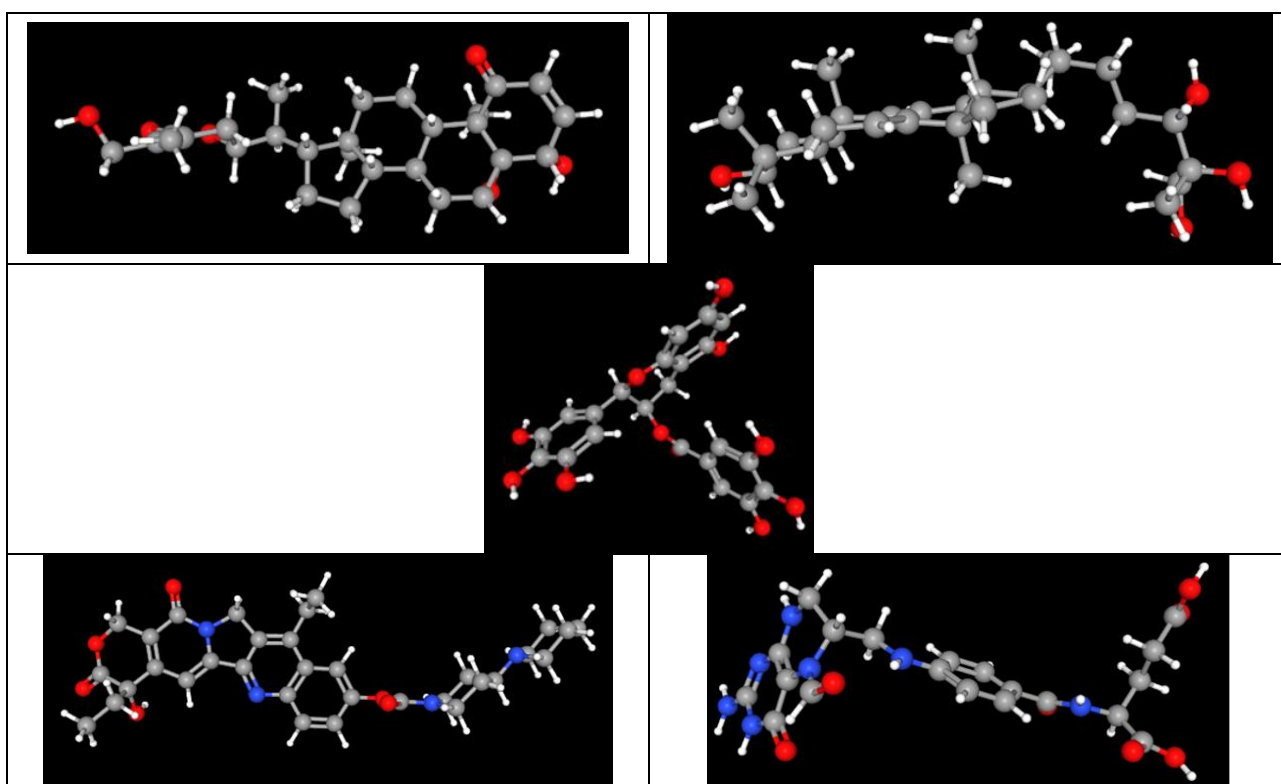


Figure 2. The 3D structure of withaferin A, epigallocatechin gallate, ganoderiol A, irinotecan, and folinic acid, respectively. The red, blue, gray, and white colors represent oxygen (O), nitrogen (N), carbon (C), and hydrogen (H).

2.3. Molecular Docking Analysis

Molecular docking analysis was performed using Chimera Tools software to dock two conventional drugs and three natural agents into the active site of the APC protein. The active site coordinates of the APC protein were determined via global alignment, and five grid boxes were created specifically for this active site. Dockings were performed with Chimera Computer-based

molecular modeling tools were used to analyze the binding interactions of each ligand. The coordinates of the active site center of the receptor and the grid box dimensions are shown in Table 1. As a result of the analysis, the aim was to determine the score of the lowest binding energy and estimate the inhibition constant. This way, information was provided regarding the potential interactions between the ligands and the APC protein selected as the receptor (Qawoogha & Shahiwala, 2020).

Table 1. Grid box sizes and center coordinates used in molecular docking studies.

center of active site		grid box dimensions (x,y,z)
x= -52.734 y= 36.466 z= 5.797		20 x 20 x 20
		40 x 40 x 40
		50 x 50 x 50
		60 x 60 x 60
		70 x 70 x 70

2.4. Protein-Ligand Complex Visualization

The protein-ligand complexes obtained from the analyses were visualized with Discovery Studio Visualizer 20.1 software (Qawoogha & Shahiwala, 2020; Zhang, Cheng, Jin, Zhao, & Wang, 2021). Thanks to this software, polar and hydrophobic interactions between the ligand and target were characterized and protein-ligand complex map representations of the interactions were created.

2.5. Utilization of SwissADME for Prediction of Pharmacokinetic Properties

The physicochemical properties and potential drug-like characteristics of ligands were calculated using SwissADME. SwissADME provides comprehensive predictions including pharmacokinetics, drug-likeness, and medicinal chemistry friendliness (Daina, Michielin, & Zoete, 2017).

2.6. Molecular Dynamics Simulation

A 50 ns molecular dynamics simulation was performed to analyze the properties such as stability and compactness of the complexes obtained after docking the APC protein, selected as the receptor, with five different ligands. RMSD (Root Mean Square Deviation), RMSF (Root Mean Square Fluctuation), RDF (Radial Distribution Function), and Rg (Radius of Gyration) graphs were

obtained using the GROMACS program for the simulation. Thanks to these graphs, both physical and thermodynamic properties such as conformational changes, stability, compactness, and density between the protein and ligands were analyzed (Yadav et al., 2022; Zrinej, Elmchichi, Alaqarbeh, Lakhliifi, & Bouachrine, 2023).

3. Findings and Discussion

When the results were examined in general within the scope of this study, among traditional drugs, irinotecan exhibited a strong interaction with the APC gene, with a binding energy of -8.5 kcal/mol. Additionally, another drug, folinic acid, showed a binding affinity of -8.1 kcal/mol. Among natural ligands, EGCG and Ganoderiol A showed the best interactions with the target receptor, with binding energies of -7.8 and -7.9 kcal/mol, respectively. When the comparative pharmacokinetic properties of natural agents were examined, it was observed that the molecular weights of Ganoderiol A (478.75 g/mol) and Withaferin A (472.61 g/mol) were lower than those of marketed drugs. Furthermore, it was noted that natural agents Withaferin A and Ganoderiol A demonstrated good oral bioavailability, particularly with gastrointestinal properties similar to irinotecan. When the potential of natural agents as drug candidates was examined, Withaferin A and Ganoderiol A were found to meet all established criteria and were considered candidate drugs according to Lipinski's rule. In molecular dynamics simulation studies, RMSD, RMSF, RDF, and Rg graphs of receptor-ligand complexes were obtained. All ligands generally exhibited RMSD values between 0.75 and 1.75 nm on the APC gene receptor. However, the natural agent Ganoderiol A showed the most stable interaction with the receptor. In the RMSF graphs, the ligand that exhibited the least flexibility was the EGCG ligand, with a value of 0.2 nm. In the RDF graphs, Ganoderiol A demonstrated the strongest interaction with the APC gene, achieving the best peak point. Rg values generally indicated that all receptor-ligand complexes had a compact structure in the findings. However, it was observed that Ganoderiol A and Withaferin A formed a much more compact complex structure, with an Rg value of approximately 2.3 nm. Additionally, the EGCG ligand exhibited a compact structure with its highly stable Rg value.

3.1. Binding Energy and Hydrogen Bonds

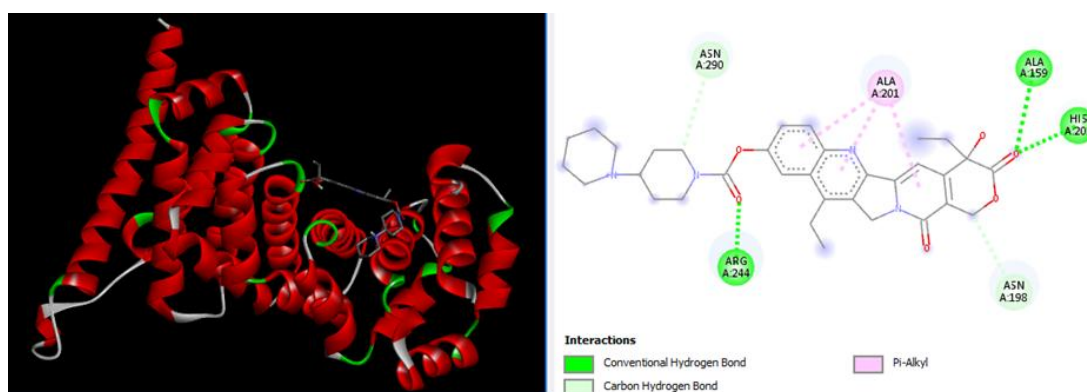
The binding affinities of various natural compounds and conventional drugs to the APC protein were evaluated through molecular docking analyses using different grid box sizes. The docking results are summarized in Table 2.

Table 2. Binding energy (kcal/mol) of conventional drugs and natural compounds to APC protein across different grid box sizes for molecular docking results.

Target Protein	Ligand	Binding Energy (kcal/mol)				
		20x20x20	40x40x40	50x50x50	60x60x60	70x70x70
APC	Irinotecan	-7.8	-7.2	-8.1	-8.5	-8.4
	Folinic acid	-7	-7.3	-7.3	-8.1	-7.3
	WithaferinA	-7.2	-7	-8.5	-8.5	-8.4
	Epigallocatechin Gallate	-5.9	-7.3	-7.5	-7.8	-7.8
	Ganoderiol A	-6.0	-7.2	-7.7	-7.9	-7.0

Table 2 provides a comprehensive overview of the binding energies of various compounds, both conventional chemotherapeutic agents and natural compounds when docked to the APC protein. The binding energy is a critical parameter as it indicates the strength and stability of the interaction between the compound and the target protein (G. M. Morris et al., 2009). Lower binding energy values correspond to stronger binding affinities, which are desirable for effective inhibition of the target protein (Zrinej et al., 2023).

The results indicate that irinotecan exhibits the highest binding affinity to the APC protein, particularly at a grid box size of 60x60x60, with a binding energy of -8.5 kcal/mol. Additionally, irinotecan formed seven hydrogen bonds with the APC protein, with bond lengths ranging from 1.85 to 2.83 Å. In addition, ARG158 has a 2.4 Å long hydrogen bond between its oxygen atom and the ligand (Figure 3).

**Figure 3.** Irinotecan binding to APC protein, illustrating significant hydrogen bonds.

Folinic acid also demonstrated significant binding affinity, with its highest binding energy of -8.1 kcal/mol at the 60x60x60 grid box size. The interaction analysis revealed that folinic acid formed ten hydrogen bonds with the APC protein, with bond lengths ranging from 2.08 to 2.8 Å. A significant interaction was observed between the oxygen of ARG153 and folinic acid, measuring 2.24 Å (Figure 4). These findings underscore the effectiveness of irinotecan and folinic acid as conventional treatments for colorectal cancer, with strong and stable binding affinities to the APC protein.

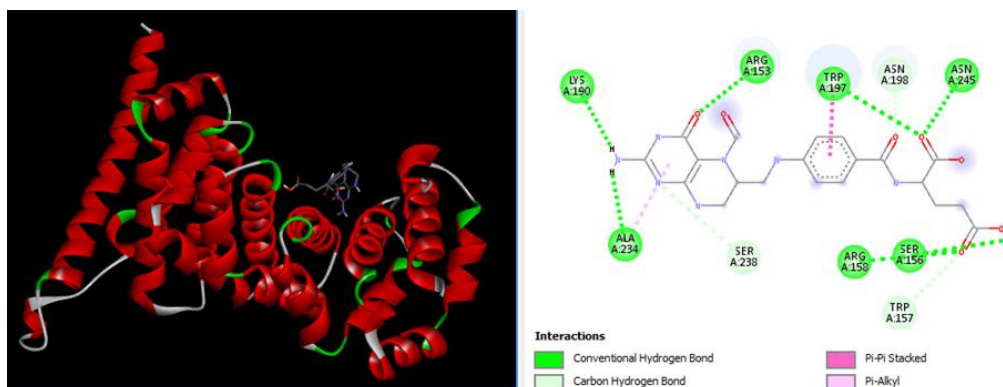


Figure 4. Folinic acid binding to APC protein, presenting crucial interactions.

Among the natural compounds, withaferin A showed the highest binding energy of -8.5 kcal/mol at the 50x50x50 grid box size, indicating a strong and stable interaction with the APC protein. Withaferin A formed six hydrogen bonds with the APC protein, with bond lengths ranging from 2.12 to 3.14 Å. An important interaction included a hydrogen bond between the oxygen of ARG153 and withaferin A, measuring 2.5 Å (Figure 5).

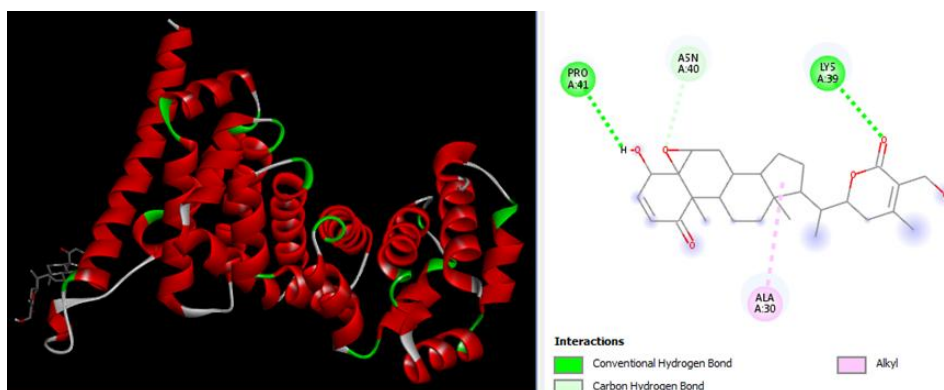


Figure 5. Withaferin A binding to APC protein, showing detailed interaction plots.

EGCG exhibited a binding energy of -7.8 kcal/mol at both the 60x60x60 and 70x70x70 grid box sizes, suggesting good binding affinity. EGCG established ten hydrogen bonds with the APC protein, with bond lengths ranging from 2.27 to 2.94 Å. A key interaction involved a hydrogen bond between the oxygen of TRP157 and EGCG, measuring 2.7 Å (Figure 6).

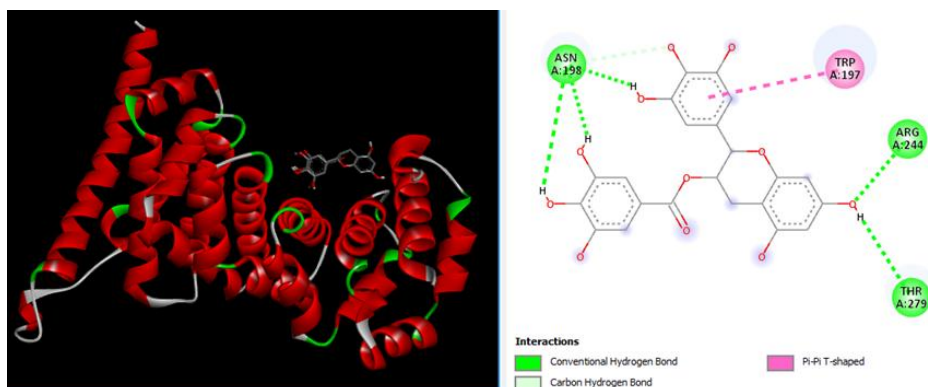


Figure 6. EGCG binding to APC protein, highlighting polar and hydrophobic interactions.

Ganoderiol A exhibited a binding energy of -7.9 kcal/mol at the 60x60x60 grid box size, which is also significant and comparable to the binding energies of conventional drugs. Ganoderiol A formed nine hydrogen bonds with the APC protein, with bond lengths ranging from 1.92 to 2.95 Å. A significant interaction was observed between the oxygen of ARG67 and the ligand, measuring 2.49 Å (Figure 7).

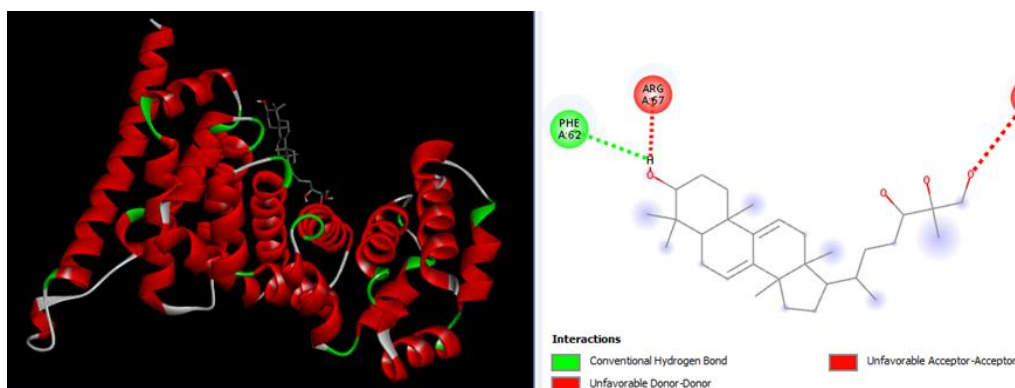


Figure 7. Ganoderiol A binding to APC protein, depicting key hydrogen bonds.

The compounds investigated include Withaferin A, EGCG, and Ganoderiol A, and we compared them to traditional chemotherapy agents such as Irinotecan and Folinic acid. The studied parameters, such as pharmacokinetics, drug similarity, water solubility, and physicochemical properties, are shown in Table 3.

Table 3. Comparative analysis of water solubility, pharmacokinetics, and druglikeness of selected compounds.

Ligand name	Water Solubility		Pharmacokinetics		Druglikeness			
	Log S (ESOL)	Log S (Ali)	GI adsorption	BBB permeant	Lipinski	Ghose	Veber	Egan
Irinotecan	-2.99	-2.25	High	No	Yes	No	Yes	Yes
Folinic acid	-0.63	-1.61	Low	No	No	No	No	No
WithaferinA	-4.98	-5.54	High	No	Yes	No	Yes	Yes
Epigallocatechin Gallate	-0.83	-0.89	Low	No	No	No	No	No
Ganoderiol A	-6.58	-8.11	High	No	Yes	No	Yes	Yes

The molecular weights of the natural compounds range from 472.61 g/mol (Withaferin A) to 478.75 g/mol (Ganoderiol A), which are slightly lower than those of the traditional drugs, particularly Irinotecan (597.77 g/mol). Water solubility, indicated by Log S (ESOL) and Log S (Ali), shows that all the natural compounds are less soluble in water compared to Folinic acid, with Ganoderiol A having the least solubility among them (Yalcin, 2020).

From a pharmacokinetic perspective, both Withaferin A and Ganoderiol A demonstrate high gastrointestinal (GI) absorption, similar to Irinotecan, suggesting good oral bioavailability potential for these natural agents. In terms of blood-brain barrier (BBB) permeation, none of the compounds, including both traditional and natural, are predicted to cross the BBB, indicating limited central nervous system side effects (El Fadili et al., 2022; Yalcin, 2020).

When assessing drug-likeness using Lipinski's rule, all compounds except Folinic acid conform to Lipinski's criteria, suggesting good oral bioavailability. Further analysis using the Ghose, Veber, and Egan filters indicates that Withaferin A and Ganoderiol A satisfy all three filters, highlighting their strong druglikeness potential. EGCG does not meet Ghose's criteria, and Folinic acid only conforms to Lipinski's rule (Moshawih et al., 2022). In summary, the analysis suggests that Withaferin A and Ganoderiol A are promising candidates for further investigation as colorectal cancer treatments. Their physicochemical properties, pharmacokinetics, and druglikeness profiles compare favorably to traditional agents, highlighting their potential as natural alternatives in therapeutic applications (El-Mernissi et al., 2024).

3.2. Molecular Dynamics Simulation Analysis

Within the scope of this study, a 50 ns molecular dynamics simulation was conducted to highlight the therapeutic effect of the ligands and their interaction with the protein. As a result of the simulation, RMSD, RMSF, RDF, and Rg graphs (Figure 8-11) were obtained.

RMSD - analyzes the mean square deviations of the changes in the positions of a protein or receptor-ligand complex structure with reference to the starting points of the atoms of a particular molecule (Akash et al., 2024). Due to RMSD graphs, the structural stability of receptor-ligand complexes, binding affinities and changing conformational properties of the complex are examined (Chen et al., 2023). When the RMSD graphs of the complexes consisting of the APC protein and the ligands EGCG folinic acid, ganoderiol A, irinotecan, and withaferin A shown in Figure 8 are examined, the fact that the RMSD values of all ligand complexes are between 0.75 and 1.75 nm indicates that generally good data are obtained. The average RMSD values of the receptor complex formed with the EGCG ligand during the 25 ns simulation are around 0.5 to 0.6 nm. These values show that the complex structure formed with the EGCG ligand and APC protein is quite stable. Sharp peaks were observed in this complex at 13 and 21 ns, but since there is not much increase in value in these peaks on a nm basis, it does not lose its stability. The RMSD graphs of the complex structures formed with folinic acid and withaferin A ligands are quite similar to each other. While the average RMSD values of the complex structure formed with folinic acid are 0.6 nm, the withaferin A complex is around 0.7 nm. It can be seen that these two different ligand complexes fluctuate from time to time throughout the simulation. This shows that some conformational changes occur while the receptor and ligands bind to each other (Akash et al., 2024; Chen et al., 2023). The complex structure formed with the APC protein and the irinotecan ligand shows a more irregular and unstable graph compared to other ligand complexes. The average RMSD values of this complex are around 1.30 nm, and higher data were obtained than the RMSD values of other complexes. The fact that the irinotecan complex graph fluctuates and peaks throughout the simulation shows that the ligand and the receptor undergo conformational changes and form an unstable complex structure (Chen et al., 2023). In addition, the complex formed with the ganoderiol A ligand shows the best results compared to all ligand complexes. The RMSD values obtained throughout the simulation range between 0.2 and 0.3 nm and have the lowest RMSD values. Its graphical appearance remained very stable, showing almost no fluctuation, especially after 0.18 ns. Among these ligands, ganoderiol A forms the best and most stable complex structure with the APC protein. This situation creates a good impression in terms of research on the ganoderiol A ligand for the treatment of colorectal cancer and its use as an alternative medicine (Ye et al., 2023).

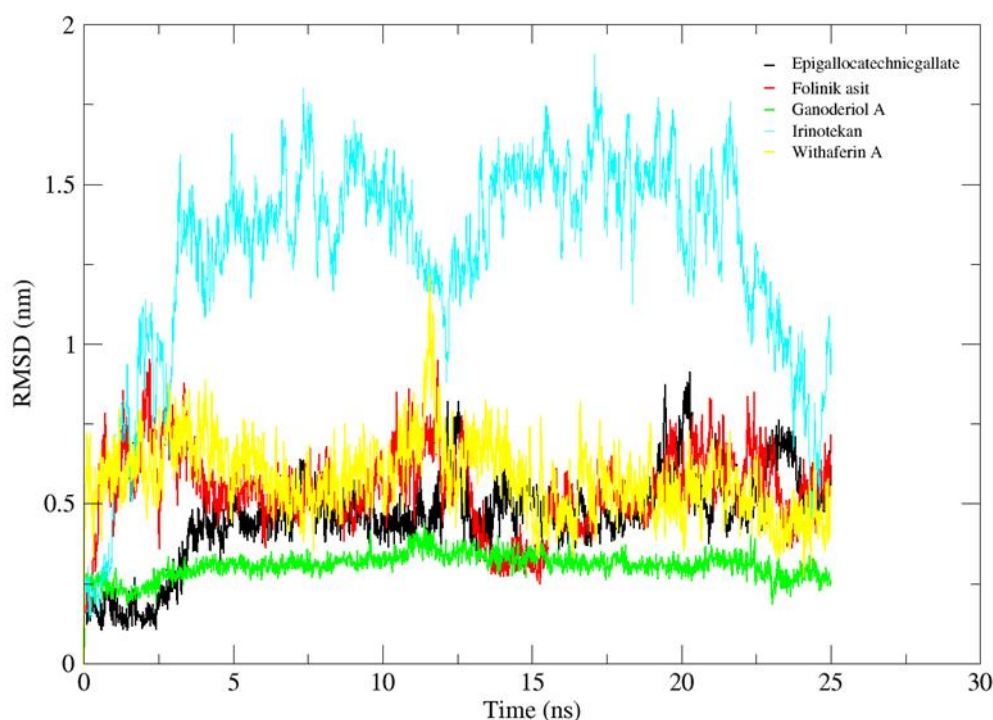


Figure 8. RMSD graph between the backbone of the receptor and ligands of epigallocatechin gallate, folinik asit, ganoderiol A, irinotekan and, withaferin A, respectively.

RMSF analyzes the movement and flexibility of atoms or molecules by measuring the deviations of their average positions relative to the reference structure (Akash et al., 2024). Within the scope of molecular dynamics simulation, RMSF graphs are used to examine the flexibility of the protein and ligand complex, the conformational changes that occur in the receptor, ligand, and binding region during ligand binding, and to examine the effects of mutations in the structure, if any (Chen et al., 2023). When the RMSF graphs of the APC receptor and five different ligand complexes in Figure 9 are examined, generally similar graphs are seen. RMSF values of the EGCG complex are generally below 0.2 nm. This shows that the EGCG ligand binds to the receptor in a compact manner and is quite stable. In general, all ligand complexes showed graph values extending to 0.6 nm at 800 to 1000 atoms, as in the case of the EGCG ligand. The reason for this difference can be interpreted as this region of the receptor having a dynamic function (Skariyachan et al., 2020). When the RMSF graphs of other ligand complexes formed with the APC receptor are examined, the average RMSF values of all complexes are 0.2 nm and below. The fact that the values of these ligands are so low and there is not much fluctuation in the RMSF graphs obtained shows that the ligands bind tightly to the receptor and form a stable structure (Akash et al., 2024). When the RMSF graphs are examined, it is generally observed that these natural ligands form a stable structure with the APC receptor, which is associated with colorectal cancer. Therefore, they show promise as therapeutic natural agents in the treatment of colorectal cancer (Ye et al., 2023). However, it should be taken into consideration that the RMSF values increase in atoms around 800 to 1000 and 4600 in all ligand complexes and that the structures

undergo conformational changes in certain regions (Wankowicz, de Oliveira, Hogan, van den Bedem, & Fraser, 2022).

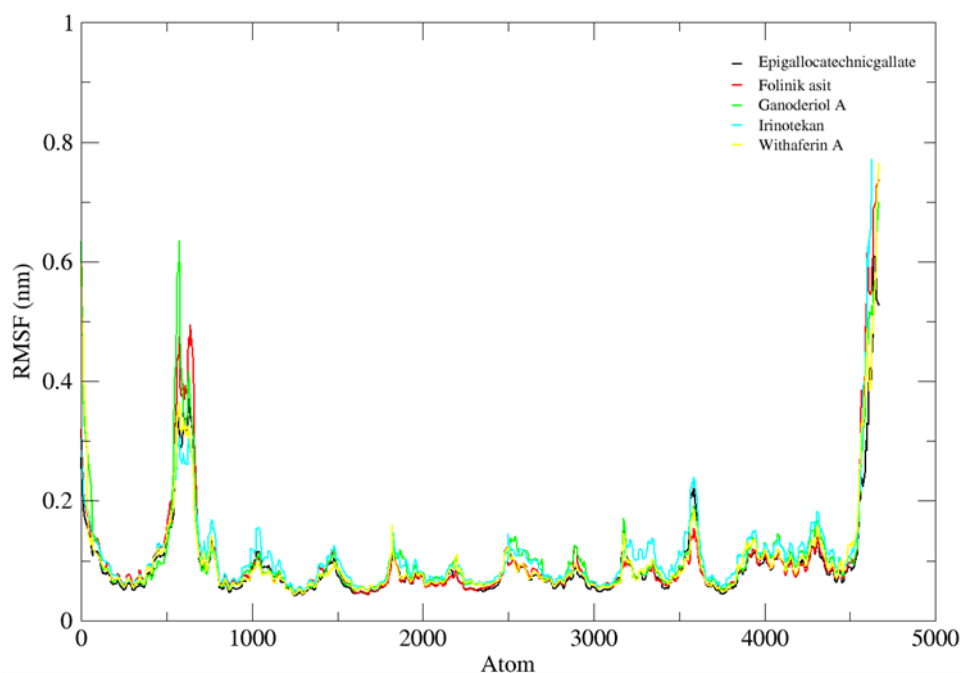


Figure 9. RMSF graph between the backbone of the receptor and ligands of epigallocatechin gallate, folinik asit, ganoderiol A, irinotekan, and withaferin A, respectively.

The term Radial Distribution Function (RDF) represents the average density of a reference molecule or atom of other molecules and atoms at a certain distance (Saha et al., 2024). This type of function is used in molecular dynamics simulations to analyze the distribution and concentration behavior of the ligand at certain distances in receptor-ligand complexes (Shariatnia & Mazloom-Jalali, 2020). When the RDF graphs of the complexes obtained with the APC receptor and the ligands EGCG, folinic acid, ganoderiol A, irinotekan, and withaferin A in Figure 10 are examined, sharp peaks are generally not seen. However, the peak values are generally at 1 nm and higher. This shows that the ligands bind to the receptor compactly at these peak values (Saha et al., 2024). When the RDF values of the EGCG complex are examined, it is seen that this ligand has a tight binding feature with the protein and a high density around 1.5 nm. Although folinic acid does not have a sharp peak, its RDF values, where it binds strongly to the receptor, are between 1 and 2 nm. The ganoderiol A ligand complex gives clearer results compared to other ligands. The peak is around 1.2 nm and shows the highest RDF value. Its high RDF value indicates that it binds to the APC receptor in a very strong and stable structure (Shariatnia & Mazloom-Jalali, 2020). The RDF values of irinotekan and withaferin A ligand complexes are much lower than other ligand complexes. This indicates that these ligands bind less stable and weakly to the receptor (Saha et al., 2024). However, these values are generally average. The reason why ligands do not have sharp peaks in RDF graphs may be due to

their structures. In addition, factors such as ligands interacting on a wide surface in different regions of the receptors, flexible structures, or multiple binding modes may also cause this situation (Saha et al., 2024; Shariatinia & Mazloom-Jalali, 2020). As a result, ganoderiol A ligand gave the best RDF value and graph for the APC receptor.

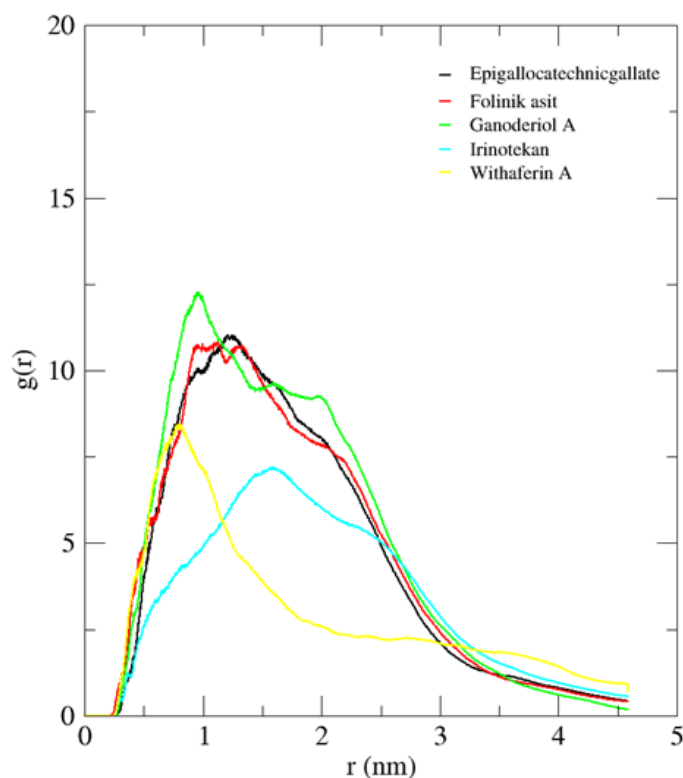


Figure 10. RDF graph between the backbone of the receptor and ligands of epigallocatechin gallate, folinik asit, ganoderiol A, irinotekan and, withaferin A, respectively.

Rg measures the average distance of the atoms to be calculated from the center of mass of a molecule structure (Rampogu, Lee, Park, Lee, & Kim, 2022). Within the scope of molecular dynamics simulation, Rg plots are used to analyze the stability and compactness of the protein-ligand complex structure (Hephzibah Cathryn & George Priya Doss, 2023). While low Rg values indicate that the complex structure is stable and compact, high Rg values indicate that the binding affinities of the protein and ligand are not stable (Justino, Nascimento, & Justino, 2021).

When the RG graphs of the APC receptor and five different ligand complexes in Figure 11 are examined, it was stated that all ligand complex structures generally exhibit low and stable values. The RG value of each ligand complex with the APC gene remains approximately 2.3 nm throughout the simulation. This indicates that each ligand, whether natural or chemical, forms a compact complex with the APC gene. A minimal increase in RG value after 15000 ps suggests that the ligand structure is attempting to find optimal stability on the receptor. Data obtained from graphs such as RG are crucial for determining the structural stability of natural agents with potential as therapeutic drugs in

the treatment of serious diseases, such as colorectal cancer. Identifying the most stable natural ligand complexes with the lowest RG values highlights the potential of these natural ligands as drug candidates (Rampogu et al., 2022). In general, while each ligand-receptor complex structure shows high compactness in the RG graphs, naturally derived EGCG was found to be as robust as the chemical drugs used in colorectal cancer treatment, along with complexes formed with the natural ligands Ganoderiol A and Withaferin A. These ligands can be selected as natural agents with therapeutic potential for the treatment of colorectal cancer and can guide research on new drugs derived from natural sources.

When the results of this literature study were compared with previous studies, it was observed that ligands such as Withaferin A, EGCG, and Irinotecan have been subjected to molecular docking studies on different receptors. In a study utilizing the ligand Withaferin A, its anti-cancer, anti-diabetic, and cholesterol-lowering effects were investigated. Specifically, Mortalin (HSPA9) with a PDB ID of 4KBO and Nrf2 (NFE2L2) with a PDB ID of 2FLU were examined in the context of cancer. In this study, binding energies of -8.85 kcal/mol and -12.59 kcal/mol were found for the mortalin and Nrf2 receptors, respectively. The results for other diabetes-related receptors ranged from -7 to -5 kcal/mol (Surya Ulhas & Malaviya, 2023). Although there are studies in the literature on ligands such as Ganoderiol D and Ganodermanotriol, the cancer receptor related to the Ganoderiol A ligand has not been studied (Bharadwaj et al., 2020). In a different study, the effects of the EGCG ligand on liver cancer were investigated. To measure the binding affinity of the EGCG ligand, receptors including TNF (Tumor Necrosis Factor), ESR1 (Estrogen Receptor 1), BCL2 (B Cell Lymphoma 2), STAT3 (Signal Transducer and Activator), HIF1A (Hypoxia-Inducible Factor 1A), MMP9 (Matrix Metalloproteinase 9), HSP90AA1 (Heat Shock Protein 90kDa), MMP2 (Matrix Metalloproteinase 2), BRAF (B-Raf Proto-Oncogene), and PIK3CA (Phosphoinositide 3-Kinase Catalytic Subunit) were examined. In this study, binding energies were reported to be lower than -7.0 kcal/mol. This indicates that the EGCG ligand shows a much stronger affinity for the APC gene receptor compared to the results reported in the literature (Yang et al., 2024). Mahalekshmi et al. investigated the effect of the antineoplastic agent irinotecan on target proteins of colorectal cancer using molecular binding analyses. In this study, the Epidermal Growth Factor Receptor (EGFR), Matrix Metalloproteinase (MMP), Serine/Threonine Protein Kinase B (AKT1), BRAF, Tankyrase 1 (TNKS-1), and Tankyrase 2 (TNKS-2) receptors, with PDB IDs 1M17, 2DDY, 3O96, 4MNE, 5ECE, and 6KRO, respectively, were used as receptors. The molecular docking results were -8.70 kcal/mol for the AKT1 gene, -7.62 kcal/mol for TNKS-2, -6.52 kcal/mol for MMP, -5.68 kcal/mol for EGFR, -4.34 kcal/mol for TNKS-1, and -3.54 kcal/mol for BRAF. The results of this literature study indicate that the APC gene and irinotecan form a protein-ligand complex with a strong interaction, with a binding energy of -8.5 kcal/mol (Vallikondaperumal et al., 2023). Overall, in this study conducted

with the APC gene, natural and chemical-based ligands showed similar or sometimes even better binding energies than those reported in the literature. However, since the gene receptors and crystal structures used in literature studies have different structural properties, such as distinct active site structures, surface properties, and amino acid sequences, it is expected that the binding energies obtained from molecular docking with the ligands will differ (C. J. Morris & Corte, 2021).

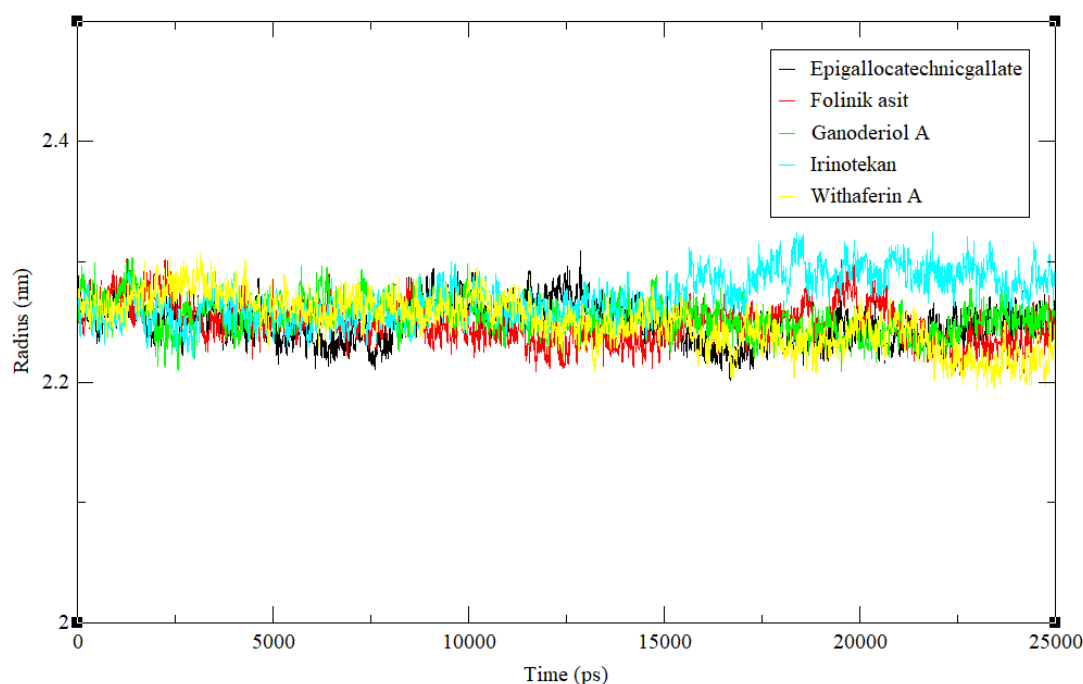


Figure 11. Rg graph between the backbone of the receptor and ligands of epigallocatechin gallate, folinik asit, ganoderiol A, irinotekan and, withaferin A, respectively.

As a result of all the analyses and data obtained within the scope of this study, it was concluded that natural agents are very good potential drug candidates for the treatment of colorectal cancer. These natural agents have fewer side effects, unlike chemical drugs, and will be a ray of hope for many literature studies, especially on colorectal cancer. The main purpose of this study is to investigate compounds with potential therapeutic properties predicted for the APC protein using various molecular modeling approaches, such as molecular docking and dynamic simulation, within an in silico environment. Computational approaches, such as molecular modeling, are employed to assess the drug potential of compounds prior to experimental validation. These methods offer significant advantages in terms of time and cost efficiency before advancing to experimental stages. Furthermore, computational studies conducted in an in silico environment support sustainability and eco-friendly practices by minimizing the consumption of materials and waste typically associated with laboratory experiments. Therefore, analyzing the interactions and pharmacological properties of

the APC protein and its ligands in an *in silico* environment is crucial for enhancing the efficiency of experimental studies and establishing a robust foundation for subsequent biological validation.

4. Conclusions and Recommendations

This study comprehensively evaluated the potential of natural compounds as alternatives to conventional drugs for colorectal cancer treatment, specifically targeting the APC protein. The analysis included both traditional chemotherapeutic agents, irinotecan and folinic acid, and natural compounds such as withaferin A, EGCG, and ganoderiol A. Using molecular docking studies, the binding affinities of these compounds to the APC protein were assessed, revealing that both natural and conventional drugs exhibited strong interactions.

Irinotecan, which has the best binding affinity score (-8.5 kcal/mol), has proven its anticancer effectiveness in the treatment of colorectal cancer by forming stable hydrogen bonds with the APC protein selected as the receptor. Folinic acid also showed significant binding, supporting its role as a chemotherapeutic adjunct. Among the natural compounds, withaferin A displayed binding affinity comparable to irinotecan, highlighting its potential as a potent therapeutic agent. EGCG and ganoderiol A also formed stable interactions, indicating their promise in cancer treatment.

The SwissADME tool provided valuable predictions of pharmacokinetic properties and drug-likeness. The natural compounds exhibited favorable pharmacokinetic profiles and adhered to Lipinski's rule of five, indicating good oral bioavailability. Withaferin A and ganoderiol A satisfied additional drug-likeness filters (Ghose, Veber, and Egan), reinforcing their suitability as drug candidates. Molecular dynamics simulations further confirmed the stability of the protein-ligand complexes, particularly for withaferin A and ganoderiol A.

The integration of these computational methods offers a robust framework for identifying promising natural compounds for cancer therapy. The results underscore the potential of withaferin A and ganoderiol A as effective alternatives to conventional chemotherapeutic agents, potentially offering treatments with fewer side effects. These findings highlight the importance of continued exploration of natural compounds in oncology, paving the way for innovative and effective therapeutic strategies.

Future research should focus on *in vivo* studies and clinical trials to validate these computational findings. Investigating the efficacy, safety, and mechanistic pathways of these natural compounds in biological systems will be crucial. Moreover, exploring the combinatorial effects of these natural agents with existing chemotherapies could provide insights into synergistic treatment approaches. The promising results from this study lay a strong foundation for further investigation

and development of natural compounds, potentially revolutionizing colorectal cancer treatment protocols and improving patient outcomes.

Acknowledgements

Computing resources used in this work for molecular docking and MD simulations were totally provided by the National Center for High Performance Computing of Turkey (UHem) under grant numbers 1013972022 and 4016782023.

Authors' Contributions

Deniz Karataş: Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Validation, Supervision, Software, Investigation, Formal analysis, Resources, Data curation. **Nil Sazlı & Eda Arabacı:** Writing – review & editing, Validation, Investigation, Methodology.

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

- Akash, S., Islam, M. R., Bhuiyan, A. A., Islam, M. N., Bayil, I., Saleem, R. M., . . . Abdel-Daim, M. M. (2024). In silico evaluation of anti-colorectal cancer inhibitors by Resveratrol derivatives targeting Armadillo repeats domain of APC: molecular docking and molecular dynamics simulation. *Front Oncol*, 14, 1360745. doi: 10.3389/fonc.2024.1360745
- Bharadwaj, S., Lee, K. E., Dwivedi, V. D., Yadava, U., Nees, M., & Kang, S. G. (2020). Density functional theory and molecular dynamics simulation support Ganoderma lucidum triterpenoids as broad range antagonist of matrix metalloproteinases. *Journal of Molecular Liquids*, 311. doi: 10.1016/j.molliq.2020.113322
- Bontempo, P., De Masi, L., & Rigano, D. (2023). Functional Properties of Natural Products and Human Health. *Nutrients*, 15(13). doi: 10.3390/nu15132961
- Chaachouay, N., & Zidane, L. (2024). Plant-Derived Natural Products: A Source for Drug Discovery and Development. *Drugs and Drug Candidates*, 3(1), 184-207. doi: 10.3390/ddc3010011
- Chen, D., Chen, Y., Huang, F., Zhang, X., Zhou, Y., & Xu, L. (2023). The underlying regulatory mechanisms of colorectal carcinoma by combining Vitexin and Aspirin: based on systems biology, molecular docking, molecular dynamics simulation, and in vitro study. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 14, 1147132. doi: 10.3389/fendo.2023.1147132

- Chicurel, M. (2002). Putting a name on it. *Nature*, 419(6908), 755, 757. doi: 10.1038/419755a
- Choi, B. Y., & Kim, B. W. (2015). Withaferin-A Inhibits Colon Cancer Cell Growth by Blocking STAT3 Transcriptional Activity. *J Cancer Prev*, 20(3), 185-192. doi: 10.15430/JCP.2015.20.3.185
- Daina, A., Michielin, O., & Zoete, V. (2017). SwissADME: a free web tool to evaluate pharmacokinetics, drug-likeness and medicinal chemistry friendliness of small molecules. *Sci Rep*, 7, 42717. doi: 10.1038/srep42717
- Dar, R. A., Shah Nawaz, M., Ahanger, M. A., & Majid, I. u. (2023). Exploring the Diverse Bioactive Compounds from Medicinal Plants: A Review. *The Journal of Phytopharmacology*, 12(3), 189-195. doi: 10.31254/phyto.2023.12307
- El-Mernissi, R., Khaldan, A., Bouamrane, S., Rehman, H. M., Alaqarbeh, M., Ajana, M. A., . . . Bouachrine, M. (2024). 3D-QSAR, molecular docking, simulation dynamic and ADMET studies on new quinolines derivatives against colorectal carcinoma activity. *J Biomol Struct Dyn*, 42(7), 3682-3699. doi: 10.1080/07391102.2023.2214233
- El Fadili, M., Er-Rajy, M., Kara, M., Assouguem, A., Belhassan, A., Alotaibi, A., . . . Elhallaoui, M. (2022). QSAR, ADMET In Silico Pharmacokinetics, Molecular Docking and Molecular Dynamics Studies of Novel Bicyclo (Aryl Methyl) Benzamides as Potent GlyT1 Inhibitors for the Treatment of Schizophrenia. *Pharmaceuticals (Basel)*, 15(6). doi: 10.3390/ph15060670
- Gao, J. J., Hirakawa, A., Min, B. S., Nakamura, N., & Hattori, M. (2005). In vivo antitumor effects of bitter principles from the antlered form of fruiting bodies of *Ganoderma lucidum*. *Journal of Natural Medicines*, 60(1), 42-48. doi: 10.1007/s11418-005-0003-5
- Gmeiner, W. H. (2024). Recent Advances in Therapeutic Strategies to Improve Colorectal Cancer Treatment. *Cancers (Basel)*, 16(5). doi: 10.3390/cancers16051029
- Guru, P. R., Kar, R. K., Nayak, A. K., & Mohapatra, S. (2023). A comprehensive review on pharmaceutical uses of plant-derived biopolysaccharides. *Int J Biol Macromol*, 233, 123454. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123454
- Han, B., Zhai, Y., Li, X., Zhao, H., Sun, C., Zeng, Y., . . . Kai, G. (2023). Total flavonoids of *Tetrastigma hemsleyanum* Diels et Gilg inhibits colorectal tumor growth by modulating gut microbiota and metabolites. *Food Chem*, 410, 135361. doi: 10.1016/j.foodchem.2022.135361
- Hephzibah Cathryn, R., & George Priya Doss, C. (2023). Comparative molecular dynamics simulation of apo and holo forms of the P53 mutant C176F: a structural perspective. *Journal of Taibah University for Science*, 18(1). doi: 10.1080/16583655.2023.2297457
- Justino, G. C., Nascimento, C. P., & Justino, M. C. (2021). Molecular dynamics simulations and analysis for bioinformatics undergraduate students. *Biochem Mol Biol Educ*, 49(4), 570-582. doi: 10.1002/bmb.21512
- Kinzler, K. W., & Vogelstein, B. (1996). Lessons from hereditary colorectal cancer. *Cell*, 87(2), 159-170. doi: 10.1016/s0092-8674(00)81333-1
- Li, B., Zhang, G., & Xu, X. (2023). APC mutation correlated with poor response of immunotherapy in colon cancer. *BMC Gastroenterol*, 23(1), 95. doi: 10.1186/s12876-023-02725-3
- Macharia, J. M., Kaposztas, Z., & Bence, R. L. (2023). Medicinal Characteristics of *Withania somnifera* L. in Colorectal Cancer Management. *Pharmaceuticals (Basel)*, 16(7). doi: 10.3390/ph16070915
- Morris, C. J., & Corte, D. D. (2021). Using molecular docking and molecular dynamics to investigate protein-ligand interactions. *Modern Physics Letters B*, 35(08). doi: 10.1142/s0217984921300027
- Morris, G. M., Huey, R., Lindstrom, W., Sanner, M. F., Belew, R. K., Goodsell, D. S., & Olson, A. J. (2009). AutoDock4 and AutoDockTools4: Automated docking with selective receptor flexibility. *Journal of Computational Chemistry*, 30(16), 2785-2791. doi: 10.1002/jcc.21256
- Moshawih, S., Lim, A. F., Ardianto, C., Goh, K. W., Kifli, N., Goh, H. P., . . . Ming, L. C. (2022). Target-Based Small Molecule Drug Discovery for Colorectal Cancer: A Review of Molecular Pathways and In Silico Studies. *Biomolecules*, 12(7). doi: 10.3390/biom12070878
- Nasir, A., Bullo, M. M. H., Ahmed, Z., Imtiaz, A., Yaqoob, E., Jadoon, M., . . . Yaqoob, S. (2020). Nutrigenomics: Epigenetics and cancer prevention: A comprehensive review. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 60(8), 1375-1387. doi: 10.1080/10408398.2019.1571480
- Olkinuora, A. P., Peltomaki, P. T., Aaltonen, L. A., & Rajamaki, K. (2021). From APC to the genetics of hereditary and familial colon cancer syndromes. *Hum Mol Genet*, 30(R2), R206-R224. doi: 10.1093/hmg/ddab208
- Peng, H., Ying, J., Zang, J., Lu, H., Zhao, X., Yang, P., . . . Wang, Z. (2023). Specific Mutations in APC, with Prognostic Implications in Metastatic Colorectal Cancer. *Cancer Res Treat*, 55(4), 1270-1280. doi: 10.4143/crt.2023.415

- Pettersen, E. F., Goddard, T. D., Huang, C. C., Couch, G. S., Greenblatt, D. M., Meng, E. C., & Ferrin, T. E. (2004). UCSF Chimera--a visualization system for exploratory research and analysis. *Journal of Computational Chemistry*, 25(13), 1605-1612. doi: 10.1002/jcc.20084
- Polakis, P. (2007). The many ways of Wnt in cancer. *Curr Opin Genet Dev*, 17(1), 45-51. doi: 10.1016/j.gde.2006.12.007
- Qawoogha, S. S., & Shahiwala, A. (2020). Identification of potential anticancer phytochemicals against colorectal cancer by structure-based docking studies. *J Recept Signal Transduct Res*, 40(1), 67-76. doi: 10.1080/10799893.2020.1715431
- Rampogu, S., Lee, G., Park, J. S., Lee, K. W., & Kim, M. O. (2022). Molecular Docking and Molecular Dynamics Simulations Discover Curcumin Analogue as a Plausible Dual Inhibitor for SARS-CoV-2. *Int J Mol Sci*, 23(3). doi: 10.3390/ijms23031771
- Saha, P., Hegde, M., Chakraborty, K., Singha, A., Mukerjee, N., Ghosh, D., . . . Sil, S. K. (2024). Targeted inhibition of colorectal cancer proliferation: The dual-modulatory role of 2,4-DTBP on anti-apoptotic Bcl-2 and Survivin proteins. *J Cell Mol Med*, 28(7), e18150. doi: 10.1111/jcmm.18150
- Shailes, H., Tse, W. Y., Freitas, M. O., Silver, A., & Martin, S. A. (2022). Statin Treatment as a Targeted Therapy for APC-Mutated Colorectal Cancer. *Front Oncol*, 12, 880552. doi: 10.3389/fonc.2022.880552
- Shariatnia, Z., & Mazloom-Jalali, A. (2020). Molecular dynamics simulations on chitosan/graphene nanocomposites as anticancer drug delivery using systems. *Chinese Journal of Physics*, 66, 362-382. doi: 10.1016/j.cjph.2020.04.012
- Siegel, R. L., Miller, K. D., & Jemal, A. (2020). Cancer statistics, 2020. *CA Cancer J Clin*, 70(1), 7-30. doi: 10.3322/caac.21590
- Skariyachan, S., Gopal, D., Chakrabarti, S., Kempanna, P., Uttarkar, A., Muddebihalkar, A. G., & Niranjan, V. (2020). Structural and molecular basis of the interaction mechanism of selected drugs towards multiple targets of SARS-CoV-2 by molecular docking and dynamic simulation studies- deciphering the scope of repurposed drugs. *Comput Biol Med*, 126, 104054. doi: 10.1016/j.combiomed.2020.104054
- Surya Ulhas, R., & Malaviya, A. (2023). In-silico validation of novel therapeutic activities of withaferin a using molecular docking and dynamics studies. *J Biomol Struct Dyn*, 41(11), 5045-5056. doi: 10.1080/07391102.2022.2078410
- Vallikondaperumal, M., N, B., T. V, A. K., & V, P. (2023). In Silico Molecular Screening and Docking Approaches on Antineoplastic Agent-Irinotecan Towards the Marker Proteins of Colon Cancer. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, 84-92. doi: 10.22159/ijap.2023v15i5.48523
- Wahnou, H., Liagre, B., Sol, V., El Attar, H., Attar, R., Oudghiri, M., . . . Limami, Y. (2023). Polyphenol-Based Nanoparticles: A Promising Frontier for Enhanced Colorectal Cancer Treatment. *Cancers (Basel)*, 15(15). doi: 10.3390/cancers15153826
- Wankowicz, S. A., de Oliveira, S. H., Hogan, D. W., van den Bedem, H., & Fraser, J. S. (2022). Ligand binding remodels protein side-chain conformational heterogeneity. *Elife*, 11. doi: 10.7554/eLife.74114
- Yadav, M., Abdalla, M., Madhavi, M., Chopra, I., Bhirdwaj, A., Soni, L., . . . Singh, S. K. (2022). Structure-Based Virtual Screening, Molecular Docking, Molecular Dynamics Simulation and Pharmacokinetic modelling of Cyclooxygenase-2 (COX-2) inhibitor for the clinical treatment of Colorectal Cancer. *Molecular Simulation*, 48(12), 1081-1101. doi: 10.1080/08927022.2022.2068799
- Yalcin, S. (2020). Molecular Docking, Drug Likeness, and ADMET Analyses of Passiflora Compounds as P-Glycoprotein (P-gp) Inhibitor for the Treatment of Cancer. *Current Pharmacology Reports*, 6(6), 429-440. doi: 10.1007/s40495-020-00241-6
- Yang, J., He, K., Zhang, M., Wu, L., Qin, S., Luo, M., & Xia, X. (2024). Unveiling the therapeutic potential of epigallocatechin gallate in liver cancer: insights from network pharmacology and in vitro assays. *Nat Prod Res*, 1-5. doi: 10.1080/14786419.2024.2384083
- Ye, T., Ge, Y., Jiang, X., Song, H., Peng, C., & Liu, B. (2023). A review of anti-tumour effects of Ganoderma lucidum in gastrointestinal cancer. *Chin Med*, 18(1), 107. doi: 10.1186/s13020-023-00811-y
- Zhang, M., Cheng, S., Jin, Y., Zhao, Y., & Wang, Y. (2021). Roles of CA125 in diagnosis, prediction, and oncogenesis of ovarian cancer. *Biochim Biophys Acta Rev Cancer*, 1875(2), 188503. doi: 10.1016/j.bbcan.2021.188503
- Zrinej, J., Elmchichi, L., Alaqarbeh, M., Lakhliifi, T., & Bouachrine, M. (2023). Computational approach: 3D-QSAR, molecular docking, ADMET, molecular dynamics simulation investigations, and retrosynthesis of some curcumin analogues as PARP-1 inhibitors targeting colon cancer. *New Journal of Chemistry*, 47(45), 20987-21009. doi: 10.1039/d3nj03981a

Kadastro, Tescil ve Planlama İlişkisinin Yeniden Yorumlanması: Tescil Dışı Alanların İhyası

Bayram UZUN¹, Volkan YILDIRIM², Fatih TERZİ³, Bura Adem ATASOY⁴,
Miraç YILMAZ^{5*}

Öz

Gelişmekte olan ülkelerde, yerel yönetimlerin yaşadığı ekonomik sıkıntılar yeni kaynak arayışlarını gündeme getirmektedir. Tescil dışı alanlar, ekonomik gelir potansiyeli taşıyan önemli kaynaklardır. Ancak bugüne kadar bu alanlar etkin biçimde değerlendirilmemiştir. İmar planlarında yapılan ilave ve revizyon işlemleri sonrasında planın bütünlüğün sağlanmasında önemli bir role sahiptir. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) tabanlı sistemler, bu alanların hassas biçimde tespit edilmesi ve ekonomiye kazandırılması için yeterli değildir. Bu alanların imar planı ve kadastro verileri üzerinden tespit edilmesi, tek elden yönetilmesi ve karar alma süreçlerinin sürdürülebilirliğinin sağlanması için Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Gerçekleştirilen çalışma ile revizyon imar planı çalışması yapılan ve parselasyon planları tamamlanmış çalışma bölgelerinde, tescil dışı alanların CBS destekli yenilikçi bir yaklaşım ile tespit edilmesi hedeflenmektedir. Böylelikle kamuya ekonomik kaynak oluşturulması amaçlanmaktadır. Çalışma ile 1.943 adet tescil dışı alan belirlenmiştir. Elde edilen bulgular örnek bir tescil dışı alan üzerinde somutlaştırılmıştır. İlgili alanların değerleri tespit edilerek kıyaslanmış ve sonuçları ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Arazi yönetimi, Tescil dışı alanlar, Yerel yönetimler, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS).

Reinterpreting the Cadastre–Registration–Planning Relationship: Redevelopment of Unregistered Areas

Abstract

In developing countries, the economic challenges faced by local governments have prompted the search for alternative resources. Unregistered areas represent significant sources of potential economic revenue. However, these areas have not been effectively utilized to date. They play a critical role in maintaining the integrity of zoning plans following additional and revision planning processes. Computer-Aided Design (CAD)-based systems are insufficient for the precise identification and economic utilization of these areas. There is a need for Geographic Information Systems (GIS) technologies to identify such areas based on zoning and cadastral data, to manage them centrally, and to support sustainable decision-making processes. This study aims to identify unregistered areas through an innovative GIS-supported approach within regions where revision zoning plans have been prepared and subdivision plans have been completed. The ultimate goal is to generate economic resources for the public sector. In total, 1,943 unregistered areas were identified in the study. The findings were exemplified through a specific unregistered area, and the values of the identified areas were determined, compared, and presented.

Keywords: Land management, Unregistered areas, Local governments, Geographic Information Systems (GIS).

^{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

³Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği ABD, Trabzon, Türkiye, fatihterzi@ktu.edu.tr

⁵Ortahisar Belediyesi, İmar ve Şehircilik Müdürlüğü, İmar Uygulamaları Birimi, Trabzon, Türkiye, yilmazmirachm@gmail.com

²GISLand Bilişim Ticaret Ltd. Şti., Trabzon Teknoloji Geliştirme Bölgesi, Trabzon Teknokent, Trabzon, Türkiye.

^{1,2,3,4}Karadeniz Teknik Üniversitesi, Coğrafi Bilgi Sistemleri Ar-Ge Lab, Arazi ve Arsa Düzenlemesi Çalışma Grubu, Trabzon, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Günümüzde hızla artan dünya nüfusu, yerleşim alanlarında hizmet ve altyapı sorunlarını beraberinde getirmektedir (Güler ve Ertaş, 2022). Kentsel alanlardaki nüfus yoğunluğu, doğru şekilde yönetilemediğinde düzensiz yapılaşmalara yol açmaktadır. Bu kontrolsüz yapılaşmalar, kentsel güvenlik, estetik, ulaşım ve altyapı sistemleri üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Yerel yönetimler bu olumsuzluklara bağlı olarak öngörülemeyen ekonomik kayıplarla karşı karşıya kalmaktadır. Ekonomik açıdan yaşanan bu kayıplar ise yeni ve daha karmaşık sorunları beraberinde getirmektedir. Sorunlara yönelik yeterli ve etkili çözüm yolları geliştirilememesi, şehir yönetiminde ciddi aksamalara neden olmaktadır. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde bu durum, kentleşme süreçlerini sekteye uğratmakta ve yönetim kapasitesini zayıflatmaktadır. Sürdürülebilir kent yönetiminin sağlanabilmesi için arazilerin hızlı ve planlı biçimde düzenlenmesi ve imar planlarına uygun hale getirilmesi büyük önem taşımaktadır (Uzun, 2009).

Gayrimenkul, bireylerin yaşamında önemli bir yer tutan temel varlıklardan biridir. Kentsel alanlarda arsa talebi her geçen gün artmakta ve bu durum yerel yönetimlerin arazi geliştirme süreçlerinde farklı perspektifler geliştirmesini zorunlu kılmaktadır. Gayrimenkul geliştirme süreci; mühendislik, şehir planlama, ekonomi ve hukuk gibi disiplinler arası bir yaklaşım gerektirir. Temel hedef, ekonomik olarak verimli projelerin hayata geçirilmesidir (Attila, 2010). Arazi geliştirme süreci ise bir arazinin bulunduğu yerin değerlendirilmesi, fiziksel olarak geliştirilmesi ve yapılaşmaya hazır hale getirilmesi gibi üç temel aşamadan oluşur. Bu sürecin sonunda ortaya çıkan nihai ürün, imar planları ve plan notlarına uygun bir yapılaşma kabiliyetine sahip arsalar (Ülger ve Baş Eray, 2003). Arazi geliştirme, gayrimenkul geliştirme sürecinin bir alt bileşeni olmakla birlikte, kentlerin fiziksel dönüşümünde önemli bir rol oynamaktadır (Yeh ve Wu, 1996, Peiser ve Hamilton, 2012). Kentsel arsa üretiminde imar uygulamaları temel araçlardan biridir. Parselasyon planları ile genellikle konut alanı üretimine uygun büyüklükte arsalar oluşturulmaktadır. Ancak jeolojik, topoğrafik ve fiziksel sınırlayıcılar ile sit ve koruma alanlarına ilişkin kararlar, imara açılacak arazi miktarını azaltmaktadır. Bu durum, hem yapılaşmaya uygun parsel sayısını hem de konut üretimini yetersiz hale getirmekte ve özellikle dar gelirli kesimlerin ruhsatsız arsa piyasasına yönelmesine neden olmaktadır (KENTGES, 2009). Arsa arzında yaşanan bu darboğaz karşısında mevcut imar uygulamaları beklenen çözümü sunamamaktadır. Bu nedenle daha yenilikçi ve çözüm odaklı yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır (Uzun ve ark., 2024).

Yerel yönetimler, planlama faaliyetleri aracılığıyla şehirleşme sürecinde doğrudan etkili aktörlerdir (Ekşi, 2018). Adams ve ark. (2013), bu kurumların hem düzenleyici hem de geliştirici roller üstlenebileceğini belirtmektedir. İmar planları, kentsel dönüşümü yönlendirirken geleceğe yönelik projeksiyonlar da sunar. Bu planların başarısı, kadastro parselleriyle olan uyumlarına

bağlıdır. Ancak planlama sürecinin sağlıklı işlemesi yalnızca teknik yaklaşımla değil, veri düzeyinde katılımcı bir anlayışla mümkündür. Parsel sınırları, mülkiyet yapısı ve fiziki-beşeri faktörlere ilişkin farkındalık, planların uygulanabilirliğini artırmaktadır. Revizyonlar sonucunda imar adası ve kadastro parsel sınırları arasındaki uyumun bozulması durumunda, planlı alanlar içinde tescil dışı alanlar oluşabilmektedir. Bu çalışma, imar uygulaması tamamlanmış, parselasyon planı tescil edilmiş ve beş yıllık imar programı dışında kalan alanlardaki tescil dışı sorunlara odaklanmaktadır.

İmar planı değişikliklerinin bilgi teknolojileriyle izlenmesi ve yönetilmesi, kadastro ve plan verilerinin uyumlu hale getirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu sayede, uygulama imar planına uygun tescil işlemleri yapılabilir ve atıl alanlar yeniden kullanıma kazandırılabilir. Sürecin etkinliği ise ancak bütüncül yapıya sahip bilgi sistemleriyle sağlanabilir. Uluslararası politika belgeleri, akademik çalışmalar ve güncel uygulamalar, şehircilik sorunlarının çözümünde Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) kullanımının gerekliliğine işaret etmektedir (Turek ve Stępnia, 2021; van Maarseveen ve ark., 2019; Scott ve Pajabifard, 2017; Çabuk, 2015; Stylianidis ve ark., 2012; Yomralıoğlu, 2009; Birleşmiş Milletler, 2001). CBS teknolojileri, yerel yönetimlerin hem görev alanlarında hem de şehircilik uygulamalarında daha etkin kullanılmalıdır (İşcan ve Ilgaz, 2017).

Bu çalışma kapsamında, arazi ve arsa üretimi, tescil dışı alanların tespiti, bu alanların değerlendirilmesi ve CBS'nin bu süreçlerdeki kullanımı üzerine ulusal ve uluslararası literatür incelenmiştir. Samancıoğlu (2021); çalışmada arazi toplulaştırma projelerinde sulak alanlar ve ekolojik koridorlar gibi ortak kullanım alan ihtiyaçlarının tescil dışı alanlardan karşılanabileceği önerilmektedir. Günakın (2019); orman ve mera niteliğinde tescil dışı alanlara ilişkin yürütülen çalışmalarda sorunları incelemiş ve çözüm önerileri getirmiştir. Kandemir ve Şaşkın (2019); Türkiye'de ekonomiye katkı sağlayabilecek olan ve tesis kadastrosu zamanında tescil dışı bırakılmış alanların tescili ve değerinin belirlenebilmesi ile ilgili araştırmalar yürütmüştür. McDermott ve ark. (2018); gelişmekte olan ülkelerin arazilerinin büyük kısmının mülkiyet ve tescil anlamında kayıtlı olmadığı ve bu süreçte gerçekleştirilecek çalışmalar ile karşılaşılan arsa talebi konusunda katkı sağlayabilecek öneriler üzerine çalışmıştır. Koçpınar (2015); Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Tapu ve Kadaastro Genel Müdürlüğü bünyesinde hazırlanan tez çalışması ile tescil dışı kalmış alanların tespiti, hukuki durumları ve nasıl değerlendirileceği üzerine incelemeler gerçekleştirmiştir. Turan (2013); Devletin hüküm ve tasarrufu altında bulunan yerlerin hukuki durumları ve imar uygulamaları kapsamındaki yeri incelenmiştir. Divithure ve Tang, 2013; Sri Lanka'da gerçekleştirilen çalışma ile ülkedeki kadastro ve tapu sistemindeki eksiklikleri günümüz teknolojisiyle daha sistematik bir yöntem haline getirme yönünden incelemelerde bulunulmuştur. Wyatt (2011); Mülkiyet altyapısında yaşanan eksikliklerin kamu arazilerinin kullanımını olumsuz etkilediği ve bu yönde gerçekleştirilecek çalışmalar ile sosyal ve ekonomik kazançların sağlanabileceği önerilmiştir. Sesli ve Şişman (2010); özellikle kıyı hattında kalan tescil dışı alanların CBS ile tespit edilmesi yönünde çalışmalar

gerçekleştirilmiştir. Gümüştay (1997); arsa üretimine yönelik çalışmalarda CBS'nin kullanılmasının daha hızlı, kolay ve ekonomik olarak sürdürülebileceği ve daha nitelikli sonuçlar ortaya çıkabileceği belirtilmiştir.

Buna karşın, ulusal literatürde CBS tabanlı yöntemlerle tescil dışı alanların tespiti ve ekonomiye kazandırılmasına yönelik bütüncül bir çalışma bulunmamaktadır. Farklı ülkelerin kadastro ve plan uygulama sistemlerinin çeşitliliği nedeniyle konu uluslararası düzeyde de sınırlı yer bulmaktadır. Bu çalışma, söz konusu boşluğu doldurmayı hedefleyen özgün ve yenilikçi bir yaklaşım sunmakta; ulusal ölçekte uygulanabilirliğinin yanı sıra uluslararası düzeyde de örnek teşkil edebilecek niteliktedir.

2. Kadastro, Tescil ve Planlama İlişkisinin Yeniden Yorumlanması: Neden İhtiyaç Duyuluyor?

Şehir planlaması ile kent sakinlerinin beklentileri arasındaki uyumun sağlanması, planlama ve kadastro düzenlemeleri arasındaki bağın güçlendirilmesini gerektirir (Emamgholian ve ark., 2021). Bu iki süreç birbirini tamamlar niteliktedir. İmar uygulamaları, mevcut kadastro dokusunu yapılaşmaya uygun biçimde yeniden düzenler. 3194 sayılı İmar Kanunu'na göre; kadastro yapıldığı zaman kadastro adaları içinde bulunan ve mülkiyeti tescilli parseller kadastro parseli, İmar Kanunu, imar planı ve yönetmelik esaslarına göre düzenlenenler ise imar parseli olarak tanımlanır (T.C. Resmî Gazete, 1985). Bu süreçte, imar planında öngörülen sınırlar dışındaki alanlar-örneğin yol, park, meydan gibi donatı alanları-tescile konu edilmez. Ancak zamanla ortaya çıkan yeni ihtiyaçlar doğrultusunda plan revizyonları yapılmakta ve daha önce terk edilen bu alanlar yeniden yapı adaları içinde kalabilmektedir. Bu durumda, söz konusu alanların yeniden sınırlandırılıp tescil edilmesi gerekebilir. Bu süreç, mecazen “ikinci kadastro” olarak adlandırılmakta ve terk edilen alanların yeniden değerlendirilmesine imkân sunmaktadır.

Kadastro çalışmaları sırasında, yol gibi kamu kullanımına açık alanlar Türk Medeni Kanunu uyarınca tescile konu edilmez. Bunun yanında, tesis kadastrosu sırasında kapsam dışında bırakılan alanlar da bulunmaktadır. Bu alanlar; (i) deniz, göl, kayalık gibi herkesin kullanımına açık doğal alanlar ile (ii) yollar, yaylaklar ve kışlaklar gibi kamunun yararlanmasına terk edilen sahalardır (Kandemir ve Şaşkın, 2019; Turan, 2013). İmar planı kararları çerçevesinde şekillenen bu tür alanların, Maliye Hazinesi adına tescil edilmesi gerekir.

Parseller ile tescil dışı alanların birlikte değerlendirilmesi, imar planlarının uygulanabilirliği açısından doğru bir yaklaşımdır. Çepni (2022), çalışmada tescil dışı alanların arsa düzenlemeleri sürecindeki konumunu, imar planları ve aynı hak ilişkileri bağlamında ele almış; özellikle idari yoldan tescil süreçlerinin hukuki boyutuna dikkat çekmiştir. Bu alanların güncel ve kayıtlı olması

hem plan uygulamalarını kolaylaştıracak hem de ekonomik olarak değerlendirilmelerini mümkün kılacaktır (Turan, 2013). Özellikle yapılaşmış ancak Arazi ve Arsa Düzenlemesi (AAD) kapsamına alınamayan bölgelerde çok sayıda tescil dışı alan mevcuttur. Bu alanların geometrik olarak tespit edilip hukuki incelemeden geçirilerek tescil edilmesi, kamuya gelir sağlama potansiyeli taşımaktadır (Kandemir ve Şaşkın, 2019). Bu yaklaşım devletin üst politika belgelerinde de kendine yer bulmuştur (T.C. Cumhurbaşkanlığı, 2018).

2.1. Türk Kadastro Sistemi

Kadastro, bir ülkedeki taşınmazların yer, sınır, alan ve değer bilgilerinin resmi olarak kayıt altına alınmasıdır. Temel amacı, taşınmazların ülke koordinat sistemine dayalı olarak sınırlarının belirlenmesi ve hukuki durumlarının tespitidir (T.C. Resmî Gazete, 1987). Bu yönüyle kadastro, taşınmazların kimliğini oluşturan temel bir araçtır (Çay ve Kandemir, 2023). Türkiye’de kadastro çalışmaları yüz yılı aşkın bir geçmişe sahiptir ve süreç boyunca farklı yöntem, mevzuat ve teknolojiler kullanılmıştır (Karataş ve Gençler, 2021). Osmanlı döneminde vergi amaçlı başlayan bu çalışmalar, Cumhuriyet döneminde özel mülkiyete dayalı olarak yeniden şekillenmiş ve 1987 tarihli 3402 sayılı Kadastro Kanunu ile sistematik bir yapıya kavuşturulmuştur. Günümüzde kadastro işlemleri özel sektör ve resmi kurumlarca yürütülse de kontrol ve tescil yetkisi yalnızca kamu otoritesine aittir (Demir ve ark., 2008; Ercan, 2021).

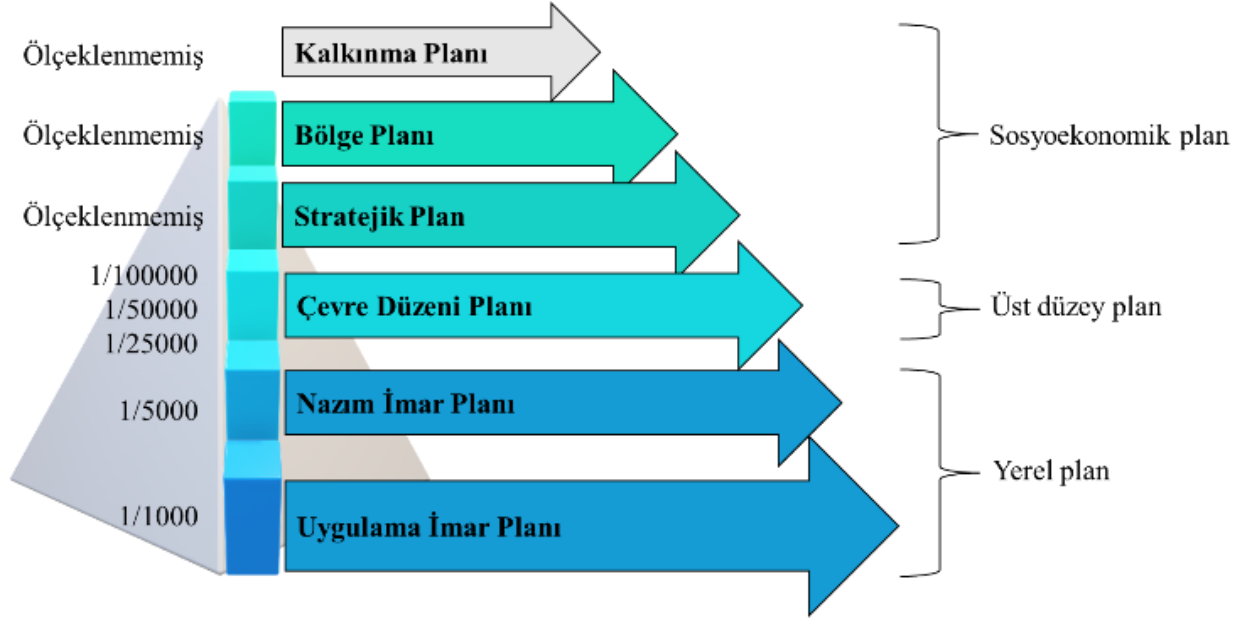
Kadastro uygulama alanları tescilli ve tescilsiz parselleri kapsar. Bu alanlar, deniz, akarsu, orman, mera, dağ gibi devletin hüküm ve tasarrufu altındaki sahalara da bitişik olabilir. Türk kadastro sisteminde arazi türleri, tescil esasına göre üç gruba ayrılır: özel mülkiyete konu alanlar, devlet mülkiyetindeki taşınmazlar ve tescil dışı alanlar. Özel ve kamu arazileri tapuya tescil edilirken, tescil dışı alanlar tapu siciline kaydedilmez (Demir ve Çoruhlu, 2009).

2.2. Türk Planlama Sistemi

Şehir planlaması, kent fonksiyonları arasında düzen sağlayarak kent sakinlerinin yaşam kalitesini artırmayı amaçlayan bir tasarım ve geliştirme sürecidir. Türkiye’de planlama uygulamaları, Cumhuriyet’in ilanı ile birlikte önem kazanmış; 1933 tarihli Yapı ve Yollar Kanunu ile başlayan süreç, 1956 ve 1957 yıllarındaki İmar Kanunları ile devam etmiştir (Yıldız ve Erden, 2021; Özdemir Sarı ve ark., 2019). 1985 yılında yürürlüğe giren 3194 sayılı İmar Kanunu ise görev ve sorumlulukları yerel yönetimlere devrederek daha esnek ve katılımcı bir yapıyı benimsemiştir (KENTGES, 2009).

3194 sayılı İmar Kanunu, mekânsal planlamada kademeli planlama ilkesini esas alır. Buna göre planlar, kapsadıkları alan ve amaçlarına göre “Bölge Planları” ve “İmar Planları” olarak ikiye ayrılır;

imar planları ise kendi içinde “Nazım İmar Planı” ve “Uygulama İmar Planı” olarak sınıflanır. Üst ölçekli planlar genel ilkeleri belirlerken, alt ölçekli planlar parselle kadar inen uygulama detaylarını içerir. Bu kademeli yapı, **Şekil 1**’de şematik olarak gösterilmiştir (Çoruhlu ve ark., 2020; Ersoy ve Keskinok, 2000; T.C. Resmî Gazete, 1985).

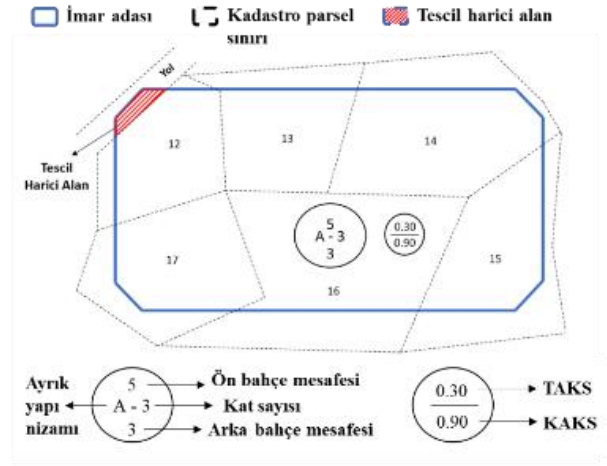


Şekil 1. Kademeli planlama ilkesi (Çoruhlu ve ark., 2020’den türetilmiştir.)

2.3. Tescil Dışı Alanlar

Tescil dışı alanlar, ilk tesis kadastrosu sırasında dikkate alınmayan ancak zamanla ekonomik değeri fark edilen alanlardır (Kandemir ve Şaşkın, 2019). Türk Medeni Kanunu’nun 715. maddesine göre, “aksi ispatlanmadıkça, yararı kamuya ait sular ile kayalar, tepeler, dağlar, buzullar gibi tarıma elverişli olmayan yerler ve bunlardan çıkan kaynaklar, kimsenin mülkiyetinde değildir ve hiçbir şekilde özel mülkiyete konu olamaz” (T.C. Resmî Gazete, 2001). Tescil dışı alanlar yalnızca devlet hüküm ve tasarrufundaki doğal alanlarla sınırlı değildir; imar planı revizyonlarıyla yapılaşmaya uygun hale gelen alanlar da bu kapsamda değerlendirilebilir. Bu çalışmada, kapanan yollar ile geçmişte terk edilen ancak yeni planlamayla yapı adalarına dönüşen alanlar için değerlendirme yöntemi önerilmektedir. Söz konusu durum, **Şekil 2** ile görselleştirilmiştir.

Bu tescil dışı alanlar, genellikle imar adasına dönüşen kadastro yolları ile daha önce bedelsiz terk edilen ancak plan değişiklikleriyle imar adası içinde kalan alanlardan oluşur. **Şekil 2**’de görüldüğü gibi, imar planı öncesinde yol olarak kullanılan bir alan, plan revizyonu ile yapı adası içinde kalmış ve ada-parcel numarası alarak ilgili idare adına tescil edilebilir duruma gelmiştir (**Şekil 2b**).



a) Tesis kadastrounda dikkate alınmayan alanlar

b) İmar planı ile farklı bir fonksiyon kazanan alanlar

Şekil 2. Tescil Dışı Alan Örnek Gösterim

Yine Arazi ve Arsa Düzenlemeleri Hakkında Yönetmeliğin 14. maddesinin (4) fıkrasına göre, kadastro yollarının imar adasına denk gelen kısımları parselasyon öncesinde ihdas edilemez; sadece Düzenleme Ortaklık Payı (DOP) oranı içinde dikkate alınabilir. İlgili hüküm gereğince arazi ve arsa düzenlemesi yapılacak alanlar özelinde tescil dışı alanların ekonomik olarak değerlendirilmesi mümkün değildir. Bu nedenle, bu tür alanların ekonomik olarak değerlendirilmesi AAD sahaları içinde mümkün değildir. Ancak beş yıllık imar programında AAD kapsamı dışında kalan, yapılaşması tamamlanmış ve parselasyon planı tescil edilmiş bölgelerde 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 18. maddesi uygulanamayacağından, bu alanların yerel yönetimlerce değerlendirilmesinde yasal bir engel bulunmamaktadır.

2.3.1. Tescil Dışı Alanların Hukuki Olarak Değerlendirilmesi

Türk Medeni Kanunu'nun 715. maddesine göre, sahipsiz yerler ile kamu yararına ayrılmış mallar devletin hüküm ve tasarrufu altındadır ve özel mülkiyete konu olamaz. Bu tür malların edinimi, korunması ve kullanımı özel kanunlara tabidir (T.C. Resmî Gazete, 2001). Dolayısıyla, kamuya ait alanların değerlendirilmesi ancak bu özel hükümlere dayanılarak gerçekleştirilebilir.

Tescil dışı alanlara ilişkin yasal dayanaklar; 3402 sayılı Kadastro Kanunu'nun 16. maddesi, 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 11. maddesi, 2644 sayılı Tapu Kanunu'nun 21. maddesi kapsamında gerçekleştirilmiştir (T.C. Resmî Gazete, 2001; 1987; 1985; 1934). Söz konusu alanların türleri, kapsamaları ve hangi kanunlarla düzenlendiği **Tablo 1**'de özetlenmiştir.

Tablo 1. İncelenen kanunların içeriğinde belirtilen tescil dışı alanlar

İlgili Kanun	Tescil Dışı Alanlar
4721 Sayılı Türk Medeni Kanunu 715. madde	Kamuya ait sular, kayalık, tepe, dağ, buzul ve benzeri tarıma elverişli olmayan yerler ve sıralanan alanlardan çıkan kaynaklar.
3402 Sayılı Kadastro Kanunu 16. madde	Kamunun ortak kullanımına veya bir kamu hizmetinin görülmesine ayrılan yerler, devletin hüküm ve tasarrufu altında bulunan sahipsiz yerler (kapanmış olan yollar, meydanlar, pazar yerleri, parklar ve bahçeler ve boşluklar ve benzeri hizmet malları).
2644 Sayılı Tapu Kanunu 21. madde	Köy ve belediye sınırları içinde kapanmış yollar ve yol fazlalıkları.

2644 sayılı Tapu Kanunu'nun 21. maddesi, kapanan yolların ve yol fazlalarının köy veya belediye adına tescilini öngörmektedir. Danıştay 6. Dairesi de bu yönde kararlar vererek, plan değişiklikleri sonucu oluşan tescil dışı alanların ilgili tüzel kişiler adına tescil edilmesi gerektiğini vurgulamıştır (bkz. Danıştay 6. Dairesi, E. 2012/1904, K. 2013/6299). 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 17. maddesi ise kamulaştırmadan artan parçaların bitişik maliklere satılabileceğini belirtmektedir. Ancak Danıştay 6. Dairesi'nin farklı bir kararına göre bu durum, önceden bedelsiz terk edilen alanların bedelsiz geri verilebileceği anlamına gelmemektedir (bkz. Danıştay 6. Dairesi, E. 1997/1847, K. 1998/760). Ayrıca 2942 sayılı Kamulaştırma Kanunu'nun 35. maddesi, DOP kapsamında terk edilen alanlarda maliklerin sonradan mülkiyet talebinde bulunamayacağını açıkça ifade etmektedir (T.C. Resmî Gazete, 1983).

Ayrıca, Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan en güncel talimatlarda (E-54634696-504-170629; 14888233; 14981552), tescil dışı alanların değerlendirilmesinde izlenmesi gereken idari ve teknik süreçlere ilişkin önemli uyarılara yer verilmiştir. Bu talimatlarda, özellikle 6306 sayılı Kanun kapsamında riskli alan ve rezerv yapı alanlarında kalan tescil dışı alanların öncelikle Hazine adına tescil edilmesi ve ardından ilgili idarelere devredilmesi gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca tescil işlemleri öncesinde, alanın bu kapsamlarda kalıp kalmadığının Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Kentsel Dönüşüm Başkanlığından teyit edilmesinin zorunlu olduğu ifade edilmiştir. Talimatlarda, işlem dosyalarının eksiksiz ve dikkatle hazırlanmasının, telafisi güç hak kayıplarını önlemek açısından kritik olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğünden görüş alınmadan işlem yapılmayacağı açıkça belirtilmiştir. Bu yönlendirmeler, tescil dışı alanların idari süreçlerinde dikkat edilmesi gereken hususları ortaya koymakta olup, çalışmada önerilen yöntem ile uygulamada karşılaşılabilecek idari gerekliliklerin uyumlaştırılması açısından yol gösterici niteliktedir.

Mevzuat ve yargı kararları doğrultusunda, kapanan yollar ve terk fazlaları gibi tescil dışı alanların değerlendirilmesi yerel yönetimlerin tasarrufuna bırakılmıştır. Bu alanların CBS ile tespit

edilmesi ve akıllı planlama yaklaşımlarıyla kamu yararına değerlendirilmesi hem idare hem de toplum açısından “kazan-kazan” ilkesi çerçevesinde önemli fırsatlar sunmaktadır.

2.4. Yerel Yönetimlerin Gayrimenkul Edinimi

Yerel yönetimler, gayrimenkul edinimini çeşitli yöntemlerle gerçekleştirebilmektedir. Bu gayrimenkuller, yerel yönetimler için farklı alanlarda değerlendirilebilecek önemli kaynaklar arasında yer almaktadır. Bu kaynaklarla birlikte, satış veya kira yoluyla gelir sağlanması, özel ve tüzel kişiler tarafından işgal edilen alanlarda talep edilen ecir misil alınması mümkün olabilmektedir. Ayrıca, imar planı onaylanmış ve imar uygulaması yapılacak bölgelerde yer alan gayrimenkuller, kamu yararı doğrultusunda da kullanılabilir niteliktedir.

Yerel yönetimler, mevzuatın sunduğu imkânlar dâhilinde gayrimenkul edinebilmektedir. Söz konusu edinim yöntemlerine; satın alma, trampa, kamulaştırma, kiralama, bağış-hibe, imar uygulamaları örnek olarak verilebilir (Köse, 2019). Gayrimenkul edinim yöntemlerinin yanı sıra umumi ve kamu hizmet alanlarının elde edilmesinde aktif olarak kullanılan yöntem ise 3194 sayılı İmar Kanunu’nun 18. maddesi uyarınca yürütülen imar uygulamalarıdır.

3. Materyal Metot

Tescil dışı alanların tespiti, hukuki ve teknik boyutları içeren çok aşamalı bir süreci gerektirir. Bu çalışmada, özellikle imar planı değişiklikleri sonrası oluşan ve mevcut plan kararlarıyla yeniden fonksiyon kazanan alanlar incelenmiştir. Süreç; çalışma alanının belirlenmesi, gerekli verilerin temin edilmesi, verilerin analiz için hazırlanması ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında değerlendirilmesi adımlarını içermektedir. Tespit edilen alanların değerlendirilmesi ise yalnızca mekânsal analizlerle sınırlı kalmamış, kadastro ve tapu müdürlükleriyle koordineli şekilde yürütülmüştür. Böylece tescil dışı alanların, yerel yönetim adına tapuya tescil edilmesine olanak sağlanmış, kamusal değerlendirilebilirliğinin önü açılmıştır.

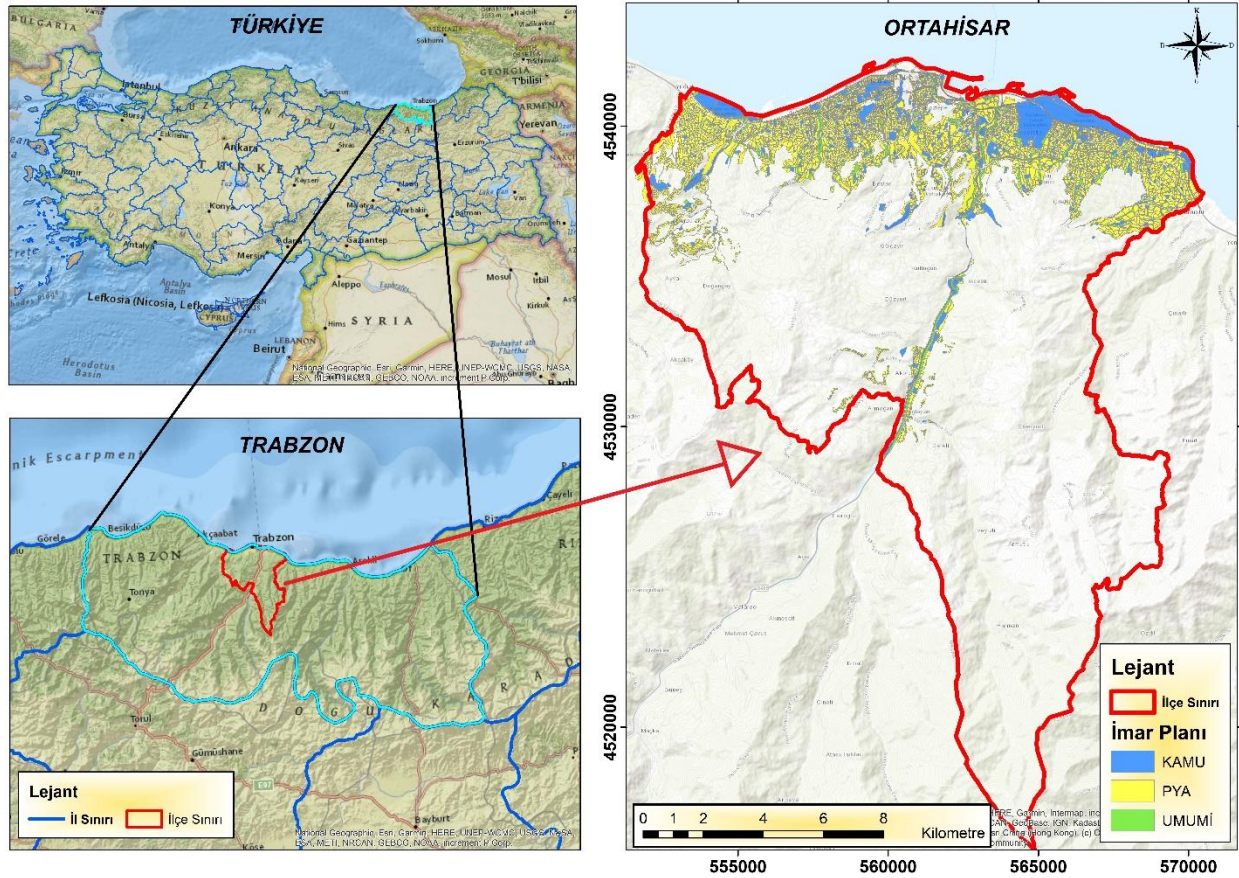
3.1. Çalışma Alanı

Trabzon ili, kentsel arsa talebi yüksek olan bir şehir olmasının yanında yeryüzü şekilleri sebebiyle yapılaşma açısından uygun ve geniş gelişme alanlarına sahip değildir. Bu sebeple kısıtlı olan kentsel arazi ve arsa kaynaklarının doğru şekilde değerlendirmesi şehir için oldukça önemlidir. Gerçekleştirilen çalışmada Trabzon ilinin merkez ilçesi olan Ortahisar pilot bölge olarak seçilmiştir. Ortahisar ilçesi, 2023 tarihli adrese dayalı nüfus sayımına göre 322.702 kişilik nüfusu

barındırmaktadır. İlçenin yüz ölçümü, 23.474 hektar olup kendisine bağlı 86 mahallesi bulunmaktadır.

İlçenin yerleşik nüfusu yıldan yıla artış eğilimindedir. İlçe, şehrin son yıllarda kazandığı turizm misyonu dolayısıyla da özellikle yaz aylarında önemli sayıda turiste de ev sahipliği yapmaktadır. Nüfus artışının varlığı, beraberinde barınma ihtiyacını doğurmaktadır. Ayrıca şehirleşmenin hızla devam etmesi, özellikle imar planı olan bölgeler için kaynakların daha verimli kullanılması ihtiyacını beraberinde getirmektedir. İlçede yapılaşmanın homojen bir dağılım göstermediği, ilçenin karma bir yapılaşmaya sahip olduğu (kentsel ve kırsal yapının iç içe olması durumu) görülmektedir.

Çalışma alanının belirlenmesinde dikkat edilen en önemli husus ise ilçenin imar planı üzerinde revizyon yapılmış olmasıdır. İlçenin 1/1000 Ölçekli Revizyon + Uygulama İmar Planı, 2023 yılında onaylanmıştır. İmar planı üzerinde gerçekleştirilen değişikliklerin ihdas alanlarının ortaya çıkmasında etkin bir role sahip olduğu yadsınamaz bir gerçektir. Gerçekleştirilen çalışmada analiz için kullanılacak veriler 2023 yılına aittir. Çalışma kapsamında Ortahisar Belediyesinin beş yıllık imar programı dikkate alınmıştır. 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 18. maddesi uyarınca imar uygulaması yapılacak bölgelerin gerisinde, yine aynı Kanun'un 15. ve 16. maddelerinin uygulanacağı alanlar için değerlendirmede bulunulmuştur (Şekil 3).



Şekil 3. Çalışma alanı görünümü

3.2. Çalışmada Kullanılan Verilerin Düzenlenmesi

Yoğun konumsal analiz gereksinimi nedeniyle hem sayısal hem de sözel olan tüm veriler, CBS ortamında ortak bir veri tabanında organize edilmiştir. Bu süreçte veriler, önce ön kontrole tabi tutulmuş, ardından topolojik düzenlemeler yapılarak analizlere uygun hale getirilmiştir. Sayısal veriler UTM-3° projeksiyon sistemi ve ITRF-96 datumuna göre, 39. dilimde referanslandırılmıştır.

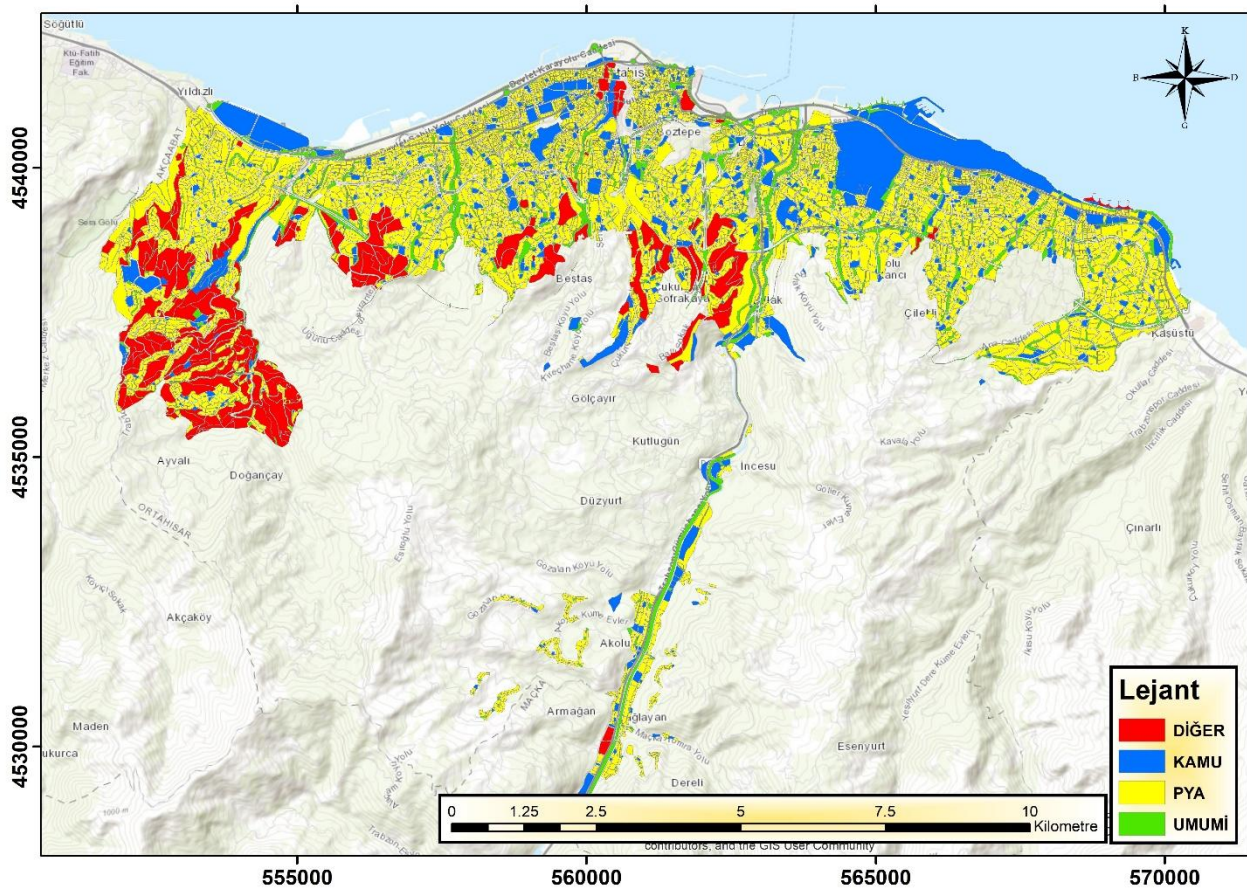
Kullanılan temel veriler şunlardır:

- 1/1000 ölçekli Revizyon Uygulama İmar Planı
- 1/1000 ölçekli kadastro parselleri
- 1/1000 ölçekli idari sınırlar
- 1/1000 ölçekli yol hatları (karayolu, cadde, sokak)
- Yol rayiç değerleri
- Takyidatlı tapu bilgileri
- Kadastral fenni klasör bilgileri

CAD formatındaki imar planı, CBS ortamına aktarıldıktan sonra konut, okul, park gibi fonksiyonlar, Mekânsal Planlar Yapım Yönetmeliği ve plan lejantları dikkate alınarak dijital ortama işlenmiştir. Kadastro parselleri ise TKGM'nin Parsel Sorgulama Sistemi üzerinden kontrol edilerek doğruluk açısından teyit edilmiş ve analizlere dâhil edilmiştir. Tescil dışı alanların sağlıklı şekilde tespit edilebilmesi amacıyla donatı alanları dört gruba ayrılmıştır:

- Parsellenecek yapı adaları (PYA)
- Kamu hizmet alanları (KAMU)
- Umumi hizmet alanları (UMUMİ)
- Diğer plan fonksiyonları (tarım alanı, afete maruz bölge vb.)

Bu sınıflandırma, analizlerde hangi alanların tescile konu olabileceğini belirlemek açısından temel veri yapısını oluşturmuştur (Şekil 4).



3.3. Değerlendirme Süreci

Tescil dışı alanların belirlenmesinde temel analizler, imar planı ve kadaströ parselleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu iki veri, CBS ortamında birleştirme, çıkarma, kesiştirme gibi mekânsal işlemlerle analiz edilmiştir. Geometrik olarak sınırları tanımlanan alanlar, ilk olarak çalışma ekibi tarafından değerlendirilmeye tabi tutulmuştur. Bu aşamada, yapılaşmaya elverişli olmayan, küçük veya düzensiz şekilli alanlar kapsam dışında bırakılmıştır.

Taşınmazların ekonomik göstergesi olan değerlerin gerçeğe en uygun şekilde tespit edilmesi, değer değişimlerinin izlenmesi ve değer verisinin güncelliğinin sağlanması için değer haritalarının oluşturulması oldukça önemlidir (TKGM, 2023). Alanların ekonomik potansiyelini belirlemek amacıyla karşılaştırmalı değer haritaları oluşturulmuştur. Bunlardan biri emlak rayiç değerleri, diğeri ise piyasa satış verilerine dayalı rayiçlerle hazırlanmıştır. Belediyeden alınan emlak verileri yol hatlarıyla; piyasa verileri ise parsel bazlı konumlarla ilişkilendirilmiştir. Çizgi ve alan verileri, analizlerde kullanılmak üzere nokta veri formatına dönüştürülmüş ve bu veriler üzerinden örnekleme yapılmıştır. Veri yoğunluğu, oluşturulan değer haritasının duyarlılığını artırmak açısından önemli bir rol oynamıştır.

3.3.1. Inverse Distance Weight (IDW) Yöntemi

Değer haritası üretiminde, örnek noktalardan elde edilen veriler enterpolasyon yöntemiyle genelleştirilmiştir. Bu amaçla, konumsal analizlerde yaygın olarak kullanılan Inverse Distance Weighting (IDW) yöntemi tercih edilmiştir. IDW, bir noktadaki değeri, çevresindeki bilinen noktalara olan uzaklığa ters orantılı olarak ağırlıklandırmakta ve tahmin etmektedir (Uyan, 2019; Yılmaz ve ark., 2023).

Yöntem yerel bir enterpolasyon yaklaşımıdır ve her bir hücre değeri, komşu noktaların ağırlıklı ortalamasına göre hesaplanır. Bu sayede, bilinmeyen konumlardaki değerler matematiksel olarak tahmin edilir (Paramasivam ve Venkatramanan, 2019; Li ve ark., 2020). Enterpolasyon hesaplamasında x_0 noktasındaki tahmini değer bulunurken (1) ve (2) eşitliklerinden yararlanılmaktadır (Konuk, 2011).

$$Z^*(x_0) = \sum w_i * Z(x_i) \quad (1)$$

$$W_i = \frac{\frac{1}{d_i^p(x_i)}}{\sum \frac{1}{d_i^p(x_i)}} \quad (2)$$

(1) ve (2) eşitliklerinde verilen;

$Z^*(x_0)$: x_0 noktasındaki tahminin değerini,

W_i : x_i noktasındaki örneğin, x_0 noktasına göre ters uzaklık ağırlığını,

d : örnek noktası ile tahmini yapılacak nokta arasındaki uzaklığı,

p : üssel değeri,

n : örnek sayısını ifade etmektedir (Konuk, 2011).

Bu yöntemle elde edilen değerler, tescil dışı alanların ortalama satış değerlerinin belirlenmesinde kullanılmıştır.

3.3.2. Değer Haritasının Oluşturulması

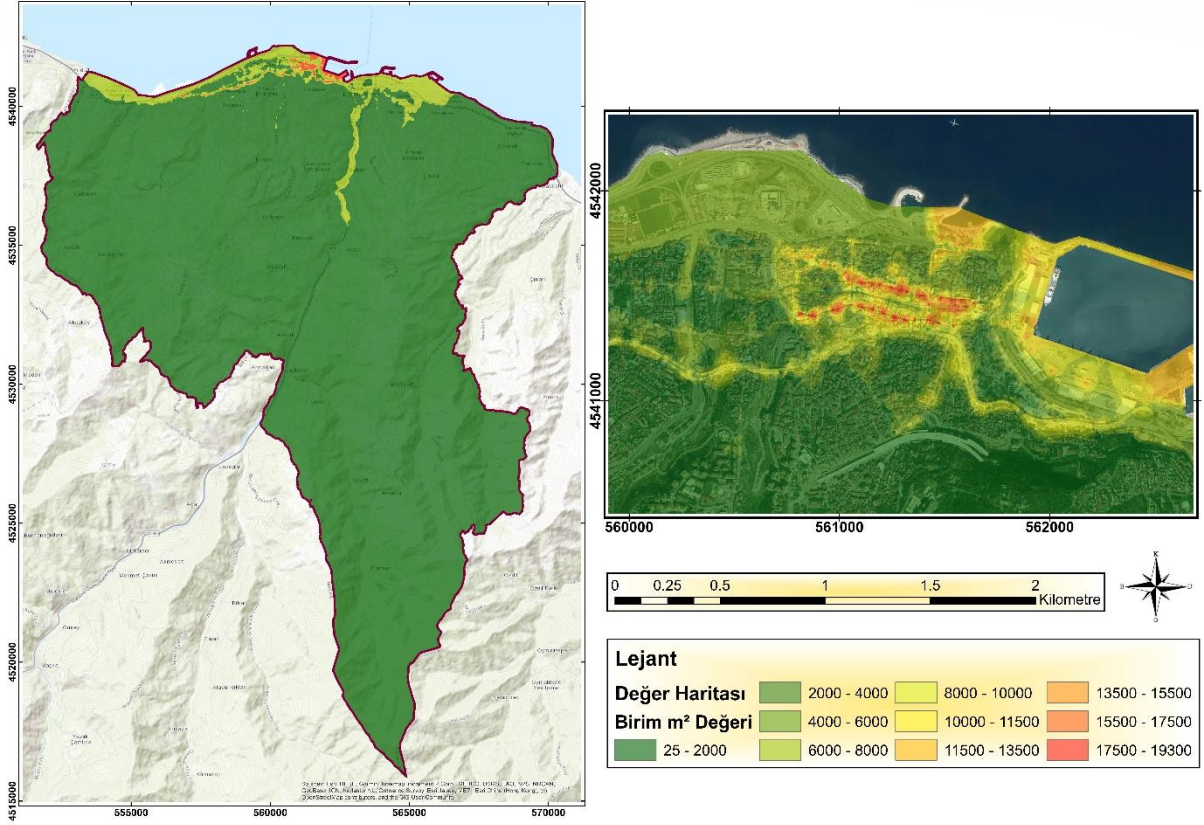
Herhangi bir gayrimenkulün değerini tespit etmek birçok faktöre bağlıdır. Bu konuda genel bir kanı üzerinden değer belirlenmesi sağlıklı değildir. Her bölge, kendine özgü bir karakter göstermektedir. İşbu sebeplerle değer haritası oluşturulurken kullanılacak faktörler, çalışma yapılacak bölgenin detaylı incelenmesi ile tespit edilmelidir. Dolayısıyla çalışma alanı dikkate alındığında her faktörün birleşiminden nominal bir değer oluşturulabilmektedir. Oluşturulan bu

nominal değer her bir faktörün değere olan etkisinin ağırlıklandırılması ile elde edilebilmektedir (Başer ve ark., 2016).

Değer haritası, çalışmanın en önemli dayanaklarından biridir. Tescil dışı alanların CBS ortamında tespiti ne kadar önemliyse, değer haritası desteğiyle bu alanların ortalama birim değerlerinin ortaya koyulması da o derecede önemlidir. Böylelikle tespit edilen tescil dışı alanların ilgili yerel yönetime sağlayabileceği en düşük finansal karşılığı da elde edilmiş olacaktır.

Değer haritası oluşumunda yol emlak vergi değeri ve piyasa rayiç değerlerinden oluşan iki temel veri kullanılmıştır. Bu iki veri kullanılarak yerel yönetimin belirlediği değer faktörünün dikkate alınması hedeflenmektedir. Rayiç değerlerin kullanılması ile oluşturulan raster tabanlı yüzey haritası ile piksel boyutlarında ortalama birim fiyatı verisi elde edilmiştir.

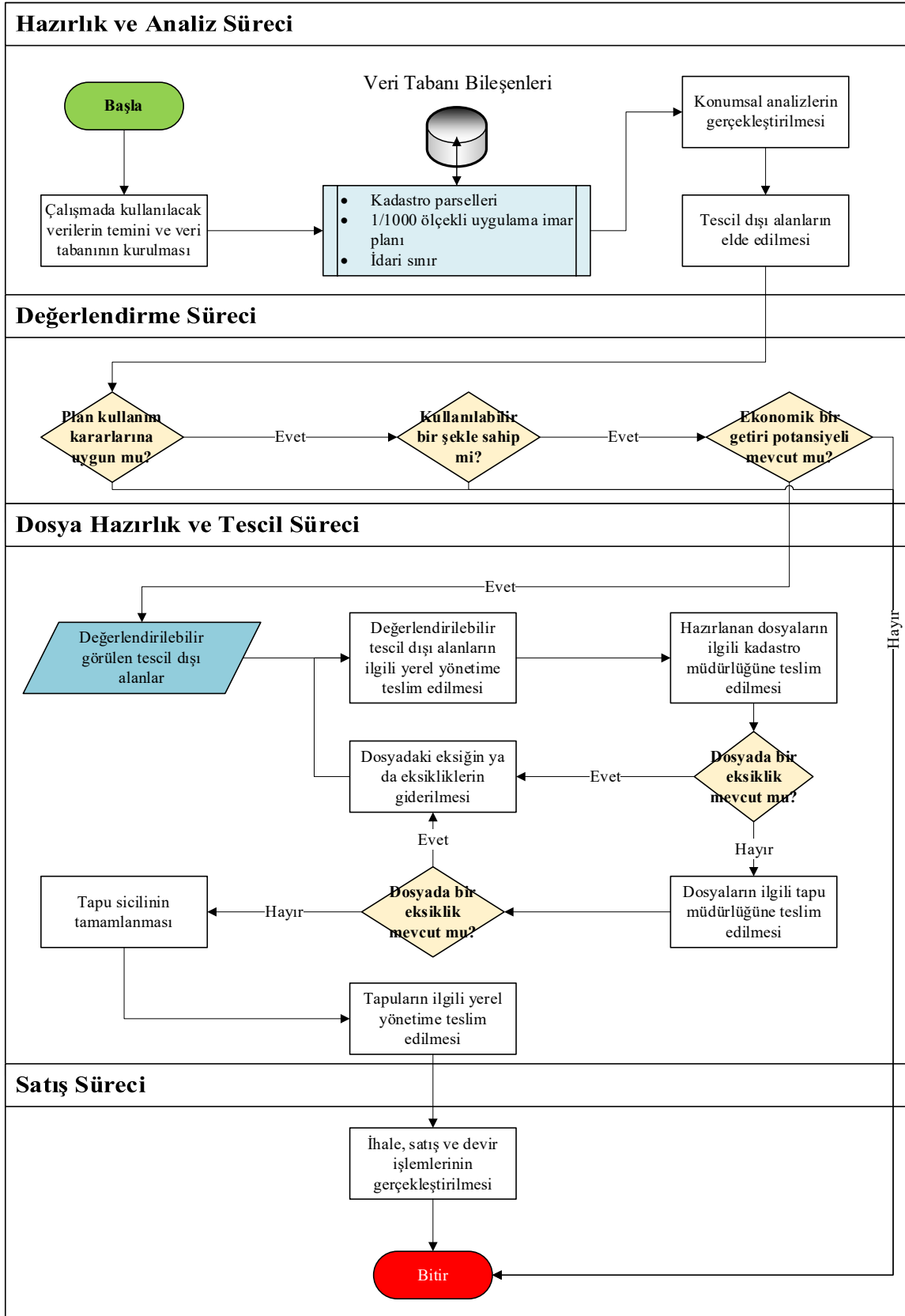
IDW enterpolasyon yöntemi kullanılarak oluşturulan raster değer haritası incelendiğinde emlak vergisine esas en düşük birim değer 25 TL/m², en yüksek birim değer ise 19.300 TL/m² olduğu görülmektedir. **Şekil 5** ile görüleceği üzere, çalışma alanının kuzeyinde yer alan ve kentsel kesime yakın olan bölgede birim değer daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bu bölge yapılaşmanın fazla olduğu ve aynı zamanda kamu yatırımlarının ulaştığı kesimdir. Çalışma alanının güneyi ise değer anlamında kuzeyine kıyasla düşüktür. Bu bölge, yapılaşmanın nispeten daha az olduğu kırsal bir bölgedir. İmar planında da bu bölgede gelişme konut alanları yoğunluktadır. Değer haritası baz alındığında emlak vergisine esas birim değer değişiminin yoğun olduğu bir bölge de örnek olarak gösterilmektedir.



Şekil 5. Değer haritası

3.4. Dosya Hazırlık ve Tescil Süreci

Analiz aşamalarının ardından belirlenen alanların mevcut durumlarının yerinde tespiti için arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışma ekipleri, bu alanları fotoğraflamış ve güncel kullanım durumlarını kayıt altına alarak raporlamıştır. Hazırlanan raporlar, öncelikle Kadastro Müdürlüğü'nün ardından ise Tapu Müdürlüğü'nün incelemesine sunulmuştur. Kadastro ve tapu kurumunun uygun görüşünün alınması ile bu alanların tapu kütüğüne tescil işlemi gerçekleştirilmiştir. Analiz, değerlendirme ve kontrol sürecinden geçen alanlar, yerel yönetim adına tescil edilmiştir. Tapulanan alanların devredilmesi ya da satılması bu aşamadan sonra mümkün olmaktadır. Satış süreci, yerel yönetimin inisiyatifinde yürütülmektedir. Sürecin genel işleyişi, Şekil 6 'da gösterilen iş akış diyagramı ile özetlenmiştir.



Şekil 6. Tescil dışı harici alanların değerlendirilmesine yönelik iş akış diyagramı

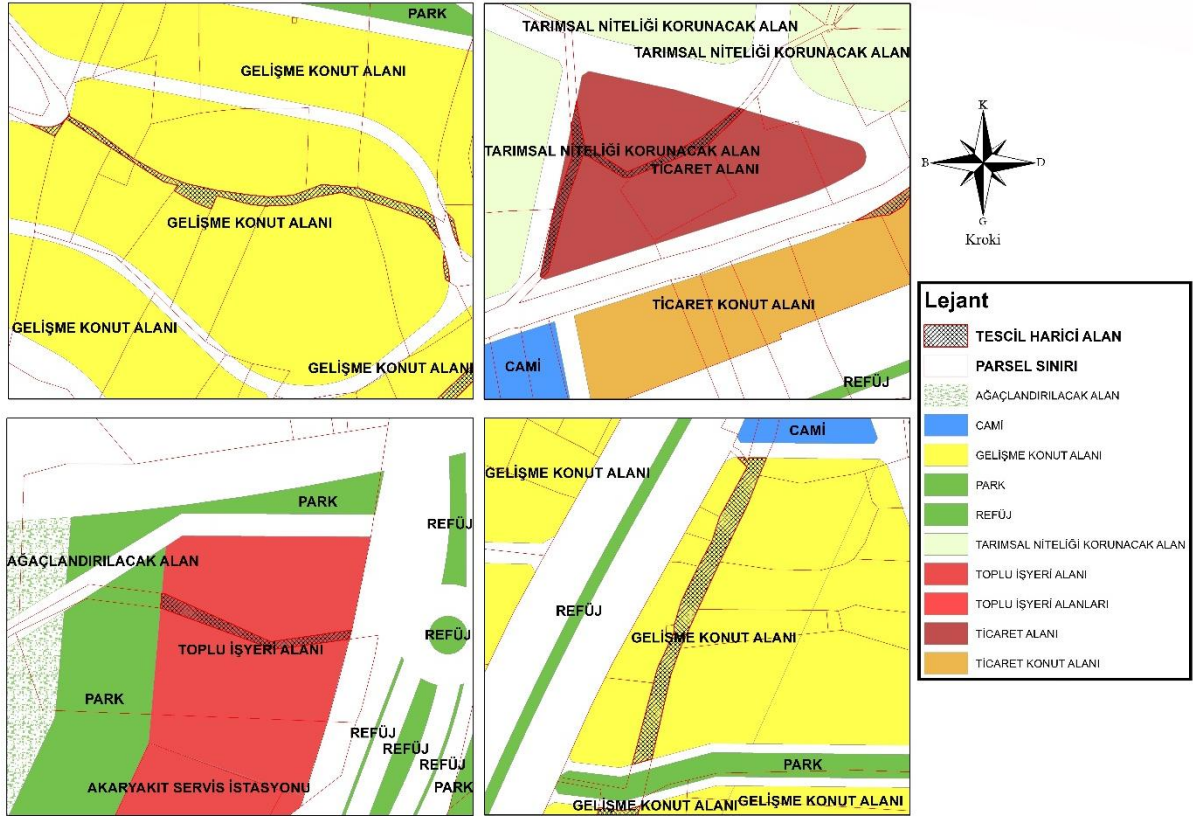
4. Bulgular

Yapılan analizlerde temel veri kaynakları imar planı ve kadastro parselleri olmuştur. Çalışmada ele alınan tescil dışı alanlar, revizyon imar planı sonrası oluşan ve mevcut durumda AAD uygulaması yapılamayan bölgelerde yer almaktadır. Sürecin nihai amacı, bu alanların uygun plan fonksiyonu kazanarak tapu kütüğüne tescil edilmesidir.

Şekil 7'de örnek olarak gösterilen kırmızı taralı alanlar, yapı adaları içinde kalmalarına rağmen henüz ada/parsel numarası almamış ve tapu siciline tescil edilmemiştir. Bu alanlar, yerel yönetimler tarafından mevzuata uygun şekilde değerlendirilerek hukuki sürece konu edilebilir. Parsellenecek yapı adaları içinde kalan bu tür alanlar tescil edilebilirken; umumi hizmet alanları içerisindeki alanlar tescile konu edilemez. Kamu donatısı içindeki alanların satışı mümkün olmasa da ilgili kurumlar arasında yapılacak protokollerle devri mümkündür.

Hem yüzölçümü açısından hem de geometrik olarak yapılaşmaya elverişli olmayan, küçük ya da düzensiz şekilli alanlar çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır. Bu eleme süreci sonucunda toplam 1.943 adet tescil dışı alan belirlenmiştir. Bu alanların yüzölçümleri 10 m² ile 9.910,54 m² arasında değişmekte olup toplam alan 586.511,87 m²'dir. Her bir alan, plan fonksiyonuna göre sınıflandırılmış ve ortalama birim değerleri hem emlak rayiçleri hem de piyasa rayiçleri üzerinden hesaplanmıştır.

Şekil 8'de tespit edilen alanların metrekare bazlı değer dağılımları; **Şekil 9** ve **Şekil 10'**da ise birim ve toplam değer karşılaştırmaları sunulmuştur. Elde edilen değerler, kamuya potansiyel gelir sağlayabilecek alanların konumsal ve ekonomik özelliklerini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 7. Tescil dışı alanların örnek gösterimi

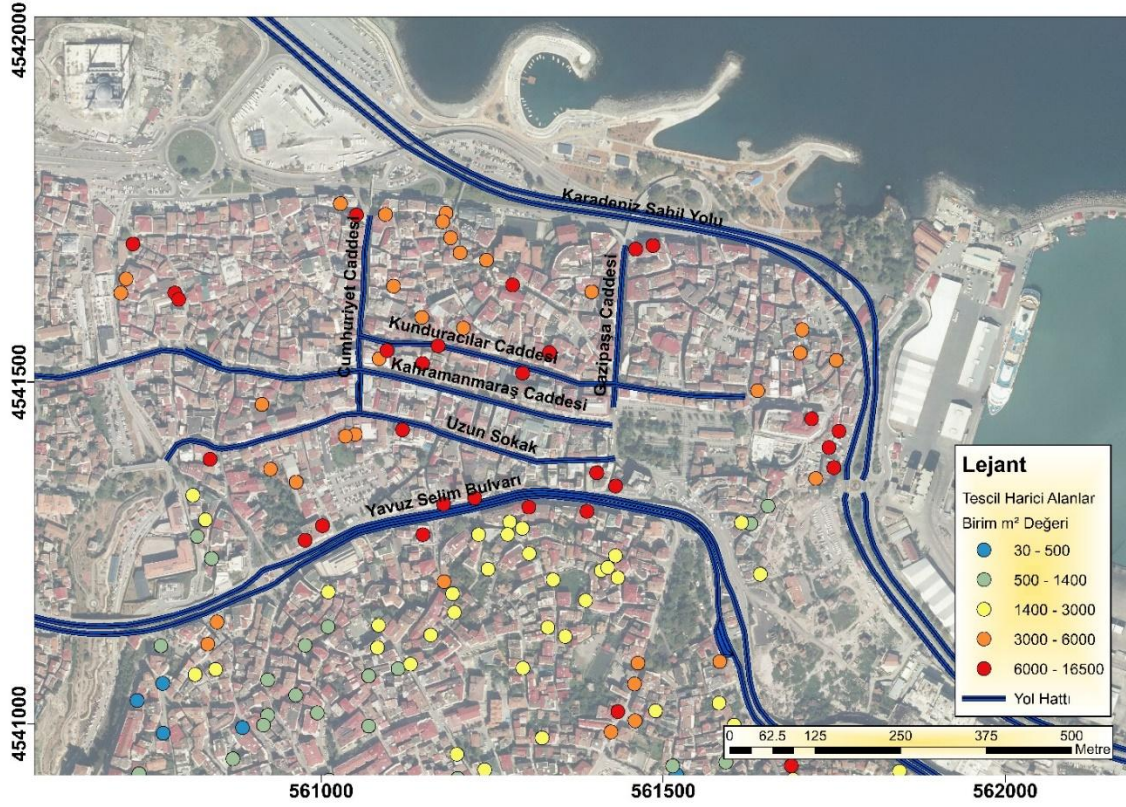
Bulguların somutlaştırılması amacıyla, çalışma kapsamında tespit edilen alanlardan biri detaylı olarak incelenmiştir. 580 numaralı bu alan, imar planında yerleşik konut alanı fonksiyonuna sahiptir ve 495 m² büyüklüğündedir. Yapılan saha çalışmasında, alanın yola cepheli olduğu ve doğrudan yapılaşmaya uygun bir konumda bulunduğu tespit edilmiştir.

Alanın tapu tescil işlemleri tamamlanmış ve sistemde 177 ada 7 parsel olarak kayıt altına alınmıştır. Bu örnek, tescil dışı alanların teknik, hukuki ve ekonomik süreçler çerçevesinde nasıl değerlendirilip kamu adına değer kazandırılabilceğini göstermesi açısından yol göstericidir (Şekil 11).

Tespit edilen alanlar, imar planında tanımlı fonksiyonlarına göre sınıflandırılmış ve her bir sınıf için ortalama birim değerler hesaplanmıştır. Değer analizi hem emlak vergisine esas rayiçler hem de piyasa rayiçleri üzerinden yapılmıştır (Tablo 2).

Emlak vergisine esas değerlere göre en düşük ortalama birim değer 323,07 TL/m², en yüksek değer ise 4,792,37 TL/m² olarak hesaplanmıştır. Piyasa rayiçlerine göre ise bu değerler 6.479,38 TL/m² ile 68.243,16 TL/m² arasında değişmektedir.

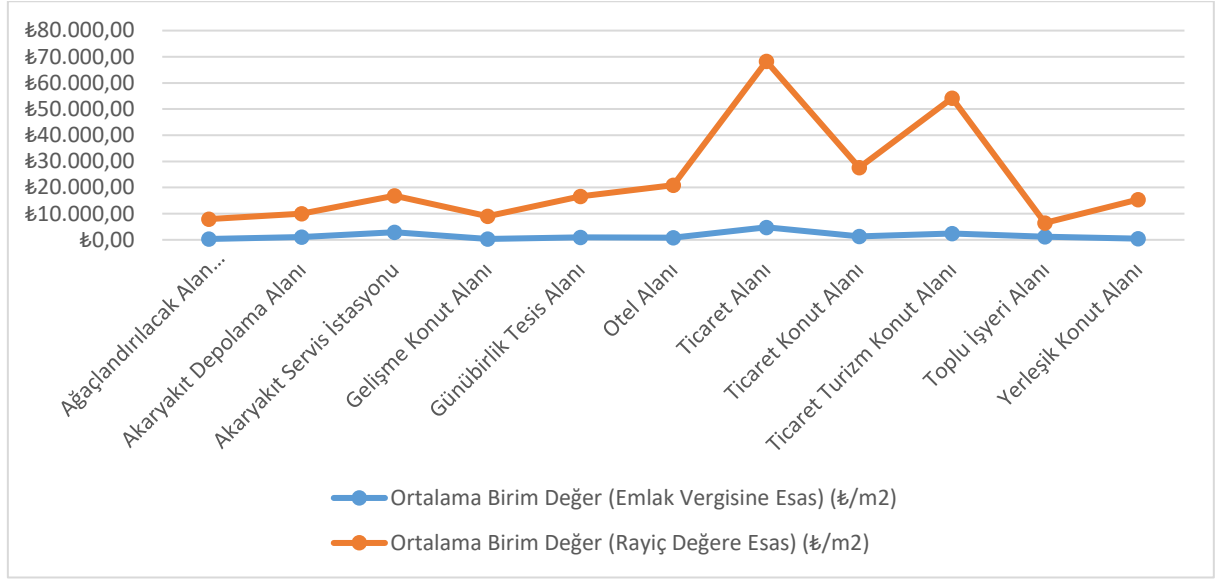
Emlak vergisi değerleri ile piyasa değerleri karşılaştırıldığında, en düşük birim fiyatlarda yaklaşık 20 kat, en yüksek fiyatlarda ise 14 kata varan farklar olduğu görülmektedir. Bu durum, değer haritalarının yalnızca vergisel değil, yatırım ve yönetim kararlarında da kritik bir araç olduğunu göstermektedir (Şekil 9 ve Şekil 10).



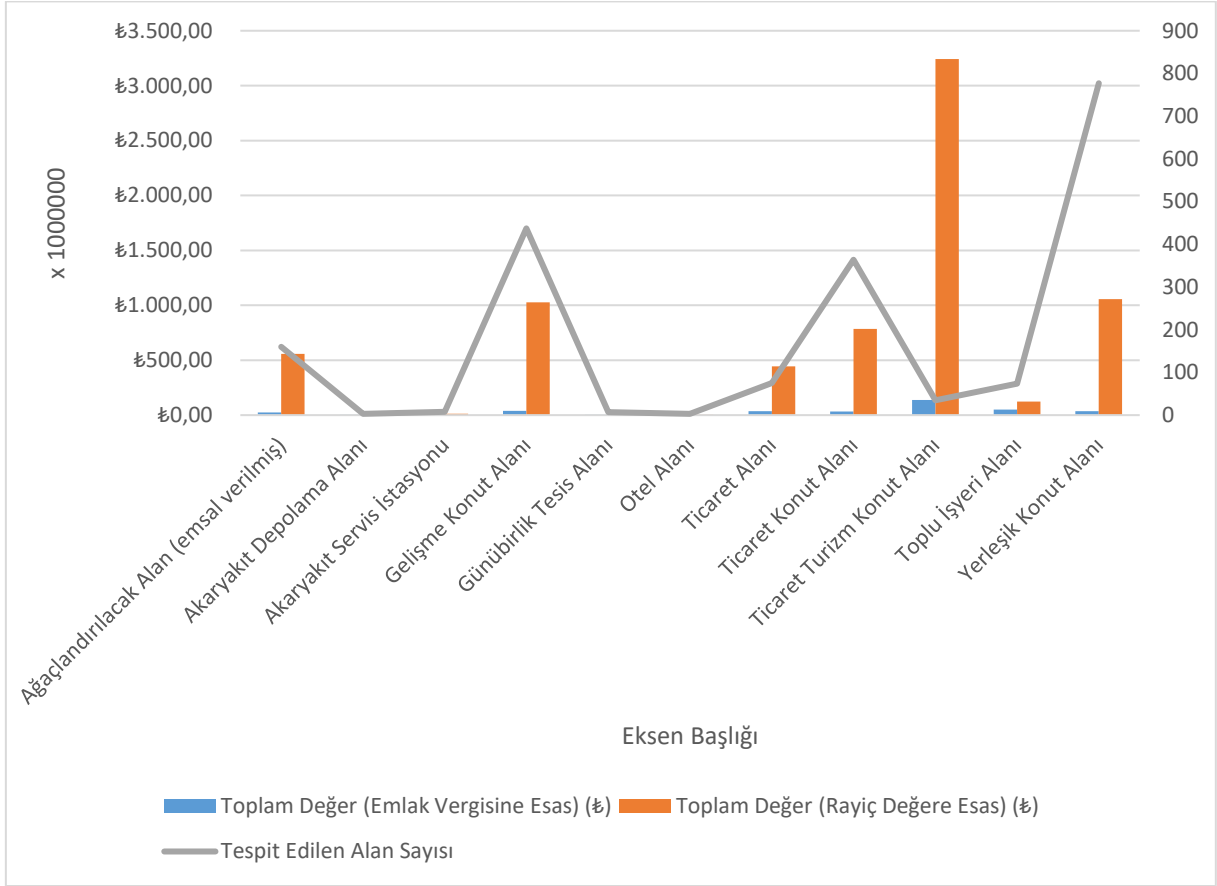
Şekil 8. Tespit edilen tescil dışı alanların m² birim değeri bazında görünümü

Tablo 2. Tespit edilen tescil dışı alanlara ait genel sonuçlar

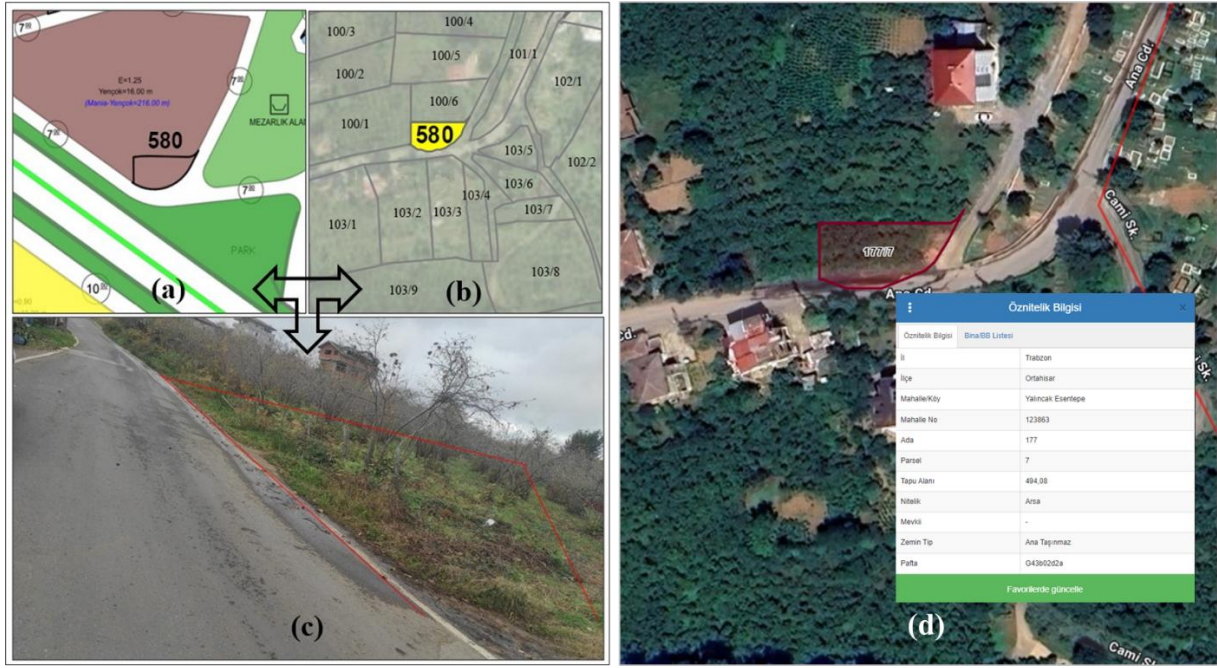
Donatı Adı	Tespit Edilen Alan Sayısı	Donatı Sınıfı	Ortalama Birim Değer (Emlak Vergisine Esas) (₺/m ²)	Toplam Değer (Emlak Vergisine Esas) (₺)	Ortalama Birim Değer (Rayiç Değere Esas) (₺/m ²)	Toplam Değer (Rayiç Değere Esas) (₺)
Ağaçlandırılacak Alan (emsal verilmiş)	160	PYA	₺323,07	₺25.223.748,49	₺7.983,50	₺557.957.147,69
Akaryakıt Depolama Alanı	3	PYA	₺1.074,85	₺1.172.088,22	₺10.032,73	₺22.047.306,42
Akaryakıt Servis İstasyonu	8	PYA	₺2.851,35	₺2.331.820,21	₺16.892,42	₺11.849.148,29
Gelişme Konut Alanı	437	PYA	₺330,41	₺38.924.331,70	₺8.969,95	₺1.026.635.804,42
Günübirlik Tesis Alanı	7	PYA	₺979,85	₺1.716.748,69	₺16.567,50	₺35.405.431,31
Otel Alanı	3	PYA	₺778,14	₺119.846,58	₺20.914,35	₺2.173.129,22
Ticaret Alanı	75	PYA	₺4.792,37	₺35.021.425,23	₺68.243,26	₺445.345.193,76
Ticaret Konut Alanı	364	PYA	₺1.344,20	₺33.991.867,45	₺27.637,50	₺786.359.573,33
Ticaret Turizm Konut Alanı	35	PYA	₺2.366,33	₺136.582.285,16	₺54.144,31	₺3.241.484.986,54
Toplu İşyeri Alanı	74	PYA	₺1.221,76	₺49.276.515,50	₺6.479,38	₺122.085.833,93
Yerleşik Konut Alanı	777	PYA	₺489,61	₺35.890.065,75	₺15.430,90	₺1.055.194.449,56



Şekil 9. Tescil dışı alanların birim metrekare değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 10. Tescil dışı alanların toplam değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 11. Örnek bir tescil dışı alanın a) imar planı üzerindeki durumu, b) kadastral durumu ve c) fiili kullanım durumu, d) ilgili alanın tescili ile ada ve parsel numarası alması (177 ada 7 numaralı parsel)

5. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışma, Türkiye'de yapılaşması tamamlanmış ancak AAD kapsamına alınamayan bölgelerdeki tescil dışı alanların bilgi teknolojileriyle tespit edilerek kamuya kazandırılmasını amaçlamaktadır. Çalışmada geliştirilen CBS tabanlı analiz yaklaşımı, tescil dışı alanların hem geometrik hem de ekonomik değer potansiyelini aynı anda ortaya koyarak, yerel yönetimlerin bu alanları plan kararlarıyla uyumlu biçimde değerlendirebilmesine yönelik uygulamalı bir araç sunmaktadır. Bu yönüyle çalışma, ulusal düzeyde örneği bulunmayan bir uygulama önerisi sunarak literatürdeki boşluğu doldurmakta ve plan-kadastro entegrasyonu üzerine yeni bir metodolojik katkı sağlamaktadır.

Trabzon Ortahisar ilçesinde yürütülen uygulama, tescil dışı kalan alanların nicelik ve nitelik olarak küçümsenmeyecek bir ekonomik potansiyel taşıdığını göstermektedir. Gerçekleştirilen CBS tabanlı analizlerle toplam 1.943 adet tescil dışı alan belirlenmiş, bu alanların toplam yüzölçümü 586.511,87 m² olarak hesaplanmıştır. Emlak vergisi rayiç değerlerine göre bu alanların tahmini değeri 360 milyon TL, piyasa rayiçlerine göre ise 7,3 milyar TL seviyesindedir. Bu fark, kamu taşınmazlarının değerlendirme süreçlerinde güncel piyasa dinamiklerinden uzak olunduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Değer haritalarının dinamik olması ve güncel tutulması yalnızca mali kazanç açısından değil, vergi kaybının önlenmesi ve adil değerlendirme sisteminin geliştirilmesi bakımından da gereklidir. Bu sonuçlar, planlama ve kadastro süreçleri arasında hâlen devam eden yapısal kopukluklara dikkat çekmektedir. İmar planlarında yapılan revizyonlar sonucu oluşan yeni donatı

sınırları ve terk fazlaları çoğu zaman tapu sistemine yansıtılamamakta, bu da mülkiyet açısından gri alanlar yaratmaktadır. Özellikle kapanan yollar, terk edilmiş donatılar ve imar adasına dönüşen eski kamusal alanlar gibi geometrik olarak anlamlı ancak hukuken sahipsiz kalan parçalar, sistematik biçimde yönetilmemektedir.

Araştırma bulguları, sadece planlama disiplini açısından değil, yerel yönetimlerin mali sürdürülebilirliği açısından da önemli çıkarımlar sunmaktadır. Sayıştay raporlarına göre Ortahisar Belediyesi 2020 yılında 4,6 milyon TL bütçe açığı vermiştir (T.C. Sayıştay Başkanlığı, 2020). Oysa yalnızca bu çalışma kapsamında belirlenen tescil dışı alanların piyasa değerine göre değerlendirilmesi hâlinde, belediyeye çok daha yüksek düzeyde kaynak yaratılması mümkündür. Bu, tescil dışı alanların yalnızca mülkiyet sorunu değil, aynı zamanda yerel düzeyde ekonomik fırsat alanı olduğunu göstermektedir.

Çalışmada kullanılan CBS tabanlı yöntem, kadastro verileri, imar planları ve rayiç değerlerin eşzamanlı olarak analiz edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yöntem; alan büyüklüğü, konumsal uygunluk ve ekonomik potansiyel gibi çok boyutlu değerlendirmelere dayandığından, yerel yönetimlerin planlama-karar süreçlerinde etkin bir araç olabilir. Ancak yöntemin sağlıklı şekilde uygulanabilmesi için nitelikli veri altyapısı, kurumlar arası eşgüdüm ve mevzuat desteği gerekmektedir.

Öte yandan, Türkiye’de tescil dışı alanlara ilişkin mevzuat parçalı ve yoruma açık niteliktedir. Kadastro, imar ve tapu yasalarında bu alanlara ilişkin farklı tanımlar yer almakta; Danıştay kararlarında dahi bu alanların değerlendirilmesine dair yeknesak bir yaklaşım bulunmamaktadır. Bu durum, uygulamada idari tereddütlere, gecikmelere ve kamu zararına neden olmaktadır. Dolayısıyla bu alanda normatif bir çerçevenin oluşturulması ve yerel yönetimlerin elini güçlendirecek yasal düzenlemelerin yapılması elzemdir.

Sonuç olarak, bu çalışma ile önerilen yöntem hem mevcut kentsel alanların etkin kullanımına katkı sunmakta hem de mülkiyet sisteminde eksik bırakılmış alanların kamuya kazandırılmasına yönelik çözüm önermektedir. Modelin ölçeklenebilirliği yüksektir; benzer yapısal soruna sahip diğer kentlerde de kolaylıkla uygulanabilir. Bununla birlikte, önerilen yöntemin başarıyla hayata geçirilebilmesi için şunlar gereklidir:

- CBS altyapısının güçlü ve güncel tutulması,
- Kadastro ve planlama verilerinin birlikte yönetilmesi,
- Tescil dışı alanların tanımının ve tescil prosedürlerinin mevzuatla netleştirilmesi,
- Yerel yönetimlerde bu süreçleri yürütecek teknik ekiplerin kurulması ve eğitilmesi.

Bu yönüyle çalışma, sadece mekânsal planlamaya değil; aynı zamanda kamu taşınmaz yönetimi ve yerel mali kapasiteyi artırma stratejilerine de somut katkı sunmaktadır.

Bu çalışma, plan uygulamalarının sadece teknik bir düzenleme değil, aynı zamanda stratejik bir süreç olduğuna da dikkat çekmektedir. Özellikle imar uygulamalarına esas beş yıllık imar programları kapsamında AAD uygulanacak alanların etaplar halinde belirlenmesi, hem planlama süreçlerinin şeffaf yürütülmesini sağlar hem de tescil dışı alanların daha erken aşamada tespit edilmesine imkân tanır. Planların parça parça uygulanması, fiili ve hukuki el atmalar, gecikmeli kamulaştırmalar ve uygulama sorunlarına neden olmakta; bu da hem mali yük hem de hukuki risk doğurmaktadır. Bu çerçevede, 3194 sayılı İmar Kanunu'nun 15. ve 16. maddelerinin hangi alanlarda uygulanabilir olduğunun önceden belirlenmesi, tescil dışı alanların sistematik bir biçimde ele alınmasını kolaylaştıracaktır. Ancak yerel yönetimlerin büyük bir kısmının, beş yıllık imar programları konusunda ve bu programları imar uygulamaları ile ilişkilendirme konusunda hâlâ kurumsal kapasite ve farkındalık eksikliği yaşadığı da gözlenmektedir.

Belirtilen sebeplerle önerilen modelin farklı kent ölçeklerinde uygulanabilirliğinin, kurumsal kapasite farklılıklarının, veri erişiminin ve kalitesinin ölçülebilmesi için, yöntemin farklı belediyelerde karşılaştırmalı olarak uygulanması, kurumsal kapasite ile ekonomik çıktı arasındaki ilişkinin incelenmesi ve pazarlama-strateji odaklı bir analiz modeliyle desteklenmesi önerilmektedir. Ayrıca, yerel yönetimlerin bu alanları etkin şekilde değerlendirebilmesi için gereken organizasyonel yapı, teknik personel yetkinliği ve veri yönetim süreçleri ayrı bir araştırma konusu olarak ele alınmalıdır. Geliştirilecek yeni çalışmalar, sadece mülkiyet sistemine katkı sunmakla kalmayacak, aynı zamanda planlama-kadastro entegrasyonunun güçlendirilmesine, yerel mali kapasitenin artırılmasına ve kamusal kaynak yönetiminde şeffaflığın sağlanmasına yönelik stratejilere de ışık tutacaktır.

Teşekkür

Yazarlar, veri kaynağı temini noktasında ve diğer teknik destekler bağlamında Karadeniz Teknik Üniversitesi Coğrafi Bilgi Sistemi Laboratuvarına (GISLab) ve Trabzon-Ortahisar Belediyesine 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.

Açıklama ve Bilgilendirme

Bu araştırma makalesi, “Yerel Yönetimler İçin CBS Tabanlı Gayrimenkul Geliştirme ve Pazarlama Modeli” başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

Kaynaklar

- Adams, D., Tiesdell, S., & White, J. T. (2013). Smart parcelization and place diversity: Reconciling real estate and urban design priorities. *Journal of Urban Design*, 18(4), 459-477. <https://doi.org/10.1080/13574809.2013.824367>
- Attila, İ. (2010). Gayrimenkul geliştirme projelerinde risk yönetimi. *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 29(2), 387-406.
- Başer, V., Bıyık, C., Uzun, B., Yıldırım, V., & Nişancı, R. (2016). A recommendation of decision-support model based on geographical information systems for generating real estate evaluation maps: kaşüstü/trabzon example. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 34(3), 349-363.
- Birleşmiş Milletler. (2001). *Indicators of Sustainable Development: framework and methodologies*. Comission on Sustainable Development, New York.
- Çabuk, S. (2015). CBS'nin yerel yönetimlerde kullanımı ve kent bilgi sistemleri. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(3), 69-87.
- Çay, T., & Kandemir, İ. (2023). An evaluation on the update cadastre legislation in Türkiye. *Advanced Land Management*, 3(1), 22-33.
- Çepni, M. S. (2022). Tescil dışı alanların arsa düzenlemelerinde değerlendirilmesi. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 9(2), 127-136.
- Coruhlu, Y. E., Uzun, B., & 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>
- Demir, O., Uzun, B., & Çete, M. (2008). Turkish cadastral system. *Survey Review*, 40(307), 54-66. <https://doi.org/10.1179/003962608X253484>
- Demir, O., & Çoruhlu, Y. E. (2009). Determining the property ownership on cadastral works in Turkey. *Land Use Policy*, 26(1), 112-120. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2008.01.011>
- Divithure, H., & Tang, C. (2013). Cadastral system migration from deeds registration to titles registration: case study of Sri Lanka. *Survey Review*, 45(330), 220-228. <https://doi.org/10.1179/1752270612Y.0000000020>
- Emamgholian, S., Pouliot, J., & Shojaei, D. (2021, Ekim). 3D Zoning: A Missing Piece to Link Planning Regulations with 3D Cadastre. In *Proceedings of the 7th International FIG 3D Cadastre Workshop, New York, NY, USA* (pp. 11-13).
- Ercan, O. (2021). A closer look at Turkish cadastre and its successful completion. *Land Use Policy*, 110, 104951. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104951>
- Ersoy, M., & Keskinok, H. Ç. (2000). *Mekan Planlama ve Yargı Denetimi*. Ankara:Yargı Yayınevi.
- Güler, N., & Ertaş, M. (2022). Examination of sustainable land management at the urban scale. *Advanced Land Management*, 2(2), 79-88.
- Gümüşay, M. Ü. (1997). *Arsa üretimine yönelik coğrafi bilgi sistemi tasarımı ve uygulaması* (Doktora tezi). Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (67843).
- Günakın, Z. (2019). *Türkiye’de tescil harici kalmış yerlerin tesciline yönelik çalışmalar karşılaşılan sorunlar ve çözüm önerileri: Çorum örneği* (Yüksek lisans tezi). Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (592728).
- Ekşi, U. (2018). *Şehirleşmede yerel yönetimlerin etkisi ve kentsel dönüşüm uygulamaları* (Yüksek lisans tezi). Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (549664).

- İşcan, F., & Ilgaz, A. (2017). Analysis of geographic/urban information system web presentations of local governments in Turkey. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 2(3), 75-83.
- Kandemir, İ., & Şaşkın, Ö. (2019). Türkiye'deki tescil harici alanların kadastro boyutu ve ekonomiye kazandırılmasının önemi. *TMMOB Harita ve Kadaastro Mühendisleri Odası 17. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, Ankara.
- Karataş, K., & Genç, E. (2021). Kadaastro Haritalarının Sayısallaştırılması Kapsamında Yapılan Çalışmaların Analizi. *Geomatik*, 6(2), 124-134.
- KENTGES. (2009). *Kentsel dönüşüm, konut ve arsa politikaları komisyonu raporu*. Kentleşme Şûrası 2009, Ankara.
- Koçpınar, T. (2015). *Tapulama ve kadaastro çalışmalarında tescil harici kalan yerlerin tescili ve ekonomiye kazandırılması*. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Tapu ve Kadaastro Genel Müdürlüğü Teftiş Kurulu Başkanlığı, Ankara.
- Konuk, A. (2011). *Coğrafi Bilgi Sistemleri İçin Temel İstatistik*. T.C. Anadolu Üniversitesi Yayını, Eskişehir.
- Köse, A. (2019). *Yerel yönetimlerde taşınmaz yönetimi: Polatlı Belediyesi örneği* (Dönem projesi). Ankara Üniversitesi Akademik Arşiv Sistemi veri tabanından erişildi.
- Li, L., Tong, W., & Piltner, R. (2020). *Spatiotemporal interpolation methods for air pollution*. (ss. 153-167). Amsterdam:Elsevier.
- McDermott, M., Myers, M., & Augustinus, C. (2018). *Valuation of unregistered lands: a policy guide*. Global Land Tenure Network, Publishing Services Section, Nairobi.
- Özdemir Sarı, Ö. B., Özdemir, S. S., & Uzun, N. (2019). *Urban and regional planning in Turkey*. Switzerland: Springer.
- Paramasivam, C. R., & Venkatramanan, S. (2019). An introduction to various spatial analysis techniques. GIS and geostatistical techniques for groundwater science. (ss. 29-30). Amsterdam:Elsevier
- Peiser, R., & Hamilton, D. (2012). *Professional real estate development: the ULI guide to the business*. Urban Land Institute.
- Samancıoğlu, F. (2021). *Arazi toplulaştırma projelerinin kırsal kalkınma içerikli yapılmasının gerekliliği üzerine bir çalışma* (Yüksek lisans tezi). Ulusal Tez Merkezi veri tabanından erişildi (705079).
- Sesli, F. A., & Şişman, A. (2010). Kıyıda kalan mülkiyetlerin coğrafi bilgi sistemleri ile belirlenmesi: Samsun örneği. *III. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu*, Kocaeli.
- Scott, G., & Rajabifard, A. (2017). Sustainable development and geospatial information: a strategic framework for integrating a global policy agenda into national geospatial capabilities. *Geo-spatial Information Science*, 20(2), 59-76. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1325594>
- Stylianidis, E., Karanikolas, N., & Kaimaris, D. (2012). A GIS for urban sustainability indicators in spatial planning. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 7(1), 1-13. <https://doi.org/10.2495/SDP-V7-N1-1-13>
- T.C. Cumhurbaşkanlığı. (2018). II. 100 Günlük İcraat Programı.
- T.C. Danıştay Başkanlığı. (1998). E.1997/1847, K.1998/760 sayılı kararı.
- T.C. Danıştay Başkanlığı. (2013). E.2012/1904, K.2013/6299 sayılı kararı.
- T.C. Resmî Gazete. (1934). Tapu Kanunu, 2892.
- T.C. Resmî Gazete. (1983). Kamulaştırma Kanunu, 18215.
- T.C. Resmî Gazete. (1985). İmar Kanunu, 18749.
- T.C. Resmî Gazete. (1987). Kadaastro Kanunu, 19512.
- T.C. Resmî Gazete. (2001)Türk Medeni Kanunu, 24607.
- T.C. Sayıştay Başkanlığı. (2020). Trabzon Ortahisar Belediyesi 2020 Yılı Sayıştay Denetim Raporu. <https://www.sayistay.gov.tr/reports/3944-trabzon-ortahisar-belediyesi>
- TKGM. (2023). Misyon ve Vizyon. Taşınmaz Değerleme Dairesi Başkanlığı. <https://www.tkgm.gov.tr/tasinmazd-db/misyon-ve-vizyon>
- Turan, K. B. (2013). *Devletin hüküm ve tasarrufu altındaki tescil dışı alanların hukuki durumları ve bu alanların imar uygulamalarındaki yeri* (Dönem projesi). Ankara Üniversitesi Akademik Arşiv Sistemi veri tabanından erişildi (74423).
- Turek, T., & Stepiak, C. (2021). Areas of integration of GIS technology and smart city tools. Research findings. *Procedia Computer Science*, 192(2021), 4681-4690. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.09.246>
- Uyan, M. (2019). Comparison of different interpolation techniques in determining of agricultural soil index on land consolidation projects. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 4(1), 28-35.
- Uzun, B. (2009). Using land readjustment method as an effective urban land development tool in Turkey. *Survey Review*, 41(311), 57-70. <https://doi.org/10.1179/003962608X390003>

- Uzun, B., Yıldırım, V., Çoruhlu, Y. E., Yıldız, O., Terzi, F., & Atasoy, B. A. (2024). Enhancing Turkish land readjustment via a combination of IPA-based on SWOT and workshops. *Land Use Policy*, 144, 107245.
- Ülger, N. E., & Baş Eray, G. (2003). Arazi geliştirmenin kuramsal temelleri. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, 16(1), 55-65.
- Wyatt, P. (2011). Land administration in a micro-state: the role of land use planning. *Survey Review*, 43(323), 505-522. <https://doi.org/10.1179/003962611X13117748891994>
- van Maarseveen, M., Martinez, J., & Flacke, J. (2019). *GIS in sustainable urban planning and management: A global perspective*. London: CRC Press.
- Yeh, A. G., & Wu, F. (1996). The new land development process and urban development in Chinese cities. *International Journal of Urban and Regional Research*, 20(2), 330-353. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2427.1996.tb00319.x>
- Yıldız, O., & Erden, Ç. (2021). Cadastral updating: the case of Turkey. *Survey Review*, 53(379), 335-348. <https://doi.org/10.1080/00396265.2020.1759982>
- Yılmaz, C. B., Bodu, H., Yüce, E. S., Demir, V., & Sevimli, M. F. (2023). Türkiye'nin uzun dönem ortalama sıcaklık (° C) değęerlerinin üç farklı enterpolasyon yöntemi ile tahmini. *Geomatik*, 8(1), 9-17.
- Yomralıoğlu, T. (2009). Coğrafı bilgi sistemleri: temel kavramlar ve uygulamalar. İstanbul.

Determination of Rooting Rates of Rootstock Hazelnut (*Corylus colurna* L.) Genotypes in Wood Cuttings

Salih ÇOLAK¹, Ali İSLAM², Ali TURAN^{3*}, Muharrem YILMAZ⁴, Selim KARAGÖL⁵,
Sezgin AYAN⁶

Abstract

The research was conducted in Tosya district of Kastamonu province between 2020 and 2022 with the objective of ascertaining the rooting of rootstock *Corylus colurna* L. genotypes. The study utilized one-year-old cuttings, meticulously planned in three replicates, with 20 cuttings employed in each replicate. The doses of indole-3-butyric acid (IBA) employed for rooting ranged from 0 to 6000 ppm, with specific concentrations including 0, 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 and 6000 ppm. Two-thirds of the IBA-treated cuttings were then buried in pans containing a perlite, and rooting was induced. The traits of the survival rate (%), callusing and rooting rate (%), as well as rooting (quantity), roots (cm) and shoots length (cm) and the number of leaves (quantity), were examined. The study revealed that the highest rooting rate was observed in the 5000 ppm treatment, reaching 25%, while the lowest rate was recorded in the control, at 1.7%. The 1000 ppm treatment resulted in the highest number of roots (8%), followed by the 2000 ppm treatment, which produced 6.3%. Following a thorough evaluation of the study's findings, it is recommended that 5000 ppm IBA be applied for the purpose of rooting in wood cuttings.

Keywords: Cutting, Rooting, Perlite, Turkish hazelnut.

Anaçlık Fındık (*Corylus colurna* L.) Genotiplerinin Odun Çeliklerinde Köklenme Oranının Belirlenmesi

Öz

Araştırma Kastamonu ili Tosya ilçesinde seleksiyon ıslahı yoluyla seçilen anaçlık *Corylus colurna* L. genotiplerinin köklenme oranlarının tespit edilmesi amacıyla 2020-2022 yılları arasında yürütülmüştür. Çalışma, bir yaşlı odun çelikleri ile üç tekrerrürlü olarak ve her tekrerrürde 20 çelik temsil edecek şekilde planlanmıştır. Köklendirmede indol butirik asidin (IBA) 0, 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 ve 6000 ppm dozları uygulanmıştır. IBA uygulanmış çelikler köklendirme ortamı tavalara 2/3'ü gömülerek köklenmeye alınmıştır. Çeliklerde, canlı çelik (%), kallüs oluşumu (%) ve köklenme oranı (%), kök sayısı (adet), kök (cm) ve sürgün uzunluğu (cm) ve yaprak sayısı (adet) özellikleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda en yüksek köklenme oranı %25 ile 5000 ppm uygulamasında elde edilirken en düşük köklenme oranı kontrol uygulamasında (%1.7) görülmüştür. En yüksek kök sayısı ise %8 ile 1000 ppm uygulamasında tespit edilirken, bunu %6.3 ile 2000 ppm dozu takip etmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bütün değişkenlere ait veriler değerlendirildiğinde 5000 ppm IBA uygulamasının Türk fındığı odun çeliklerinde köklenme için önerilebilir kanaati oluşmuştur.

Anahtar Kelimeler: Çelik, Köklenme, Perlit, Türk fındığı.

^{1,2,4,5}Ordu University, faculty of Agriculture, Department of Horticulturae, Ordu, Türkiye,
scolak1974@hotmail.com islamali@hotmail.com muharremyilmaz@gmail.com selimkaragol@gmail.com

³Giresun University, Hazelnut Specialization Coordinatorship, Giresun, Turkey, ali.turan@giresun.edu.tr

⁶Kastamonu University, Faculty of Forestry, Department of Silviculture, Kastamonu, Turkey, sezginayan@gmail.com

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Introduction

Türkiye has well-established tradition of fruit cultivation, and recently, there have been significant improvements in fruit sapling production. The current production of fruit and vineyard saplings in Türkiye at 238 million. Notably, there is an absence of records pertaining to hazelnut sapling production. A study conducted to ascertain the procurement sources of hazelnut seedlings revealed that all (100%) of the seedlings utilized in new orchard facilities are derived from bottom shoots. Producers prioritise bottom shoots that can be saplings, selecting those that are abundant, productive, and healthy. It has been documented that 59.58% of the seedlings utilized in the establishment of orchards were sourced from the producers' personal gardens, 27.92% were obtained from other orchards in the vicinity, 8.17% were acquired from outside the province, and 3.50% were obtained from agricultural organizations (İslam et al., 2019).

Corylus avellana L. is typically propagated through vegetative methods, though it has been observed to facilitate the transmission of diseases (Scortichini, 2002). Micropropagation techniques have been extensively employed for the purpose of generating disease-free seedlings (Sgueglia et al., 2019; Braun and Donald, 2019).

In hazelnut cultivation, the most straightforward method for producing seedlings is through the use of bottom shoots. The seedlings obtained through this method should exhibit a smooth and disease-free appearance, devoid of new shoots from the bottom. The ideal seedlings should be 1-2 years old, with abundant root growth and undamaged health. When selecting seedlings for use in establishing a new orchard, even when attention is paid to selecting those from well-developed and abundant productive sources, hazelnut seedlings are generally weak-rooted.

In Türkiye, hazelnut cultivation is predominantly undertaken in gardens established by the so-called hearth method. In contrast, in countries such as the USA, Spain and Chile, single-stem cultivation is the preferred approach (Karatas et al., 2018). In some countries, Dundee, Newberg, Gasaway rootstocks obtained from *Corylus colurna*, which do not produce bottom shoots, are used. Saplings obtained by the top-dipping method are used in new garden establishment (Karatas et al. 2018). A substantial body of research has been dedicated to the study of rootstock and seedling production in hazelnut (Lagerstedt, 1976 and 1993; Gautam and Howard, 1994; Yu and Reed, 1995; Korac et al., 1997; Bassil et al., 1991; Damiano et al., 2005; Roversi, 2015). However, there is a paucity of research focusing on the characteristics of hazelnut rootstock (İslam et al., 2023). Consequently, there is a necessity to augment the existing body of knowledge in this area and to undertake further studies in this field.

Kantarıcı and Ayfer (1992) reported that high-dose IBA (5000 ppm) application increased the rooting rate in a study on *Corylus avellana* L. species. In numerous studies where IBA application

was conducted, the timing of cuttings alongside the chemical application was examined, revealing that IBA application significantly augmented the number of roots and their quality, irrespective of the date of cuttings (Kantarıcı and Ayfer 1992). Hartmann and Kester (1990) further emphasized the efficacy of high concentrations for successful hazelnut propagation through wood cuttings. Ercişli and Read (2001) obtained high rooting at 2000 ppm IBA dose in their rooting studies with soft and semi-woody cuttings of hazelnut (*Corylus colurna*). İslam et al. (2019) reported that 4000 and 8000 ppm IBA doses can be recommended for rooting of *Corylus colurna* L. wood cuttings.

The process of fruit cultivation commences with the production of saplings, which must be authentic, robust, and adhere to established standards (İslam et al., 2019). Vegetative propagation methods are predominantly employed in nursery settings. However, research on rootstock breeding in hazelnut is currently limited. Furthermore, studies that ascertain rootstock characteristics are inadequate. Consequently, there is a pressing need for research focusing on rootstock breeding and vegetative propagation in hazelnut. The present study was conducted with the objective of determining the rooting characteristics of rootstock *Corylus colurna* L. genotypes identified by selection breeding from Küçüksekiler village in Tosya of Kastamonu province. It is anticipated that the data obtained will contribute to the development of improved rootstock, rooting, and, in particular, the hazelnut sector.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

The cutting materials were gathered from Küçüksekiler village in Tosya of Kastamonu province between 2020 and 2022 (March; Figure 1). Following the evaluation, cuttings were taken from one-year-old shoots of the genotypes with prominent rootstock characteristics and stored in the refrigerator at +4°C temperature and 65% humidity until the rooting process.

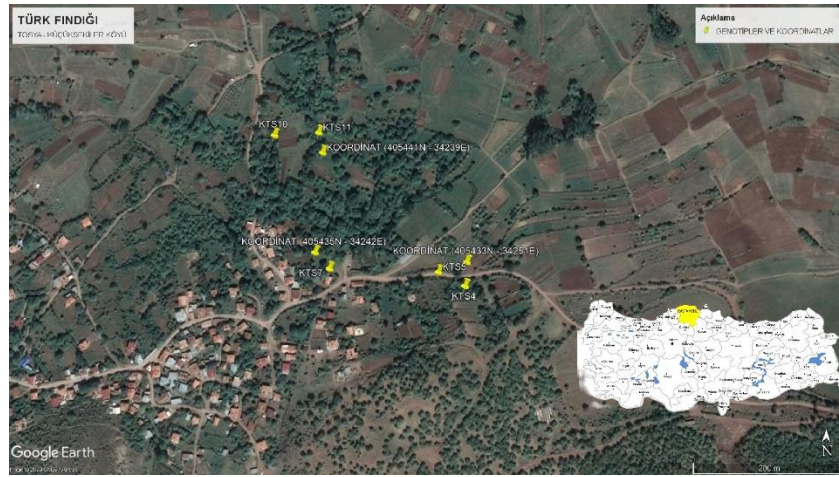


Figure 1. The geographical location in which the samples were obtained

2.2. Methods

The experiment was conducted within a rooting tray situated in the plastic greenhouse at Ordu University Faculty of Agriculture application area. The study utilized indole-3-butyric acid (IBA) doses ranging from 0 to 6000 ppm; encompassing 0, 500, 1000, 2000, 2000, 3000, 4000, 5000 and 6000 ppm, respectively. In the study, which was carried out in three replicates, 20 cutting were used in each replicate. The cuttings were immersed in IBA solutions for a period of 5-6 seconds (Hartman and Kestel, 2002). Thereafter, two-thirds of the cuttings were buried in perlite rooting medium and the process of rooting was initiated (Figure 2).



Figure 2. Preparation of cuttings (A) and rooting in perlite condition (B)

A rooting condition of agricultural perlite was utilized in the experimental setup. The rooting process was conducted in thermostatically controlled rooting pans that were bottom-heated to a temperature of +24°C within a high tunnel environment. The application of misting was employed to mitigate moisture loss. After a period of 90 days, the cuttings were removed from the rooting

condition, and the following parameters were determined: Viable cutting (%; SR), callus formation (%; C), rooting rate (%; RR), number of root (quantity; RT), root length (cm; RL), shoot length (cm; SL) and number of leaves (quantity; LV; İslam et al., 2023).

2.3. Statistical analysis

The study was conducted in a randomised plots experimental design, with three replicates, and the data were analysed with JMP 13.0 (a business unit of SAS for Windows) statistical package programme at 5% significance level.

3. Findings and Discussion

In general, it can be said that the rooting rate increases with the increase in IBA doses and high IBA doses are more effective in the rapid dipping process (Çiçek and Özel, 2021). Of course, this may vary according to the time of taking cuttings, the type of cuttings and the dose intensity of the plant growth regulator applied. Namely; the higher rooting rate of the bottom cuttings may be due to the fact that the bottom parts of the shoots are rich in carbohydrates and this encourages root development (Hartmann et al., 2011). In our study, the cuttings were removed 90 days after the establishment of the experiment and measurements and observations were made (Figure 3).

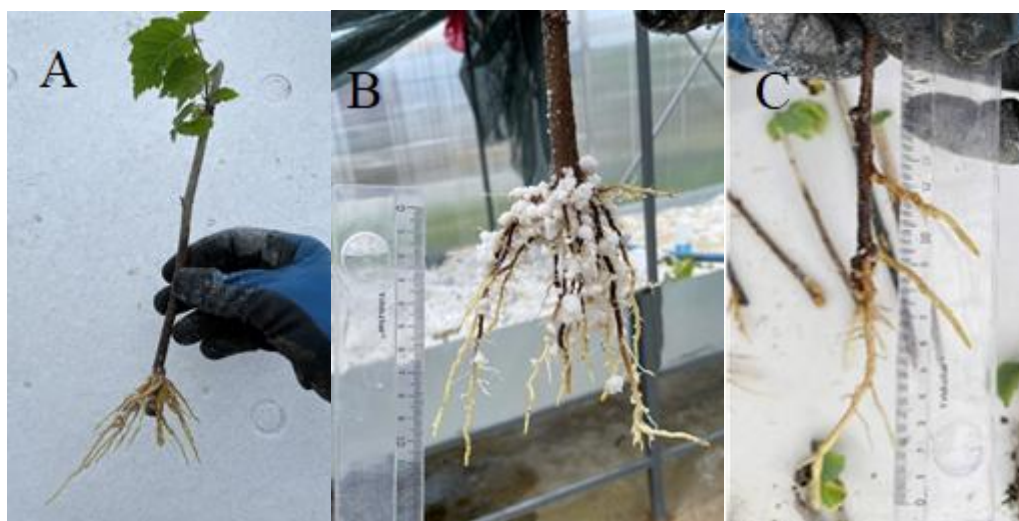


Figure 3. Rooting of wood cuttings with different IBA applications (A-C)

The measurements demonstrated that the highest survival rate was recorded in the control group, which accounted for 60% of the total (Figure 4). This was followed by 1000 ppm IBA with 48.3%, 3000 ppm IBA with 46.7%, 2000-4000 ppm IBA with 43.3%, 6000 ppm IBA with 40% and 500 ppm IBA with 30%. The lowest number of viable cuttings was observed in the 5000 ppm IBA

treatment, yielding 28.3%. The highest number of callus-forming cuttings was observed in the control group, with 26.7% of cuttings forming callus. This was followed by the 1000 ppm IBA group, with 20% of cuttings forming callus, and the 4000 ppm IBA group, with 16.7% of cuttings forming callus. The 3000 ppm IBA group had the lowest number of callus-forming cuttings, with only 3.3% of cuttings forming callus. The least callus formation was detected in the 500 ppm IBA treatment, with a percentage of 1.7% (Figure 4).

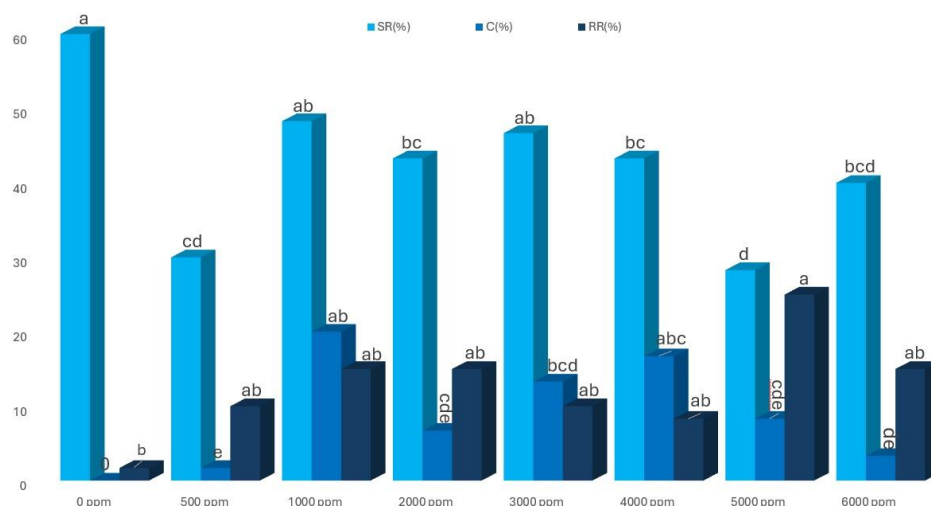


Figure 4. Effect of IBA concentration (0-6000 ppm) on survival rate (SR), callusing (C) and rooting rate (RR). Data represent the mean $\pm$ sd (n=3). Different letters indicate significant differences ($p < 0.05$).

The treatment with 5000 ppm IBA produced the highest rooting rate, with 25% of the cuttings successfully rooting. This was followed by the 1000 ppm, 2000 ppm, and 6000 ppm IBA treatments, each yielding around 15% rooting. In comparison, the 500 ppm and 3000 ppm IBA treatments resulted in 10% rooting, while the 4000 ppm IBA treatment showed the lowest rooting rate at 8.3%, as shown in Figure 4. İslam et al. (2023) reported that the number of viable cuttings was obtained from IBA 4000 ppm dose and the rooting rate was 21.7% in the same application. Conversely, Srivastava et al. (2010) reported that a 33% rooting rate was achieved at a 3000 ppm dose, and Hartmann and Kester (1990) recommended high IBA doses for hazelnut propagation by wood cuttings.

The highest mean number of roots in the rooted cuttings was observed in the 1000 ppm IBA treatment, which had eight pieces. This was followed by the 2000 ppm IBA treatment, which had six pieces, and the 5000 ppm IBA treatment, which had five pieces. The 3000-6000 ppm IBA treatment had an average of four pieces. The lowest average number of roots in the rooted cuttings was found in the control group with 0.60 (Figure 5). The highest number of leaves was observed in the control group, with a mean of 7.7, followed by 6000 ppm IBA, with a mean of 7.3, 1000-3000-4000-5000 ppm IBA, with a mean of 6.3, and 2000 ppm IBA, with a mean of 5.7. The lowest number of leaves

was found in the 500 ppm IBA treatment, with a mean of 5.0 (Figure 5). İslam et al. (2023) reported that the number of roots per rooting plant was significantly higher than the other doses in cuttings treated with 8000 ppm IBA, exceeding 6000 ppm. In addition to these findings, Kantarcı and Ayfer (1992) reported that high doses of IBA (5000 ppm) increased the rooting rate in *C. avellana*, Erdoğan and Smith (2005) reported that the average number of roots increased in parallel with the increase in dose.

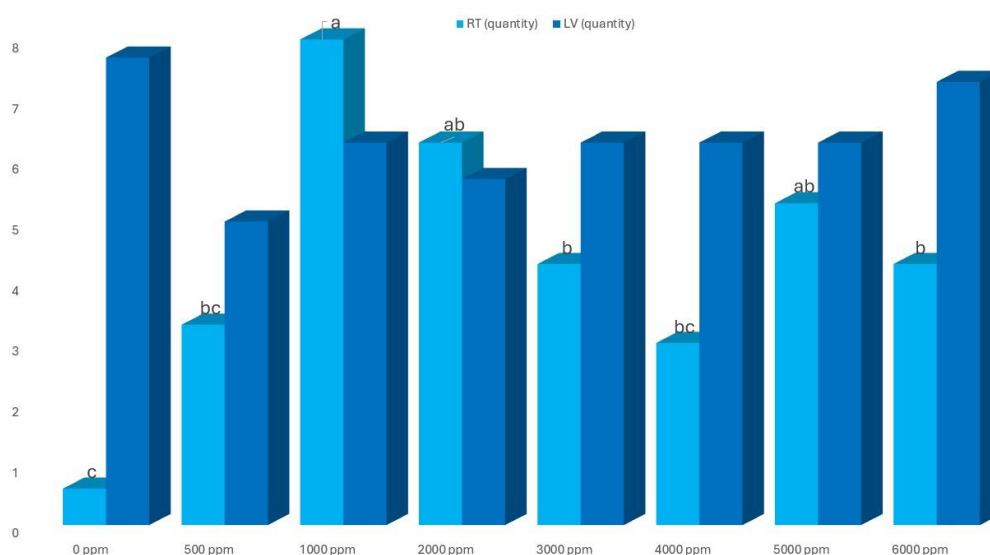


Figure 5. Effect of IBA concentration (0-6000 ppm) on rooting (RT), and number of leaves (LV). Data represent the mean $\pm$ sd (n=3). Different letters indicate significant differences ($p<0.05$).

The maximum root length was obtained from the 1000 ppm IBA treatment, which yielded a measurement of 14.3 cm. This was followed by the 5000 ppm IBA treatment, which yielded a measurement of 10.7 cm, the 2000 ppm IBA treatment, which yielded a measurement of 9 cm, and the 0 ppm IBA treatment, which yielded a measurement of 2 cm. The least root length was measured in the control group, which was 0.3 cm (Figure 6). The mean shoot length was recorded as 9.7 cm in the control group, followed by 8 cm in the 6000 ppm IBA group, 6.3 cm in the 5000 ppm IBA group, 6 cm in the 500 ppm IBA group, and 5.7 cm in the 3000-4000 ppm IBA group.

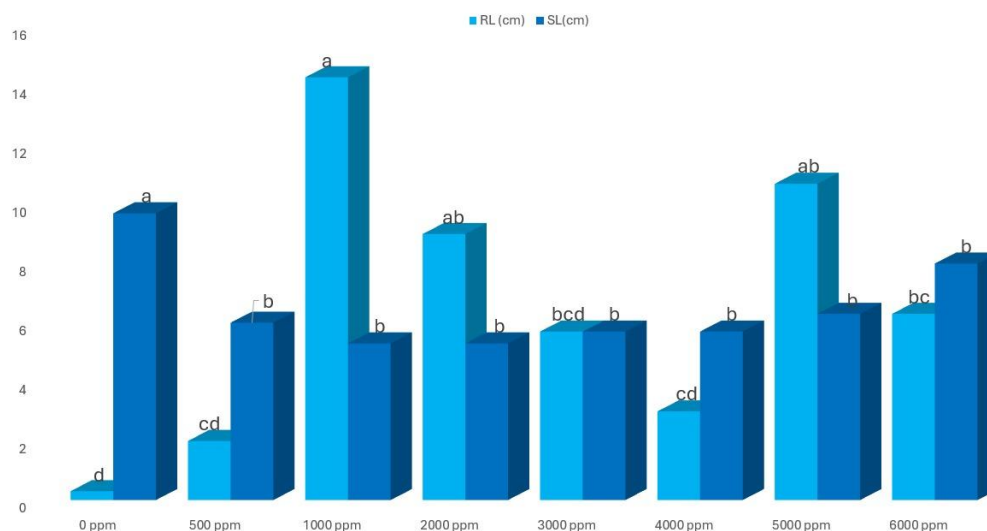


Figure 6. Effect of IBA concentration (0-6000 ppm) on roots and shoots length. Data represent the mean $\pm$ sd (n=3). Different letters indicate significant differences ($p<0.05$).

The shortest shoot length was observed in the 1000-2000 ppm IBA treatments, with an average of 5.3 cm (Figure 6). In a related study, Avcı (2023) reported that the rooting rate, the proportion of live cuttings, and the root length of the cuttings of the Tombul cultivar varied depending on the time of taking the cuttings and the treatments. Furthermore, it was observed that the most successful results were obtained in the 15 June-2000 ppm IBA treatment, and it was emphasized that the number of roots per cuttings and rooting level were in the 10 July-2000 ppm IBA treatment. Consequently, the study by Sayar (2023) on the Foşa cultivar also highlighted the significance of the timing of cuttings in terms of rooting and other characteristics. In a similar vein, Cristofori et al. (2010) ascertained that the rooting rate of green cuttings taken in June ranged from 0-50%, the callusing rate varied from 0-70%, and the number of roots was 0-4.7. The rooting rate of semi-wood cuttings taken in July was found to be 0-26.7%, callusing rate was 0-46.7% and number of roots was 0-11; rooting rate of semi-wood cuttings taken in August was 0-76.7%, callusing rate was 0-63.3% and number of roots was 0-6.3. In addition, it was observed that these characteristics varied according to the cultivars.

Consequently, it was observed in our and previous studies that the time of cuttings and the concentration of IBA applied had different effects on the characteristics of viable cuttings, callus formation, and rooting rate, number of roots, root and shoot length and number of leaves. Furthermore, ambient humidity and natural auxin content in the cuttings have been reported to be influenced by callus formation (Baul et al., 2010). In addition to these findings, it is widely acknowledged that cultivar and genetic differences, the location of the cuttings, nutritional status, storage conditions and period will also vary in terms of these characteristics.

4. Conclusions and Recommendations

In the field of hazelnut rootstock breeding, which has a long cultural history, studies are extremely limited. Therefore, further research in this area is imperative. The present study investigates the effects of different IBA doses on rooting rate and other root parameters in wood cuttings of various *Corylus colurna* genotypes. The results demonstrate variability in the effects of the doses applied. While other studies have examined the rooting success of diverse *Corylus colurna* genotypes in hazelnut, the addition of new comparative studies remains essential to the scientific community. A comprehensive evaluation of the data revealed that the application of 5000 ppm IBA was moderately effective in promoting rooting in *Corylus colurna* cuttings. Consequently, it is anticipated that the continuation of these studies will significantly contribute to the hazelnut production sector.

Acknowledgements

The research was funded by TÜBİTAK (Project N: 219O234).

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

- Avcı, H. İ. (2023), *Çelik Alma Zamanı, IBA ve Putresin Uygulamalarının Tombul Fındık Çeşidinde Köklenme Üzerine Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi. Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu.
- Bassil, N. V., Proebsting, W. M., Moore, L. W., and Lightfoot, D. A. (1991). Propagation of hazelnut stem cuttings using *Agrobacterium rhizogenes*. *HortScience*, 26, 1058– 1060.

- Baul, T. K., Mezbahuddin, M., Hossain, M. M., and Mohiuddin, M. (2010). Vegetative propagation of *Holarrhena pubescens*, a wild tropical medicinal plant: effect of indole-3-butyric acid (IBA) on stem cuttings. *Forestry Studies in China*, 12(4), 228-235.
- Braun, L., and Wyse, D. (2019). Optimizing IBA concentration and stem and segment size for rooting of hybrid hazelnuts from hardwood stem cuttings. *Journal of Environmental Horticulture*, 37(1), 1-8.
- Cristofori V., Roupheal Y., and Rugini E. (2010). Collection time, cutting age, IBA and putrescine effects on root formation in *Corylus avellana* L. Cutting. *Scientia Horticulturae*, 124, 189-194.
- Çiçek, E., ve Özel, A. (2021). Lavanta (*Lavandula angustifolia* Mill.)’da çelikle çoğaltmada uygun çelik tipi ve IBA dozunun belirlenmesi. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 25(2), 254-264. <http://dx.doi.org/10.29050/harranziraat.827325>
- Damiano, C., Catecaro, E., Giovinnazzi, J., Frattarelli, A., and Caboni, E. (2005). Micropropagation of hazelnut (*Corylus avellana* L.). *Acta Hort.*, 686, 221-226.
- Ercişli, S., and Read, P. E. (2001). Propagation of hazelnut by softwood and semi-hardwood cuttings under Nebraska conditions. *Acta horticulturae*, 556(556), 275-279.
- Erdoğan, V., and Smith, D. C. (2005). Effect of tissue removal and hormone application on rooting of hazelnut layers. *Hort Science*, 40, 1457-1460.
- Gautam, D. R., and Howard, B. H. (1994). Influence of preconditioning treatments and propagation environments of the rooting of hazelnut leafy stem cuttings. *Acta Hort.* 35, 361-369.
- Hartmann, H. T., and Kester D. E. (1990). *Plant Propagation*. Principles and Practices, 4th Ed. <http://dx.doi.org/10.2307/2483997>
- Hartmann, H. T., Kester, D. E., Davies, F., and Geneve, Y. R. (2011). *Plant Propagation: Principles and Practices*. 6th ed., 840s.
- İslam, A., Öger, İ., Karagöl, S., ve Turan, A. (2019). Farklı IBA uygulamalarının *Corylus colurna* L.’nin odun çelikleriyle köklenmesi üzerine etkisi. *Akademik Ziraat Dergisi*, 8(Özel Sayı), 45-48. <https://doi.org/10.29278/azd.655495>
- İslam, A., Ayan, S., Turan, A., Yılmaz, M., Çolak, S., and Karagöl, S. (2023). Morphometric Diversity for Rootstock Characteristics of Turkish Hazel (*Corylus colurna* L.) Populations in The Western Black Sea Region of Türkiye. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 13(4), 1416-1426. <https://doi.org/10.31466/kfbd.1285059>
- Kantarci, M., and Ayfer, M. (1992). Propagation Of Some Important Turkish Hazelnut Varieties By Cuttings. *Acta Horticulturae*, 351, 353-360.
- Karatas, Y. S., İslam, A., Tonkaz, T., Özkutlu, F., Rovira, M., Romero, A., Cristofori, V., Silvestri, C., Speranza, S., and Cetin, S. (2018). Examination of modern and traditional applications in hazelnut production. *Acta horticulturae*, 1226, 329-332.
- Korac, M., Ninicodorovic, J., Cerovic, S., and Golosin, B. (1997). Results of Hazel Grafting on Turkish Filbert. IV. *Acta Horticulture*, 445, 419-422.
- Lagerstedt, H. B. (1993). The evolution of a clonal filbert rootstock. Proceedings of the Nut Growers Association of Oregon, *Washington and British Columbia*, 78, 89-101.
- Lagerstedt, H. B. (1976). Development of Rootstock for Filberts. *Annu Rep Northern Nut Growers Assoc*, 65, 161-165.
- Roversi, A. (2015). How to Propagate no Suckering Hazelnut (*Corylus avellana* L.). *Bulg. J. Agric. Sci.*, 21, 355-357.
- Sayar, B. (2023). *Foşa Fındık Çeşidinde Çelik Alma Zamanı, IBA ve Putresin Uygulamalarının Köklenme Üzerine Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi. Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu.
- Scortichini, M. (2002). Bacterial canker and decline of European hazelnut. *Plant Dis.*, 86(7), 704-709.
- Sgueglia, A. A., Gentile, A., Frattarelli, G., Urbinati, M., Germanà A., and Caboni, E. (2019). Micropropagation of Sicilian cultivars with an aim to preserve genetic diversity in hazelnut (*Corylus avellana* L.), *Plant Biosystems An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 153:5, 720-724, <http://dx.doi.org/10.1080/11263504.2018.1549600>
- Srivastava, K. K., Singh, S. R., Zargar, K. A., and Sundouri, A. S. (2010). Response of propagating materials and rooting hormones on rooting potential of Hazelnut (*Corylus colurna* L.). *Indian Journal of Forestry*, 33(1), 85-88.
- Yu, X., and Reed, B. M. (1995). A micropropagation system for Hazelnut (*Corylus species*). *Hort Science*, 30, 120-123.

Elektrikli Motosiklet İçin Fırçasız Doğru Akım ve Asenkron Motorun Karşılaştırmalı Analizi: Tasarım, Performans ve Optimizasyon

Hakan KAHVECİ^{1*}, Furkan Muhammed KIRIKCI², Ömür AKYAZI³

Öz

Elektrikli motosikletler, fosil yakıtlara olan bağımlılığı ortadan kaldırmada önemli bir adım olmaları nedeniyle literatürde büyük bir öneme sahiptir. Literatürde, asenkron motorlar (ASM) basit tasarımları, düşük üretim maliyetleri ve dayanıklılıklarıyla; fırçasız doğru akım motorlar (FDAM) ise yüksek verimlilik, tork yoğunluğu ve hassas hız kontrol özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. FDA motorların, tekerlek içi (hub motor) uygulamalarda kullanılabilmesi elektrikli motosikletlerde güç aktarım organlarına duyulan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır. Özellikle dıştan rotorlu FDA motorlar ise yüksek tork yoğunluğu ve üstün soğutma özellikleri sayesinde literatürde popüler bir araştırma konusu olmaya devam etmektedir. Bu çalışmada, bir elektrikli motosikletin fiziksel kuvvet hesaplamalarına dayalı olarak (2.2-2.3) kW çıkış gücünü sağlayabilecek ASM ile dıştan rotorlu FDAM tasarımları, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanan ANSYS Electronics-Maxwell programında gerçekleştirilmiştir. Motorların hız, verim ve tork parametreleri değerlendirilmiş, ayrıca 2D-Maxwell ortamında akı yoğunlukları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar (%91.14 verim; 50.5 Nm; 11.067 kg), motosiklet uygulamasında FDA motorun üstün olduğunu göstermektedir. Genetik algoritma kullanılarak yapılan optimizasyon ile FDAM'ın istenmeyen Cogging torkunda azalma gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme, aynı nüve ve sargı malzemeleri referans alınarak yapılmıştır. Çalışmada, motor tasarım ve optimizasyon yöntemlerinin sunulması literatüre ve uluslararası yarışmalara önemli katkılar sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Fırçasız Doğru Akım Motor, Asenkron Motor, ANSYS Maxwell, Optimizasyon, Cogging Tork, Elektrikli Motosiklet.

Comparative Analysis of Brushless Direct Current and Induction Motor for Electric Motorcycle: Design, Performance and Optimization

Abstract

Electric motorcycles are significant in the literature as they are an important step in eliminating dependence on fossil fuels. In the literature, asynchronous motors (ASM) stand out with their simple design, low production costs and durability, while brushless direct current motors (BLDC) stand out with their high efficiency, torque density and sensitive speed control characteristics. The ability to use BLDC motors in in-wheel (hub motor) applications eliminates the need for powertrains in electric motorcycles. In particular, external rotor BLDC motors continue to be a popular research topic in the literature due to their high torque density and superior cooling properties. In this paper, based on the physical force calculations of an electric motorcycle, the external rotor BLDC motor designs with ASM which can provide (2.2-2.3) kW output power are carried out in ANSYS Electronics-Maxwell program using Finite Element Method (FEM). The speed, efficiency and torque parameters of the motors are evaluated and the flux densities are analyzed in a 2D-Maxwell platform. The results (%91.14 efficiency; 50.5 Nm; 11.067 kg) obtained show that the BLDC motor is advantageous in the motorcycle application. With the optimization using genetic algorithm, the undesired Cogging torque of the FDAM was reduced. The evaluation is based on the same core and winding materials. The presentation of motor design and optimization methods in this paper makes significant contributions to the literature and international challenge.

Keywords: Brushless Direct Current Motor, Asynchronous Motor, ANSYS Maxwell, Optimization, Cogging Torque, Electric Motorcycle.

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Trabzon, Türkiye, hknkahveci@ktu.edu.tr

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Trabzon, Türkiye, mfurkankirikci@ktu.edu.tr

³ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Trabzon, Türkiye, oakyazi@ktu.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

21. yüzyılda, çevresel sürdürülebilirliğin artırılması amacıyla fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmaya yönelik çalışmalar büyük önem kazanmıştır. Fosil yakıtlardan elde edilen ısı enerjisini kinetik enerjiye dönüştüren içten yanmalı motorların çevresel zararları hem endüstride hem de akademide yeni adımların atılmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu adımların sonucunda, elektrik motorlarının tasarımı, üretimi ve kullanımı kritik bir öneme sahip olmuştur. Elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla daha düşük işletim maliyetlerine ve daha yüksek konfor seviyesine sahiptir (Yaşa., 2023). Bu çalışmada, ulaşımdaki trafik sorununu azaltma potansiyeline sahip ve kullanımı giderek artan elektrikli motosiklet için motor tasarımı ve seçimine ilişkin bir yöntem ele alınmıştır.

Elektrikli motosiklet için motor tasarımı yapılırken, bireysel kullanıcı koşulları (kuvvetler, hız, kütle, boyutlar ve menzil vb.) göz önünde bulundurulmalıdır. Bu koşullar altında, asenkron motor (ASM) ile fırçasız doğru akım motorun (FDAM) tasarımı ele alınacaktır.

ASM alternatif akım gerilimini indüksiyon ile hareket enerjisine çeviren elektrik makinesidir. Yük altında devir sayısını koruması, bakım periyodunun uzun ve üretim maliyetinin düşük olması gibi avantajları bulunurken, hassas hız aralığı kontrolünün zor ve kontrol ünitesinin pahalı olması ulaşımda kullanılabilirlik alanını sınırlar.

FDAM stator sargılarında oluşan manyetik alanın rotor üzerindeki kalıcı mıknatıslarla etkileşimi sayesinde enerji dönüşümünü gerçekleştiren elektrik makinesidir. Yüksek güç/hacim ve ivmelenme/güç oranı, düşük bakım masrafı ve kompakt tasarım gibi avantajları bulunurken, yüksek üretim maliyeti ve karmaşık kontrol sistemleri gerektirmesi kullanım alanlarını sınırlayabilmektedir (Gieras., 2009). Ayrıca motorun ön veya arka tekerleğin göbeğine yerleştirilmesinden dolayı Hub motor olarak adlandırılan bu sistemler; montaj kolaylığı sağladığından dolayı bir bisikletin elektrikli hale dönüştürmesi daha basit ve kolay olduğu için tercih edilmektedir (Aydın ve ark., 2023).

Asenkron motorlar alternatif akım ile çalıştığından dolayı invertere (DA>AA), geometrik modelinden dolayı güç aktarım sistemlerine ihtiyacı vardır. FDAM ise doğru akım kaynağı ve sürücüsü ile güç aktarım sistemlerine ihtiyaç duymadan çalışabilir. Ancak, sensör ile yazılım desteğine ihtiyacı vardır (Husain ., 2003).

Üç faz, 4 kutup, 30 kW sincap kafesli asenkron motorun rotor oluk ölçüleri ile stator ve rotor çaplarında yapılabilecek bir değişiklik; Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile analiz edilip; motor verimi ve maliyetini optimize edebilir (Nakhaei ve Roshanfekar ., 2021). Çalışmada genetik algoritma kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Sonuçlar ekonomik çıktılar ile ilişkilendirilmiştir.

ASM'nin stator sargı malzemesi değiştirilerek motor performansı optimize edilebilir (Prakash ve Perumallapalli ., 2024). 415 Volt, 50 Hz, 75 C° yüklenme parametrelerine sahip ASM'nin sargı

ham maddeleri (Ag, Al, Be, Cu, Mg, W, Zr) değiştirilerek değerlendirme yapılmıştır. Nüve malzemesi steel_1010; sargı hammaddesi gümüş (Ag) olarak belirlendiğinde %90.377 verim, 23.579 kg kütle, 79.6834 Nm kırılma momenti ve 0.884616 ileri güç faktörü ile çalışmanın en iyi motoru elde edilmiştir.

Stator sargılarının spiral ve halkalı sarılması ile elde edilen ASM'lerin tasarım sonuçları verilmiştir (Tikhonova ve ark., 2017). Sonuçlar, 2 kutuplu ASM'de stator sarımlarının halkalı yapılmasının farklı kayma değerlerinde motor momentini azalttığını göstermektedir.

Ocak ve Yenipınar, hafif elektrikli araçlar için ASM tasarımı yaparak prototip üretmişlerdir (Ocak ve Yenipınar ., 2021). ASM, sekiz farklı hız-yük koşulları altında test edilmiştir. Tasarımda %87.21, üretimde ise %88.41 verim elde edilmiştir. IC 410 sınıf soğutma ile çıkış gücünün %84'ü kadar sürekli güç elde edilmiştir.

ASM motorun performansını arttırmak için yapılan farklı bir çalışmada yeni bir soğutma sistemi önerilerek, motorların verimliliğinin ve kullanım ömrünün artması sağlanmıştır (Tören ve Mollahasanoğlu., 2021).

Elektrikli araçlarda ASM ve FDAM haricinde anahtarlama relüktans motorları da (ARM) kullanılmaktadır (Gecer ve ark., 2021). ARM, FDAM ve ASM'nin aynı güç/hacim oranında ANSYS RMxprt ve 2D Maxwell'de analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ARM'nin en yüksek tork ve dalgalanması değerlerine; FDAM'ın ise verim, manyetik dağılım ve boyut açısından en iyi sonuçlara sahip olduğunu göstermektedir.

Akar ve arkadaşları, 1.5 kW dıştan rotorlu bir elektrikli araç motor tasarımı gerçekleştirmişlerdir (Akar ve ark ., 2021). 48 Volt, 680 RPM, 51 oluk/46 kutup konstrüksiyon parametreleri baz alınarak tasarlanan motordan 21.07 Nm tork ile %86 verim elde edilmiştir. Motor, 10 inç janta hub olarak monte edilmiştir.

Çabuk ve arkadaşları, 2.5 kW dıştan rotorlu bir elektrikli araç motor tasarımı gerçekleştirmişlerdir (Çabuk ve ark ., 2019). 150 Volt ve 900 RPM parametreleri baz alınarak tasarlanan motor üzerinde farklı sarım teknikleri denenmiş olup, yarım kalıp-konsantrik yapıda en iyi sonuç elde edilmiştir. Analiz sonuçları (29.2484 Nm Tork, %90 Verim) ile üretim sonuçları birbirine yakın değerlerdedir.

Literatürde elektrik motorlarının klasik tasarımının yanı sıra eksenel akılı tipte de tasarımı oldukça artmıştır. Nugraha ve arkadaşları, 5 kW dıştan rotorlu bir elektrikli scooter motor tasarımı gerçekleştirmişlerdir (Nugraha ve ark ., 2018). 50.9 Volt, 5000 RPM, 12 oluk/8 kutup konstrüksiyon parametreleri baz alınarak tasarlanan motor ile 9.5 Nm tork ve %94.49 verim elde edilmiştir.

Hsiao ve Htet, Taguchi yöntemi ve Yanıt Yüzeyi Metodolojisi (RSM) gibi optimizasyon teknikleri kullanarak FDAM'ın tasarım ve performans iyileştirmelerine yönelik çalışma gerçekleştirmişlerdir (Hsiao ve Htet ., 2024). Çalışmada 26 W FDA elektrikli fan motoru referans alınmıştır. Bu yöntemlerle yapılan optimizasyon sonucunda çıkış gücünde 10 Watt'lık bir artış ve

maksimum torkta 0,032 Nm’lik bir iyileştirme elde edilmiştir. Ayrıca, referans tasarıma kıyasla enerji verimliliği %15 oranda artırılmıştır.

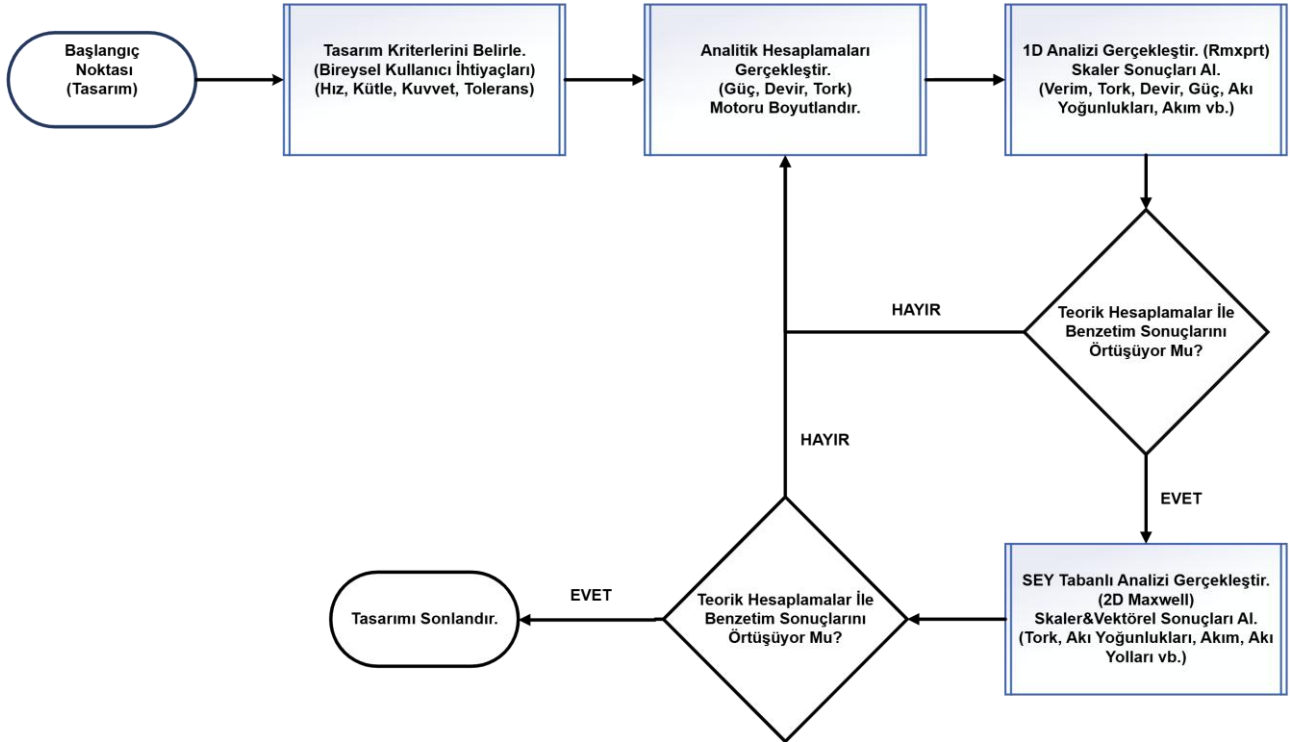
Mandasari ve arkadaşları, V şeklindeki FDAM’ın stator eğik açılarının Cogging torku üzerine etkisini incelemiştir. SEY kullanılarak yapılan çalışmada, eğik açının artırılmasının Cogging torkunu önemli ölçüde azalttığını ve motor verimliliğini artırdığını gösterilmiştir. Eğik açının 10° artırılması Cogging torkunda yaklaşık %72’lik bir azalma; 15° artırılmanın ise Cogging torkunu neredeyse ortadan kaldırdığı görülmektedir (Mandasari ve ark ., 2024).

ANSYS Electronics benzetim programında, FDAM tasarımına dair örnek bir çalışma verilmiştir (Dusane ., 2016).

Elektrik motorlarının tasarımında yapılması gereken ilk adım, motorun bireysel kullanım ihtiyaçları ile enerji tüketimini belirlemektir. Motosikletin belirlenen bir hızda gidebilmesi için ihtiyaç duyduğu güç miktarı, karşılaması gereken kuvvetlerin toplamı ile bulunabilir (Long ve ark ., 2013).

Motorun vereceği güç, boyutlar, elektriksel ve manyetik zorlanması (tork) ile dakikadaki devir sayısına bağlıdır (Boduroğlu ., 1994). Bulunan güç ve belirlenen hız değerleri ile motorun tasarım ölçüleri hesaplanabilir. Hesaplamadan sonra yapılacak analiz ile motor performans verileri üretim yapılmadan önce tahmin edilebilir, bulunabilir.

Şekil 1’de, elektrik makinelerinin ANSYS Electronics programı aracılığıyla tasarımına dair akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 1. Elektrik makineleri tasarım adımları (ANSYS Electronics)

Bu çalışmada elektrikli motosiklet için gücü hesaplanan ASM ve FDAM'ın karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir. ASM ve FDAM'ın kullanıldığı uygulama, stator nüve malzemesi (M19_29G), sargı malzemesi (bakır) ve hava aralığı (1 mm) eşit alınmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına dayanarak, uygun olan motosiklet motoru için ANSYS Optimetrics arayüzünde, PoleEmbrace tasarım parametresi bazlı genetik algoritma kullanılarak Cogging tork düşürülmüştür. PoleEmbrace değeri motorun performans, maliyet ve verimine bağlı olarak alt ve üst sınırlar arasında seçilen bir katsayıdır. Tasarım parametresi olan PoleEmbrace'in sınırları parametrik analiz yöntemiyle belirlenmiştir.

Materyal ve metot bölümünde motor ölçülerine ait eşitlikler verilmiştir. Motorların sargı tasarımları ANSYS'de yer alan Auto-Design kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Auto-Design, belirlenen Setup değerlerine (Hedef Motor Verileri) göre arka planda Maxwell denklemlerini kullanarak en uygun değerleri belirleyen yazılımdır. Tasarımlara ait detaylı eşitlikler literatürde verilmiştir (Boduroğlu ., 1994; Hendershot ., 2010).

Bulgular bölümünde ise eşitliklerle (1-19) belirlenen ölçüler kullanılarak ASM ve FDAM için Rmxprt (1D) ile Maxwell (2D) çıktıları verilmiştir. Sonuçlar bölümünde ise motorların tork, hız, verim, akım ve manyetik akı dağılım verileri değerlendirilmiş, performansları uygulama bazlı tartışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

ASM ve FDAM tasarımı şekil 1'deki adımlardan oluşmaktadır. Çalışma teorik benzetim ortamında yapılmıştır. Motor ölçüt ve hedef tasarım verileri piyasada yer alan ürünler referans alınarak belirlenmiştir.

2.1. Tasarım Hedeflerinin Belirlenmesi – Motosiklet Parametreleri

Elektrik motoru tasarımında yapılacak ilk adım, toplam çıkış gücü, devir/dakika ve torkun belirlenmesidir. Eşitlik 1'de ASM ve FDAM'ın kullanıldığı motosikletin üstesinden gelmesi gereken kuvvetlerin toplamı ile bulunan motor çıkış gücü verilmiştir (Dusane ., 2016). Eşitlik 1'de verilen yuvarlanma direnci (F_R) eşitlik 2'de; hava direnci (F_A) eşitlik 3'te; eğim direnci (F_G) eşitlik 4'te sırasıyla verilmiştir. Eşitlik 5'te hedeflenen nominal tork verilmiştir.

Tablo 1'de araca ait kütle bilgisi verilmiştir. Birleşmiş Milletler Çevre Programı ve piyasa ürünleri araştırması sonucunda, düz yolda bulunan motosikletin yapabileceği sınır hız (v_M) 40 km/s; 11.111 m/sn olarak belirlenmiştir (URL-1). Tablo 2'de ise eşitliklerde (2-4) yer alan parametreler verilmiştir.

Tablo 1. Araç kütle bilgileri

Parametre	Değer (kg)
Gövde (Şase)	30-40
Elektrik Motoru	10-20
Elektrik Sistemi	5-10
Batarya	15-25
Sürücü (Tahmini)	80-110
Toplam Kütle	140-205

$$P_{toplam} = (F_R + F_A + F_G) \times v_M \quad (1)$$

$$F_R = f \times m_g \times \cos \alpha \quad (2)$$

$$F_A = C \times S \times \frac{\rho}{2} \times \left[\frac{v_M}{3.6} \right]^2 \quad (3)$$

$$F_G = m_g \times \sin \alpha \quad (4)$$

$$T_{yük} = T_{nominal} = \frac{P_{çıkış} \times 60}{2 \times \pi \times N_{RPM}} \quad (5)$$

Tablo 2. Eşitlik parametreleri

Parametre	Sembol	Değer
Yuvarlanma Direnci Katsayısı	f	0.013 (Karel ., 2011)
Motosiklet Ağırlığı	m_g	1569.6 N
Hava Direnci Katsayısı	C	0.6 – 1.2
Araç Ön Yüzey Alanı	S	0.782 m ²
Hava Basıncı	ρ	1.326 Kg/m ²

Eşitlikler (2-4), tablo 1 ve 2 verileri alınarak toplam güç (eşitlik 1) 2173 Watt bulunmuştur. ASM ve FDAM'ın hedef güç aralığı 2.2-2.3 kW olarak belirlenmiştir. Elektrik motorlarının devir sayısı, frekans ve kutup sayısı ile belirlenir. FDAM'ın (32 kutup) nominal hızı 430 devir / dakika, ASM'nin (4 kutup) ise 1450 devir / dakika belirlenmiştir. Eşitlik 5'e göre FDAM'ın hedef tasarım torku 48.257 Nm, ASM' ise 14.310 Nm hesaplanmıştır.

Sistemin batarya gerilimi 72 Volt belirlenmiştir. Elektrikli motosikletlerde genellikle 48 Volt bataryalar tercih edilse de 72 Volt tercih edilmesinin nedeni gerilimin artmasıyla birlikte akımın düşmesidir. Akımın düşmesi, motorun enerji kayıplarını azaltarak verimliliği artırırken, güç elektroniği ekipmanlarının daha düşük akım değerlerinde seçilmesine imkân tanır. Bu durum, ürün

maliyetlerini düşürür ve anahtarlama kayıplarını azaltır. Sonuç olarak, 72 Volt batarya kullanımı sayesinde sistem verimliliği ve menzil artar.

2.2. Elektrik Motorlarının Genel Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi

Motosikletin tasarım hedefleri belirlendikten sonra, uygulama sınırları içerisindeki elektrik motor boyutlarının hesaplanması gerekir (Hendershot ., 2010). Elektrik motorunun tasarım hedefleri (Boyutsal sınırlar, verim, kutup sayısı, hedeflenen akı yoğunlukları, mıknatıs, nüve ve sargı malzemeleri vb.) belirlenmelidir. ASM ve FDAM'ın dış çapları için 155-255 mm sınır, %86-92 verim aralığı ve M19_29G nüve malzemesi belirlenmiştir.

İlk olarak motorun birim hacmindeki hava aralığı moment değerinin (TRV) seçilmesi gerekir (Erdoğan ve ark ., 2024). Makinelerin kullanım amacı, performansı, gücü gibi değerlere bağlı olan TRV değeri (kN/m^3) eşitlik 6'da verilmiştir (Hendershot ., 2010). D stator dış çap (mm), L fiktif uzunluk (mm), p ise kutup çifti sayısıdır. Eşitlik 7'de makinenin maliyet, tasarım ve kalite faktörüne bağlı seçilen φ katsayısı; eşitlik 8'de ise τ_p kutup adımı verilmiştir (URL-2).

$$TRV = \frac{T_{nominal}}{\frac{\pi \times D^2 \times L}{4}} \quad (6)$$

$$\varphi = \frac{L}{\tau_p} \quad (7)$$

$$\tau_p = \frac{\pi \times D}{2 \times p} \quad (8)$$

Eşitlikler (5-8) ile ASM ve FDAM'ın stator dış çap ve fiktif uzunlukları sırasıyla 155/128 mm; 227/50 mm bulunmuştur. Dış çap ve uzunluk bulunduktan sonra stator ve rotor nüve parametreleri belirlenmelidir.

2.3. Fırçasız Doğru Akım Motorun Boyutlandırılması

FDAM'ın kutup (mıknatıs) sayısı tork, titreşim ve gürültü, frekans ve verim parametreleri göz önünde bulundurularak 32 seçilmiştir. FDAM tasarımında hedef, yüksek tork değeri elde etmektir. Elektrik makinelerinde giriş ve çıkış arasındaki enerji dönüşümü manyetik alan aracılığıyla sağlanır. Makine verimini parçaların akı yoğunluğu değerleri doğrudan etkiler. Makine boyutları belirlenirken

akı yoğunluğu değerlerinin kontrol edilmesi tasarımın önemli bir adımıdır. Tablo 3'te makinelere göre akı yoğunluğu değerleri verilmiştir (Pyrhonen ., 2013).

Stator dış çap bulunduktan sonra rotor iç çap ve dış çap tablo 3'e göre program yardımıyla bulunabilir. Ancak rotor tasarımında boyutlandırmayı etkileyen temel nokta mıknatısların seçimi ve boyutlarıdır (Hanselman ., 2006). Literatürde belirtilen NdFe türü mıknatıs seçilmiştir (Tören ve Mollahasanoğlu ., 2023). Eşitlik 9'dan mıknatısların kalınlığı (t_M); eşitlik 10'dan ise hava aralığı (δ) bulunabilir. B_R mıknatısların kalıntı akı değeri olup, teknik formdan bakılabilir. B hedef akı ise literatürden bulunmaktadır (Boduroğlu ., 1953). Statorda indüklenen trapezoidal gerilimin 120 derece sabit kısmında makine DA (doğru akım) makinesi karakteristiği gösterdiğinden dolayı tablo 3'te verilen DA makinesi parametreleri FDAM için de kullanılabilir.

Tablo 3. Uygun akı yoğunluk değerleri (Tesla)

Parça	Asenkron Makine	DA Makine
Hava Aralığı	0.7 – 0.9	0.6 – 1.1
Stator Nüve	1.4 – 1.7	1.1 – 1.5
Stator Dış	1.4 – 2.1	1.6 – 2.0
Rotor Nüve	1 – 1.6	1 – 1.5
Kutuplar	-	1.2 – 1.7

$$B = B_R \times \frac{t_M}{t_M + \delta} \quad (9)$$

$$\delta = 0.2 + 2 \times \sqrt{D \times L} \quad (10)$$

FDAM dıştan rotorlu olarak tasarlandığından, rotorun iç çapı hava aralığına bağlı olarak bulunmaktadır. Eşitlik 11'de statorun iç çapı; eşitlik 12'de stator oluklarının yüksekliği (t_b); eşitlik 13'te ise A_{hava} verilmiştir. FDAM'ın stator oluk ölçüleri belirlenirken 2 koşulun göz önünde bulundurulması gerekir: Slotların doluluk oranının en fazla %75 olabileceği ve tablo 3 akı yoğunluğu değerleri.

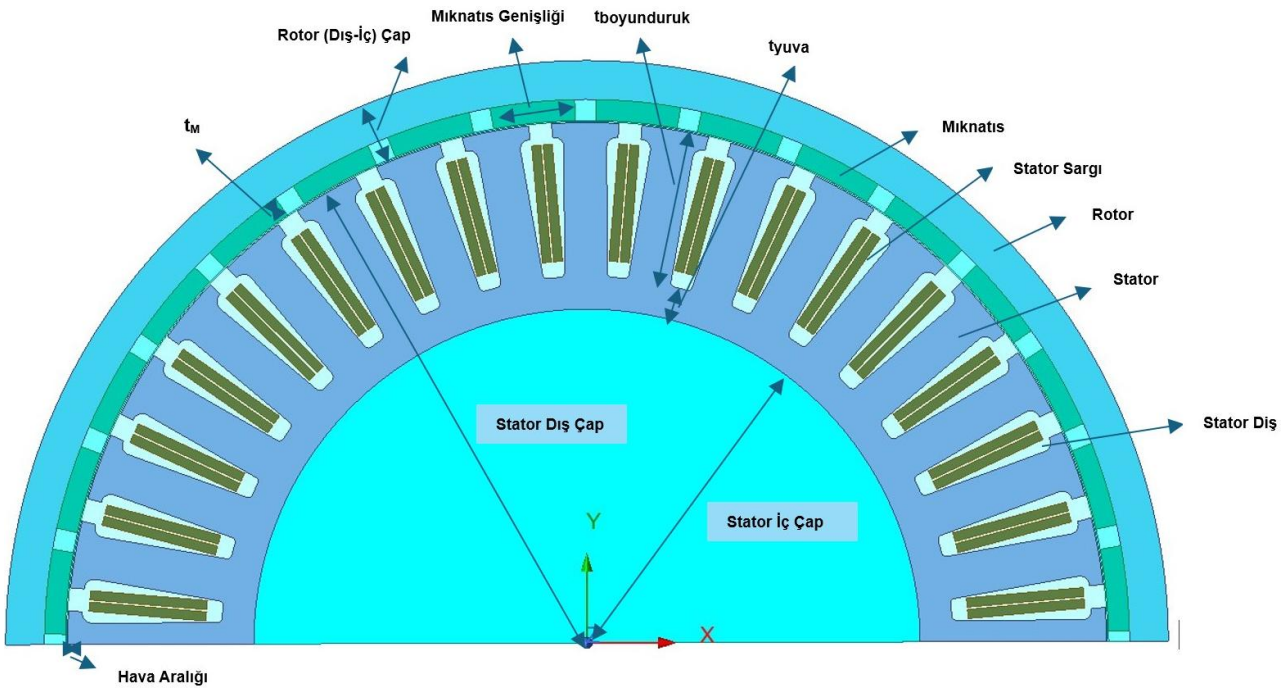
Eşitlik 12'nin yüksek olması slotların doluluk oranını düşüreceğinden dolayı sargı çapının artmasına ve kaynak akımının artmasına neden olur. Düşük bir değer alması ise olukların manyetik akı doygunluğuna ulaşmasına neden olur.

$$D_{S_{iç}} = D_{S_{dış}} - 2 \times (t_{boyunduruk} + t_{yuva}) \quad (11)$$

$$t_{boyunduruk} = \frac{\Phi_{Rotor}}{B_{stator} \times L} \quad (12)$$

$$A_{hava} = \pi \times D_{R(dış-ıç)} \times L \quad (13)$$

Eşitlik 12’de verilen B_{stator} ve B_{rotor} tablo 3’ten referans alınabilir. ϕ_{rotor} değeri doğrudan $t_{boyunduruk}$ ’u etkiler. Motor tasarımı yapılırken ideal manyetik akı aktarımı kabul edildiğinden dolayı rotor nüve alanı referans alınmıştır. Rotorun dış ve iç çap farkının ayarlanması, stator oluk ölçülerini doğrudan etkiler. Eşitlik 11’de verilen t_{yuva} , tablo 3 ve literatürde yapılan çalışmalar referans alındığında yaklaşık olarak $D_{S(dış-ıç)}$ (stator) değerinin %20-35’i arası alınabilir. Şekil 2’de FDAM’ın 2D Maxwell arayüz görüntüsü verilmiştir. Tablo 4 ve 5’te motora ait tasarım parametreleri verilmiştir.



Şekil 2. FDAM (ANSYS Maxwell)

Tablo 4. FDAM stator tasarım parametreleri

Bölüm	Uygun Değer (mm)
H_{S1}	2.078
H_{S2}	27.31
B_{S1}	9.56
B_{S2}	4.78
Kablo Çapı	0.965
Fiktif Uzunluk	50

Tablo 5. FDAM rotor tasarım parametreleri

Bölüm	Uygun Değer (mm)
Embrace	0.8 (Oran)
Mıknatıs Kalınlığı	4.55
Hava Aralığı	1
Dış Çap	255

Embrace, FDAM'ın rotorunda yer alan mıknatısların (kutupların) genişliği ile doğru orantılıdır. Bu değerin Cogging torkuna doğrudan etkisi bulunmaktadır. Yüksek verim ve düşük maliyet göz önüne alınarak 0.8 değeri belirlenmiştir. Cogging torkunun azaltılması amacıyla Optimetrics arayüzü ile iyileştirme çalışması gerçekleştirilecektir.

MATLAB tabanlı meta-sezgisel algoritmalar, sıralı türev tabanlı lineer olmayan programlama, Quasi Newton, pattern search ve genetik algoritma ANSYS Optimetrics arayüzünde kullanılabilir. Bu çalışmada, PoleEmbrace tasarım parametresine bağlı olarak Cogging torku genetik algoritma ile azaltılmıştır. Genetik algoritmanın tasarım parametresinin sınırlarının belirlenmesi ve karşılaştırma amacıyla parametrik analiz yöntemi kullanılmıştır. PoleEmbrace'in alt ve üst sınırları 0.40 ile 0.825 alınmıştır.

Parametrik analiz sistemin farklı parametre değerleri ile nasıl tepki vereceğini belirleyerek en uygun çözümün bulunmasında yardımcı olur. Genetik algoritma ise doğa temelli bir optimizasyon tekniği olup, Cogging torkunu minimize etmek için en uygun embrace değerini bulmayı amaçlar. Genetik algoritma doğada bulunan kromozomların evrimleşmesi ilkesi ile çalışan gen tabanlı optimizasyon yöntemidir (John ., 1992).

Genetik algoritmanın birey sayısı 30 belirlenmiştir. Seçilim için rulet seçim yöntemi kullanılmış ve seçilim baskısı 10 ayarlanmıştır. Pareto sekmesinde, hayatta kalan birey sayısı 10'dur. Yeni nesil için her bir nesilde 30 birey hedefi belirlenmiş, algoritmanın çalışması 50 nesil ile sınırlandırılmıştır. Algoritmanın çalışma süresi ise 1 saatle sınırlıdır. Yavaş yakınsama durumunda da algoritma durdurulacaktır.

2.4. Asenkron Motorun Boyutlandırılması

Asenkron motorlar indüksiyon prensibiyle çalıştığından dolayı akının kaynağı olan statorun tasarımı ilk adımdır. Literatürde tasarım kaynakları mevcuttur (Boldea ., 2020).

Eşitlik 14'te asenkron motorun genel güç ifadesi ana boyutlara bağlı verilmiştir. D_i stator iç çap; L_i fiktif uzunluk, n_s devir sayısı; C ise Esson katsayısını (faydalanma) temsil eder. Gerçek makine uzunluğu, havalandırma ve izolasyon koşulları altında fiktif uzunluktan büyüktür. Literatürde D_i , motor gücüne göre referans alınabilir (Nürnberg ., 1952).

$$P_s = C \times D_i \times L_i \times n_s \quad (14)$$

Esson katsayısı, motorun birim hacminden elde edilen güç değerini verir. Eşitlik 15'te Esson katsayısının ampirik denkliği verilmiştir. Eşitlikte yer alan, B_{ort} (hava aralığındaki ortalama akı değeri) eşitlik 16'da, a_c (elektriksel yüklenme) eşitlik 17'de verilmiştir. Eşitlik 16'da bulunan $\emptyset$

değeri ve tablo 3'e göre stator nüve kalınlığı ayarlanabilir. K_w ise sargı faktörü olarak verilmiştir. Eşitlik 18'de ise stator oluklarının akı değeri (B_s) verilmiştir. Eşitlikte, w_{ts} diş genişliğini ve s oluk sayısını temsil eder (Apaydın ve ark ., 2022).

$$C_0 = 1.1 \times \pi^2 \times B_{ort} \times a_c \times K_w \times 10^{-3} \quad (15)$$

$$B_{ort} = \frac{2 \times p \times \phi}{\pi \times D_i \times L_i} \quad (16)$$

$$a_c = \frac{I \times Z}{\pi \times D_i} \quad (17)$$

$$\frac{B_s}{B_{ort}} = \frac{\pi \times D_i}{w_{ts} \times s} \quad (18)$$

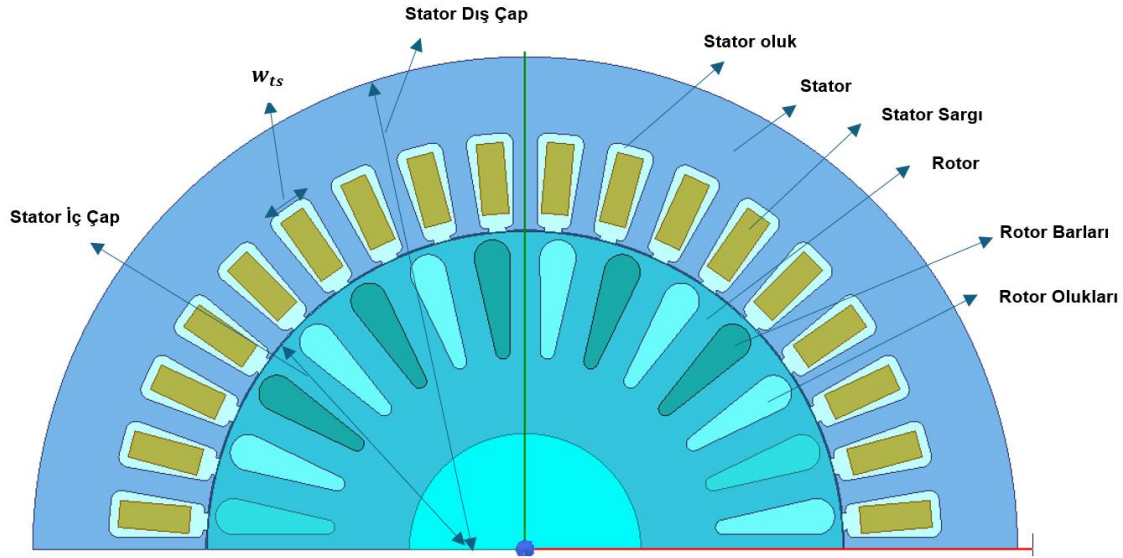
Stator çap ve oluklara dair parametreler bulunduktan sonra diğer oluk parametreleri ampirik formüller veya program yardımıyla bulunabilir (Boduroğlu ., 1994). Parametre tasarımında tablo 3'ün göz önünde bulundurulması gerekir. Eşitlik 19'da motorun hava aralığı (δ) stator iç çapa bağlı olarak verilmiştir.

Hava aralığı bulunduktan sonra rotor dış çap ve parametreleri bulunabilir (Gürdal ., 2001). Şekil 3'te ASM'nin 2D Maxwell arayüz görüntüsü verilmiştir. Stator oluk tipi FDAM ile aynıdır. Tablo 6 ve 7'de ise ASM'ye ait tasarım parametreleri verilmiştir. Makine 36/28 oluk konstrüksiyonunda oluşturulmuştur.

$$\delta = 0.2 + \frac{D_i}{1000} \quad (19)$$

Tablo 6. ASM stator tasarım parametreleri

Bölüm	Uygun Değer (mm)
H_{S1}	1
H_{S2}	12.21
B_{S1}	5.3
B_{S2}	7.39
Kablo Çapı	1.29
Fiktif Uzunluk	227



Şekil 3. ASM (ANSYS Maxwell)

Tablo 7. ASM rotor tasarım parametreleri

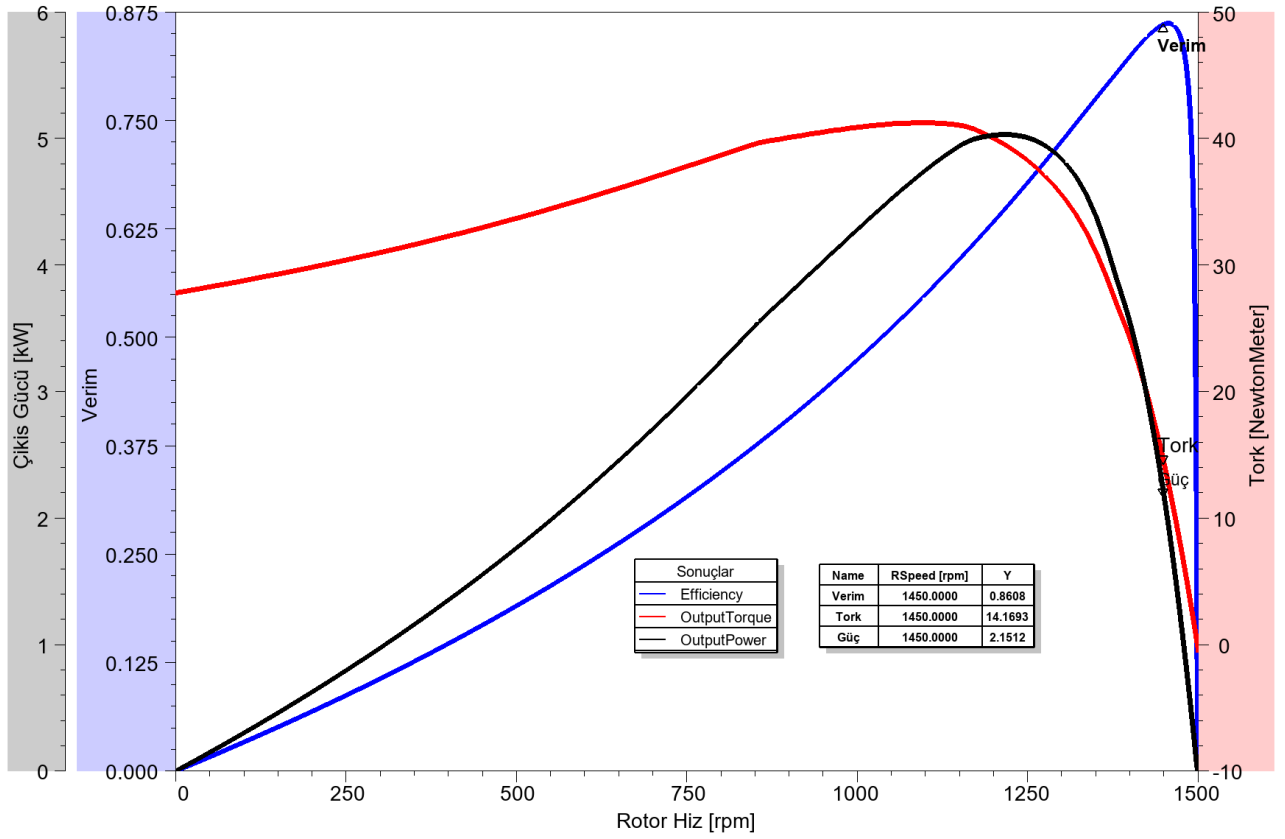
Bölüm	Uygun Değer (mm)
Bar Boyu	25
Bar Genişliği	7
Hava Aralığı	1
Dış Çap	100.2

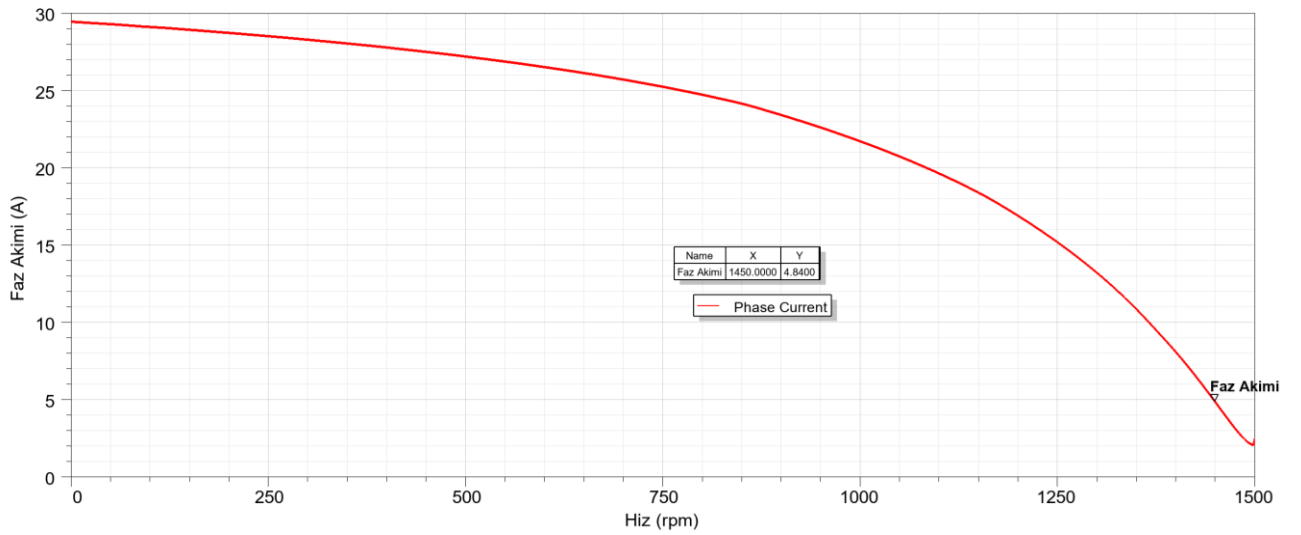
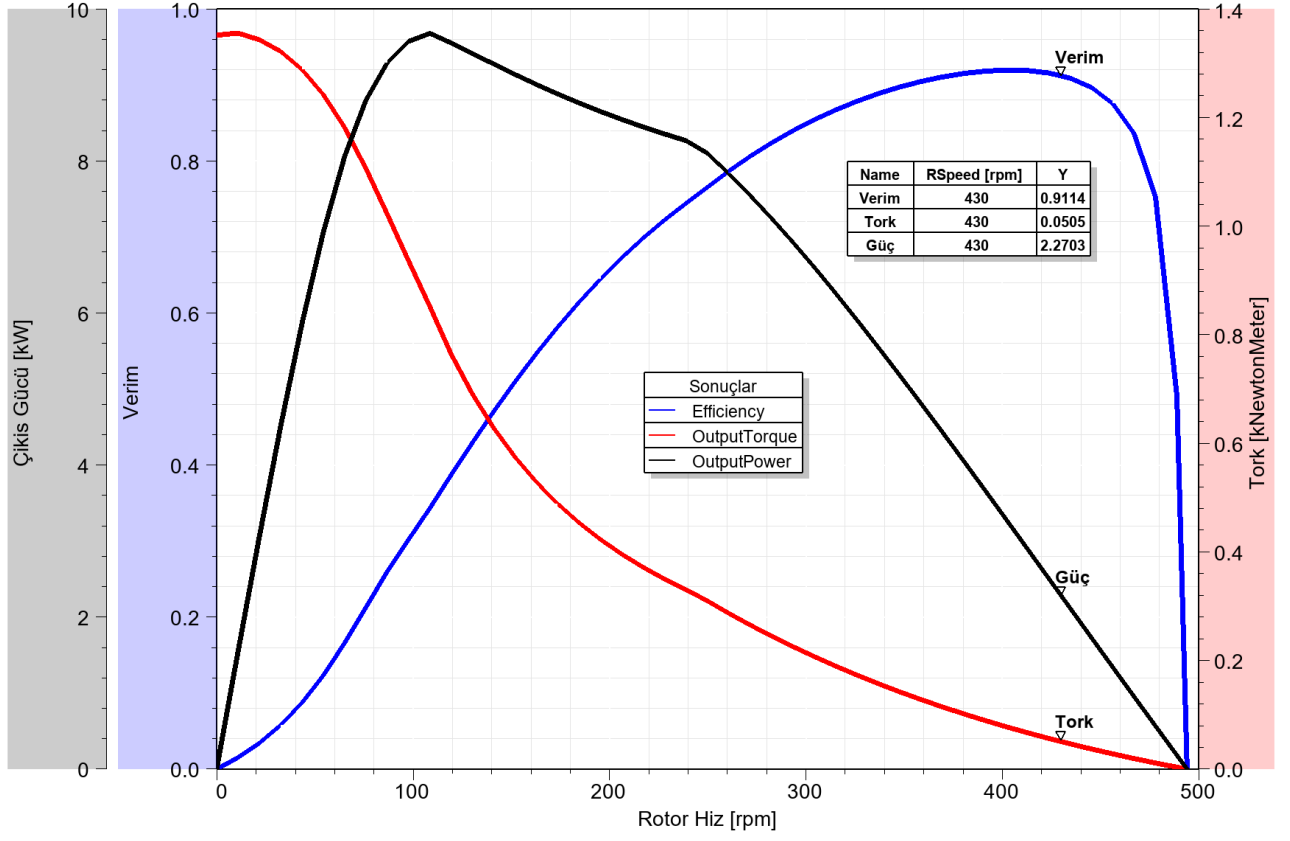
3. Bulgular ve Tartışma

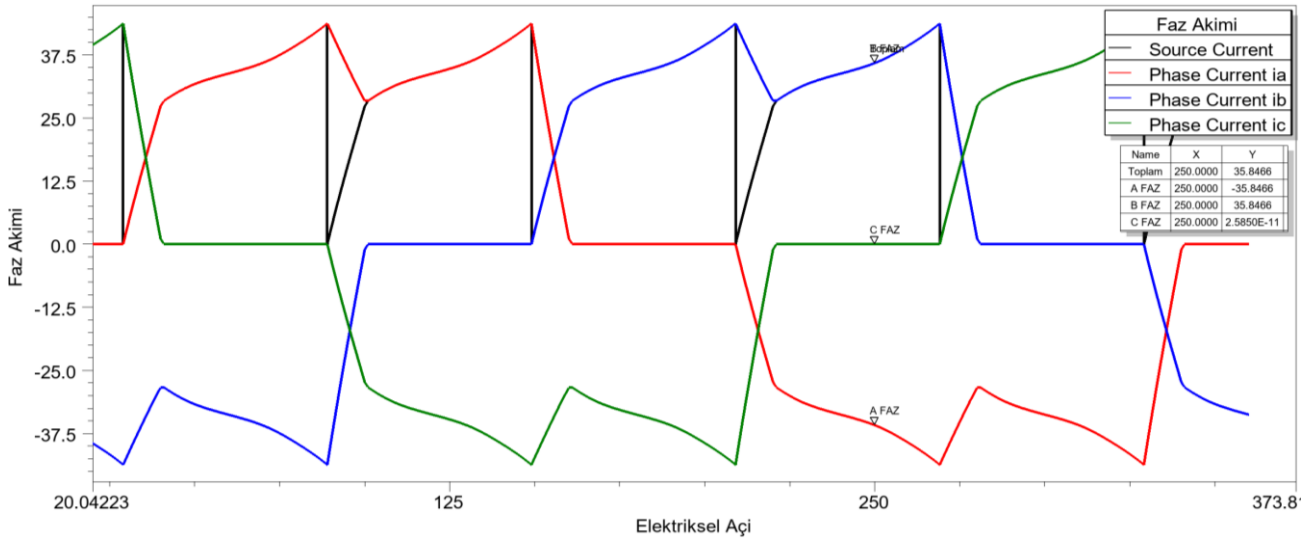
Şekil 4 ve 5'te sırasıyla ASM ve FDAM'ın Hız-(Moment, Güç, Verim) karakteristikleri verilmiştir. Şekil 6 ve 7'de ise sırasıyla ASM ve FDAM'ın hız-faz akımı grafiği verilmiştir. Tablo 8'de ASM ve FDAM'ın aynı nüve ve sargı malzemesi, stator oluk tipi ve hava aralığı referans alınarak yapılan karşılaştırmalı sonuçları verilmiştir. ASM ve FDAM tasarımlarının sonuçları (Tablo-8) incelendiğinde, FDAM tasarımının 11.067 kg ile daha düşük kütle, 50.5 Nm'lik yüksek tork ve %91.14 verim değerine sahip olduğu görülmüştür. İlk değerlendirmede motosiklet uygulaması için FDAM tasarımının daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. FDAM'ın daha düşük kütlesi ve yüksek verimliliği uygulama ihtiyaçları açısından önemli bir avantaj sağlar.

Tablo 8. ASM ve FDAM performans verileri

Sonuçlar	Birim	ASM	FDAM
Hız	(RPM)	1450	430
Çıkış Gücü	(kW)	2.151	2.270
Toplam Kayıp	(kW)	0.347	0.220
Verim	(%)	86.08	91.14
Moment	(Nm)	14.16	50.5
Stator Oluk Akı Yoğunluğu	(Tesla)	1.4654	1.8417
Stator Nüve Akı Yoğunluğu	(Tesla)	1.4207	1.1388
Rotor Nüve Akı Yoğunluğu	(Tesla)	1.4338	1.004
Faz Akımı	(Amper)	4.84	28.541
Toplam Kütle	(Kg)	15.9069	11.067

**Şekil 4.** ASM karakteristik (Hız-(Moment, Güç, Verim))





Şekil 7. FDAM faz akımı-hız grafiği

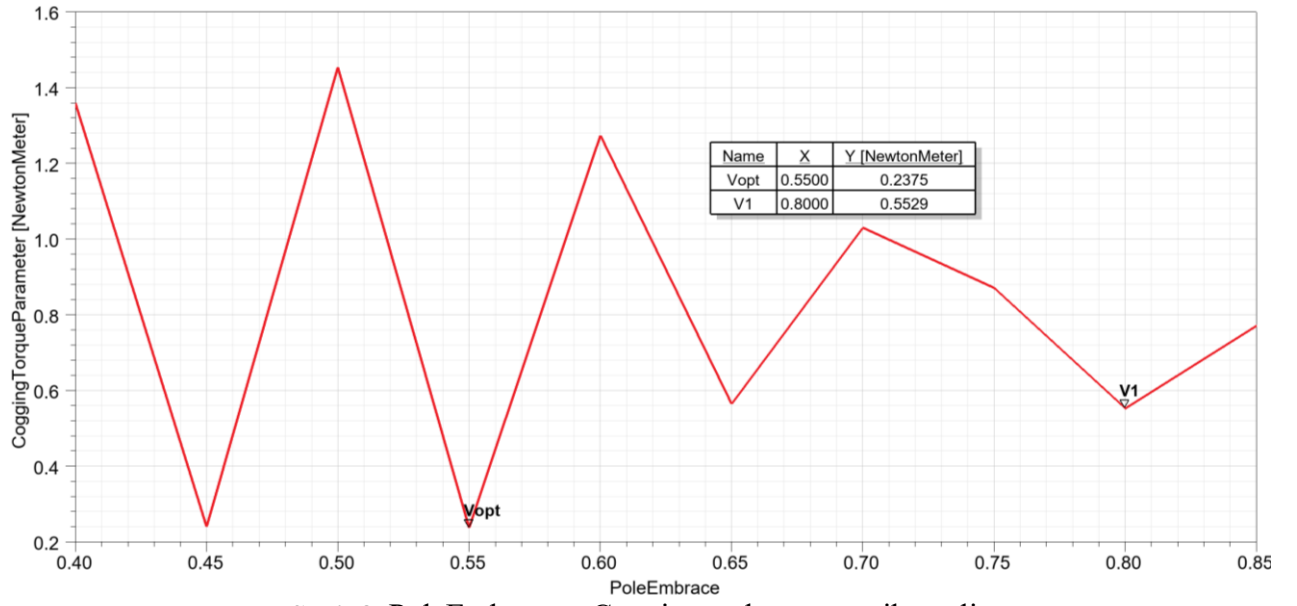
Bu çalışmada karşılaştırılan ASM ile FDAM karakteristikleri, motorların uygulama (motosiklet) bazlı performanslarını belirlemede önemli ipuçları sunar. ASM'nin elektriksel giriş gücü 2498.83 W iken, FDAM'ın 2490.673 W hesaplanmıştır. Yaklaşık güç tüketim değerlerinde, verimlilik açısından FDAM %91.14 değeri ile ASM'yi (%86.08) geride bırakmıştır.

ASM'nin momentı 14.16 Nm iken, FDAM'ın momentı 50.5 Nm ile yüksek bir değere sahiptir. Momentler arasındaki 36.34 Nm'lik fark eşitlik 5'te yer alan devir sayısından kaynaklanır. ASM'nin konstrüksiyon yapısından dolayı tork ve çektiği akım değeri sınırlanmaktadır. Şekil 6 ve 7'de ise FDAM'ın daha fazla akım çektiği görülmüştür.

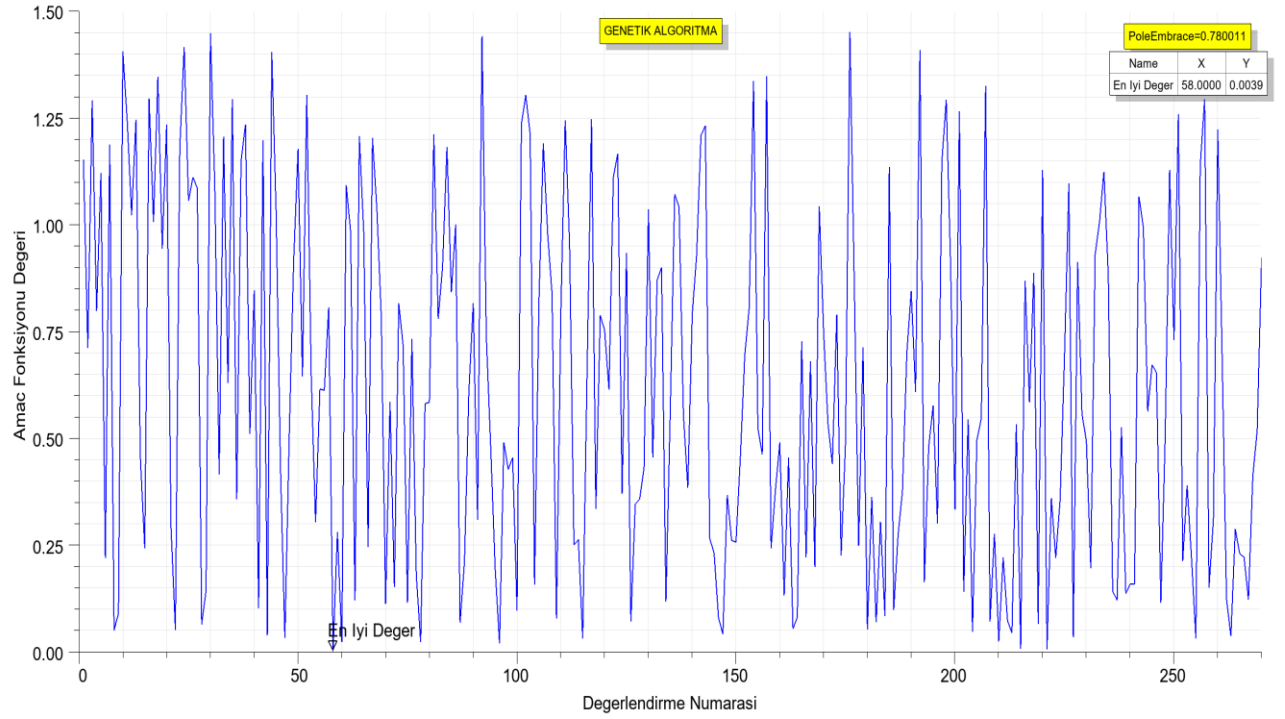
Ancak FDAM'da istenmeyen Cogging tork mevcuttur. Cogging tork, rotor kutuplarının statordaki oluklara etkisi sonucunda ters kuvvet meydana getirir. Ters kuvvet sonucunda titreşim, gürültü ve mekanik zorlanmalar meydana gelir. Uygulamadaki kullanıcı konforunu azaltmaktadır.

Cogging tork değeri ANSYS Optimetrics Genetik Algoritma ile azaltılmıştır. Tasarım parametresi olan PoleEmbrace'in parametrik analizi şekil 8'de; genetik algoritmanın amaç fonksiyonu değeri şekil 9'da verilmiştir. İlk ve optimize edilmiş tasarıma ait Cogging tork ise şekil 10'da verilmiştir.

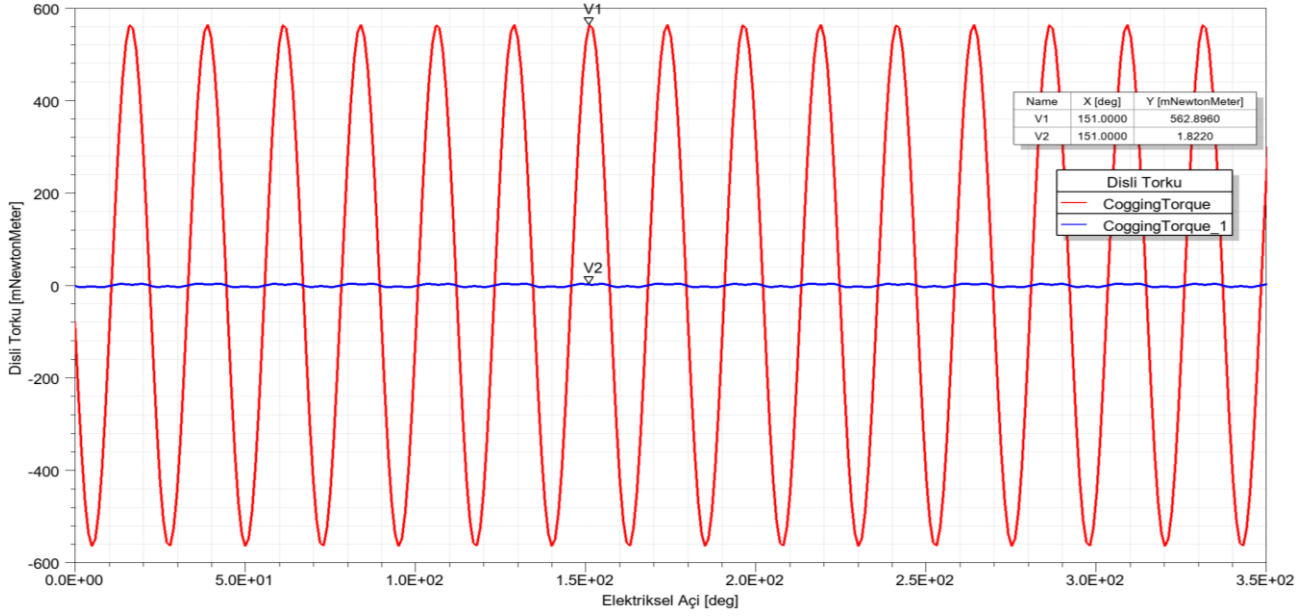
Şekil 8'de, PoleEmbrace=0.55 değerinde minimum Cogging tork (0.23 Nm) elde edilmiştir. Parametrik analiz alt ve üst sınırlar arasında artırım değerine bağlı olarak ayırık zamanlı değerlendirme yapar. Çalışmada parametrik analiz alt ve üst sınırların belirlenmesi amacıyla yapılmıştır.



Şekil 8. PoleEmbrace – Cogging tork parametrik analiz



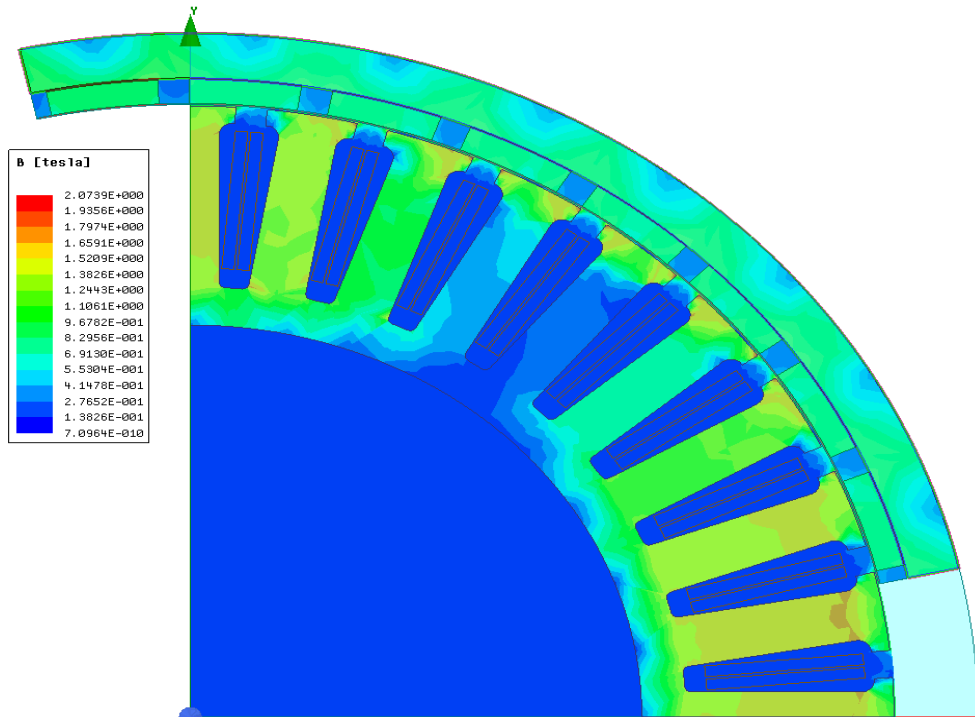
Şekil 9. Değerlendirme numarası – amaç fonksiyonu değeri (Genetik Algoritma)



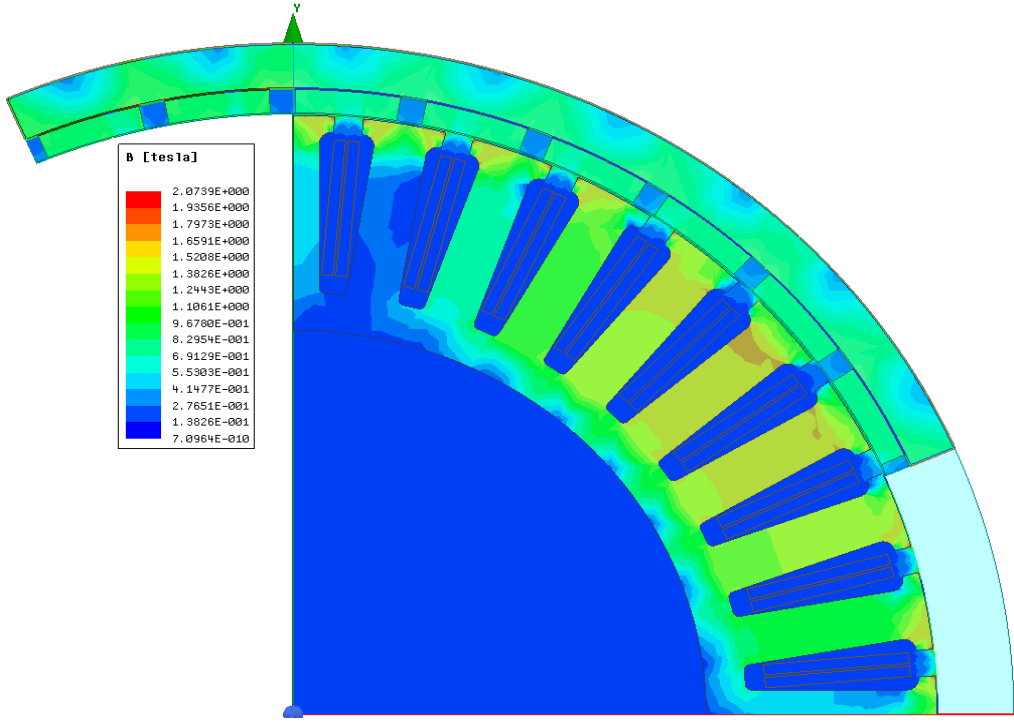
Şekil 10. Optimizasyon çalışması – Cogging tork

Şekil 11 (PoleEmbrace=0.8) ve Şekil 12’de (PoleEmbrace=0.780011) 2D Maxwell transient analizine göre 0.5 saniyedeki FDAM konumu gösterilmiştir. Cogging torkundaki azalma akı yoğunluğunun homojen dağılımı ve rotor konumu ile doğru orantılıdır.

Çalışmanın konusu sürekli zamanlı mühendislik problemi olduğundan dolayı, aynı yöntemi kullanan genetik algoritmadaki Cogging tork azalması daha fazladır.

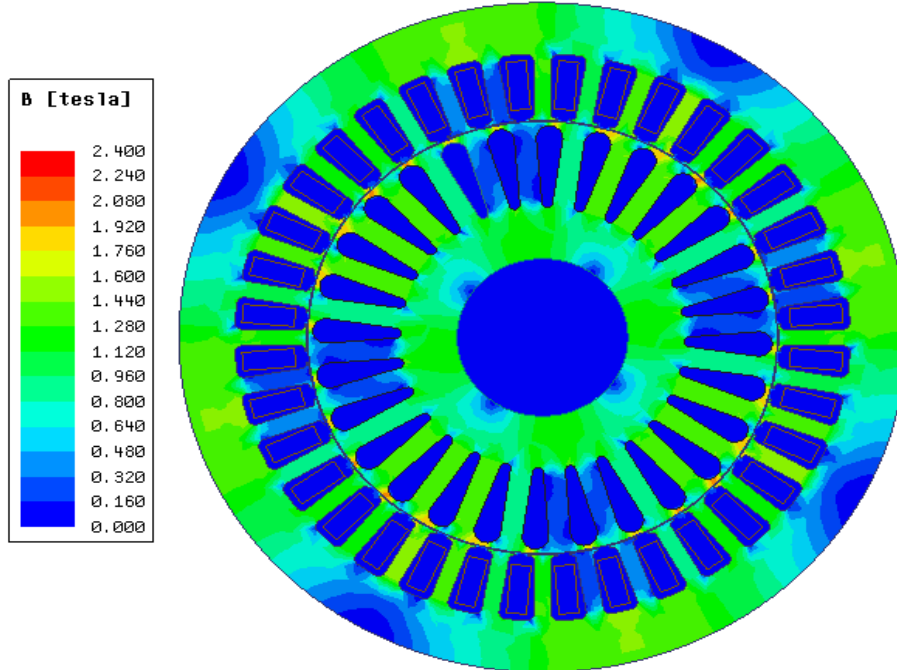


Şekil 11. PoleEmbrace = 0.8 (FDAM 2D Maxwell)



Şekil 12. PoleEmbrace = 0.780011 (FDAM 2D Maxwell)

Şekil 13'te ise ASM'nin 2D Maxwell transient analizinin akı yoğunluğu görüntüsü verilmiştir. Şekil 11, 12 ve 13 incelendiğinde tablo 3'teki hedef akı yoğunluğu değerlerine uygun olarak stator nüve akı yoğunluğunun sağlandığı gözlemlenmiştir.



Şekil 13. 2p=4, 36/28 Motor (ASM 2D Maxwell)

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada dıştan rotorlu fırçasız doğru akım motoru ile asenkron motorun karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Oluşturulan bu modellerin, ANSYS Maxwell RMxpert ve Maxwell 2D program arayüzünde benzetimi gerçekleştirilmiştir. Verim, çıkış torku, çıkış gücü ve Cogging tork gibi çeşitli parametreler ile gerçekleştirilen karşılaştırmalı analizler belirtilen motosiklet uygulaması için yapılmıştır. Yapılan benzetim çalışması sonucunda;

- FDAM tasarımında belirlenen yüksek tork hedefi doğrultusunda, düşük devir elde edilmiştir. Sistemin yüksek tork yoğunluğuna sahip olması için gereken çalışma koşulları sağlanırken, aynı zamanda geniş bir hız kontrol aralığında etkili bir performans sergilemesi mümkündür. FDAM'ın şekil 5 karakteristik grafiği de bu geniş hız aralığında kontrolün sağlanabilmesini destekleyen önemli bir kanıttır.

- 2490 Watt giriş gücü olan FDAM, ASM'den (2498 W) daha fazla çıkış gücü sağlayarak verim performansını ortaya koymuştur. FDAM'ın enerji kaybı daha az olduğundan dolayı ısı kayıpları azdır.

- FDAM, dıştan rotorlu olarak tasarlandığı için dönen rotor doğrudan tekerleğe monte edilebilir. Bu nedenle güç aktarım organına ihtiyaç duymaz. Asenkron motorlarda ise mil bağlantısı olduğundan dolayı güç aktarım organı zorunludur. Ayrıca asenkron motorun kapalı bir konstrüksiyona sahip olması nedeniyle soğutma fanlarına ihtiyaç varken, FDAM'ın tekerlek içi montajı açık bir şekilde yapılabilir ve kanallar aracılığıyla aldığı hava ile soğutma sağlanabilir. Ek bir soğutma sistemine ihtiyacı olmayabilir.

- FDAM tasarımında belirlenen hedef doğrultusunda elde edilen yüksek tork değeri motosikletin daha yüksek eğimli yollarda kullanılabilirlik oranını artırmaktadır.

- FDAM'ın güç/kütle oranının daha yüksek olması yarışmalar ve endüstriyel ürünlerde önemli bir avantaj sağlar.

Yukarıdaki maddeler göz önüne alındığında, FDAM'ın sunduğu hız kontrol aralığı ve düşük devir sayısı motosiklet hızını ASM'den daha verimli bir şekilde kontrol edilmesini sağlar. Ayrıca güç aktarım sistemine duyulan ihtiyacın ortadan kalkması motosiklet maliyetini düşürür. FDAM daha az enerji kaybı ve düşük ısınma ile daha yüksek verimliliğe sahiptir. ASM'deki fan-soğutma gibi sisteme ihtiyaç duymaz. FDAM'ın düşük kütle ve devir sayısı ile yüksek verimlilik ve tork üretme kapasitesine sahip olması elektrikli motosiklet uygulamalarının performansını artırmaktadır.

FDAM'ın ASM'ye uygunluğu kanıtlandıktan sonra, motorun uygulama bazlı optimize edilmesi için iyileştirme çalışmaları yapılmalıdır. Bu iyileştirmelerden biri, kullanıcı konforunu olumsuz etkileyen Cogging torkunun minimize edilmesidir.

Cogging torku, boyutsal ölçüler, malzeme seçimi ve PoleEmbrace değerine bağlıdır. Motor tasarımı, sürekli zamanlı bir mühendislik problemi olduğu için doğru optimizasyon yönteminin seçilmesi kritik öneme sahiptir. Genetik algoritma veya metasezgisel algoritmalar kullanmak, en uygun çözümü elde etmek için etkili bir yaklaşımdır (Şekil 9-10).

ASM tasarımında belirlenen hedeflere göre uygulama bazında dayanıklılık, basit tasarım ve üretim maliyeti gibi avantajları bulunmasına rağmen, motosiklet performansını sağlayan tork ile kolay ve hassas hız kontrolünün zor olduğu sonucuna ulaşılmıştır. FDAM'ın bu konuda uygun olduğu gösterilmiştir.

Literatürde ASM ile aynı stator konstrüksiyonuna sahip senkron relüktans motorların (SRM), FDAM ile yakın sonuçlar verebileceği gözlemlenmiştir. FDAM'ın dezavantajı olan mıknatıs maliyetini incelemek için, üretim maliyeti/performans bazlı yeni bir ikili motor kıyaslaması gerçekleştirilebilir.

Teşekkür

Yazarların haricinde katkısı olan bulunmamaktadır.

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

- Akar, M., Eker, M., & Akın, F. (2021). BLDC Motor Design and Application for Light Electric Vehicle. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21(2), 326-336. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.889877>
- Apaydın, H., Kara, O., & Serteller, N. F. O. (2022). Investigation of the efficiency improvement on a 1.1 kW three-phase asynchronous motor. *Turkish Journal of Electromechanics and Energy*, 7(2), 58-66.
- Aydın, İ., Mengi, O. Ö., & Arslan, S. (2023). Farklı Oluk/Kutup Oranlarına Sahip Sıralı Kutuplu Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Analizi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 13(3), 1117-1134. <https://doi.org/10.31466/kfbd.1296266>
- Boduroğlu, T. (1953). *Elektrik makinaları dersleri:(teori, hesap ve konstrüksiyon)*. Teknik Üniversite Matbaası.
- Boduroğlu, T. (1994). *Elektrik makinaları dersleri, cilt 2, kısım 3, asenkron makinelerin hesap ve konstrüksiyonu*. Beta Basım Yayın Dağıtım A.Ş.
- Boldea, I. (2020). *Induction Machines Handbook: Transients, Control Principles, Design and Testing*. CRC press.
- Buhr Karel, V. P. (2011). *Analysis of the electric vehicle with the BLDC PM motor in the wheel body*. Prague.
- Çabuk, A. S., Sağlam, S., & Üstün, Ö. (2019). Farklı sargı yapılarının tekerlek içi fırçasız doğru akım motorlarının verimi üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(4), 1975-1986. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.571649>
- Dusane, P. M. (2016). *Simulation of a brushless DC motor in ANSYS-Maxwell 3D* (Master's thesis). Czech Technical University in Prague, Prague.
- Erdoğan, G., Taşkın, Y., & Tiryaki, H. (2024). HİBRİT ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN DÜŞÜK ÇALIŞMA GERİLİMİNDE İÇ ROTORLU FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU TASARIMI. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(1), 1243-1256. <https://doi.org/10.31796/ogummf.1146133>
- Gecer, B., Tosun, O., Apaydın, H., & Oyman Serteller, N. F. (2021). Comparative analysis of SRM, BLDC and induction motor using ANSYS/Maxwell. 2021 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICECCME52200.2021.9591010>
- Gieras, J.F. (2009). *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*, Third Edition (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429292736>
- Gürdal, O. (2001). *Elektrik makinalarının tasarımı*. Atlas Yayın Dağıtım.
- Hanselman, D. (2006). *Brushless permanent magnet motor design*. Ohio: Magna Physics Publishing.
- Hendershot, J. R., & Miller, T. J. E. (2010). *Design of brushless permanent-magnet motors*. Motor Design Books LLC.
- Hsiao, C. Y., & Htet, S. M. (2024). Multi-Step Design Optimization for the Improvement of an Outer-Rotor Brushless Direct Current Motor. *Applied Sciences*, 14(10), 4302.
- Husain, I. (2003). *Electric and hybrid vehicles design fundamentals*. New York: CRC Press.
- John, H. (1992). Holland. genetic algorithms. *Scientific american*, 267(1), 44-50.
- Long, B., Lim, S. T., Ryu, J. H., & Chong, K. T. (2013). Energy-regenerative braking control of electric vehicles using three-phase brushless direct-current motors. *Energies*, 7(1), 99-114.
- Mandasari, D. R., Sudiarto, B., Amelia, L., & Suryandi, A. A. (2024). Reducing Cogging Torque in V-Shaped BLDC Motors: A FEA Simulation Study on the Impact of Skew Angle. *Mekanika: Majalah Ilmiah Mekanika*, 23(1), 64-74.
- NAKHAEI, M. R., & ROSHANFEKR, R. (2021). Optimal Design of 3-phase Squirrel Cage Induction Motors Using Genetic Algorithm Based on the Motor Efficiency and Economic Evaluation of the optimal Model. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 9(1), 59-68.
- Nugraha, Y. U., Yuniarto, M. N., Herizal, H., Asfani, D. A., Riawan, D. C., & Wahyudi, M. (2018). Design analysis of axial flux permanent magnet BLDC motor 5 kW for electric scooter application. 2018 *International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, 163-168. <https://doi.org/10.1109/ISITIA.2018.8711225>
- Nürnberg, W. (1952). *Die Asynchronmaschine*. Springer: Berlin.
- Ocak, C., & Yenipinar, B. (2021). Hafif Elektrikli Araçlar için Asenkron Motor Tasarımı ve Uygulaması. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi* (26), 228-233. <https://doi.org/10.31590/ejosat.949092>

- Prakash, T. S. S. S., & Perumallapalli, K. (2024). Performance analysis of an induction motor using Ansys Maxwell RMxpert for various materials (Steel_1010, Ag, Al, Be, Cu, Mg, W, and Zr). *2024 IEEE Students Conference on Engineering and Systems (SCES)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/SCES61914.2024.10652456>
- Pyrhonen, J. (2013). *Design of Rotating Electrical Machines* (Vol. 1). Wiley-VCH.
- Tikhonova, O., Malygin, I., & Plastun, A. (2017). Electromagnetic calculation for induction motors of various designs by “ANSYS Maxwell.” *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076294>
- Toren, M., & Mollahasanoglu, H. (2021). Investigation of thermoelectric cooler system effect on induction motor performance. *2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ELMA52514.2021.9503049>
- Tören, M., & Mollahasanoğlu, H. (2023). Investigation of the effect of different power degree NdFeB magnets used in interior permanent magnet brushless direct current motor (IPMBLDC) on motor performance. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(3), 1389-1402.
- URL-1: <https://www.unep.org.tr> , (Erişim Tarihi: 10 Ocak 2025).
- URL-2, <https://www.youtube.com/watch?v=X2q6YUGuD6U> , (Erişim Tarihi: 10 Ocak 2025).
- Yaşa, Y. (2023). Design of High-Power Density Spoke-Type Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for E-Bikes. *Mühendislik Bilimleri Ve Araştırmaları Dergisi*, 5(2), 264-271. <https://doi.org/10.46387/bjesr.1300653>

Effects of Starter Cultures on the Physicochemical and Nutritional Characteristics of Fermented Fish Sausages

Fatma ÖZTÜRK¹ , Hatice GÜNDÜZ^{2*} , Fettah GÜNDÜZ³ 

Abstract

This study investigated the effects of amine-negative starter cultures, *Lactobacillus sakei* subsp. *sakei*, *Staphylococcus xylosus*, and *Pediococcus pentosaceus*, both individually and in combination, on the nutritional composition, texture, color, and amino acid profile of fish sausages during ripening and storage. The moisture content differences were significant during fermentation but not during storage ($P > 0.05$). Sausages with *S. xylosus* had the highest ash content, which increased by the end of storage. Color measurements showed declines in revealed decreases in the L^* and b^* values, whereas the a^* values varied with bacterial addition. Texture analysis revealed no significant differences in hardness between the groups. Amino acid analysis demonstrated a notable increase in total free amino acids postfermentation, particularly in sausages inoculated with mixed cultures ($P < 0.05$). Significant increases in flavor-related amino acids such as alanine, valine, and leucine were observed in sausages with *P. pentosaceus* and mixed cultures. The results highlight the potential of *S. xylosus*, *P. pentosaceus*, and mixed cultures to improve fish sausage quality, stability, and flavor development during storage.

Keywords: Fish sausage, Microbial fermentation, Organoleptic attributes, Biochemical properties.

Starter Kültürlerin Fermente Balık Sucuklarının Fizikokimyasal ve Besinsel Özellikleri Üzerine Etkileri

Öz

Bu çalışmada, amin negatif starter kültürler olan *Lactobacillus sakei* subsp. *sakei*, *Staphylococcus xylosus* ve *Pediococcus pentosaceus*'un, olgunlaşma ve depolama süresince balık sucuklarının besin bileşimi, tekstür, renk ve amino asit profili üzerindeki etkileri ayrı ayrı ve birlikte incelenmiştir. Fermantasyon sırasında nem içeriğinde anlamlı farklılıklar gözlenmiş ancak depolama sürecinde fark tespit edilmemiştir ($P > 0.05$). En yüksek kül içeriği *S. xylosus* içeren sucuklarda bulunmuş ve bu içerik depolama sonunda artmıştır. Renk ölçümleri, L^* ve b^* değerlerinde azalma olduğunu, a^* değerlerinin ise değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur. Tekstür analizinde gruplar arasında sertlik açısından fark bulunmamıştır. Amino asit analizinde, fermantasyondan sonra toplam serbest amino asit içeriğinde anlamlı bir artış gözlenmiş ve en yüksek seviyeler karışık kültürlerle aşılanmış sucuklarda kaydedilmiştir ($P < 0.05$). Özellikle lezzet gelişiminde önemli amino asitlerin *P. pentosaceus* ve karışık kültürlerde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar, *S. xylosus*, *P. pentosaceus* ve karışık kültürlerin, kalite, stabilite ve lezzet geliştirme açısından balık sucuklarında kullanımı için uygun olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Balık sucuğu, Mikrobiyal fermentasyon, Organoleptik özellikler, Biyokimyasal özellikler.

^{1,2,3}Department of Fisheries and Fish Processing Technology, Faculty of Fisheries, Izmir Katip Celebi University, Izmir, Turkey, fatma.ozturk@ikcu.edu.tr hatice.gunduz1@ikcu.edu.tr fettahgunduz@gmail.com

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Introduction

Fish are a rich source of easily digestible protein with high biological value and can provide the body with vitamins, minerals and essential fatty acids (Arslan et al., 2001, Sadeghi et al., 2021). The popularity of seafood as a foodstuff is increasing, largely because of its perceived health benefits and flavorful nature. The fish industry has responded to this trend by developing a range of processed or minced fish products, including fish burgers, fish fingers, and fish sausages. These products offer a convenient alternative while providing nutritional advantages. Fish sausage, in particular, involves mixing fish meat with additives and stuffing it into appropriate casings (Rahman et al., 2007). In response to the growing consumer demand for low-fat meat products, interest in the use of microbial fermentation to produce fish sausage is increasing (Hu et al., 2007).

Fermented sausages are important meat products, accounting for the majority of global food production. Their special characteristics include improved shelf-life, increased nutritional value due to reduced nitrosamines, and improved odor and flavor as a result of bacterial metabolites during fermentation (Sadeghi et al., 2021).

During fermentation, enzymatic and microbial activities lead to the breakdown of proteins, lipids, and carbohydrates, resulting in the formation of organic acids, amino acids, small peptides, and other compounds. These substances contribute to nutritional enhancement, flavor enrichment, and the distinct soft and fluffy texture characteristic of fermented fish products (An et al., 2022).

There are numerous benefits to fermenting fish for human consumption. First, fermentation serves as an affordable and practical method for preserving fish muscle without refrigeration. Second, it enhances the sensory properties of fish. Finally, it can increase the nutritional value and digestibility of the raw material (Hu et al., 2007).

Fermented meats and fish are highly popular in many Oriental and some Western countries. Recently, interest in the use of pure bacterial cultures to create fish-like products has increased (Hu et al., 2008). Lactic acid bacteria increase product safety by lowering the pH through sugar fermentation, whereas coagulase-negative staphylococci impact other technological characteristics of fermented meat products (Hu et al., 2007).

Various researchers have highlighted that the use of starter cultures in fish meat can significantly increase the quality of the final product (Yin and Jiang, 2001; Hu et al., 2007; An et al., 2008; Xu et al., 2010a; Xu et al., 2010b; Zaman et al., 2011; Zeng et al., 2013a; Zeng et al., 2013b; Nie et al., 2014a; Nie et al., 2014b; Sadeghi et al., 2021; An et al., 2022). *L. sakei* and *P. pentosaceus*, both lactic acid bacteria, are recognized for their rapid acidification capacity and antimicrobial properties, whereas *S. xylosum* plays a key role in flavor development and nitrate reduction (Lauková 2011; Zheng et al., 2025).

This study aims to investigate the impacts of three amine-negative starter cultures, *Lactobacillus sakei* subsp. *sakei*, *Staphylococcus xylosus*, and *Pediococcus pentosaceus*, both individually and in mixed cultures, on the nutritional composition, textural properties, and color characteristics of fish sausages during ripening and storage. By addressing gaps in the literature, this research provides detailed insights into how these specific starter cultures affect fish sausage quality. In this context, this study examines the effects of various factors on the moisture content; protein, fat, ash, and amino acid contents; and color attributes of a product, with the goal of enhancing the quality. Moreover, this study aims to provide practical implications for the commercial production of fish sausages, with the potential to increase product stability and safety.

2. Materials and Methods

2.1. Preparation of Starter Cultures

Three strains of lactic acid bacteria were used as starter cultures: *Lactobacillus sakei* subsp. *sakei* ATCC 15521, *Pediococcus pentosaceus* ATCC 33316, and *Staphylococcus xylosus* ATCC 29971. Freeze-dried cultures of *L. sakei* and *P. pentosaceus* were rehydrated and inoculated into De Man Rogosa Sharpe (MRS, Merck) Broth, while *S. xylosus* was grown in Heart Infusion Broth. All the cultures were incubated at 37 °C for 48 hours. After incubation, the cells were harvested via centrifugation at $3000 \times g$ for 10 minutes, washed twice with a saline solution (0.85% NaCl), and resuspended in fresh saline. These cell suspensions were then used as starter cultures.

2.2. Preparation of Fish Sausages

Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets were used in the production of sausages. The fish meat, comprising 80%, and tail oil, comprising 20%, were ground through a 3 mm disc to produce minced meat.

The preparation of sausages is carried out following the formulation specified by Kamiloğlu et al. (2019). This mince was combined with various seasonings, including red pepper (7 g/kg), garlic (10 g/kg), black pepper (5 g/kg), cumin (9 g/kg), allspice (2.5 g/kg), sucrose (4 g/kg), and NaNO₂ (0.15 g/kg). The prepared mixture was divided into five portions: four were inoculated with different starter cultures, *Lactobacillus sakei*, *Staphylococcus xylosus*, and *Pediococcus pentosaceus*, and a mixed culture (*L. sakei*, *S. xylosus*, and *P. pentosaceus* at a 1:1:1 ratio), whereas the remaining batch, which served as a control, contained 1.5% NaCl without any starter cultures. In bacterial cultures, 1 mL (10^{10} CFU/mL) was inoculated into 1 kg of sausage dough. In this way, a final concentration of

7 log CFU/g was achieved in the sausage batter. (Table 1). The batters with bacterial cultures were then stuffed into casings with a diameter of 35 mm, each weighing approximately 100 g. The sausages were ripened in a climate-controlled chamber with 92% relative humidity for 1 day at 24 °C, 90% relative humidity for 2 days at 20 °C, and 88% relative humidity for 3 days at 18 °C. As sausage is a fermented raw meat product, the fermentation and maturation stages play a crucial role. According to the TS 1070 Turkish Sausage Standard (TSE, 2002), the final product should contain no more than 40% moisture, no more than 5% salt, and should have a pH value between 4.7 and 5.5 at the end of the maturation period. In all sausage groups produced in this study, these parameters moisture content, salt concentration, and pH were found to meet the specified standards by the sixth day of maturation. Following the ripening phase, the sausages were stored at 4 °C. This study was carried out in 2 replications. Analyses were performed on days 0, 3, 6, 15, and 25.

Table 1. The experimental groups and compositions of sausages

C (1.5%)	1.5% NaCl (Control)
Sx	1.5% NaCl + <i>S. xylosus</i> (10^7 CFU/g)
Ls	1.5% NaCl + <i>L. sakei</i> sups <i>sakei</i> (10^7 CFU/g)
Pp	1.5% NaCl + <i>P. pentosaceus</i> (10^7 CFU/g)
Mix	1.5% NaCl + (<i>L. sakei</i> , <i>P. pentosaceus</i> , <i>S. xylosus</i>) (1:1:1- 10^7 CFU/g)

2.3. Determination of Chemical Composition

The moisture, protein and crude fat contents of the fish were measured via the oven method (AOAC, 1984), the Kjeldahl method (AOAC, 1984) and the Bligh and Dyer method (1959), respectively. The ash content of the samples was determined by incineration in a muffle furnace at 550 °C for 24 hours (Ismail, 2017).

2.4. Color Evaluation

The color of the samples was assessed on a flat surface via a colorimeter (Color Muse, Variable Inc., Tennessee, USA). The colorimeter was configured to take absolute measurements in the L^* , a^* , b^* mode (CIE 1976). Hunter L^* (indicating lightness), a^* (indicating redness), and b^* (indicating yellowness) values were used to monitor color changes during fermentation. To account for color variation, the average of three readings from the surface of each sample was used (Hu et al., 2007).

2.5. Texture Analysis

Shear measurements were performed to determine the hardness and toughness of the fish sausages. The samples were analyzed with a TA HD Plus texture analyzer (Stable Micro Systems Ltd., UK) via a Warner bratzler cutting probe. Analyses were performed under the following conditions:

Pre Test speed: 2.00 mm/sec

Test speed: 2.00 mm/sec

Post Test speed: 10.00 mm/sec

Distance: 30.000 mm

Trigger force: 20.0 g

2.6. Determination of Amino Acids

The free amino acid composition of the samples was analyzed using High Performance Liquid Chromatography (HPLC), following the methods described by Aristoy and Toldra (1991) and Antoine et al. (1999). Initially, the samples were homogenized, weighed to 5 g, and hydrolyzed with 6 N HCl for 24 hours at 110 °C. Single-detector UV and Zorbax Eclipse-AAA 4.6 × 150 mm, 3.5 µm HPLC were employed to determine the free amino acid composition. Fmoc (9-fluorenylmethyl chloroformate) with OPA (ortho-phthalaldehyde) was used as the derivatization agent, and 0.4 N borate (pH 10.2) served as the buffer solution for amino acids.

2.7. Statistical Analysis

The obtained data were analyzed using Analysis of Variance (ANOVA). The results were further evaluated with the Duncan Multiple Comparison Test. The SPSS statistical software package was used to determine if there were any significant differences between the application groups (IBM SPSS, 2012).

3. Results and Discussion

3.1. Chemical Compositions

Moisture, protein, fat and ash analyses were performed to evaluate the nutritional properties of

the fish sausages. The values obtained during fermentation and storage are shown in Figure 1.

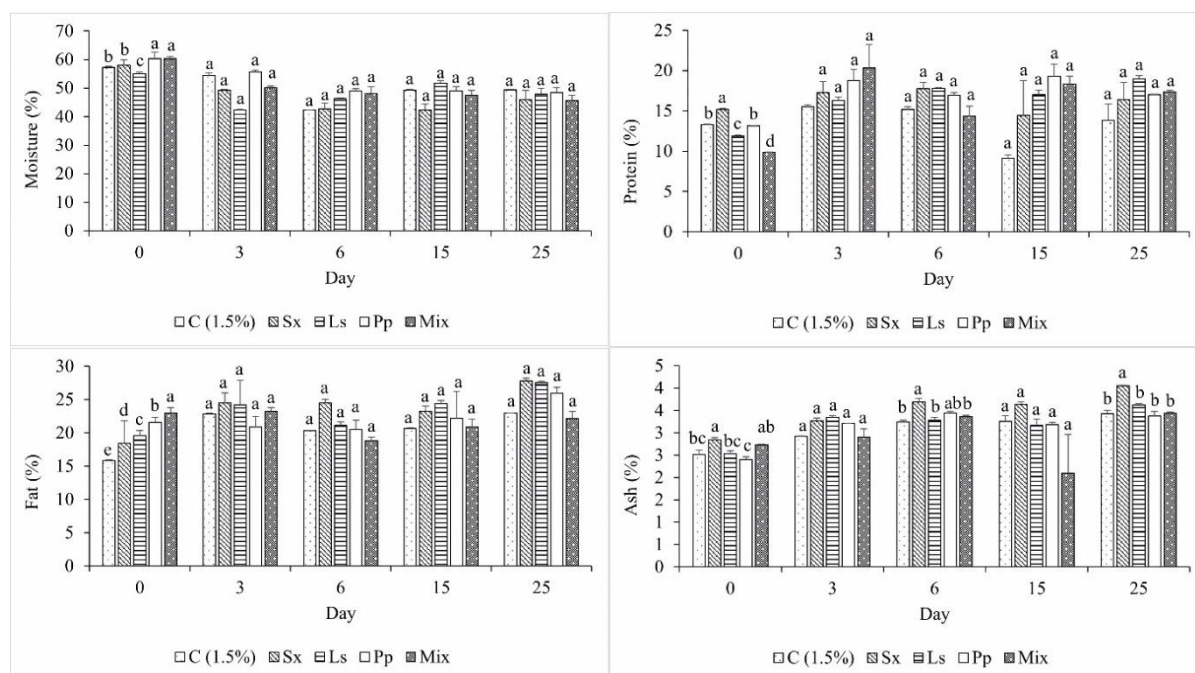


Figure 1. Chemical composition of the fermented fish sausage groups

There was a statistically significant increase in the moisture content of the groups during storage after fermentation ($P < 0.05$). Although differences were observed in the moisture contents of the groups at the beginning of storage and during the fermentation process ($P < 0.05$), no significant difference was detected between the moisture contents of the groups in the analyses performed on the 15th and 25th days of storage after fermentation was completed ($P > 0.05$).

Fermentation enhances the functional value of food by inducing chemical changes in organic substrates such as carbohydrates, proteins, and fats through the enzymatic activities of microorganisms (Afifah et al., 2023). The initial moisture content of the fish sausages produced with different starter cultures ranged from 55.04–60.31% ($P < 0.05$). However, there was a significant decrease in the moisture content of the experimental groups at the fermentation stage ($P < 0.05$). The observed decrease in moisture content as fermentation progressed may be due to an increase in dry matter content as a result of microbial cell proliferation (Obadina et al., 2013). A decrease in the moisture content of fermented mackerel sausages has also been reported (Afifah et al., 2023). Zeng et al. (2013a) reported similar results for fermented fish parts. The decrease in moisture level may be due to the added raw materials as well as the evaporation that occurs during the fermentation stage. Before fermentation, some water molecules form hydrates with other molecules (oxygen, nitrogen, carbohydrates, protein and other organic compounds) so that the water becomes free water. During

fermentation, free water evaporates to a considerable extent because of enzyme activity, breaking the bonds of water into free water (Afifah et al., 2023).

On the first day, a statistically significant difference was detected in the protein content (9.84-15.18%) of the fish sausage groups ($P < 0.05$), but this difference was not detected during the fermentation and storage periods ($P > 0.05$). The changes in the protein content of the fish sausage samples over the analysis periods (except for *L. sakei*) were not statistically significant ($P > 0.05$).

The increase in protein levels in the groups is thought to be due to the increase in the total nitrogen amount and lactic acid bacteria (LAB) population in the fermented sausages. The increase in nitrogen is due to LAB proteases, which actively degrade proteins into amino acids and peptides, resulting in increases in nitrogen and protein contents (Afifah et al., 2023). In our study, no significant difference was detected between the protein values of all the sausage groups with and without starter cultures. Similar results were obtained with fermented fish pieces using different starter cultures (Zeng et al., 2013a).

While there was a statistically significant difference in the fat content of the fish sausage samples on day 0 ($P < 0.05$), no significant differences were detected in any of the groups except for the *L. sakei* culture group on the other days of analysis.

While the fat content of the fish sausage samples ranged from 15.82--22.96% at the beginning of fermentation, it ranged from 18.80--24.50% at the end of fermentation (6th day). The increase in fat content is due to the secondary lipolytic activity of LAB, which actively releases fatty acids from fat molecules during fermentation (Afifah et al., 2023). In our study, the increase in fat content was not statistically significant except for sausage samples containing *P. pentosaceus* and mixed culture during the 6 days of fermentation ($P > 0.05$). Hu et al. (2008) reported that there was no significant difference in the fat content of fish sausages fermented with starter cultures. Zeng et al. (2013a) reported that the fat content of fermented fish pieces from different starter cultures was greater in a group containing mixed cultures (*P. pentosaceus*, *S. xylosus*, and *S. cerevisiae*) than in other groups.

The ash content indicates the presence of mineral substances in food (Yorukoglu and Dayısoylu, 2016). Among all the groups, the highest ash content was found in the group containing *S. xylosus* on the 0th, 6th and 25th days of storage ($P < 0.05$). The ash content in all the groups was greater on the 25th day of storage than at the beginning of storage ($P < 0.05$).

Zeng et al. (2013a) and Afifah et al. (2023) reported an increase in ash content in fermented fish products during fermentation. Zeng et al. (2013a) reported no significant difference between the ash contents of fermented fish pieces prepared by using different starter cultures, whereas in our study, the ash contents of the sausage groups containing 1.5% salt, *L. sakei* and mixed culture at the end of fermentation (6th day) were significantly lower than those of the other groups ($P < 0.05$). In

another study on fermented fish, the ash value of the experimental group without starter culture was lower than that of the experimental groups with starter culture (Zeng et al., 2013b).

The chemical composition may be influenced by the sources of raw materials, the types of ingredients used, the extent of water removal before processing, and the water loss that occurs during fermentation (Zeng et al., 2013a).

3.2. Color Properties

The color (L^* , a^* , and b^*) values of the fish sausage samples were analyzed during fermentation and storage. Color is one of the most important quality indicators in foods. According to the International Commission on Illumination (CIE), in the L^* , a^* , b^* system, L^* ranges from 0 (black, dull) to 100 (white, bright); a^* represents (+) red or (-) green; and b^* represents (+) yellow or (-) blue (Ormancı, 2013).

The changes in the brightness (L^*) values of the fish sausage samples during fermentation and storage are shown in Table 2. In this study, the L^* values of all the fish sausage groups at the beginning of storage varied between 48.37 and 57.53 ($P > 0.05$). The L^* values were between black and white on average. At the end of storage, the L^* value varied between 32.73 and 37.35 ($P > 0.05$). Analyses conducted during fermentation and storage revealed that the addition of different lactic acid bacteria had no effect on the L^* values of the fish sausage samples ($P > 0.05$). However, the L^* values measured in all the groups at the beginning of storage were lower at the end of storage as a result of the dulling of the fish sausages ($P < 0.05$). This decrease is related to the thickening of the samples due to weight and water loss (Sadeghi et al., 2021).

Table 2. Changes in the L^* values of the fish sausage samples during fermentation and storage

Day	C (1.5%)	Sx	Ls	Pp	Mix
Fermentation					
0	53.87±4.31 ^{Aa}	48.70±2.76 ^{Ab}	54.70±5.22 ^{Aa}	48.37±1.54 ^{Aa}	57.53±3.5 ^{Aa}
3	45.23±5.60 ^{Ab}	44.37±4.08 ^{Ac}	43.55±5.60 ^{Ab}	37.18±2.25 ^{Ab}	41.85±3.95 ^{Ac}
6	55.17±3.60 ^{Aa}	55.45±1.69 ^{Aa}	55.92±6.46 ^{Aa}	52.15±1.89 ^{Aa}	48.28±5.84 ^{Ab}
Storage					
15	53.72±4.27 ^{Aa}	50.07±2.36 ^{Ab}	51.78±7.8 ^{Aab}	48.98±6.39 ^{Aa}	54.97±4.79 ^{Aa}
25	37.35±3.00 ^{Ac}	34.95±3.13 ^{Ad}	32.73±3.63 ^{Ac}	37.12±2.82 ^{Ab}	35.95±1.32 ^{Ac}

Mean (n=2) ± std.error a, b, c (↓); There is a statistically significant difference between days with different letters in the same column ($P > 0.05$)

A, B, C (→): There is a statistically significant difference between days with different letters in the same row. ($P > 0.05$)

C: sausage without starter culture containing 1.5% salt; Sx: sausage with *S. xylosum*; Ls, sausage with *L. sakei*; Pp, sausage with *P. pentosaceus*; Mix, sausage with mixed starter culture (*S. xylosum*, *L. sakei*, *P. pentosaceus*)

The changes in the a^* values of the fish sausage samples during fermentation and storage are given in Table 3. In this study, the a^* values of the fish sausage samples at the beginning of storage varied between 12.03 and 13.07 ($P > 0.05$). At the end of the fermentation process (6th day), the highest and lowest a^* values were 14.52--8.43 for the control and *L. sakei* subsp. *sakei* groups, respectively. On the 25th day, the last day of storage, the value was found to vary between 6.05 and 10.87 ($P > 0.05$). While no difference was observed in the values of the groups before fermentation, the a^* value of the *L. sakei* subsp. *sakei* group was different from those of the *S. xylosum* and control groups after fermentation.

Table 3. Changes in the a^* values of the fish sausage samples during fermentation and storage

Day	C (1.5%)	Sx	Ls	Pp	Mix
Fermentation					
0	12.60±0.75 ^{Aa}	12.97±0.77 ^{Aa}	13.07±1.43 ^{Aa}	12.03±2.21 ^{Aa}	12.20±1.53 ^{Aa}
3	11.70±2.20 ^{ABa}	12.55±1.47 ^{Aa}	11.12±1.57 ^{ABab}	7.72±1.93 ^{Ca}	9.65±2.20 ^{BCa}
6	14.52±1.64 ^{Aa}	13.23±2.82 ^{ABa}	8.43±2.74 ^{Cbc}	9.55±3.4 ^{BCa}	9.97±4.42 ^{BCa}
Storage					
15	12.58±3.32 ^{Aa}	8.88±3.42 ^{Aa}	8.30±3.74 ^{Abc}	8.08±0.86 ^{Aa}	8.38±4.22 ^{Aa}
25	7.78±1.83 ^{Ab}	10.87±2.18 ^{Aa}	6.05±1.05 ^{Ac}	9.02±4.06 ^{Aa}	9.80±3.55 ^{Aa}

Mean (n=2) ± std.error a, b, c (↓); There is a statistically significant difference between days with different letters in the same column ($P > 0.05$)

A, B, C (→): There is a statistically significant difference between days with different letters in the same row. ($P > 0.05$)

C: sausage without starter culture containing 1.5% salt; Sx: sausage with *S. xylosum*; Ls, sausage with *L. sakei* Pp, sausage with *P. pentosaceus*; Mix, sausage with mixed starter culture (*S. xylosum*, *L. sakei*, *P. pentosaceus*)

The a^* value determined at the beginning of storage was lower at the end of storage on the 25th day, and the redness decreased ($P > 0.05$); however, this decrease in redness was found to be significant only in the fish sausage groups containing 1.5% salt and *L. sakei* ($P < 0.05$). Similar results were reported by Hu et al. (2008), who reported that the a^* value of samples containing starter cultures was significantly lower than that of samples without starter cultures. The decrease in the a^* value and the increase in the L^* value could be attributed to pigment denaturation and the exposure of muscle proteins under acidic conditions. The coagulation of these proteins may be linked to surface water release, which can cause light scattering. Fish muscles contain sarcoplasmic proteins, including chromoproteins such as myoglobin. Myoglobin is particularly sensitive to pH and temperature changes, making it one of the most labile proteins in these contexts (Hu et al., 2007).

The changes in the b^* values of the fish sausage samples during fermentation and storage are given in Table 4. At the beginning of storage, the b^* value detected at positive values (yellow) varied between 25.13 and 29.70, but this change was not statistically significant ($P > 0.05$). On the 25th day, the last day of storage, the b^* value was found to vary between 17.08 and 19.87 ($P > 0.05$). Similar

to the L^* and a^* values, the addition of different lactic acid bacteria had no effect on the b^* values of the fish sausage samples during fermentation and storage ($P > 0.05$). The b^* value determined at the beginning of storage was lower in the fish sausages at the end of storage ($P < 0.05$). An increase in yellow color may have occurred in the oxidized fish sausage samples. However, in our study, the addition of salt to the fish sausage samples and the addition of protective lactic acid bacteria delayed oxidation, and no increase in the yellow color b^* value was observed.

Table 4. Changes in the b^* values of the fish sausage samples during fermentation and storage

Day	C (1.5%)	Sx	Ls	Pp	Mix
Fermentation					
0	28.50±1.49 ^{Aa}	28.17±3.51 ^{Aa}	29.50±2.87 ^{Aa}	25.13±0.95 ^{Aa}	29.70±3.72 ^{Aa}
3	21.78±3.31 ^{Ac}	22.03±1.72 ^{Ab}	23.38±2.73 ^{Ab}	18.48±1.78 ^{Ab}	21.02±4.39 ^{Aa}
6	24.27±1.48 ^{Abc}	26.58±0.82 ^{Aa}	26.67±3.28 ^{Aab}	25.68±2.17 ^{Aa}	28.78±12.31 ^{Aa}
Storage					
15	25.45±1.50 ^{Aab}	23.22±1.78 ^{Ab}	22.75±3.52 ^{Ab}	23.70±2.45 ^{Aa}	23.82±4.05 ^{Aa}
25	19.87±2.05 ^{Ad}	17.88±1.69 ^{Ac}	17.57±2.45 ^{Ac}	18.70±1.32 ^{Ab}	17.08±1.80 ^{Aa}

Mean (n=2) ± std.error a, b, c (↓); There is a statistically significant difference between days with different letters in the same column ($P > 0.05$)

A, B, C (→): There is a statistically significant difference between days with different letters in the same row. ($P > 0.05$)

C: sausage without starter culture containing 1.5% salt; Sx: sausage with *S. xylosum*; Ls, sausage with *L. sakei*; Pp, sausage with *P. pentosaceus*; Mix, sausage with mixed starter culture (*S. xylosum*, *L. sakei*, *P. pentosaceus*)

3.3. Free Amino Acids

The contents of free amino acids in the fish sausages are shown in Table 5. Compared with the samples before fermentation, the fermented sausages presented a noticeable increase in total free amino acid levels ($P < 0.05$).

Several studies agree that the free amino acid content of fermented products generated via starter culture increases after fermentation (Hu et al., 2007; Zhang et al., 2013; Nie et al., 2014b; Liu et al., 2021). Similarly, in our study, the amino acid contents of the Sx, Ls, Pp, and mixed culture groups were greater than those of the control group. Free amino acid release is caused by the proteolytic activity of endogenous and microbial enzymes (Zhang et al., 2013; Tagawa et al., 2023). However, Zaman et al. (2011) reported that the addition of starter culture did not influence the production of amino acids.

Table 5. Changes in the free amino acid contents of the fish sausages fermented with/without starter culture (g/100 g)

Free amino acid	Initial sausage	Fermented sauge-25. day				
		C (1.5%)	Sx	Ls	Pp	Mix
Aspartic acid	26.73±0.1 ^c	54.08±0.18 ^a	0.83±0.03 ^c	1.28±0.09 ^c	2.05±0.13 ^d	49.87±0.2 ^b
Threonine	1.86±0.06 ^c	6.59±0.42 ^d	11.02±0.6 ^{ab}	8.82±0.27 ^c	11.70±0.3 ^a	10.12±0.4 ^{bc}
Serine	0.51±0.23 ^c	3.17±0.05 ^d	12.60±0.4 ^a	8.14±0.24 ^c	10.91±0.4 ^b	10.61±0.2 ^b
Glutamic acid	5.08± 0.22 ^d	8.85±0.22 ^c	24.31±0.2 ^a	24.11±0.32 ^a	16.6±0.18 ^b	8.59±0.11 ^c
Glycine	19.98±0.21 ^a	4.19±0.08 ^c	4.49±0.17 ^c	5.40±0.1 ^d	8.29±0.25 ^b	6.39±0.19 ^c
Alanine	5.90±0.14 ^c	25.78±0.42 ^b	22.6±0.35 ^c	20.46±0.27 ^d	26.4±0.2 ^{ab}	27.26±0.1 ^a
Cystine	0.01±0.00 ^d	0.02±0.00 ^d	33.21±0.4 ^c	32.98±0.22 ^c	38.53±0.3 ^a	36.71±0.2 ^b
Valine	1.90±0.16 ^d	14.10±0.13 ^b	13.89±0.3 ^{bc}	12.97±0.14 ^c	16.94±0.5 ^a	16.19±0.4 ^a
Methionine	1.36±0.16 ^d	7.44±0.12 ^c	9.51±0.27 ^b	7.87±0.2 ^c	10.51±0.1 ^a	10.49±0.1 ^a
Isoleucine	0.71±0.17 ^c	7.70±0.04 ^d	11.29±0.1 ^b	9.98±0.2 ^c	12.13±0.2 ^a	11.00±0.0 ^b
Leucine	1.84±0.14 ^c	18.95±0.08 ^d	23.16±0.2 ^c	19.46±0.3 ^d	25.26±0.2 ^a	23.92±0.0 ^b
Tyrosine	0.20±0.01 ^d	0.11±0.02 ^c	1.09±0.03 ^a	0.94±0.01 ^b	0.46±0.03 ^c	0.48±0.04 ^c
Phenylalanine	1.89±0.16 ^c	8.64±0.10 ^d	10.78±0.2 ^b	10.00±0.1 ^c	12.29±0.1 ^a	11.97±0.1 ^a
Histidine	0.05±0.01 ^c	5.84±0.32 ^b	7.07±0.47 ^b	6.98±0.3 ^b	8.64±0.32 ^a	8.86±0.47 ^a
Lysine	0.37±0.16 ^c	21.13±0.10 ^a	11.51±0.3 ^{cd}	11.13±0.2 ^d	13.72±0.3 ^b	12.38±0.3 ^c
Arginine	0.01±0.00 ^c	0.23±0.02 ^a	0.24±0.01 ^a	0.13±0.02 ^b	0.19±0.02 ^a	0.19±0.01 ^a
Total	68.41±1.99 ^c	186.82±2.4 ^d	197.6±3.9 ^c	180.73±3.2 ^d	214.6±3.6 ^b	254.03±3.6 ^a

Mean (n=2) ± std.error a, b, c (↓); There is a statistically significant difference between days with different letters in the same column ($P > 0.05$)

A, B, C (→): There is a statistically significant difference between days with different letters in the same row. ($P > 0.05$)

C: sausage without starter culture containing 1.5% salt; Sx: sausage with *S. xyloso*; Ls, sausage with *L. sakei*; Pp, sausage with *P. pentosaceus*; Mix, sausage with mixed starter culture (*S. xyloso*, *L. sakei*, *P. pentosaceus*)

Free amino acids are strongly related to the characteristic taste development of fermented products, and amino acids such as alanine, aspartic acid, glutamic acid, leucine, methionine, serine, valine, and threonine are known as sweetening amino acids (Hu et al., 2007). In this study, the contents of sweetening amino acids and amino acids such as arginine, histidine, phenylalanine, isoleucine, and lysine increased compared with those before fermentation. Nie, Lin, et al. (2014) reported that high concentrations of valine and leucine were found in inoculated sausages. In our study, high concentrations of alanine, valine, leucine, threonine, and methionine were detected in sausages inoculated with *Pediococcus pentosaceus* and mixed cultures. The role of these amino acids as precursors for flavor compounds in fermented foods is well established (Hu et al., 2007; Nie et al., 2014a; Yuan et al., 2023).

The addition of *P. pentosaceus* and mixed culture mixture (*L. sakei*, *S. xyloso*, and *P. pentosaceus*) clearly affected the release of free amino acids in fermented fish sausage ($P < 0.05$). Compared with the control groups, the starter-inoculated groups presented greater contents of threonine, alanine, cysteine, valine, methionine, isoleucine, leucine, histidine, and arginine but lower

contents of aspartic acid ($P < 0.05$). This result was in agreement with the results of Nie et al. (2014a). These findings are consistent with the changes in α -amino nitrogen content (Nie et al., 2014a).

3.4. Texture Properties

Figure 2 shows the results of the texture analysis of the fish sausage samples during fermentation and storage.

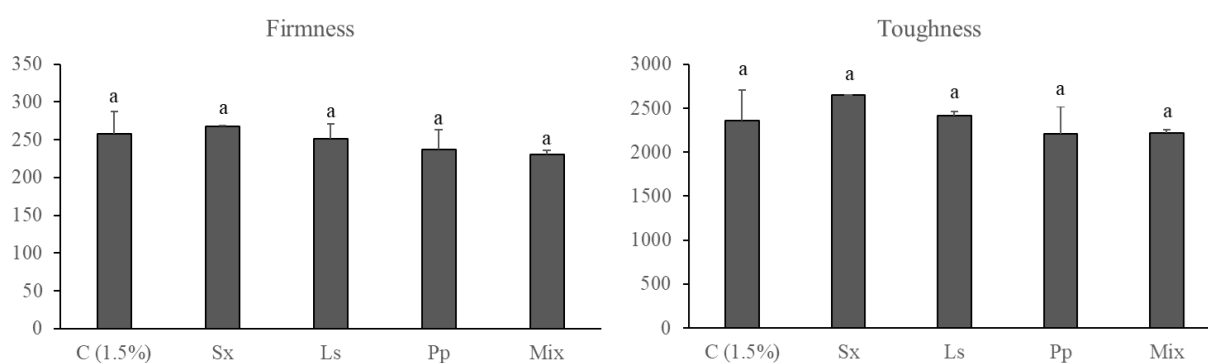


Figure 2. Results of texture analysis of the fish sausage samples

At the end of storage, the firmness values of the experimental groups varied between 230.70 and 267.51 ($P > 0.05$), but there was no significant difference between the control and bacteria-treated groups. Similarly, there was no significant difference between the hardness values of the experimental groups ($P > 0.05$).

Among texture properties, firmness and toughness are important properties for consumers because they determine the acceptability of a product's texture (Chambers and Bowers, 1993). Many minced food products, such as meatballs, sausages and sausages, have a cutoff point at which the texture is unacceptable (Yu and Yeang, 1993). In our study, according to the results of the shear test, the firmness value was lower in the experimental group containing mixed culture than in the other groups. The highest firmness value was determined in sausage samples containing *S. xylosus*. However, the difference between the firmness values of the groups was not significant ($P > 0.05$).

The toughness value is the ability of the food to resist any applied force. The toughness value obtained from shear force analysis is the sufficient force required to compress a sample (Roldán et al., 2013). In this study, the toughness values of the sausage samples ranged from 2209.55--2732.42. The lowest toughness value was determined in sausage samples containing *P. pentosaceus*, and the highest value was determined in sausage samples containing *S. xylosus*. The increase in toughness is

due to denaturation of collagen in the meat or a change in the myofibrillar structure of the meat (Bıyıklı et al., 2020).

4. Conclusions

This study evaluated the effects of three amine-negative starter cultures, *L. sakei* subsp. *sakei*, *S. xylosus*, and *P. pentosaceus*, both individually and in combination, on the nutritional composition, textural properties, color characteristics, and amino acid profile of fish sausages during ripening and storage. The results demonstrated that while the moisture content decreased significantly during fermentation, it increased during storage, with no significant differences observed in moisture content on days 15 and 25. The protein and fat contents remained stable throughout the study, with only initial differences noted. The highest ash content was found in sausages containing *S. xylosus*.

Amino acid analysis revealed a significant increase in total free amino acid content after fermentation, particularly in sausages inoculated with mixed cultures ($P < 0.05$). The presence of essential amino acids such as alanine, valine, leucine, threonine, and methionine was notably greater in sausages inoculated with *P. pentosaceus* and mixed cultures, contributing to enhanced flavor profiles.

On the basis of these findings, *S. xylosus*, *P. pentosaceus* and mixed cultures have emerged as the most beneficial starter cultures because of their positive effects on ash content, overall stability during storage, and enhanced amino acid profile. This study contributes to the development of higher-quality fish sausages, offering practical insights for improving product attributes and advancing the commercial production of fish sausages.

Acknowledgments

This study was supported by Izmir Katip Celebi University Scientific Research Project Coordination (Project number: 2021-GAP-SUÜF-0003).

Authors' Contributions

Study conception and design: FÖ, HG; data collection: FÖ, HG, FG; analysis and interpretation of results: FÖ, HG, FG; draft manuscript preparation: FÖ, HG,. All authors reviewed and approved the final version of the manuscript.

Statement of Conflicts of Interest

The authors declare that there are no conflicts of interest.

Statement of Research and Publication Ethics

The authors declare that this study complies with Research and Publication Ethics.

References

- Afifah, D.N., Ratna Sari, I., Prastifani, N.T., Fulyani, F., Anjani, G., Widyastuti, N., Hastuti, V. N. (2023). Effect of fermentation time on nutrition content, physical properties, pH, amino acids, fatty acids composition and organoleptics on fermented mackerel sausage (*Rastrelliger kanagurta* Cuvier) characteristics. *International Journal of Food Studies*, 12(1), 57–70. <https://doi.org/10.7455/ijfs/12.1.2023.a4>
- An, Y., Cai, X., Cong, L., Hu, Y., Liu, R., Xiong, S., Hu, X. (2022). Quality improvement of zhayu, a fermented fish product in china: effects of inoculated fermentation with three kinds of lactic acid bacteria. *Foods*, 11(18). <https://doi.org/10.3390/foods11182756>
- Antoine, F.R., Wei, C.I., Littell, R.C., Marshall, M.R. (1999). HPLC method for analysis of free amino acids in fish using o-phthalaldehyde precolumn derivatization. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47(12), 5100–5107. <https://doi.org/10.1021/jf990032>
- AOAC. (1984). Official methods of analysis. Association of official analytical chemist (14th ed). Arlington, Washington DC. Washington DC.
- Aristoy, M.C., Toldra, F. (1991). Deproteinization techniques for HPLC amino acid analysis in fresh pork muscle and dry-cured ham. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 39(10), 1792–1795. <https://doi.org/10.1021/jf00010a020>
- Arslan, A., Dinçoğlu, A.H., Gönülalan, Z. (2001). Fermented *Cyprinus carpio* L . sausage. *Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences*, 25(5), 667–673. <https://journals.tubitak.gov.tr/veterinary>
- Bıyıklı, M., Akoğlu, A., Kurhan, Ş., Akoğlu, İ.T. (2020). Effect of different Sous Vide cooking temperature-time combinations on the physicochemical, microbiological, and sensory properties of turkey cutlet. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 20, 100204. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2020.100204>
- Bligh, E.G., Dyer, W.J. (1959). A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 37(8), 911–917. <https://doi.org/10.1139/o59-099>
- Chambers E., Bowers J.R. (1993). Consumer perception of sensory qualities in muscle foods. *Food Technology*, 47(11), 116–120.
- Hu, Y., Xia, W., Ge, C. (2007). Effect of mixed starter cultures fermentation on the characteristics of silver carp sausages. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 23(7), 1021–1031. <https://doi.org/10.1007/s11274-006-9330-2>
- Hu, Y., Xia, W., Ge, C. (2008). Characterization of fermented silver carp sausages inoculated with mixed starter culture. *LWT-Food Science and Technology*, 41(4), 730–738. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.04.004>
- Ismail, B.P. (2017). Ash content determination (pp. 117–119). https://doi.org/10.1007/978-3-319-44127-6_11
- Kamiloğlu, A., Kaban, G., Kaya, | Mükerrrem. (2019). Effects of autochthonous *Lactobacillus plantarum* strains on *Listeria monocytogenes* in sucuk during ripening. *Journal of Food Safety*, 39(e12618). <https://doi.org/10.1111/jfs.12618>
- Lauková, A. (2011). Using natural and novel antimicrobials to improve the safety and shelf-life stability of processed meat products. In *Processed meats* (pp. 299–330). Woodhead Publishing.
- Liu, J., Lin, C., Zhang, W., Yang, Q., Meng, J., He, L., Deng, L., Zeng, X. (2021). Exploring the bacterial community for starters in traditional high-salt fermented Chinese fish (Suanyu). *Food Chemistry*, 358, 129863. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129863>

- Nie, X., Lin, S., Zhang, Q. (2014a). Proteolytic characterisation in grass carp sausage inoculated with *Lactobacillus plantarum* and *Pediococcus pentosaceus*. *Food Chemistry*, 145, 840–844. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.08.096>
- Nie, X., Zhang, Q., Lin, S. (2014b). Biogenic amine accumulation in silver carp sausage inoculated with *Lactobacillus plantarum* plus *Saccharomyces cerevisiae*. *Food Chemistry*, 153, 432–436. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.12.093>
- Obadina, A.O., Akinola, O.J., Shittu, T.A., Bakare, H.A. (2013). Effect of natural fermentation on the chemical and nutritional composition of fermented soymilk nono. *Nigerian Food Journal*, 31(2), 91–97. [https://doi.org/10.1016/S0189-7241\(15\)30081-3](https://doi.org/10.1016/S0189-7241(15)30081-3)
- Ormancı, H.B. (2013). Palamut (*Sarda sarda*) lakerdasının olgunlaşması süresince serbest amino asit ve biyojen amin oluşumunun ürün kalitesine etkileri. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Çanakkale, Türkiye.
- Rahman, M.S., Alwaili, H., Guizani, N., Kasapis, S. (2007). Instrumental-sensory evaluation of texture for fish sausage and its storage stability. *Fisheries Science*, 73(5), 1166–1176. <https://doi.org/10.1111/j.1444-2906.2007.01449.x>
- Roldán, M., Antequera, T., Martín, A., Mayoral, A.I., Ruiz, J. (2013). Effect of different temperature–time combinations on physicochemical, microbiological, textural and structural features of sous-vide cooked lamb loins. *Meat Science*, 93(3), 572–578. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.11.014>
- Sadeghi, A., Hakimzadeh, V., Salehi, E., Rashidi, H. (2021). Investigation of the physicochemical, organoleptic and dietary properties of trout fermented sausages through probiotic strains and fat replacer. *Food Science and Technology*, 15(1). <https://doi.org/10.15673/fst.v15i1.1968>
- Tagawa, J., Noma, S., Demura, M., Hayashi, N. (2023). Comparison of reduced-salt fish sauces produced under pressurized carbon dioxide treatment from sardinops melanostictus, trachurus japonicus, konosirus punctatus, odontamblyopus lacepedii, and their mixture. *Food and Bioprocess Technology*, 16(2), 434–446. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02920-2>
- TSE (2002), Türk Standartları Enstitüsü. Türk Sucuğu, TS:1070., Ankara.
- Xu, Y., Xia, W., Yang, F., Kim, J.M., Nie, X. (2010a). Effect of fermentation temperature on the microbial and physicochemical properties of silver carp sausages inoculated with *Pediococcus pentosaceus*. *Food Chemistry*, 118(3), 512–518. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.05.008>
- Xu, Y., Xia, W., Yang, F., Nie, X. (2010b). Physical and chemical changes of silver carp sausages during fermentation with *Pediococcus pentosaceus*. *Food Chemistry*, 122(3), 633–637. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.03.023>
- Yin, L.J., Jiang, S.T. (2001). *Pediococcus pentosaceus* L and S utilization in fermentation and storage of mackerel sausage. *Journal of Food Science*, 66(5), 742–746. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2001.tb04631.x>
- Yorukoglu, T., Dayısoylu, K.S. (2016). Some chemical and functional properties of maras tarhana. *Atatürk University Journal of Agricultural Faculty*, 47(1), 53–63.
- Yu, S., Yeang, S.B. (1993). Effect of type of starch on the quality of fishballs. In: Liang, O.B., Buchanan, A. and Fardiaz, D. (Eds.), *Development of Food Science and Technology in Southeast Asia*, IPB Press, 325-332.
- Yuan, L., Zhang, Q., Zhao, F., Jin, W., Shi, T., Xiong, Z., Gao, R. (2023). Dynamic changes and correlation analysis of protease activities, texture and flavour compounds during fish fermentation (suanyu) using mixed culture (*Enterococcus rivorum* and *Enterococcus lactis*). *International Journal of Food Science & Technology*, 58(5), 2312–2324. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16360>
- Zaman, M.Z., Abu Bakar, F., Jinap, S., Bakar, J. (2011). Novel starter cultures to inhibit biogenic amines accumulation during fish sauce fermentation. *International Journal of Food Microbiology*, 145(1), 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2010.11.031>
- Zeng, X., Xia, W., Jiang, Q., Yang, F. (2013b). Effect of autochthonous starter cultures on microbiological and physico-chemical characteristics of Suan yu, a traditional Chinese low salt fermented fish. *Food Control*, 33(2), 344–351. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.03.001>
- Zeng, X., Xia, W., Yang, F., Jiang, Q. (2013a). Changes of biogenic amines in Chinese low-salt fermented fish pieces (Suan yu) inoculated with mixed starter cultures. *International Journal of Food Science and Technology*, 48(4), 685–692. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12010>
- Zhang, Q., Lin, S., Nie, X. (2013). Reduction of biogenic amine accumulation in silver carp sausage by an amine-negative *Lactobacillus plantarum*. *Food Control*, 32(2), 496–500. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.01.029>

Zheng, Y., Zhao, G., Zhao, S., Li, X., Cui, W., Xu, L., ... & Tong, L. (2025). Don't Judge a Sausage by Its Cover: Effects of Inoculating Three Indigenous Lactic Acid Bacteria on Quality, Moisture Distribution, and Protein Structure in Fermentation. *Fermentation*, 11(3), 134.
<https://doi.org/10.3390/fermentation11030134>

Lamine edilmiş Poli(laktik asit)/Keten Biyokompozitlerin Biyobozunurluk Özelliklerinin İncelenmesi

Ramazan YILDIRIM¹ , Levent ELEN^{2*} 

Öz

Bu çalışmada mekanik özellikleri nispeten yüksek, ucuz ve ulaşılabilir bir biyopolimer olan PLA (poli(laktik asit)) matrisli, örülmüş ham keten takviyeli bir biyokompozit üretilmiştir. PLA matrisine kırılabilirliğini azaltıp sünekliğini arttırmak için %20 PBS (polibütilen süksinat) katkısı yapılmıştır. Saf PLA ve PLA/PBS karışımı 190°C sıcaklıkta enjeksiyon kalıplama yöntemi ile plakalar halinde üretilmiştir. Matris ve takviye fazının arayüzey yapışmasını iyileştirmek için kullanılan keten elyafa %5 NaOH (Sodyum hidroksit) kullanılarak alkali muamelesi yapılmıştır. Biyokompozitler 160°C'de sıkıştırma kalıplama yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen biyokompozitlerin su emme ve biyobozunma kapasiteleri analiz edilmiştir. FT-IR (Fourier Dönüştürümlü Kızılötesi Spektroskopisi) ve SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu)-EDX (Enerji Dağıtıcı X-ışını) analizleri ile keten elyafın, yüzey modifikasyonu öncesi ve sonrası, yüzey özellikleri incelenmiştir. Yapılan analiz ve testler sonucunda %5 NaOH kullanılarak yapılan alkali muamelesinin iyi bir arayüzey yapışması sağladığı, nem emme kapasitesini ve toprakta bozunma sürecini artırdığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Poli(laktik asit), Polibütilen süksinat, Su emme, Biyobozunurluk.

Investigation of Biodegradability Properties of Laminated PLA/Flax Biocomposites

Abstract

In this study, a PLA matrix, which is a relatively high mechanical properties, cheap and accessible biopolymer, and knitted raw flax reinforced biocomposite was produced. 20% PBS was added to the matrix to reduce the brittleness of PLA and increase its ductility. The pure PLA and PLA/PBS mixture forming the matrix were produced as plates by injection molding at 190°C. Alkaline treatment was applied to the flax fiber used to improve the interfacial adhesion of the matrix and reinforcement phase using 5% NaOH. The biocomposites were produced by compression molding at 160°C. The water absorption and biodegradation capacities of the produced biocomposites were analyzed. The surface properties of the flax fiber before and after surface modification were examined by FT-IR and SEM-EDX analyses. As a result of the analyses and tests, it was determined that the alkaline treatment using 5% NaOH provided good interfacial adhesion, increased the moisture absorption capacity and the degradation process in the soil.

Keywords: Poly(lactic acid), Polybutylene succinate, Water absorption, Biodegradability.

¹Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karabük, Türkiye, ramazanyildirim.35@hotmail.com

²Karabük Üniversitesi, TOBB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Karabük, Türkiye, leventelen@karabuk.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Geleneksel petrol bazlı sentetik kompozitlerle karşılaştırıldığında, biyokompozitlerin kullanımı geri dönüştürülebilirlik, yenilenebilirlik ve biyolojik olarak parçalanabilirlik, düşük yoğunluk ve daha az maliyet gibi üstün avantajlar sunar (Gholampour ve Ozbakkaloglu, 2020). Ayrıca, yeterli akustik ve termal yalıtım sağlarlar ve esnek yapıya sahiptirler (Rajeshkumar ve ark., 2021). Ek olarak, biyokompozitler toksik değildir, yani herhangi bir rahatsızlığa neden olmazlar ve dolayısıyla sentetik kompozitlerle karşılaştırıldığında kullanımı daha güvenlidir (Hemath ve ark., 2020). Bu avantajları nedeniyle, otomobil, havacılık, inşaat, savunma, biyomedikal, paketleme, spor malzemeleri vb. gibi çeşitli endüstrilerde geniş bir uygulama yelpazesine sahiptirler (Gurunathan ve ark., 2015; Vinod ve ark., 2020). Dolayısıyla tüm bu özellik ve avantajları nedeniyle son yıllarda, biyolojik olarak parçalanabilir kompozitler araştırmacıların daha fazla ilgisini çekmektedir çünkü daha ucuzdur, dairesel ekonomiyi destekler (Roussi  re ve ark., 2012) ve sentetik polimerlere kıyasla daha az CO₂ ayak izi   re  tir (Smitthipong ve ark., 2015).

Biyopolimer kompozitlerde doğal fiberler kullanmak, üretim malzemelerinin maliyetini potansiyel olarak düşürebilir; ve bazı durumlarda biyopolimerlerin performansını da artırdığı raporlanmıştır (Bajpai ve ark., 2014). Ayrıca PLA (poli(laktik asit) kompozitlerinin sergilediği erime noktası ve cam geçiş sıcaklığının saf PLA'ya kıyasla iyileştiği bildirilmiştir (Prithivirajan ve ark., 2015). Bu nedenle PLA ve doğal fiberlere dayalı birçok malzeme sistemi incelenmiştir. Ancak sahip olduğu üstün mekanik özellikleri nedeniyle keten, PLA takviyesi için en çok ilgi çeken doğal fiberlerden biri olmuştur (Bulota ve Budtova, 2015; Couture ve ark., 2016; Durante ve ark., 2017). Keten fiberleri diğer sak fiberleriyle karşılaştırıldığında, 345 ile 1500 Mega Pascal (MPa) arasında değişen en yüksek nihai çekme mukavemeti değerine ve 27 ile 100 Gigapascal (GPa) arasında değişen bir elastiklik modülüne sahiptirler (Mwaikambo, 2006). Ayrıca selüloz içeriği hacimce %60 ile %81 arasında değişirken, hemiselüloz %14, lignin %19 ve pektin %0,9 ve %2-3 arasında değişmektedir (Farag, 2017; Lalit ve ark., 2018; Saba ve ark., 2015). Bu   zellikleri sebebiyle keten fiber takviyeli kompozitler, spor ve denizcilik endüstrilerinde ve de otomotiv i   parçaları olarak kullanım için uygun kompozitlerdir (Moudood ve ark., 2019). Otomotiv endüstrisinde, Toyota, Ford ve Mazda dahil olmak üzere bazı otomobil üreticileri biyopolimerlerin kullanımında   nc   olmuşlardır ve artık   vre dostu araçlar yaratmak için biyobazlı, yenilenebilir plastikleri otomobil parçalarına entegre etmektedirler (*Automotive*, 2010; Reddy ve ark., 2017). Ford şu anda   ekil hafızalı polimerler ve mısır bazlı, j  t, kenevir, kenaf ve keten gibi doğal takviye malzemeleri kullanarak kompozitler üretmeyi hedeflemektedir (Rahman ve ark., 2023). Ancak Ford'un ana hedefi geleneksel plastikleri PLA ile değiştirmektir (*Automotive*, 2010). Dolayısıyla biyokompozitler, özellikle otomotiv sektöründe

oldukça büyük üne kavuşmuş durumdadır ve gelecekte biyokompozit kullanan sektör çeşitliliğinin artması beklenmektedir.

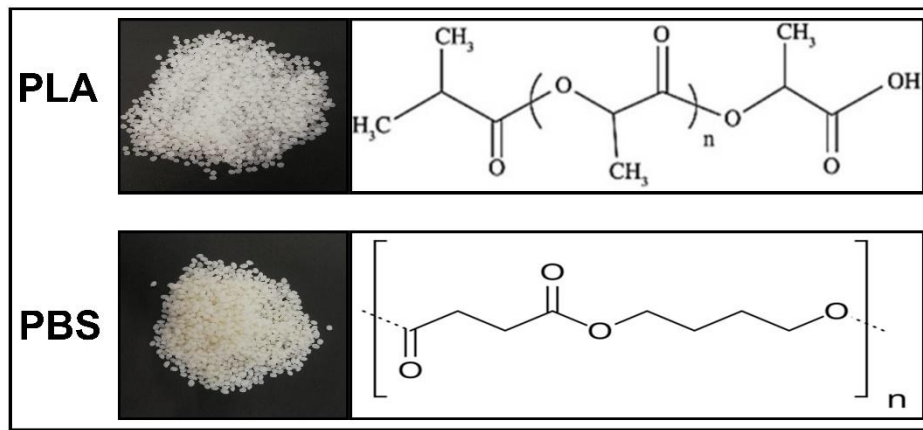
2. Çalışmanın Amacı ve Yapısı

Çalışmamızın genel amacı, otomotiv endüstrisi için biyolojik olarak parçalanabilir polimer kompozitlerle yüksek miktarda yük taşıma kapasitesi gerektirmeyen otomobil iç mekan parçalarının (araç torpido gözü, kol dayanağı, araç kapı panelleri, araç koltuklarının plastik bileşenleri ve bazı metal parçalar) nasıl üretileceği ve ikame edileceği konusunda literatüre ve endüstriye fikir ve rehberlik sağlamaktır. Bu bağlamda, bu çalışmada sunulan verilerin yeniliği hem malzeme hem de teknolojik ikamelerin bir kombinasyonu yoluyla otomotiv sektörü için sürdürülebilirlik sorununu ele almaktadır. Ayrıca çalışmamızda, klasik üretim yöntemlerinin dışında kalan yöntem ve teknikleri içeren bir dizi uygulama gerçekleştirilmiş ve sonuçları tartışılmıştır.

Klasik sıkıştırma kalıplama yöntemlerinde, granüler polimerin sıcak pres altında ezilerek polimerlerin plaka ve/veya film yapısı oluşturulması işlemini içerir. Ancak, çalışmamızda, daha homojen bir plaka yapısı elde etmek için, 2 mm kalınlığındaki kalıplarda enjeksiyon kalıplama yoluyla ince plakalar elde edildi. Ayrıca, üretim sürecinde ek bir film, bağlayıcı veya yapıştırıcı madde veya yöntem kullanılmamıştır. Doğrudan plaka ve mat fiberleri, sıcak pres altında sıkıştırma kalıplamaya tabi tutuldu. Bunlara ek olarak, literatürde belirtildiği gibi, safsızlıklardan arındırmak ve polimer penetrasyonunu geliştirmek için keten, NaOH (alkali) ile yüzey işlemine tabi tutuldu (Borchani ve ark., 2015; Elen ve ark., 2023; Xia ve ark., 2016). PLA poli(bütlen süksinat) (PBS) plakalar, literatürde belirtildiği gibi (Chang ve ark., 2022; Elen ve ark., 2023; Yıldırım, 2024; Zhang ve ark., 2022), PLA'nın kırılkan yapısını azaltmak için %20 oranında PBS eklenerek oluşturuldu. PLA ve PLA+PBS plakalarının katmanları ile alkali ile işlenmiş ve işlenmemiş fiberler, sıcak preste sıkıştırılarak belirlenmiş uygun sıcaklık ve bekleme süresinde kompozitleri elde edildi. Uygun sıcaklık ve bekleme süresi belirlendikten sonra kompozitler oluşturuldu. Ardından kompozitlere uygulanan test ve analizler değerlendirildi ve raporlandı.

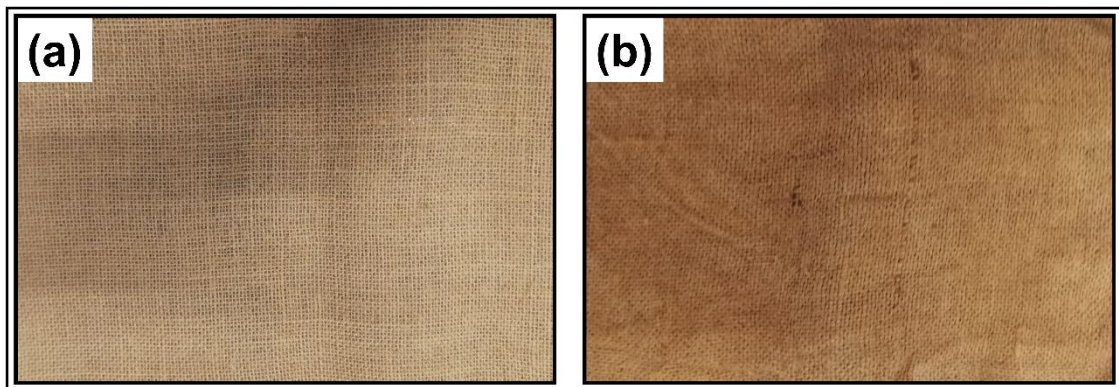
3. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalarda kullanılan PLA (Luminy LX175 Total Corbion) Kumru Kimya, Türkiye tarafından tedarik edilmiştir (Şekil 1). Kullanılan PLA'nın yoğunluğu $1,24 \text{ g cm}^{-3}$ 'tür ve camsı geçiş sıcaklığı $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığındadır. Karışımda kullanılan Bio-PBS (PTT MCC Biochem) PTT MCC BIOCHEM CO., LTD., Tayland tarafından tedarik edilmiştir (Şekil 1); yoğunluğu $1,24 \text{ g cm}^{-3}$ 'tür ve erime noktası $84 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir.



Şekil 1. PLA ve PBS polimerlerinin granül formları ve kimyasal formülleri.

Çalışmada kullanılan keten hasır elyafı (Şekil 2(a)) 4D Makine ve Teknoloji şirketinden tedarik edilmiştir. Keten hasır elyafı önce saf su ile yıkanmış ve kurutulmuştur. Bu temizleme işleminden sonra, ortam sıcaklığında 30 dakika boyunca %5'lik NaOH çözeltisine daldırılmış ve pH seviyesi yaklaşık 7,0'a ulaşana kadar akan su ile yıkanmıştır. Yıkama işleminin ardından fiberler 80 °C'de fırında 48 saat kurutulmuştur (Sawpan ve ark., 2011) (Şekil 2(b)).



Şekil 2. Keten mat fiberinin, (a) yüzey işlemsiz, (b) yüzey işlemlı görünümü.

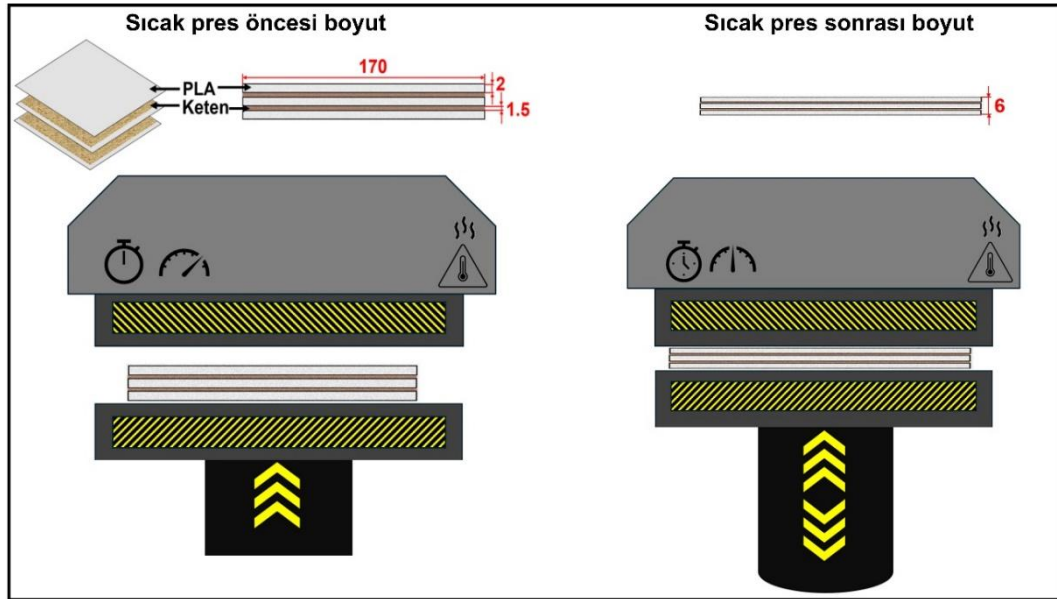
Yüzey işlemsiz fiberlerin ve yüzey işleminin fiberlerin kimyasal özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek için FT-IR kullanılmıştır. FT-IR spektrum analizi, bir FT-IR Thermo Scientific, Nicolet iS50 Model spektrometri kullanılarak yapılmıştır. Numuneler, 700 ile 3500 cm^{-1} arasındaki dalga sayıları üzerinde taranmıştır.

PLA ve PLA+20% PBS plakaları, Akort Ortopedik Ayak Bakım Ürünleri Ltd. Şti. Türkiye'de endüstriyel üretim için tasarlanmış Sole Shoe enjeksiyon kalıplama makinesinde üretilmektedir. Plakalar, 180 °C enjeksiyon sıcaklığına ve 2 mm kalıp boşluğuna ve 200 mm x 150 mm en boy oranına sahip bir alüminyum kalıpta kalıplanarak elde edilmiştir. Tablo 1, kompozitlerin bileşimini göstermektedir.

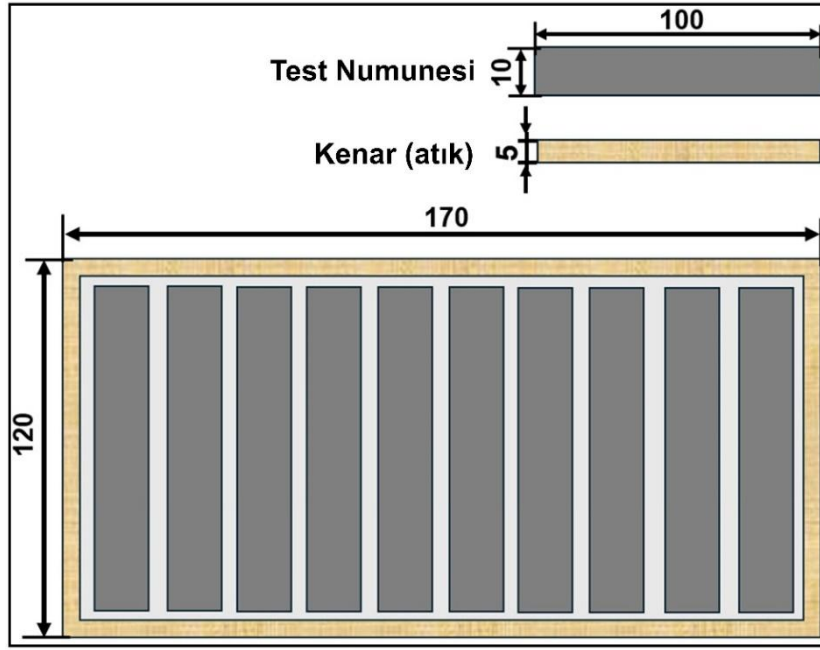
Tablo 1. Biyokompozit üretiminde kullanılan malzeme çeşitleri ve yüzdeleri.

Malzeme Adı	Kod	Kompozisyon ve (%) Ağırlık		
		Fiber	NaOH	PBS
Saf PLA	PLA	-	-	-
PLA / Keten	PLA+F	Mat Fiber	-	-
PLA / Keten (NaOH)	N-PLA+F	Mat Fiber	5	-
PLA / PBS / Keten	PLA+PBS+F	Mat Fiber	-	20
PLA / PBS / Keten (NaOH)	N-PLA+PBS+F	Mat Fiber	5	20

Sabit bir sıkıştırma kuvvetinde (0,5 MPa) ideal yapışma sıcaklığını belirlemek için, üretilen plakalar ve mat fiberleri çeşitli sıcaklıklarda ve sürelerde sıcak pres altında bir dizi teste tabi tutuldu. Ketenin bozulmasını önlemek için deneysel sıcaklıklar 120°C-160°C arasında tutuldu. Denemeler sonunda, uygun yapışmayı sağlayan kompozitlerin üretim sıcaklığı ve süresi 50 saniye boyunca 160 °C olarak belirlendi ve tüm üretimler aynı sıcaklıklarda ve sürelerde gerçekleştirildi. Sıkıştırma kalıplama sırasında kalıba yapışmayı önlemek için yağlı kağıt kullanıldı. Elde edilen kompozitlerin son boyutları (genişlik x uzunluk x kalınlık) 170 x 120 x 6 idi (Şekil 3).

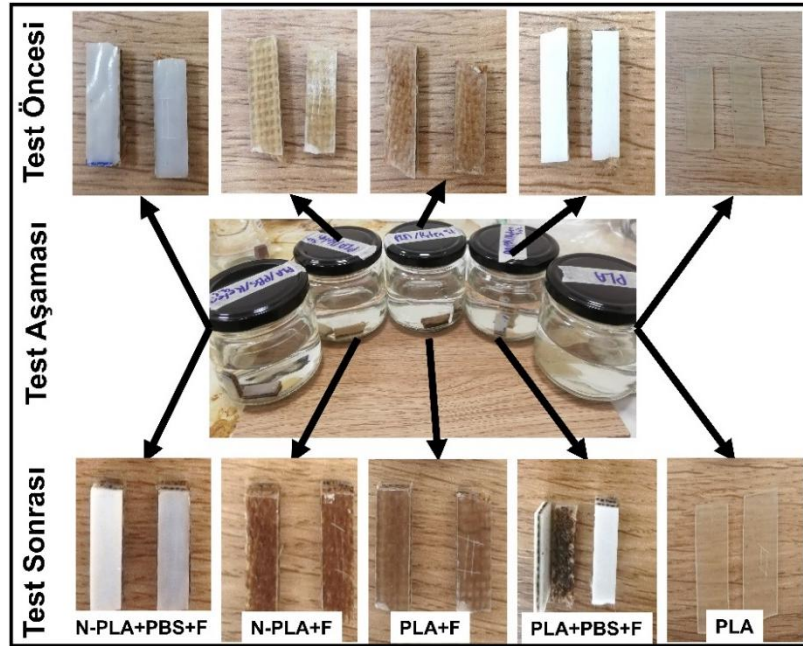
**Şekil 3.** Sıcak presin şematik görünümü ve sıcak pres öncesi ve de sonrası kompozit boyutları.

Kompozitler sıcak prestan çıkarıldıktan sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı. Kompozitler Şekil 4'te gösterildiği gibi hassas kesimle 10mmx100mm (1/10) boyutlarında kesildi ve test numuneleri hazırlandı. Kompozitler üretimden teste kadar kuru ve temiz alanlarda zipli poşetlerde saklandı.



Şekil 4. Test ve analiz için numune alınan yerler ve numune boyutları.

Saf PLA ve PLA biyokompozit numuneleri üzerindeki su emiliminin etkisi ASTM D570-98'e göre araştırıldı. Numuneler 70 °C'de fırın içerisinde 24 saat tutularak nemi alınmış ve ardından 0,0001 gr hassasiyete sahip terazide (W_i) tartılmıştır. İlk tartım sonrası numuneler oda sıcaklığında suya daldırılarak 30 günlük süre boyunca suda bekletilmiştir (Şekil 5). Su emme testi süresince 3 gün arayla su içerisinden alınıp, yüzeyleri pamuklu kumaşla silinmiş ve hemen ardından (W_s) tartılmıştır.



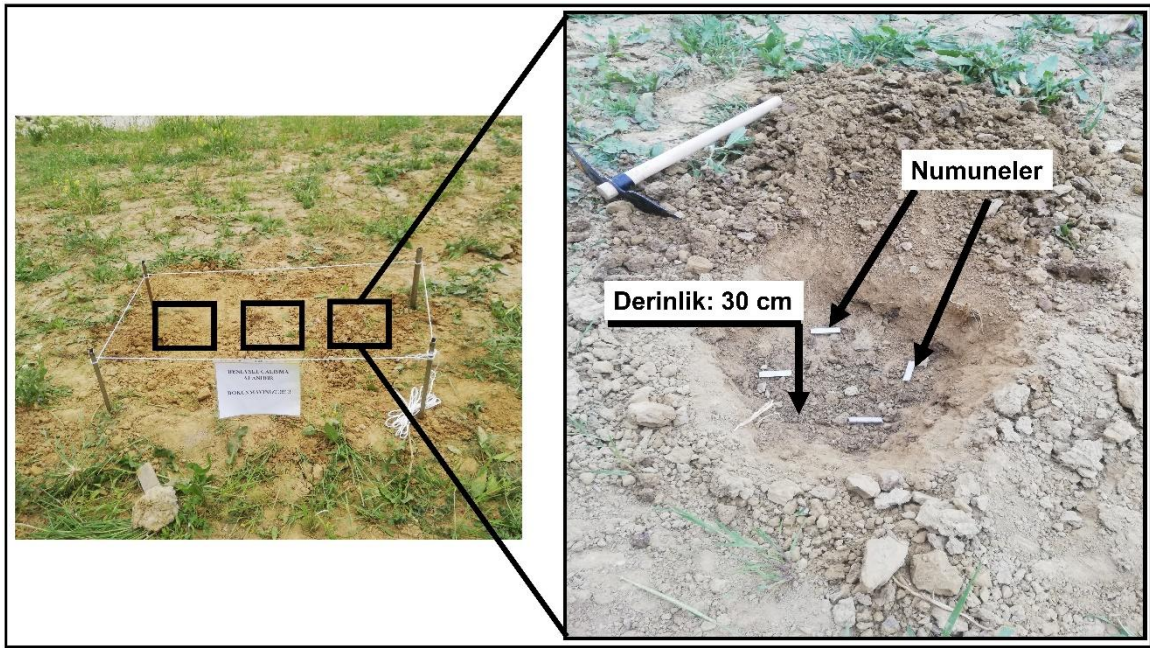
Şekil 5. Su emme testi ve test öncesi ve de test sonrası numunelerin görünümü.

Su emme sonrası numunelerdeki su emilim miktarı ağırlık farkı ile hesaplanmıştır. Su emilimi ile meydana gelen ağırlık artışının yüzde (%) olarak (W_{suemme}), Denklem (1)'e göre hesaplanmıştır.

$$W_{suemme}(\%) = \frac{W_i - W_s}{W_s} \times 100 \quad (1)$$

burada W_i başlangıç ağırlığı, W_s daldırma sonrası ağırlık olarak tanımlanmıştır.

Biyokompozitler, doğal biyolojik bozunmasını tespit etmek için toprağa gömme testi ile biyobozunma açısından incelenmiştir. Toprakta bozunma testi, 50x10x6 mm boyutlarında numuneler hazırlanarak doğal ortamda ve %25-30 arasında nem içeriğine sahip bir bölgede (41°12'22.4"N 32°39'36.8"E koordinatlı) 100 gün boyunca gerçekleştirilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Toprağa gömme testinin yapıldığı bölge ve biyokompozit numuneler.

Numuneler 10 günde bir topraktan çıkarılarak ölçümler yapılmıştır. Her aşamada, yüzeyindeki toprak kalıntılarını kaldırmak için numuneler dikkatlice su ile temizlendi. Tutarlı bir ağırlık elde etmek için, numuneler 60 °C'de fırında kurutuldu. Test öncesi ve sonrası kilo kaybı ölçüldü. Tartım sonrası numunelerin ağırlık değişimi (bozunma derecesi ($\Delta m_{bozunma}$)) aşağıdaki eşitlik Denklem (2) kullanılarak belirlendi:

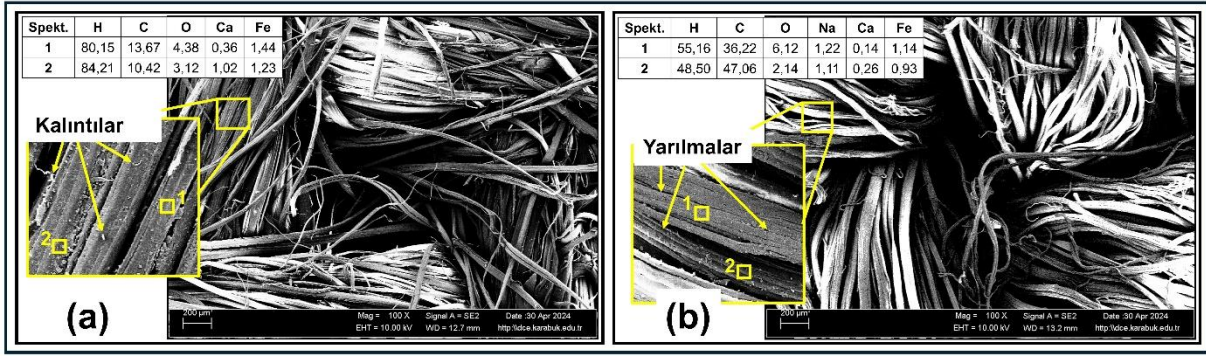
$$\Delta m_{bozunma}(\%) = \frac{\Delta m_i - \Delta m_s}{\Delta m_i} \times 100 \quad (2)$$

burada, $\Delta m_{\text{bozunma}}$ numune ağırlığının değişimini (bozunma derecesi), Δm_i numunelerin başlangıç ağırlığının ortalamasını ve Δm_s numunelerin son ağırlığının ortalamasını (toprak gömülme periyodunun sonunda) temsil eder.

4. Deneysel Sonuçlar

Şekil 7’de yüzey işlemi uygulanmamış ve alkali yüzey işlemi uygulanmış keten mat fiber yüzeylerinin SEM morfolojisi sunulmaktadır. İşlemsiz elyafların üzerinde safsızlıklar olduğu ve çaplarının işlem görmüş elyafların çapından daha büyük olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 7(a)). Ayrıca yüzeyleri daha doğrusal bir görüntü sergilediği tespit edilmiştir.

Keten fiberlerine uygulanan alkali yüzey işleminin boyut ve yüzey görünümünü değiştirdiği, dalgalanmalar ve yarılmaların meydana geldiği gözlenmiştir (Şekil 7(b)).



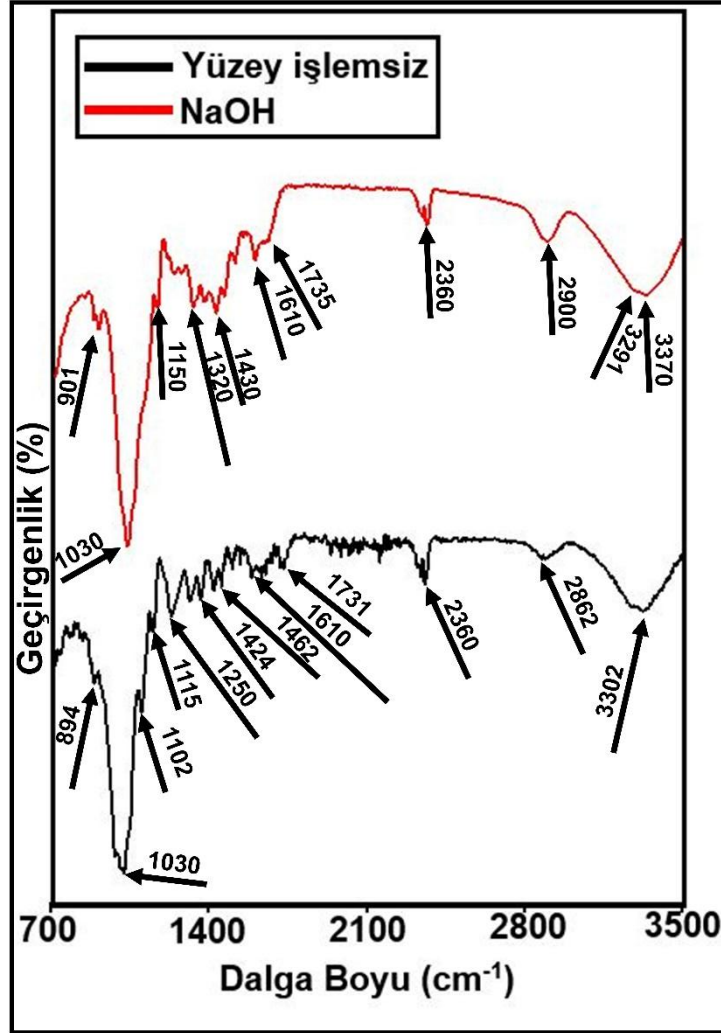
Şekil 7. Keten mat fiberlerinin (a) Yüzey işlemsiz, (b) yüzey işlemi uygulanmış hallerine ait SEM görüntüleri ve EDX analizleri.

Kompozitlerin üretiminde kullanılan mat keten fiberlerinin kimyasal yapısı ve uygulanan yüzey işleminin fiberlerin kimyasal yapısına etkisi FT-IR analizi ile tespit edilmiş ve elde edilen analiz sonucu Şekil 8’de verilmiştir.

Keten fiberi esas olarak selüloz, hemiselüloz ve ligninden oluşur. Gözlemlenen FT-IR spektrumları bu bileşenlere atfedilebilir (Jandas ve ark., 2012). C–O–C ve C–O gerilmesi 1030 ve 1150 cm^{-1} ’de ortaya çıktı. 1610 cm^{-1} ’deki tepe noktası esas olarak selüloz zincirine ait afiberatik karboksilik asit ve keton grubunun C=O gerilmesine atfedilir (Xia ve ark., 2016). C–H emilimi keten fiberinin selülozunda yaklaşık 2900 cm^{-1} ’de ortaya çıktı. Ayrıca yaklaşık 3400 cm^{-1} ’deki tepe noktası selüloz zincirindeki D-piran glikozunun –OH gerilmesi idi (Ray ve Sarkar, 2001). 1735 cm^{-1} ’deki bandın hemiselüloz ve lignine ait olan aldehit karbonil C=O gerilmesine karşılık geldiğine dikkat etmek önemlidir (Hassan ve ark., 2000; Matuana ve ark., 2001). 1735 cm^{-1} ’deki bandta küçük bir pik ortaya çıkmıştır. Bu durumun nedeni; alkali işlem sonucunda ester bağları kırılıp karboksilatlar dönüşebilir. Ancak yıkama sırasında bu karboksilatlar asidik ortamda tekrar

esterleşebilir veya kısmen serbest asit haline geçebilir ve karbonil grup olmasa dahi karbonil sinyali verebilir.

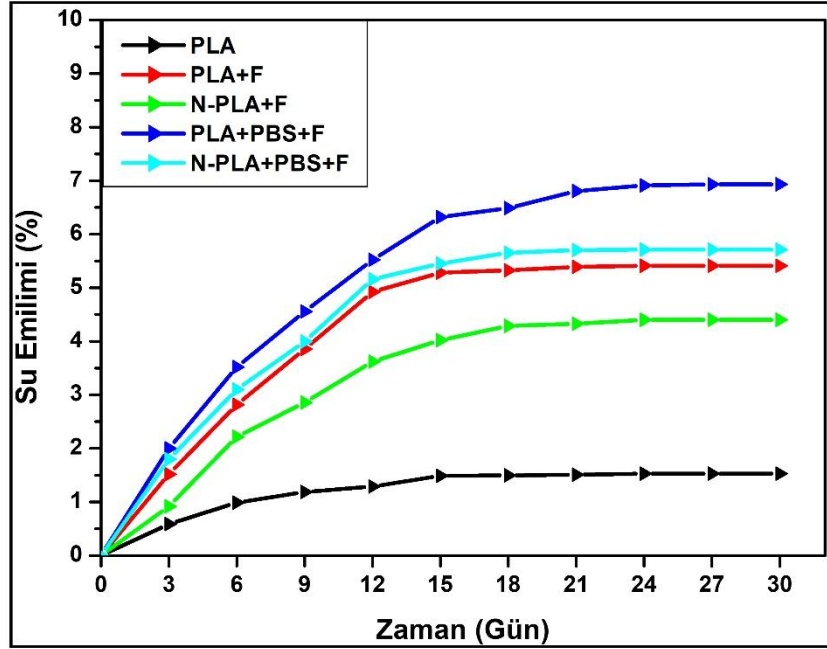
alkali yüzey işlemi görmüş fiberde kaybolduğu açıktır; bu, keten fiberinin hemiselüloz ve lignininin NaOH çözeltisinde çözüldüğünü gösterir (Alvarez ve Vázquez, 2006).



Şekil 8. FT-IR analizi.

Şekil 9, yüzey işlemi uygulanmamış ve yüzey işlemi uygulanmış keten fiberi ile PLA eklenerek yapılan kompozitlerin su emilim davranışı üzerindeki etkisini göstermektedir. 30 günlük testten sonra, saf PLA'daki su emilimi, hidrofobik yapısı nedeniyle %1,32 idi. Keten fiberi, çok miktarda hidroksil grubu içerdiği için hidrofiliktir. Fiber içeriği, PLA'nın nispeten düşük bir su emilim kapasitesine sahip olması nedeniyle kompozitlerin su emilimini etkileyen birincil unsurdur (Anuar ve ark., 2012). Keten fiberinin sahip olduğu güçlü hidrofilik etkisi ile fiberlere uygulanan yüzey işlemi, su emilim oranında hızlanmaya neden olmuştur. Bu nedenle, ilk 12 gün boyunca önemli ölçüde fazla su emilimi gerçekleşti ve daha sonra tüm kompozitlerde stabil hale geldi. Kompozite eklenen fiberlerin yüzey işleminin ve PBS polimerin ilavesi ile meydana gelen kimyasal karışımların

kompozitlerdeki su emilim miktarını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu bağlamda en yüksek su emilimi %6,9 ile PLA+PBS+F kompozitinde gözlenmiştir. N- PLA+PBS+F kompoziti ise %5,7 ile en yüksek ikinci kompozit olmuştur. PLA+F ve N-PLA+F kompozitleri ise sırasıyla %5,4 ve %4,4 oranında su emilimi sergilemiştir.

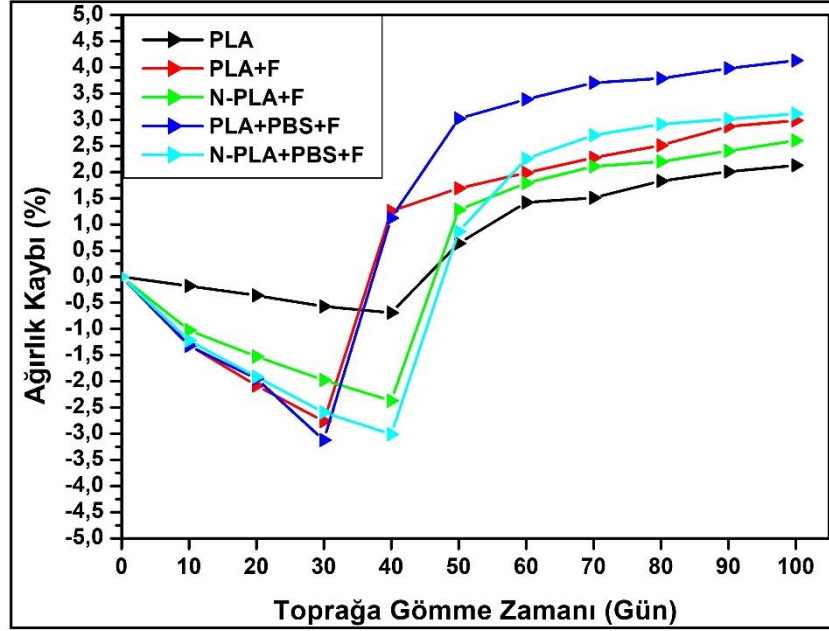


Şekil 9. PLA ve PLA biyokompozitlerinin su emilim oranları.

Biyokompozitler neme maruz bırakıldığında, polimer zincirleri arasındaki boşluklardan su molekülleri doğrudan nüfuz eder ve hidrofilik özellikteki keten fiberlerin nem emilimine neden olur (Elen ve ark., 2023). Emilen nem sonrası kompozitler şişerler. Fiberlerde de meydana gelen şişmesinin bir sonucu olarak, ana matriste mikro çatlaklar oluşur. Keten fiberinde bulunan yüksek orandaki selülozlar, fiberlerin şişmesi ile ortaya çıkan mikro çatlaklar yoluyla arayüze daha fazla su taşınımı sağlar, bu da kompozitin bozulmasına yol açmaktadır (Bismarck ve ark., 2002). Mikro çatlaklar, yetersiz yapışma nedeniyle fiber-matris arayüzeyinde oluşan kusurlara ve boşluklara su moleküllerini taşırlar (Carvalho ve ark., 2013). Ayrıca, keten fiberinin hidrofilik yapısının yanı sıra, kompozit üretim esnasında meydana gelen boşluk içeriği, gözenekler de artan su emilimi için önemli nedenler arasında sayılabilir (Siva ve ark., 2021).

Bozunma testi ortalama %30 nem oranına sahip toprakta ve doğal ortamda (41°12'25.6"N 32°39'40.6"E koordinatlarında) gerçekleştirilmiştir. İlk 30-40 günlük periyotlarda tüm numunelerde bir ağırlık artışı görülmüştür (Şekil 10). Bunun nedeni, neme maruz kalan kompozitin yapısında bulunan ve hidrofilik özelliğe sahip olan keten fiberinin şişmesidir. Ayrıca, fibere uygulanan yüzey işlemiyle yüzeyleri pürüzlendirilen fiberin hidrofilik özelliğini artırdığı söylenebilir. Bununla birlikte, ketenin yüksek selüloz içeriği fiberlerin şişmesine, bunun sonucu olarak mikro çatlaklar oluşmasına

ve arayüze daha fazla su girmesine neden olmaktadır. Bu durum ise kompozitin bozunmasını hızlandıran şişme gerilmelerine yol açar (Bismarck ve ark., 2002). Ardından hızlı bir bozunma süreci başlar. Dolayısıyla Şekil 10 incelendiğinde 30-40 gün sonrası artan bir ağırlık kaybı gözlenmiştir.

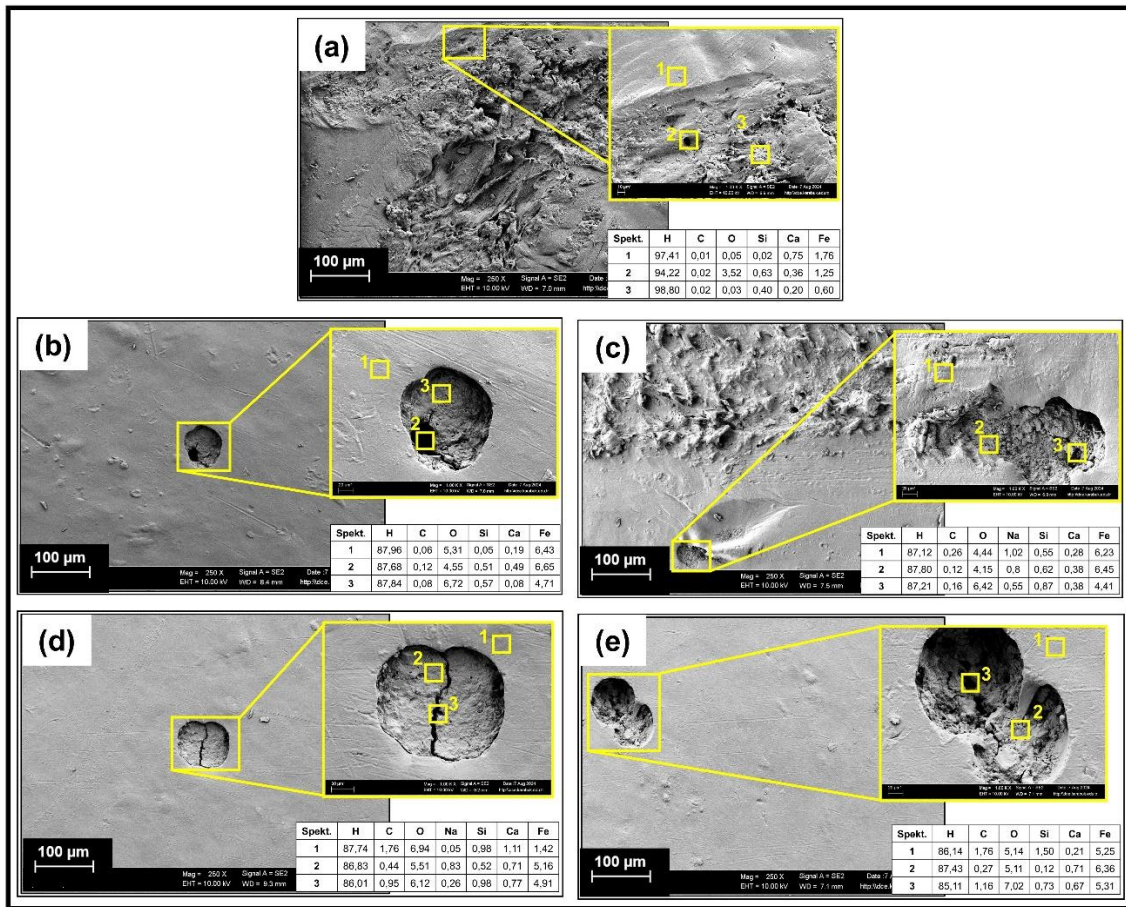


Şekil 10. Biyokompozitlerin toprakta bozunma sonrası ağırlık kayıpları.

Kompozitin çatlaması devam ettikçe, artan mikro çatlaklar yoluyla nem transferi aktif hale gelir (Dhakal ve ark., 2007). Daha sonra, su moleküllerinin arayüze saldırması, elyaf ve matrisin ayrılmasına neden olur (Marom, 1985). Şekil 11 incelendiğinde, biyokompozitlerin bozunma yüzeyleri SEM görüntülerinde mikro çatlaklar ve çukurlaşmaların meydana geldiği gözlenmiştir. (Valapa ve ark., 2016) çalışmasında, laboratuvar ortamında bozunma özelliklerini incelediği PLA yüzeyinde çukurlaşmalar rapor etmiştir. (Chomnutcha Boonmee, 2016) çalışmasında, 90 gün boyunca toprak ve çamur ortamında biyobozunurluk testi uyguladığı PLA yüzeyinde birçok gözenek, çatlak ve düzensiz pürüzlülük tespit etmiştir. Bu durum, toprak ortamında PLA moleküllerinin hidrolitik bozunmasından kaynaklanmaktadır (Erkul ve Uçaroğlu, 2023). Dolayısıyla topraktan alınan nem, PLA yapısında bulunan ester grubunu daha da hidrolize eden PLA matrisine nüfuz etmektedir (Palai ve ark., 2021). Topraktaki nemin dışında bulunan diğer bileşenler de kompozitin bozunma sürecini destekler. Çünkü mantarların, bakterilerin, mayaların ve birçok enzimlerin, plastiği bir besin kaynağı olarak kullandığı ve orijinal formun yok olduğu süreç olarak tanımlanan biyolojik bozunma (Gautam ve Kaur, 2013), plastiğin yüzeyinde ve/veya içinde büyüyen mikrobiyal aktivitenin bir sonucu olarak meydana gelir (Mohee ve ark., 2008). Dolayısıyla literatürde birçok araştırmacı (Itävaara ve ark., 2002; Karamanlioglu ve Robson, 2013; Martucci ve Ruseckaite, 2015) tarafından da belirtilmiş olan, PLA'nın bozunma mekanizmasında genel olarak sürecin başlangıcı

aşamasında basit kimyasal hidrolizlerin ve ardından mikrobiyal aktivitelerin etki etmesi, PLA ve PLA esaslı biyokompozitlerin bozunma sürecini tanımlayan en net ifadedir.

Ayrıca polimerlerin biyolojik olarak bozunması için pH, sıcaklık, nem seviyesi ve oksijen içeriği de oldukça önemli çevresel parametrelerdir (Fotopoulou ve Karapanagioti, 2019; Massardier-Nageotte ve ark., 2006). Kompozitlerin ve fiberlerin EDX analizleri (Şekil 11 ve Şekil 7) incelendiğinde yapıda oksijen ve hidrojen varlığı gözlenmiştir. EDX alınan bazı bölgelerde nispeten oksijen oranı düşükken hidrojen oranının yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu durum, PLA ana matrisinin elyaf yüzeyini tam olarak ıslatamaması (Siva ve Valarmathi, 2019) nedeniyle hava dolu boşlukların oluşmasından (Siva ve ark., 2021) kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 11. Toprakta bozunma sonrası (a) PLA, (b) PLA+F, (c) N-PLA+F, (d) PLA+PBS+F, (e) N-PLA+PBS+F biyokompozitlerin bozunma yüzeylerine ait SEM görüntüleri ve EDX analizleri.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilmiş %80/%20 PLA/PBS matris, alkali muamelesi görmüş keten kullanılarak 160 °C’de sıkıştırma kalıplama yöntemi ile PLA/PBS/keten biyokompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin nem emme kapasiteleri ve doğal toprakta biyobozunma kapasiteleri incelenmiştir. Yapılan test ve analizlerin sonucunda:

1. Keten elyafa uygulanan alkali muamelesi sonrasında elyaf yüzeyinde bulunan safsızlıklar, istenmeyen ligin, mumsu yapılar uzaklaştırılmış ve fibrilasyon sağlanmıştır.
2. FT-IR spektrumları incelendiğinde, işlenmemiş keten fiberinin 1731 cm^{-1} dalga boyunda görülen pektin-mumunun varlığı, NaOH yüzey işlemiyle fiber yüzeyinden uzaklaştırılmıştır. Bu, asetil ester grubunun hemiselüloza bağlandığını ve onu fiber yüzeyinden ayırdığını göstermektedir.
3. Su emme testi sonucu en yüksek nem emme kapasitesine sahip biyokompozitin PLA+PBS+F en düşük nem emme kapasitesine sahip biyokompozitin N-PLA+F olduğu gözlemlenmiştir.
4. Toprakta bozunma testi sonucu en yüksek bozunma gerçekleşen biyokompozitin PLA+PBS+F en düşük bozunma gerçekleşen biyokompozitin N-PLA+F olduğu gözlemlenmiştir.

Su emme ve toprakta bozunma testi sonrası, yüzey işlemi yapılmış keten elyafın matris ile iyi bir arayüzey yapışmasına sahip olmasının suyun kompozitin içine nüfuz etmemesi açısından da önemli olduğu gözlemlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) KBÜBAP-24-YL-040 projesi 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

- Alvarez, V. A., and Vázquez, A. (2006). Influence of fiber chemical modification procedure on the mechanical properties and water absorption of MaterBi-Y/sisal fiber composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(10), 1672-1680. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.10.005>
- Anuar, H., Zuraida, A., Kovacs, J. G., and Tabi, T. (2012). Improvement of Mechanical Properties of Injection-Molded Polylactic Acid–Kenaf Fiber Biocomposite. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 25(2), Article 2. <https://doi.org/10.1177/0892705711408984>
- Automotive: Green gets in gear - Canadian Plastics. (2010, Ekim). <https://www.canplastics.com/features/automotive-green-gets-in-gear/>
- Bajpai, P. K., Singh, I., and Madaan, J. (2014). Development and characterization of PLA-based green composites: A review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 27(1), Article 1. <https://doi.org/10.1177/0892705712439571>
- Bismarck, A., Aranberri-Askargorta, I., Springer, J., Lampke, T., Wielage, B., Stamboulis, A., Shenderovich, I., and Limbach, H.-H. (2002). Surface characterization of flax, hemp and cellulose fibers; Surface properties and the water uptake behavior. *Polymer Composites*, 23(5), 872-894. <https://doi.org/10.1002/pc.10485>
- Borchani, K. E., Carrot, C., and Jaziri, M. (2015). Untreated and alkali treated fibers from Alfa stem: Effect of alkali treatment on structural, morphological and thermal features. *Cellulose*, 22(3), 1577-1589. <https://doi.org/10.1007/s10570-015-0583-5>
- Bulota, M., and Budtova, T. (2015). Highly porous and light-weight flax/PLA composites. *Industrial Crops and Products*, 74, 132-138. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.045>
- Carvalho, L. H., Canedo, E. L., Farias Neto, S. R., de Lima, A. G. B., and Silva, C. J. (2013). Moisture Transport Process in Vegetable Fiber Composites: Theory and Analysis for Technological Applications. İçinde J. M. P. Q. Delgado (Ed.), *Industrial and Technological Applications of Transport in Porous Materials* (ss. 37-62). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37469-2_2
- Chang, F.-L., Hu, B., Huang, W.-T., Chen, L., Yin, X.-C., Cao, X.-W., and He, G.-J. (2022). Improvement of rheology and mechanical properties of PLA/PBS blends by in-situ UV-induced reactive extrusion. *Polymer*, 259, 125336. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2022.125336>
- Chomnutchai Boonmee, C. K. (2016). Degradation of Poly(lactic acid) under Simulated Landfill Conditions. *Environment and Natural Resources Journal*, 14, 2. <https://doi.org/10.14456/ENNRJ.2016.8>
- Couture, A., Lebrun, G., and Laperrière, L. (2016). Mechanical properties of polylactic acid (PLA) composites reinforced with unidirectional flax and flax-paper layers. *Composite Structures*, 154, 286-295. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.069>
- Dhakal, H. N., Zhang, Z. Y., and Richardson, M. O. W. (2007). Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. *Composites Science and Technology*, 67(7), 1674-1683. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.06.019>
- Durante, M., Formisano, A., Boccarusso, L., Langella, A., and Carrino, L. (2017). Creep behaviour of polylactic acid reinforced by woven hemp fabric. *Composites Part B: Engineering*, 124, 16-22. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.038>
- Elen, N. Ç., Yıldırım, M., and Kanbur, Y. (2023). Tribological properties of hemp fiber reinforced polylactic acid bio-composites: Effect of different types of modification methods. *Functional Composites and Structures*, 5(1), 015009. <https://doi.org/10.1088/2631-6331/acbf9d>
- Erkul, Ş. N., and Uçaroglu, S. (2023). Topraklarda Polilaktik Asitin (PLA) Biyobozunması. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 28(1), 25-40. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1246168>
- Farag, M. M. (2017). Design and Manufacture of Biodegradable Products from Renewable Resources. İçinde *Handbook of Composites from Renewable Materials* (ss. 111-131). John Wiley and Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119441632.ch23>
- Fotopoulou, K. N., and Karapanagioti, H. K. (2019). Degradation of Various Plastics in the Environment. İçinde H. Takada and H. K. Karapanagioti (Ed.), *Hazardous Chemicals Associated with Plastics in the Marine Environment* (ss. 71-92). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-93-8043-201-1_11
- Gautam, N., and Kaur, I. (2013). Soil burial biodegradation studies of starch grafted polyethylene and identification of *Rhizobium meliloti* therefrom. *Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 5(6), 147-158. <https://doi.org/10.5897/JECE09.022>

- Gholampour, A., and Ozbakkaloglu, T. (2020). A review of natural fiber composites: Properties, modification and processing techniques, characterization, applications. *Journal of Materials Science*, 55(3), Article 3. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03990-y>
- Gurunathan, T., Mohanty, S., and Nayak, S. K. (2015). A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 77, 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.06.007>
- Hassan, M. L., Rowell, R. M., Fadl, N. A., Yacoub, S. F., and Christainsen, A. W. (2000). Thermoplasticization of bagasse. II. dimensional stability and mechanical properties of esterified bagasse composite. *Journal of Applied Polymer Science*, 76(4), 575-586. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(20000425\)76:4<575::AID-APP15>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(20000425)76:4<575::AID-APP15>3.0.CO;2-9)
- Hemath, M., Mavinkere Rangappa, S., Kushvaha, V., Dhakal, H. N., and Siengchin, S. (2020). A comprehensive review on mechanical, electromagnetic radiation shielding, and thermal conductivity of fibers/inorganic fillers reinforced hybrid polymer composites. *Polymer Composites*, 41(10), 3940-3965. <https://doi.org/10.1002/pc.25703>
- Itävaara, M., Karjomaa, S., and Selin, J.-F. (2002). Biodegradation of polylactide in aerobic and anaerobic thermophilic conditions. *Chemosphere*, 46(6), 879-885. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(01\)00163-1](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(01)00163-1)
- Jandas, P. J., Mohanty, S., and Nayak, S. K. (2012). Renewable Resource-Based Biocomposites of Various Surface Treated Banana Fiber and Poly Lactic Acid: Characterization and Biodegradability. *Journal of Polymers and the Environment*, 20(2), 583-595. <https://doi.org/10.1007/s10924-012-0415-8>
- Karamanlioglu, M., and Robson, G. D. (2013). The influence of biotic and abiotic factors on the rate of degradation of poly(lactic) acid (PLA) coupons buried in compost and soil. *Polymer Degradation and Stability*, 98(10), 2063-2071. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.07.004>
- Lalit, R., Mayank, P., and Ankur, K. (2018). Natural Fibers and Biopolymers Characterization: A Future Potential Composite Material. *Strojnický Časopis - Journal of Mechanical Engineering*, 68(1), 33-50. <https://doi.org/10.2478/scjme-2018-0004>
- Marom, G. (1985). The Role of Water Transport in Composite Materials. İçinde J. Comyn (Ed.), *Polymer Permeability* (ss. 341-374). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-4858-7_9
- Martucci, J. F., and Ruseckaite, R. A. (2015). Biodegradation behavior of three-layer sheets based on gelatin and poly (lactic acid) buried under indoor soil conditions. *Polymer Degradation and Stability*, 116, 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.03.005>
- Massardier-Nageotte, V., Pestre, C., Cruard-Pradet, T., and Bayard, R. (2006). Aerobic and anaerobic biodegradability of polymer films and physico-chemical characterization. *Polymer Degradation and Stability*, 91(3), Article 3. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.02.029>
- Matuana, L. M., Balatinecz, J. J., Sodhi, R. N. S., and Park, C. B. (2001). Surface characterization of esterified cellulosic fibers by XPS and FTIR Spectroscopy. *Wood Science and Technology*, 35(3), 191-201. <https://doi.org/10.1007/s002260100097>
- Mohee, R., Unmar, G. D., Mudhoo, A., and Khadoo, P. (2008). Biodegradability of biodegradable/degradable plastic materials under aerobic and anaerobic conditions. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 28(9), 1624-1629. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.07.003>
- Moudood, A., Rahman, A., Öchsner, A., Islam, M., and Francucci, G. (2019). Flax fiber and its composites: An overview of water and moisture absorption impact on their performance. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 38(7), 323-339. <https://doi.org/10.1177/0731684418818893>
- Mwaikambo, L. (2006). Review of the history, properties and application of plant fibres. *African Journal of Science and Technology*, 7, 120-133.
- Palai, B., Mohanty, S., and Nayak, S. K. (2021). A Comparison on Biodegradation Behaviour of Polylactic Acid (PLA) Based Blown Films by Incorporating Thermoplasticized Starch (TPS) and Poly (Butylene Succinate-co-Adipate) (PBSA) Biopolymer in Soil. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(9), 2772-2788. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02055-z>
- Prithivirajan, R., Jayabal, S., and Bharathiraja, G. (2015). Bio-based composites from waste agricultural residues: Mechanical and morphological properties. *Cellulose Chemistry and Technology*, 49(1), 65-68. Scopus.
- Rahman, M. Z., Rahman, M., Mahbub, T., Ashiquzzaman, M., Sagadevan, S., and Hoque, M. E. (2023). Advanced biopolymers for automobile and aviation engineering applications. *Journal of Polymer Research*, 30(3), 106. <https://doi.org/10.1007/s10965-023-03440-z>
- Rajeshkumar, G., Arvinth Seshadri, S., Devnani, G. L., Sanjay, M. R., Siengchin, S., Prakash Maran, J., Al-Dhabi, N. A., Karuppiah, P., Mariadhas, V. A., Sivarajasekar, N., and Ronaldo Anuf, A. (2021).

- Environment friendly, renewable and sustainable poly lactic acid (PLA) based natural fiber reinforced composites – A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 310, 127483. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127483>
- Ray, D., and Sarkar, B. K. (2001). Characterization of alkali-treated jute fibers for physical and mechanical properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 80(7), 1013-1020. <https://doi.org/10.1002/app.1184>
- Reddy, A. B., Manjula, B., Jayaramudu, T., Owonubi, S. j., Owonubi, S. j., Sadiku, E. r., Agboola, O., Sivanjineyulu, V., Molelekwa, G. F., and Molelekwa, G. F. (2017). Biocomposites from Renewable Resources: Preparation and Applications of Chitosan–Clay Nanocomposites. İçinde *Handbook of Composites from Renewable Materials* (ss. 275-303). John Wiley and Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119441632.ch158>
- Roussière, F., Baley, C., Godard, G., and Burr, D. (2012). Compressive and Tensile Behaviours of PLLA Matrix Composites Reinforced with Randomly Dispersed Flax Fibres. *Applied Composite Materials*, 19(2), 171-188. <https://doi.org/10.1007/s10443-011-9189-8>
- Saba, N., Paridah, M. T., and Jawaid, M. (2015). Mechanical properties of kenaf fibre reinforced polymer composite: A review. *Construction and Building Materials*, 76, 87-96. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.043>
- Sawpan, M. A., Pickering, K. L., and Fernyhough, A. (2011). Effect of fibre treatments on interfacial shear strength of hemp fibre reinforced polylactide and unsaturated polyester composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(9), Article 9. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.05.003>
- Siva, R., Sundar Reddy Nemali, S., Kishore kunchapu, S., Gokul, K., and Arun kumar, T. (2021). Comparison of Mechanical Properties and Water Absorption Test on Injection Molding and Extrusion—Injection Molding Thermoplastic Hemp Fiber Composite. *Materials Today: Proceedings*, 47, 4382-4386. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.189>
- Siva, R., and Valarmathi, T. N. (2019). Investigation of use of different volume percentages of cissus quadrangularis natural fiber constitute in epoxy matrix composite. *2019 Fifth International Conference on Science Technology Engineering and Mathematics (ICONSTEM)*, 1, 413-417. <https://doi.org/10.1109/ICONSTEM.2019.8918740>
- Smitthipong, W., Tantatherdtam, R., and Chollakup, R. (2015). Effect of pineapple leaf fiber-reinforced thermoplastic starch/poly(lactic acid) green composite: Mechanical, viscosity, and water resistance properties. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 28(5), 717-729. <https://doi.org/10.1177/0892705713489701>
- Valapa, R. babu, G., P., and Katiyar, V. (2016). Hydrolytic degradation behaviour of sucrose palmitate reinforced poly(lactic acid) nanocomposites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 89, 70-80. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.04.040>
- Vinod, A., Sanjay, M. R., Suchart, S., and Jyotishkumar, P. (2020). Renewable and sustainable biobased materials: An assessment on biofibers, biofilms, biopolymers and biocomposites. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120978. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120978>
- Xia, X., Liu, W., Zhou, L., Hua, Z., Liu, H., and He, S. (2016). Modification of flax fiber surface and its compatibilization in polylactic acid/flax composites. *Iranian Polymer Journal*, 25(1), 25-35. <https://doi.org/10.1007/s13726-015-0395-3>
- Yıldırım, R. (2024). *Lamine edilmiş pla/keten biyokompozit malzemelerin mekanik ve biyobozunurluk özelliklerinin incelenmesi* [M. Sc. Thesis]. Karabük Üniversitesi.
- Zhang, M., Jiang, C., Wu, Q., Zhang, G., Liang, F., and Yang, Z. (2022). Poly(lactic acid)/Poly(butylene succinate) (PLA/PBS) Layered Composite Gas Barrier Membranes by Anisotropic Janus Nanosheets Compatibilizers. *ACS Macro Letters*, 11(5), 657-662. <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.2c00139>

Mobil EEG Cihazları ile Veri Toplama: Metodolojik Bir Kılavuz ve Uygulamalarla Değerlendirme

Çağatay Murat YILMAZ^{1*}, Bahar Hatipoğlu YILMAZ²

Öz

EEG (Elektroensefalografi), beyin aktivitelerinin invaziv olmayan şekilde ölçülmesini sağlayan ve nörolojik bozuklukların teşhis ve tedavisinde ile beyin-bilgisayar arayüzleri gibi çeşitli alanlarda kullanılan önemli bir teknolojidir. Mobil EEG kayıt cihazları, klinik alternatiflerine benzer kalitede sinyaller kaydedebilmektedir. Geleneksel EEG sistemlerinin gerektirdiği sabit ve kontrollü kayıt ortamlarına olan bağımlılığı ortadan kaldırarak, gerçek yaşam koşullarında, hatta hareket halindeyken bile beyin sinyallerinin gerçek zamanlı izlenmesini ve analizini mümkün kılmaktadır. Bu çalışma, mobil EEG ile kayıt alma sürecine dair literatürdeki deneyim eksikliğini gidermeyi amaçlamaktadır. Kayıt sürecinin deneysel aktarımıyla, benzer araştırmalarda özellikle kayıt alma sürecinde yöntemsel güvenilirliğin artırılması hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında, EEG sinyallerinin kaydedilmesi ve ön işlenmesine ilişkin adımlar teknik detaylarla aktarılmış; motor hareket hayali ve duygu tanıma görevleri için oluşturulan veri setleri kullanılarak deneysel değerlendirmeler yapılmıştır. Mobil EEG cihazlarının teknik farklılıklarına rağmen, araştırmalarda güvenilir biçimde kullanılabileceği ortaya konmuştur. Sunulan yöntemsel kılavuz, mobil EEG sistemleriyle çalışacak araştırmacılar için pratik bir başvuru kaynağı niteliği taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: EEG, Mobil cihazlar, Motor hareket hayali, Duygu tanıma, Beyin-bilgisayar arayüzü.

Data Acquisition with Mobile EEG Devices: A Methodological Guide and Evaluation with Applications

Abstract

EEG (Electroencephalography) is an important technology that enables non-invasive measurement of brain activity and is used in various fields such as diagnosis and treatment of neurological disorders and brain-computer interfaces. Mobile EEG devices can record signals of similar quality to clinical counterparts. Eliminating the dependence on the fixed and controlled recording environments required by clinic EEG systems enables real-time monitoring and analysis of brain signals under real-life scenarios, even on the move. This paper addresses the lack of experience in the mobile EEG recording process literature. By experimentally demonstrating the recording process, this study aims to enhance methodological reliability for future research, particularly regarding data acquisition. Within the scope of the study, the steps regarding the recording and preprocessing EEG signals are described in technical detail, and experimental evaluations are made on the datasets generated for motor imagery and emotion recognition tasks. The findings demonstrate that mobile EEG devices can be used reliably in research despite their technical limitations. The methodological framework presented here is a practical reference for researchers utilizing mobile EEG systems.

Keywords: EEG, Mobile devices, Motor imagery, Emotion recognition, Brain-computer interface.

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, cmymaz@ktu.edu.tr

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, baharhatipoglu@ktu.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Elektroensefalografi (EEG), beyin sinyallerinin ölçülmesi, kaydedilmesi ve incelenmesini sağlayan müdahalesiz bir nörogörüntüleme yöntemidir. EEG sinyalleri başta teşhis ve tedavi amaçlı sağlık uygulamaları olmak üzere insanları anlama ve yardım etmede sıklıkla kullanılır. Ayrıca insanlara ait duyguları, düşünceleri, niyetleri ve davranışları anlamak için önemli bir araçtır. İnsanların hayatına girmesi özellikle sinyal işleme ve yapay zeka tekniklerindeki ilerlemeler ile gün geçtikçe artmıştır. Günümüzde insansız hava araçlarını, (sanal) dronları, robotik kolları ve sanal gerçeklik ortamlarını kontrol etme gibi birçok problemin çözümü için kullanılır (Yılmaz ve ark., 2025). Örneğin, Li ve ark. bir alt ekstremite dış iskelet destek sistemi için yüzey elektromiyografisi (sEMG) ve motor hareket hayali (MHH) EEG sinyalleri ile beyin-bilgisayar arayüzü (BBA) tasarlamıştır (Li ve ark., 2024). EEG sinyallerinin sanal gerçeklik gibi teknolojilerle birleştirilmesi insan-bilgisayar etkileşimi, psikoloji ve sinirbilimi gibi alanlarda yeni yaklaşımlar sunar. Örneğin, Doma, EEG'nin sanal gerçeklik ortamında bir BBA giriş yöntemi olarak kullanımını göstermek amacıyla bir sanal gerçeklik oyunu geliştirmiştir. EEG ile tanımlanmış beyin dalgası örüntüleri bir dizi komut olarak kullanılmış, duygu durumları ve konsantrasyon değişiklikleri aracılığıyla sanal gerçeklik ortamlarıyla etkileşim sağlanmıştır (Doma, 2024). EEG sinyalleri özellikle sanal gerçeklik ile birlikte insan merkezli mimari tasarımlar için dahi fırsatlar sunmaktadır (Taherysayah ve ark., 2024).

EEG sinyalleri çok düşük genlikli elektrofizyolojik potansiyellerdir. Bu sinyallerin arka plan gürültülerinden ve farklı türdeki sinyallerden ayrılması kayıtların doğru alınması için önemlidir. Bu nedenle, EEG kayıtlarının teknik yönleri anlaşılmalı ve kayıtlar doğru alınmalıdır. Hem anlamlı EEG örüntülerini kaydetmek hem de sinyalleri doğru yorumlamak için elektrofizyoloji, kaydın biyolojik yönleri ve EEG'nin fiziksel ilkeleri bilinmelidir. Günümüzde sensör ve cihaz teknolojisinde ilerleme kaydedilmiştir, ancak yorumlanabilir EEG'yi çok az bozulmayla kaydetmek teknik açıdan zordur (William Tatum ve ark., 2025). Ayrıca, klinik EEG özellikle tıbbi alanlarda önemli bir araç olduğundan doğru veri kaydı bu alanlarda daha önemlidir. Tıbbi işlemlerde kayıt alma prosedürleri çoğunlukla sabittir ve işlemler sağlık uzmanları veya uzman teknisyenler tarafından yapılır. EEG uygulamalarında gerekli uzmanlık bilgisi, ya deneyime dayalı kuşaklar arası aktarım yoluyla ya da elektronörofizyoloji teknikerliği gibi alanlara özgü akademik ve mesleki eğitimlerle edinilir. Bu eğitimler, EEG cihazlarının etkin kullanımı, elektrot yerleşimi, kayıt sürecinin yürütülmesi, sinyal analizi, artefaktların tespiti, frekans bileşenlerinin hesaplanması ve klinik EEG bulgularının raporlanması gibi çeşitli becerilerin kazandırılmasını hedefler. Öte yandan, EEG verilerinin tanı amacıyla yorumlanması ise ileri düzey uzmanlık gerektirir (Jain ve ark., 2024).

Beyin-bilgisayar arayüzü (BBA) gibi uygulamalarda EEG sinyalleri, çoğunlukla özel tıbbi eğitim almamış kullanıcılar tarafından mobil EEG (mEEG) cihazlarıyla kaydedilmektedir. EEG sinyalleri kullanılarak geliştirilecek sistemlerin etkinliği, elde edilen sinyallerin doğruluğu ve güvenilirliğine bağlıdır. Çünkü, örneğin, status epileptikus hastalık teşhisinin EEG ile analizinde dikkat edilmesi gereken birçok husus vardır ve EEG kayıtları başarısız alınırsa teşhis olumsuz etkilenir (Wang ve ark., 2023). Bu nedenle, sağlıklı ve güvenilir sonuçlar için kayıt süreci titizlikle ele alınmalıdır. EEG sinyalleri ile yürütülen araştırmaların çoğunda veri kaydı ile ilgili deneysel bilgi yetersiz sunulur. Çalışmaların çoğu hazır veri setlerini kullanır. Bu veri setleri sadece veriler ve deneyler ile ilgili katılımcı sayısı, elektrot sayısı ve yerleşimi, örnekleme frekansı, görev türü (motor hareket hayali, duygu tanıma, görsel uyarılmış potansiyeller, vb.), kayıt süreleri gibi bilgiler içerir (OpenBCI-Datasets, 2025). Çalışmaların diğer bir kısmında hem veri setleri oluşturulur hem de bu veri setleri kullanılarak bilimsel araştırmalar yapılır (örn., Shi ve ark., 2023). Bu çalışmalarda veri setlerine ilişkin bilgiler daha ayrıntılı sunulur. Ancak, EEG sinyallerinin kaydı deneysel bir süreç şeklinde aktarılmaz. EEG kayıt cihazlarının kullanım kılavuzları ise sadece teknik dokümanlardır. Bu nedenlerle, EEG kayıtlarının alım sürecinin deneysel olarak aktarımı literatürdeki önemli bir eksikliktir. Çalışmada mobil EEG sistemlerinde kayıt alım sürecindeki tecrübe eksikliğini gidermek ve araştırmaların metodolojik kalitesini artırmak hedeflenmiştir. Motor hareket hayali ve duygu tanıma veri setlerine ilişkin EEG kayıtlarının alınmasından ön işleme aşamasına kadar olan süreç genel bilgiler eşliğinde sunulmuş, çalışmalarda elde edilen deneysel çıktılar verilmiştir. Bu çalışmanın literatüre sağladığı temel katkılar aşağıda sıralanmıştır:

- Mobil EEG cihazları ile gerçekleştirilen uygulamalarda, kayıt alma sürecinin deneysel aktarımına odaklanarak literatürdeki metodolojik boşluk doldurmaya çalışılmış, kayıt alma sürecindeki yöntemsel güvenilirliği artırmaya yönelik deneysel tecrübeler aktarılmıştır.
- Mobil EEG teknolojilerinin klinik ve araştırma uygulamalarındaki yeri değerlendirilmiş, mobil EEG sistemlerinin avantajları, kısıtları ve potansiyel kullanım alanları tartışılmıştır.
- Elektrot türlerinin teknik özellikleri ve avantaj-dezavantajlarını karşılaştırılmış, uygulamaya yönelik sistem tasarımı ve cihaz seçimine katkısı verilmiştir.
- Salin solüsyon kullanan yarı kuru elektrotlarla mobil EEG kayıtlarında sinyal iletim kalitesini korumaya yönelik uygulamalı öneriler ifade edilmiştir.
- EEG sinyallerinin güvenilir analizine yönelik ön işleme aşamaları incelenmiş ve bu süreçte kullanılabilecek örnek yöntem ve araçlar sunulmuştur.
- Önerilen kayıt alma prosedürleriyle oluşturulan motor hareket hayali ve duygu tanıma veri setlerinden elde edilen sonuçlar, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmış ve önerilen yaklaşımların etkinliği deneysel olarak değerlendirilmiştir.

2. EEG Sistemleri: Genel Bilgiler, Zorluklar, Kayıt Cihazları ve Elektrot Teknolojileri

2.1. EEG Sinyallerinin Sınıflandırılmasını Zorlaştıran Etmenler

EEG sinyallerinin analiz ve sınıflandırma sürecinde hem EEG'nin doğası hem de deneysel koşullardan kaynaklanan zorluklar bulunur. EEG aynı anda farklı konumlardaki elektrotlardan kaydedilir. Bu durum, kanal korelasyonu, yüksek boyutluluk gibi zorluklara neden olur. Ayrıca kafa derisi, kafatası ve diğer beyin katmanlarından geçen hacim iletimi uzamsal çözünürlüğü olumsuz etkiler (Brunner ve ark., 2007). Ayrıca, uyaranlar, duygusal durumlar, uyanıklık/uyku döngüleri, beyin hastalıkları, dikkat seviyeleri ve diğer faktörlere bağlı beyin aktiviteleri sürekli değişir. EEG'nin durağan ve doğrusal olmayan yapısı ile farklı kaynaklara ait birçok gürültü içermesi yorumlama ve analizini zorlaştırır.

Ayırt edici bilgileri taşıyan EEG sinyallerini yakalamak diğer önemli bir problemdir. Çünkü, her EEG bandı (delta, teta, alfa, beta, gama) çeşitli nörolojik süreçlerle ilintilidir. Probleme özgü frekansların belirlenmesiyle önemli beyin aktiviteleri yakalanır, ilgisiz frekans bileşenleri elenir, veri işleme maliyeti azaltılır. Örneğin, bir motor hareket hayali problemde faydalı örüntüler sıklıkla alfa ve beta bantlarında yer alır. Bu bantların performansları uygulamalara (Al-Saegh ve ark., 2021) ve kişilere bağlı olarak değişebilir. Duygu tanıma problemleri için de benzer durum geçerlidir. Örneğin, Zheng ve Lu duygu analizi için gama ve beta alt bantlarını kullanmıştır (Zheng ve Lu, 2015). Yang ve ark. ise duyguları ayırt etmek için yüksek gama frekanslarını kullanmıştır (Yang ve ark., 2020). Zhao ve ark. ise alfa ve beta gücünün olumlu duyguları verimli bir şekilde ayırt edebileceğini fakat teta gücünün olumsuz duygulardan büyük ölçüde etkilendiğini öne sürmüştür (Zhao ve ark., 2018). Zhang ve ark. adaptif bir şekilde frekans bandı üst ve alt sınırlarını belirleyen ve önemli beyin bölgeleriyle zaman aralıklarını vurgulayan bir ağ geliştirmiştir. Adaptif frekans bant seçimi BBA görevlerinin sınıflandırılmasında etkili olmuştur (Zhang ve ark., 2024).

Probleme ait ayırt edici bilgileri taşıyan elektrotların tespiti diğer önemli bir husustur. Çünkü, tüm elektrotlardan gelen verileri kullanmak yerine, probleme özgü bilgi taşıyan elektrotları belirlemek, veri boyutunu azaltıp yapay zeka modelleri ile analizi daha odaklı hale getirir (Arvaneh ve ark., 2011). Alakasız veya gürültülü elektrotları devre dışı bırakmak, sınıflandırma ve tahmin performansını yukarı çektiği gibi hesaplama verimliliğini artırır ve faydasız bilgilerin olası olumsuz etkilerini azaltır. Probleme özgü olmayan elektrotlar ek gürültü de getirebilir. Bu elektrotları kullanmamak sinyal kalitesini ve güvenilirliğini artırır. Örneğin, ortalama referans yöntemi ile tüm kanallara ait sinyal değerlerinin bir referansa göre yeniden hesaplanmasında gürültü içeren bir elektrotun referans alınması tüm sinyallerin kalitesini düşürür (Newman, 2025). Bu nedenle, probleme özgü elektrotların tespiti başarılı sistemlerin geliştirilmesini sağlar. Örneğin, BBA

görevlerine ait spesifik nöral aktiviteler yüksek sinyal kalitesi ile ancak uygun elektrotlardan edinilebilir. Ayrıca, farklı elektrot konumlarına ait sinyal güçleri kişiden kişiye değişkenlik gösterir. Bu nedenle, performansı optimize edecek elektrot konumları belirlenmelidir (Arvaneh ve ark., 2011). Örneğin, Kucukler ve ark. faydasız kanalların performansı olumsuz etkileyeceğini göz önüne almış ve performansı arttırmak için en ideal kanalları tespit etmeye çalışmıştır. Kanalların etkinliği kısa zamanlı Fourier dönüşümü ve Gramian Angular Fields (GAF) çıktıları çeşitli derin öğrenme modellerinde işlenerek belirlenmiştir (Kucukler ve ark., 2024). Bir duygu tanıma probleminde kanal sayısı arttıkça doğruluğun azaldığı ve kanal sayısı ile sınıflandırma performansı arasında ters korelasyon olduğu görülmüştür.

Denek içi değişkenlik (intra-subject variability), bir deneğin aynı görevi birden fazla tekrarında sinyallerde oluşan farkı ifade eder. Denekler arası değişkenlik (inter-subject variability) ise farklı deneklerin aynı görevdeki sinyal değişimlerini ifade eder (Zhao ve ark., 2021). EEG sinyallerinin denek içi ve denek arası değişim göstermesi, sinyal işleme, model oluşturma ve nörolojik araştırmalar için ciddi zorluk oluşturur (Huang ve ark., 2023). Sinyal değişkenlikleri farklı deneklerde ve zamanlarda beynin işleyişindeki farklılıkları yansıtır. Bu nedenle, aynı yöntemler farklı deneklerde başarılı olmayabilir ve değişkenlikler yapay zeka yöntemlerinin genelleme yeteneğini azaltabilir. Denek içi ve arası değişkenlikler ayırt edici bilgilerin dağılımında oldukça fazla değişkenliğe yol açsa da literatürde yeterince irdelenmemiştir (Huang ve ark., 2023).

2.2. İnvaziv Olmayan Mobil EEG Cihazları

EEG sinyallerinin kaydedilmesi, işlenmesi ve analizi zor bir problemdir. Günümüzde nörolojik hastalıkların teşhis ve tedavisinden BBA'lara kadar birçok alanda çalışmalar yürütülmektedir. EEG sinyalleri ile gerçekleştirilen çalışmaların (deneysel, laboratuvar, prototip/ürün geliştirme ve mühendislik) önemli aşamalarından biri kayıtların doğru alınmasıdır. Kayıtlar tıbbi cihazlarla alınabileceği gibi düşük maliyetli mobil cihazlarla da alınabilir. Tıbbi EEG cihazları, beynin elektriksel aktivitesini zamana bağlı ölçen ve kaydeden tanı amaçlı sistemlerdir. Klinik uygulamalarda epilepsi, uyku bozuklukları, koma değerlendirmesi ve beyin işlevi izleme gibi nörolojik durumların teşhis ve takibinde yaygın kullanılır. Mobil EEG cihazları ise beynin elektriksel aktivitesini sabit laboratuvar ortamları ve tıbbi amaçlar dışında gerçek zamanlı kaydedebilen taşınabilir sistemlerdir. Bu cihazlar nörobilim, bilişsel araştırmalar ve BBA'lar gibi uygulama alanlarında kullanılır. Günümüzde epilepsi gibi birçok sağlık uygulamasında mobil EEG'nin potansiyel klinik değeri incelenmiş, zaman, maliyet, kullanılabilirlik ve güvenilirlik açısından avantajları olduğu görülmüştür (Biondi ve ark., 2022). Örneğin, Titgemeyer ve ark. epilepsi hastalarının mobil ve klinik EEG kayıtlarını eşzamanlı almış, çeşitli kısıtlamalar altında klinik video

EEG'nin mobil EEG'den daha üstün olduğunu, ancak mobil EEG'nin teşhiste yardımcı olabileceğini gözlemlemiştir (Titgemeyer ve ark., 2020). Kutafina ve ark. mobil ve klinik EEG ile dinlenme durumunda eş zamanlı veri toplamıştır. Klinik EEG Micromed Brain Quick Plus Evolution cihazı ile 10-20 sistemine göre 21 elektrottan 256 Hz örnekleme oranıyla kaydedilmiştir. Mobil EEG ise Emotiv Epoc ile 10-20 sistemine göre 14 elektrottan 128 Hz örnekleme oranıyla kaydedilmiştir. Kayıtlarda kullanılan elektrot sayıları, konumları ve referanslar farklıdır. Mobil elektrotlar klinik EEG elektrotlarına mümkün olduğunca yakın yerleştirilmiştir. Farklıklara rağmen mobil ve klinik cihazlar arasında 0,64'lük bir ortalama doğrusal korelasyon elde edilmiştir (Kutafina ve ark., 2020).

Mobil EEG cihazları, teknik sınırlamalara karşı özellikle BBA ve nörobilim alanlarında yüksek potansiyel sunmaktadır. Geliştirilmekte olan mobil sensörler bu alanlarda yeni araştırma fırsatları oluşturmaktadır. Mobil EEG cihazları ve sensörleri tıbbi alternatiflerinden farklılıklar içerir. Bu cihazlar taşınabilir olmaları ve çeşitli problemlerde kullanılmaları için daha farklı yapılarda tasarlanır. Örneğin, bir sanal gerçeklik uygulamasında, BBA oluşturulurken, doğada yürüyüş yaparken veya uyurken EEG kaydı mobil cihazlarla daha kolaydır. Mobil cihazlar genellikle tıbbi cihazlara göre daha az sayıda kanala sahiptirler ve dolayısıyla daha düşük çözünürlük sunarlar. Genellikle kablosuz bağlantı kullanırlar ve dahili bataryalarla çalışırlar. Kullanıcılar için hareket özgürlüğü, kolay kurulum ve daha basit kullanım kolaylığı sağlarlar. Örneğin, bir BBA'da EEG kabloları hareket kapasitesini kısıtlayarak ek bir yük getirir. Mobil cihazlar beyin aktivitelerinin gerçek zamanlı ölçümü ve işlenmesini sağlayarak için yeni çözümler sunarlar. Bu cihazlar beyin aktivitelerinin taşınabilir ve sürekli izlenmesini de mümkün kılar. Cerrahi müdahaleyle yerleştirilen invaziv elektrotlarla daha iyi kaynaklardan daha yüksek çözünürlük ve hassasiyette, daha az gürültülü EEG kayıtları alınabilir. Ancak cerrahi müdahale gerektirmesi bu tekniğin en önemli dezavantajıdır (Shah ve Mittal, 2014). Günümüzde, farklı kullanım senaryolarına ve uygulama alanlarına hitap eden çok sayıda taşınabilir EEG cihazı piyasaya sunulmuştur. BioSemi EEG sistemleri (BioSemi, 2025), CGX EEG cihazları (CGX, 2025), Brain Products nörofizyoloji EEG çözümleri (Brain Products, 2025), OpenBCI donanım ve yazılımları (OpenBCI, 2025), Muse baş bantları (Muse, 2025), NeuroSky MindWave mobil başlık seti (NeuroSky, 2025), Emotiv Epoc X, Flex, Insight başlıkları ve MN8 earbudları (Emotiv, 2025) bazı popüler mobil EEG kayıt cihazlarıdır.

2.3. EEG Elektrot Türleri: Islak, Kuru ve Yarı Kuru Yaklaşımlar

EEG beynin elektriksel aktivite salınımlarını kafa derisine yerleştirilen elektrotlarla kaydeder. Sinyallerinin kaydedilmesinde ıslak, kuru veya yarı kuru elektrotlar kullanılabilir (Li ve ark., 2020; Yuan ve ark., 2021). Klasik ıslak elektrotlarda kafa derisi ile elektrot yuvaları arasındaki boşluklar jel ile doldurup iletkenlik sağlanır. Bu elektrotlar özellikle klinik EEG sinyallerini (uyku çalışmaları,

epilepsi teşhisi, beyin tümörü veya travmatik beyin hasarı değerlendirmesi gibi) kaydetmede kullanılır. Nispeten uzun süreli ve stabil veri toplamaya olanak sağlarlar. Hareket ve temas artefaktlarına karşı kuru elektrotlara göre daha dayanıklıdırlar. Ancak, jel uygulamasının zaman alması hazırlık süreci gerektirir. Jel uzun süreli kullanımda kuruyabilir ve iletkenlik düşebilir (Yuan ve ark., 2021; Guger ve ark., 2012; Li ve ark., 2020). Ayrıca, sinyallerin alınmasından sonra jel temizlenmelidir. BBA gibi günlük yaşam uygulamaları için avantaj ve dezavantajları dikkate alınmalıdır. Çünkü, jel sürülmesi kullanıcı açısından rahatsız edicidir, hazırlık süresi gerektirir ve kullanıcı konforu açısından yetersiz olabilir. Kuru elektrotlar ise kafa derisi ile temas için herhangi bir iletken sıvıya ihtiyaç duymaz (Soufineyestani ve ark., 2020). Islak elektrotlara kıyasla hızlı kurulum sağlarlar ve daha kullanıcı dostudurlar. Ancak, kuru elektrotların pratik kullanımlarını sınırlayan bazı problemler vardır. Örneğin, elektrot teması daha düşük olacağı için sinyal kalitesi nispeten düşüktür. Ayrıca, kafa hareketlerinden dolayı oluşan sinyal bozulmalarına daha duyarlıdırlar. Son yıllarda hem ıslak hem de kuru elektrotların avantajlarını bir araya getirip az miktarda elektrolit sıvısı gerektiren yarı kuru elektrotlar kullanılmaya başlamıştır (Li ve ark., 2020). Bu elektrotlar hem ıslak elektrotlar gibi güvenilir sinyalleri toplayabilir hem de kurulumları kuru elektrotlar gibi kolaydır. Islak elektrotlarla karşılaştırıldığında, yarı kuru elektrotların kurulumu daha pratiktir ve temizlik işlemleri daha kısa sürede tamamlanır.

2.4. EPOC Flex Salin Sensör EEG Kayıt Cihazı Seti

Emotiv Epoc Flex birçok araştırma alanında sıklıkla kullanılan ve araştırma kalitesinde veri toplama kapasitesine sahip invaziv olmayan bir mobil EEG cihazıdır (Williams ve ark., 2020). Bu çalışmada sunulan deneylerde EPOC Flex Model 1.0 kiti kullanılmıştır. Güncel versiyonu 256 Hz örnekleme destekleyen EPOC Flex Model 2.0'dır. Kit içerisinde, kontrol ünitesi, şarj için USB kablosu, USB PC alıcı-verici dongle, salin solüsyon sıvısı (jel sensörlü cihazlarda jel), EasyCap başlık, kırmızı renkteki sağ elektrot ağaçları, mavi renkteki sol elektrot ağaçları, kenarlıklar ve keçe pedleri yer alır. Güncel versiyonlarında kabloları düzenleyip hareket halinde başlığa sabitlemek için siyah kablo bağları ve bağlamak için iğne gibi eklerde yer alır.

Cihazda EEG kayıtlarının iletimi kablosuz bağlantı ile gerçekleştirilir. PC alıcı-verici dongle, başlık setinin bir bilgisayara bağlanması ve sinyallerin 2.4 GHz kablosuz bir protokolle kontrol ünitesinden kayıt cihazına aktarılması için kullanılır. Elektrot sensörler paketinde 32 normal elektrot ile 2 referans elektrot bulunur. Kırmızı renkteki sağ ve mavi renkteki sol elektrot ağaçları kontrol ünitesinin ilgili yönüne takılır, elektrotlar yerleştirilir, temas ve EEG sinyal kalitesi iyiye kayda başlanır. Şekil 1(a)'da temel hatları verilen başlık seti aynı anda 32 konumdan kayıt alabilir (Flex 2 Saline, 2025). EasyCap başlık elektrot yerleşimi için Şekil 1(b)'deki gibi 72 farklı açıklık içerir

artmıyor veya kayıt alınırken sürekli değişiyorsa (aynı veya farklı elektrotlarda düşük veya yüksek şeklinde) elektrotların doğru konuma yerleşiminde sorun olması muhtemeldir. Bu durumlarda başlık çıkarılmalı ve keçe pedleri salin solüsyonla tekrar doyurulmalıdır. Ardından başlık yeniden yerleştirilmelidir. Başlık yerleştirmeden önce saçların temasa engel olup olmadığı kontrol edilmelidir. Keçe pedleri salin solüsyonla ıslatıldıktan bir süre sonra kurumaya başlar ve zamanla elektrot teması düşer. Epoc Flex paketinde yer alan kenar aparatları kurumayı yavaşlatır, salin solüsyonun yayılmasını önler ve elektrotların başlığa daha iyi tutunmasını sağlar (EPOC Flex User Manual, 2025; Yılmaz, 2021).

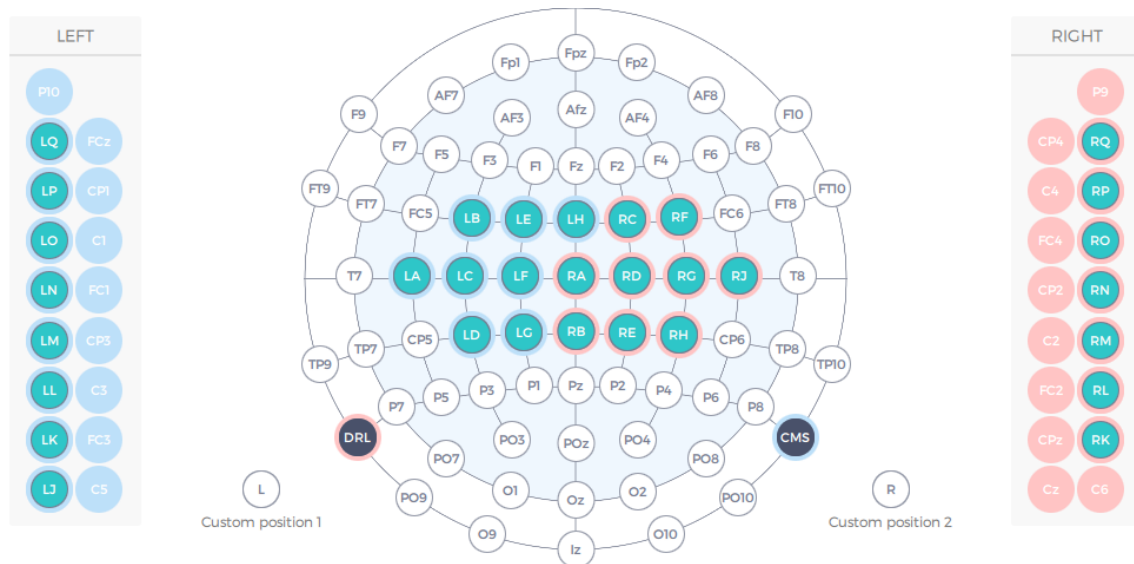
Deneylerde oturur pozisyonda kayıtlar alınmasına rağmen kayıt süresince elektrot temasının bazen oldukça düştüğü gözlenmiştir. Bu durumlarda sinyal iletim düzeyi yukarıda verilen yöntemlerle arttırılmış ve stabil kalması sağlanmıştır. EEG kayıtlarının özellikle hareket halinde alındığı durumlarda, başta referans elektrotlar olmak üzere tüm kayıt elektrotlarının iletkenlik düzeyi sürekli yüksek tutulmalıdır. Çünkü, hareket halinde kaydedilen EEG sinyallerinde, vücut hareketlerinden kaynaklanan artefaktlar daha belirgin hale gelir. Bunların fark edilmemesi beyin aktivitelerinin yanlış yorumlamalara neden olabilir. Bu tarz deneylerde jel kullanan sıvı elektrotların kullanılması yerinde olabilir. Çünkü, jel yapışkanlık sağlayıp hem kafa derisini hem de elektrotu tuttuğundan özellikle kafa hareketlerinin olduğu deneylerde jel kullanan elektrotlar daha dayanıklıdır.

3.2. EEG Sinyallerinin Kaydedilme Süreci

Deneylerde EEG sinyallerinin kaydedilmesi, cihazın ve elektrot sinyal veriminin kontrolü, EEG sinyallerin izlenmesi ve temel bazı analiz işlemler için Emotiv PRO yazılımı kullanılmıştır (EmotivPRO, 2025); ancak farklı cihaz kullanıcıları benzer işlemleri kendi cihazlarının desteklediği yazılımlarla gerçekleştirebilir. EEG kayıtlarında öncelikle hangi elektrotların kullanılacağı belirlenmelidir. Epoc Flex'te standart elektrot yerleşimi Şekil 1(b)'deki gibidir. Bu senaryoda 32 elektrot kayıt için kullanılırken, CMS ve DLR referans olarak kullanılır. Kırmızı renkteki sağ ve mavi renkteki sol elektrot ağaçları kontrol ünitesinin ilgili yönüne takılır. Temas sağlanacak biçimde elektrotlar ilgili konumlarına yerleştirilir ve elektrot teması yeterliyse kayıt toplamaya başlanır. Epoc Flex'te kırmızı renkteki elektrotlar başın sağ kısmına, mavi renktekiler ise sol kısmına yerleştirilir. Örneğin, beynin sol tarafında mavi renkteki H kodlu elektrot (LH) yerleşim şemasına göre frontal lobda Fp1 konumundaki açıklığa yerleştirilir. Benzer şekilde, sağ tarafta kırmızı renkteki H kodlu elektrot (RH) frontal lobda Fp2 konumundaki açıklığa yerleştirilir. CMS elektrodu TP9, DLR ise TP10 konumuna yerleştirilir (EPOC Flex User Manual, 2025; Yılmaz, 2021).

EEG kaydında farklı problemlere göre farklı elektrot yerleşimleri de kullanılabilir. Örneğin, 32 elektrotla sadece ön bölgelerden daha yoğun kayıtlar alınmak istenebilir. Benzer şekilde, daha az

sayıdaki 24 elektrotla farklı konumlardan kayıtlar alınmak istenebilir. Epoc Flex ile daha az sayıda elektrottan kayıtların alınması durumunda kayıt için en az 14-16 elektrotun (referans elektrotlar dışında) kullanılması verilerin sağlıklı alınması için oldukça önemlidir. Farklı elektrot yerleşimlerinin kullanılacağı durumlarda EmotivPro’da yeni bir yerleşim konfigürasyonu oluşturulmalıdır. Çünkü EEG sinyalleri bu konfigürasyonlarla kontrol ünitesine iletilir. Kullanılmayacak elektrotlar elektrot ağaç konnektörlerinden çıkarılmalıdır.

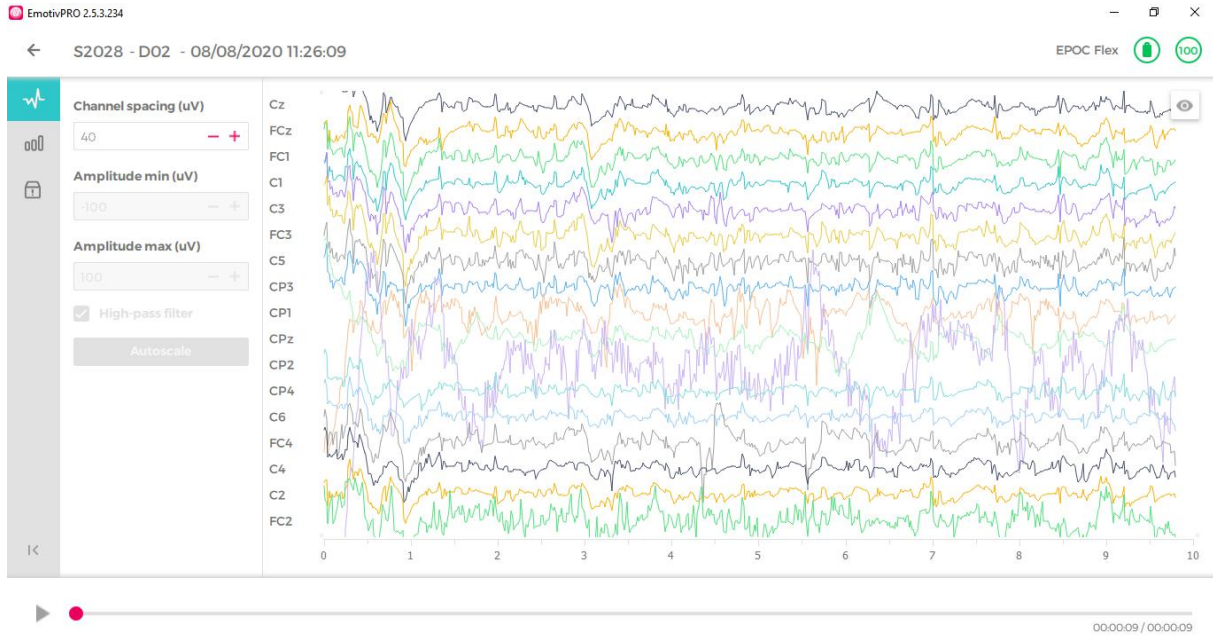


Şekil 3. Motor hareket hayali sinyallerinin kaydı için örnek bir elektrot yerleşim düzeni

Motor hareket hayali görevlerine ait EEG sinyallerinin kaydedilmesinde kullanılan örnek bir elektrot yerleşim düzeni Şekil 3'te verilmiştir. Veri kaydında C3, Cz ve C4 ile çevresindeki toplam 17 elektrottan EEG kaydı alınmıştır. Bunlar; C3 ve çevresindeki FC3, C1, CP3, C5; Cz ve çevresindeki FCz, C2, CPz, C1; C4 ve çevresindeki FC4, C6, CP4, C2 ile yoğunluğunu arttırmak için eklenen FC1, CP1, FC2 ve CP2 elektrotlarıdır. DRL ve CSM referansları olarak sırasıyla P9 ve P10 kullanılmıştır. Elektrotların etiketleri ve konumları ise şu şekildedir. Mavi renkteki sol elektrot ağacına ait LA elektrodu C5, LB elektrodu FC3, LC elektrodu C3, LD elektrodu CP3, LE elektrodu FC1, LF elektrodu C1, LG elektrodu CP1 ve LH elektrodu FCz konumlarındadır. Kırmızı renkteki sağ elektrot ağacına ait RA elektrodu Cz, RB elektrodu CPz, RC elektrodu FC2, RD elektrodu C2, RE elektrodu CP2, RF elektrodu FC4, RG elektrodu C4, RH elektrodu CP4 ve RJ elektrodu C6 konumlarındadır. Referans elektrotlar farklı çalışmalarda farklı konumlara yerleştirilebilir. Örneğin, Emotiv EPOC + cihazı ile gerçekleştirilen bir nöro-oyun çalışmasında P3 and P4 konumları kullanılmıştır (Paszkiel ve ark., 2021). Duygu tanıma deneylerinde ise kayıtlar Fp1-Fp2, AF3-AF4, F7-F3-Fz-F4-F8, FC5-FC1-FC2-FC6, T7-C3-Cz-C4-T8, CP5-CP1-CP2-CP6, P7-P3-Pz-P4-P8, PO3-PO4, O1-Oz-O2 elektrotlarından alınmıştır. Elektrot yoğunluğunun fazla olması tüm elektrotların aynı anda yüksek derecede temas sağlama olasılığını düşürür. Duygu tanıma

deneylerinde özellikle bazı kadın katılımcıların saç yoğunluğunun fazla olması nedeniyle bağlantı kalitesinde zorluk yaşanmıştır. Bu katılımcılarda 32 elektrodun tamamı kullanılmamıştır. Sadece duyu tanıma ile ilişkisi en yüksek bölgelerdeki elektrotlar kullanılmıştır.

EmotivPro, EEG sinyallerini kaydetme, görüntüleme, analiz etme ve dışa aktarma için gerekli bileşenleri içerir. Bu nedenle, sinyallerin hem gerçek zamanlı incelenmesi hem de kaydedilmiş verilerin görüntülenmesi bu yazılımla gerçekleştirilmiştir. Motor hareket hayali görevi sırasında kaydedilen örnek bir EEG sinyali arayüzde Şekil 4’te verilmiştir. Hareket etme, göz kırpması, sinyal iletim düzeyi düşüklüğü gibi problemler nedeniyle oluşan bozulmaların bir kısmı veri toplamada ham sinyallerde gözlemlenebilir. EmotivPro elektrot kurulum arayüz haritalarıyla doğru yerleştirilmemiş ve iletkenlik seviyesi yetersiz elektrotların anlık izlenmesine olanak verir. Deneylerde sinyal iletim düzeyi kayıt alım süresince yüksek tutulmuştur. Sensörlerde aşınma ve kirlilik olup olmadığı kayıt öncesinde kontrol edilmiştir. Kayıt sonrasında ise sensörler saf suyla temizlenip kurulanmıştır. Kablosuz aktarımın başarılı olması için USB PC alıcı-vericisi kontrol ünitesini doğrudan göreceği bir konuma yerleştirilmiştir.



Şekil 4. EmotivPro arayüzü ve motor hareket hayali amacıyla kaydedilen örnek bir EEG sinyali

3.3. Veri Setleri

3.3.1 Motor Hareket Hayaline Dayalı Beyin-Mobil Telefon Arayüzü Veri Seti

Motor hareket hayalinde fiziksel hareketler yapıp motor sistem ve kaslar kullanılmaz, hareketler sadece beyinde simüle edilerek gerçekleştirilir. Örneğin, bir kişinin parmaklarını fiziksel

olarak hareket ettirmeden zihninde hareket ettirdiğini düşünmesi motor hareketin hayal edilmesine bir örnektir. Motor hareket hayaline dayalı beyin-mobil telefon arayüzü veri seti (MHH-BMTA) mobil telefonların kullanımındaki motor hareketlerden olan tıklama ve kaydırma hareketlerinin hayallerine ait EEG verilerini içermektedir. Tıklama mobil bir cihazın ekranına parmakla hafif bir şekilde tıklamanın hareket hayalini, kaydırma ise ekranındaki nesneleri başparmakla aşağı doğru kaydırma hareketinin hayalini ifade eder. Veri seti TÜBİTAK proje desteğiyle Yılmaz (2021) çalışmasında oluşturulmuştur.

Deneklere, mobil cihazlara yönelik motor hareket hayali görevlerine alışmaları amacıyla ön bilgilendirme yapılmış ve her oturum öncesinde test kayıtları alınmıştır. Çünkü motor hareketlerin zihinsel olarak hayal edilmesi zordur. Kayıtlar sabah saatlerinde (10:00–13:00) alınmıştır. Denekler konforlu bir koltukta oturmuş, kayıtlar EPOC Flex ile müdahalesiz alınmıştır. Veri seti, Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde öğrenim gören veya çalışan 8 (2 kadın, 6 erkek) gönüllüden elde edilmiştir. Güvenilir veri elde edebilmek adına, daha önce EEG veya BBA sistemleriyle deneyim sahibi olan ve verilecek talimatları doğru şekilde uygulayabilecek denekler tercih edilmiştir. Bir denek için deney ortamı ve elektrot yerleşim düzeni Şekil 5'teki gibidir. Veri seti bölüm 3.1 ve 3.2'te sunulan kayıt alma adımları ile oluşturulmuştur. Sinyaller ön işlenmesi ise bölüm 3.4'te sunulan adımların bir kısmı ile gerçekleştirilmiştir. Kayıtların alınması, deney ortamı ve işlenmesi ile ilgili detaylı bilgilere Yılmaz (2021) ve Yılmaz ve ark. (2025) çalışmalarından erişilebilir.



Şekil 5. Kayıt alma ortamı ve elektrot sensörlerin yerleştirilme düzeni (Yılmaz, 2021)

3.3.2 Karadeniz Teknik Üniversitesi Çok Modlu Duygu Tanıma Veri Seti

Çok modlu duygu tanıma sistemlerinin doğru analizi ve performanslarının artırılabilmesi için sistemli bir biçimde oluşturulmuş kaliteli veri setleri gerekir. Katılımcılardan aynı anda birden fazla biyolojik veri toplamak kolay bir işlem olmadığından, çok modlu veri setlerinin sayısı literatürde oldukça sınırlıdır. Bu veri setlerinin başarısı, kayıt ortamının dış etkenlerden arındırılmış ve kontrollü olması, katılımcıların yeterli ve iyi bilgilendirilmiş olması, ayrıca deney materyallerinin eksiksizliği gibi birçok faktöre bağlıdır.

KMED veri seti, Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde öğrenim gören lisans ve lisansüstü öğrenciler ile akademisyenlerden oluşan 14 sağlıklı katılımcıya (11 erkek, 3 kadın) ait EEG sinyalleri ile yüz görüntüsü kayıtlarını içermektedir. Kayıtlar, her bir katılımcı için iki ayrı günde alınmıştır. Erkek katılımcılardan her duygu sınıfı (komik, korku, tiksinti ve rahatlama) için bir oturumda 40 olmak üzere, iki oturumda toplamda 320 kayıt alınmıştır. Kadın katılımcılardan ise her sınıf için bir oturumda 35 deneme olmak üzere iki oturumda toplamda 280 kayıt alınmıştır. Kadın katılımcılardan alınan kayıt sayısının daha az olmasının nedeni, EEG sinyallerinin elde edilmesini güçleştiren yüksek saç yoğunluğu gibi faktörlerdir. Veri seti, Hatipoğlu Yılmaz (2022) tarafından yürütülen TÜBİTAK destekli bir proje kapsamında hazırlanmıştır. Kayıt ortamında kadın ve erkek katılımcılardan alınan örnek görüntüler Şekil 6'da verilmiştir. Veri seti bölüm 3.1 ve 3.2'te sunulan kayıt alma adımları ile oluşturulmuştur. Sinyaller ön işlenmesi ise bölüm 3.4'te sunulan adımların bir kısmı ile gerçekleştirilmiştir. Kayıtların alınması, deney ortamı ve işlenmesi ile ilgili detaylı bilgilere Hatipoğlu Yılmaz (2022) ve Hatipoğlu Yılmaz ve ark. (2025) çalışmalarından erişilebilir.



Şekil 6. EEG ile yüz görüntülerinin eş zamanlı kaydı ve kayıt ortamında erkek (solda) ve kadın (sağda) katılımcılardan alınan örnek görüntüler (Hatipoğlu Yılmaz, 2022)

3.4. EEG Sinyallerinin Önışlenmesi ve Kullanıma Uygun Hale Getirilmesi

Ortamdaki radyo dalgaları EEG sinyallerini etkiler ve gürültüye neden olabilir. Bu nedenle, kayıt ortamında gürültüye neden olan etmenlere dikkat edilmelidir. Epoc Flex 1.0'ın gömülü yazılımı elektriksel güç kaynaklı paraziti gidermek için 50 ve 60 Hz'de çift çentik filtresi uygular. Filtre yaklaşık 45 Hz'e kadar etki ettiğinden üst limit 43 Hz civarındadır. Nyquist-Shannon örnekleme teoremine göre, örnekleme hızının yarısının üzerindeki frekans bileşenleri yeniden yapılandırılmaz ve Nyquist-Shannon sınırının üzerindeki herhangi bir frekansın analizi gerçekleştirilemez (Weiergräber ve ark., 2016). Bu nedenle, EEG cihazının seçimi, hedeflenen frekans aralıkları ve çalışma koşulları dikkate alınarak yapılmalıdır. Örneğin, gamma frekans bandını (30-100 Hz) incelemek için cihaz en az 200 Hz örnekleme hızına sahip olmalıdır. Yeterli örnekleme hızı, uygun frekans aralığı, yüksek sinyal gürültü oranı ve elektrot kalitesi, doğru ve güvenilir ölçümler için önemlidir. Epoc Flex kayıt cihazı şehir elektrik şebekeleri kaynaklı harmonikleri kaldırmak için 85 Hz üzeri bir filtre ve 64 Hz de alçak geçiren bir filtre uygular (Emotiv EPOC+, 2025). Farklı mobil EEG cihazları çeşitli donanım filtreleri, göz kırpması ve kas hareketleri gibi artefaktlar için tespit ve giderim teknikleri, referanslama ve dijital örnekleme gibi araçlar içerir.

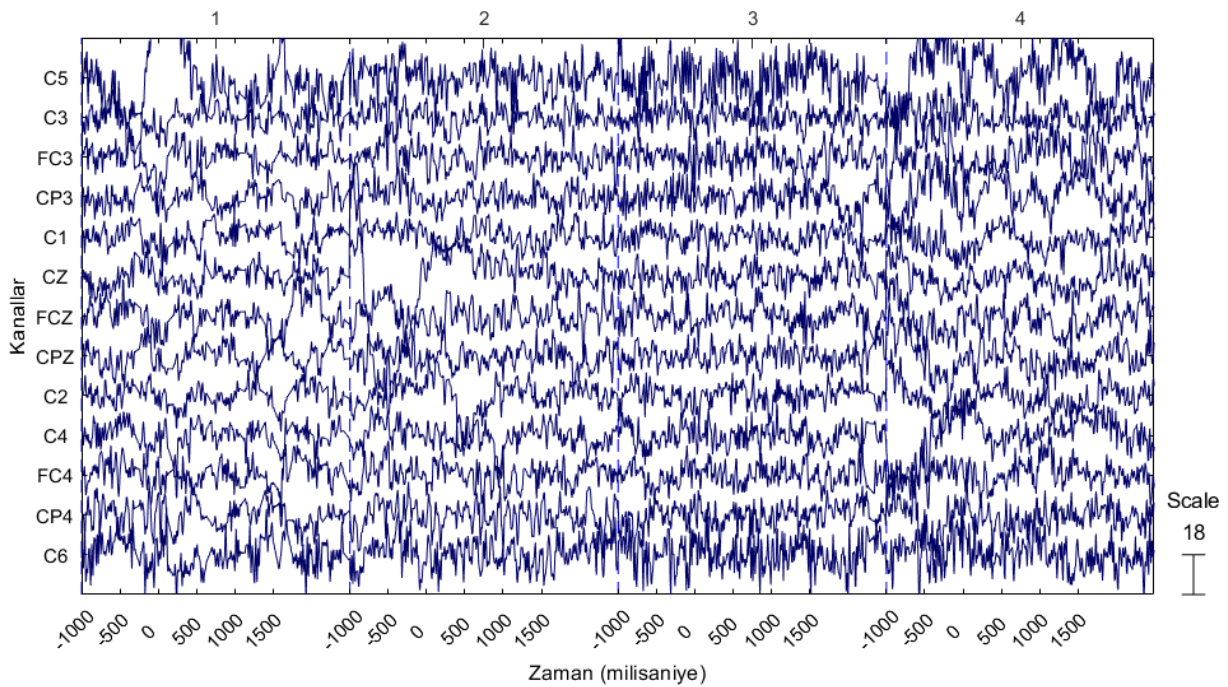
Ön işleme artefaktları filtreleme, veri kalitesi artırma ve analiz için temiz sinyalleri elde etmeyi amaçlar. EEG sinyallerinin daha doğru ve güvenilir analizine olanak tanır. EEG cihazlarının uyguladığı önışlemler temiz EEG sinyallerinin elde edilmesi için yeterli değildir. Bu nedenle ek önışlemler yapılmalıdır. EEG sinyallerinin işlenmesinde hazır kütüphanelerin (örneğin EEGLAB, FieldTrip, Brainstorm, MNE, BioSPPy, OpenViBE) kullanılması, sinyal filtreleme, bozuklukların giderimi, zaman-frekans analizi gibi karmaşık işlemlerin doğrulukla uygulanmasını sağlar. EEG sinyalleri için ön işlemenin evrensel bir yolu yoktur, çünkü farklı veri setleri, sinyal türleri ve yöntemlere göre veri ön hazırlığı adımları değişebilmektedir. Deneme yanılma ve sinyal analizi ile en iyi adımlar ve hangi sırada uygulanacakları belirlenir. Literatürde, ön işleme adımlarının etkinliğini değerlendiren ve bu süreçleri tartışan çalışmalar da mevcuttur (Delorme, 2023). Deneylerde ve sonraki çalışmalarda, cihazların uyguladığı önışlemlere ek olarak şu adımların uygulanmasının EEG sinyallerinin sınıflandırılmasına katkı sağlayacağı gözlenmiştir. Bazı adımlarda kullanılabilecek örnek uygulamalar EEGLAB Matlab araç seti (Delorme ve Makeig, 2004; EEGLAB, 2025) ve bazı kütüphaneler ile verilmiştir.

- Örnekleme oranı yeniden ayarlanarak hem veri boyutu azaltılabilir hem de frekans içeriği analiz amacına uygun bir şekilde optimize edilebilir.
- 0.5 Hz veya 1 Hz yüksek geçiren filtre uygulanır. İlgili alanındaki frekans bileşenlerini kapsayacak şekilde bant geçiren (örneğin motor hareket hayali için 8-30 Hz) süzgeçlerle de filtreleme yapılabilir.

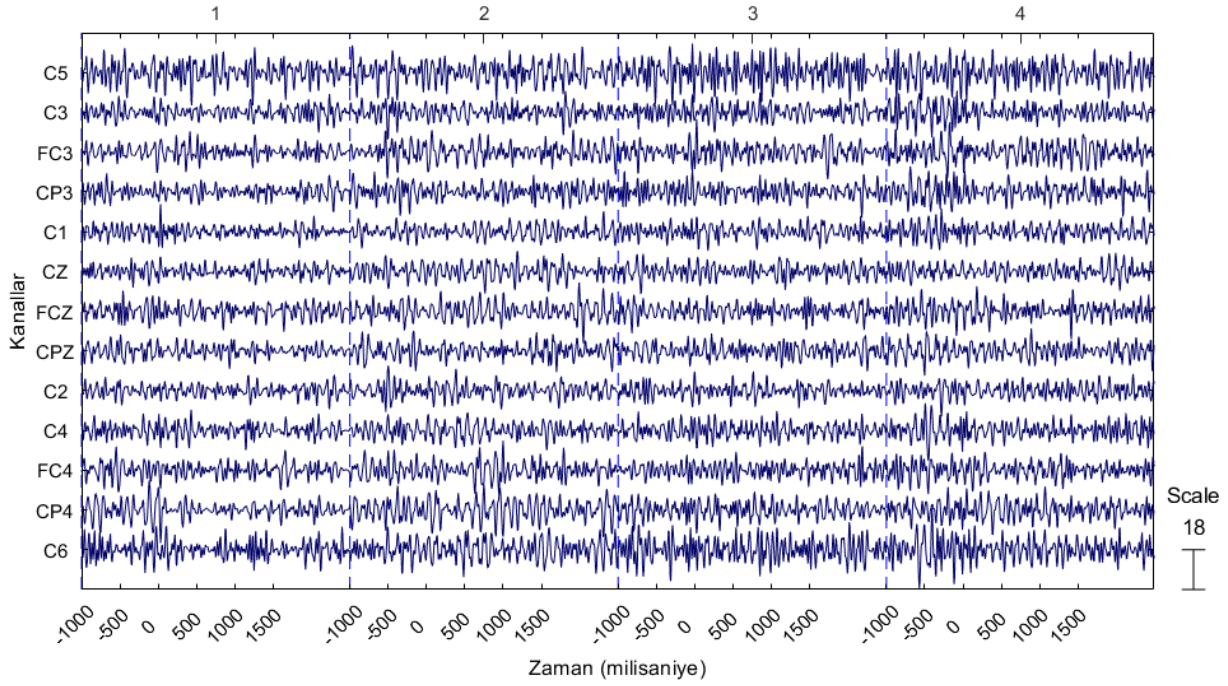
- EEG sinyalleri referanslar temel alınarak ölçülür. Ancak, yanlış referans seçimi, gürültü veya istenmeyen etkilere neden olabilir. Bu nedenle, sinyaller başka bir referansa göre yeniden hesaplanabilir. Ortalama referanslama (average reference) ve referans elektrot standardizasyon tekniği (reference electrode standardization technique) gibi yöntemler kullanılabilir. Referans montajı ve elektrot kurulumu kafa derisinden ölçülen EEG potansiyellerini oldukça etkileyebilir. Örneğin, Hu ve ark. referans elektrot standardizasyon tekniğinin yeniden referanslama için tercih edilebileceğini ve ortalama referanslamamanın yüksek seviyeli sensör gürültüsü durumlarında alternatif bir seçenek olabileceğini göstermiştir (Hu ve ark., 2018).
- Problemlerle ilişkili EEG zaman dilimleri epoklar halinde çıkarılabilir. Uygun olmayan veri periyotları ve kanallar kaldırılabilir. Sinyal bozukluğu içeren kayıtlar manuel olarak silinebileceği gibi bu işlemleri otomatik yapan yöntemler de kullanılabilir. Örneğin, EEGLAB'ın Clean Rawdata eklentisi ile şu kriterlere uyan sinyaller kaldırılabilir: 10 saniyeden uzun bir süre sabit kalan, maksimum kabul edilebilir yüksek frekanslı gürültü standart sapması 4 Hz üstünde olan ve komşu kanallarla kabul edilebilir korelasyonu 0.6'dan düşük olan. Ayrıca, artefakt alt uzay yeniden yapılandırması (artifact subspace reconstruction, ASR) EEG arka plan aktivitesi koruyup göz kırpması, kas ve sensör hareketinden kaynaklanan gürültüler kaldırılabilir (Mullen ve ark, 2015). Örneğin, Arad ve ark. (2018) hareket halinde EEG sinyallerinde bu yöntemle başarılı sonuçlar almıştır. ASR uygulanmadan önce bazı önkoşullar yerine getirilmelidir. Örneğin, yüksek geçiren filtre uygulanmalı (sinyal ortalaması sıfır olmalı) ve veriler tüm-rank (full-rank) yani tüm kanallar bağımsız olmalıdır. ASR öncesi ortak ortalama referanslama (Common Average Reference) gibi verilerde bağımlılık oluşturacak işlemlerin yapılmamasına dikkat edilmelidir (Kothe, 2025).
- EEG sinyalleri, yalnızca beyin aktivitelerini değil, aynı zamanda göz kırpması, kas hareketleri ve çevresel gürültüler gibi istenmeyen sinyal bozulmalarını da içerir. Bir kör kaynak ayırma (blind source separation) yöntemi olan bağımsız bileşen analizi (independent components analysis, ICA) gibi tekniklerle, sinyaller bağımsız bileşenlere ayırarak farklı kaynaklardan gelen sinyaller belirlenebilir ve asıl beyin aktiviteleri daha net bir şekilde analiz edilebilir. Örneğin, EMG ile EEG zamansal ve uzamsal düzlemlerde istatistiksel bağımsızlığa sahiptir (Jiang ve ark., 2019). Bu prensibe dayanarak EMG gibi bileşen artefaktlarını elimine etmek için bağımsız bileşen analizi ve çeşitli istatistiksel yöntemler kullanılır (Li ve ark., 2021). Sinyallerin bağımsız bileşenlere ayrıştırması manuel olarak incelenebilir, seçilebilir ve yorumlanabilir, ancak bunu yapmak hem zaman hem de deneyim gerektirir. Çünkü bağımsız bileşenlerin bir düzeni veya özgün yorumları yoktur. Literatürde bağımsız bileşenlerin sınıflandırılması için otomatik yaklaşımları önerilmiştir. Bu yaklaşımlar EEG sinyallerinin

analizini hızlandırır ve bağımsız bileşenlere ayrıştırmanın gerçek zamanlı uygulamalara yakın kullanımını sağlar (Pion-Tonachini ve ark. 2019). ICLabel (Pion-Tonachini ve ark. 2019) bağımsız bileşenlerin otomatik sınıflandırılmasında kullanılabilen başarılı yaklaşımlardan biridir. Bu araç bileşenlerin beyin aktivitesi mi yoksa kas, göz, kalp atışı, hat gürültüsü, kanal gürültüsü gibi farklı kategorilere ait olup olmadığını tespit eder. Örneğin, bu yaklaşım kullanılarak EEG aktivitesiyle ilgili olmayan göz hareketleri ve kanal gürültüleri olasılıklarına göre EEG sinyallerinin çıkarılabilir. Kör kaynakları ayırmak için temel bileşen analizi (principal component analysis) ve kanonik korelasyon analizi gibi (canonical correlation analysis) yöntemler de kullanılabilir. Literatürde artefaktları kaldırmak için regresyon analizi, dalgacık dönüşümü, ampirik mod ayırma (empirical mode decomposition), çeşitli filtreleme metotları ve seyrek ayrıştırma (sparse decomposition) gibi yöntemler de yaygındır (Jiang ve ark., 2019). Farklı veri setleri ve sinyallere göre bu artefakt kaldırma tekniklerinin başarısı değişebilir. EEGLAB gibi araç setleri sinyal işlemeye yönelik birçok eklenti içerir (EEGLAB Plugins, 2025).

Motor hareket hayali görevlerine ait EEG sinyalleri için yapılan örnek bir ön işleme şu şekildedir: Epoklarına ayrılan sinyaller 0.5 Hz yüksek geçiren ve 8-30 Hz bant geçiren süzgeçlerle filtrelenmiştir. Ardından, sinyaller ICA ile bağımsız bileşenlerine ayrılmış, bağımsız bileşenler ICLabel ile otomatik sınıflandırılmış ve farklı kaynaklardan (kas, göz, kalp atışı, hat gürültüsü, kanal gürültüsü ve diğer) olma olasılıkları 0.9 üstü olan bileşenler işaretlenip kaldırılmıştır. Ön işleme öncesi ham sinyaller Şekil 7, ön işlemler uygulandıktan sonra elde edilen sinyaller ise Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 7. Ön işlemler öncesi örnek bir motor hareket hayali EEG sinyali



Şekil 8. Önışlemler sonrası örnek bir motor hareket hayali EEG sinyali

4. Bulgular ve Tartışma

Emotiv EPOC Flex cihazı ile yapılan kayıtlar, mobil EEG sistemlerinin hem bilişsel hem de duygusal durumların ayrıştırılmasında etkin bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Bu bölümde, mobil EEG sistemleriyle toplanan verilerde gerçekleştirilen motor hareket hayali ve duygu tanıma görevlerine yönelik sınıflandırma performanslarına ilişkin bulgular sunulmaktadır. MI-BMPI veri setinde mobil telefonlarda tıklama ve kaydırma hareketlerinin motor hareket hayallerine ait sinyaller iki kategorili olarak sınıflandırılmıştır. Bu veri setinde değerlendirmeler yaşları 25-35 arasında değişen sekiz denek için yürütülmüştür. Performans ölçümü doğruluk ve Kappa metrikleri ile yapılmıştır. Çalışmada tüm frekans bantları ve zaman segmentleri kombinasyonlarına yarı olasılıksal dağılım modelleri uygulanmış ve tüm sınıflandırıcı çıktıları çoğunluk oylama ile birleştirilmiştir. Deneklerde %78,4% ile %86,25 arası maksimum doğruluklar ve 0,56 ile 0,73 arası maksimum Kappa değerleri elde edilmiştir. Tüm denekler boyunca ortalama $82 \pm 2,76$ sınıflandırma doğruluğu ve $0,65 \pm 0,06$ Kappa değeri elde etmiştir. Deneyler hakkında detaylı bilgi ve sonuçlar Yılmaz ve ark. (2025) tarafından yayınlanmıştır. MI-BMPI çalışma bünyesinde oluşturulan yeni bir veri seti olduğundan farklı çalışmalarda kullanılmamıştır. Tablo 1’de çeşitli mobil EEG cihazları ile farklı alanda yürütülen bazı çalışmalar verilmiştir. Fakhruzzaman ve ark., (2015) Emotiv EPOC’un motor hareket hayali görevleri için kullanılabilirliği üzerine yaptığı çalışmada el, ayak ve baş hareketlerini çeşitli senaryolarda sınıflandırmıştır. Sağ ayak hareketi için %91,67 doğruluk elde ederken eşzamanlı sol el hareketi ile baş sallama için başarı %13,33’e kadar düşmüştür. Permana ve ark. (2019) Neurosky Mindwave Mobile 2 ile kaydettikleri EEG sinyalleri ile tekerlekli sandalyeleri

kontrol eden bir BBA oluşturmuştur. Hareketsizlik durumu ile dört yöndeki hareketlerde %17,78 ile %82,22 arası başarı elde etmiştir. Saichoo ve ark. (2022) simüle tekerlekli sandalyelerin motor hareket hayali BBA paradigması ile kontrol edilebilirliğini ölçmüş, çeşitli sol/sağ motor hareket hayali paradigmaları için sonuçlar almıştır. Motor hareket hayalinde kullanıcı yeterliliğine göre önerilen uzuv hareket paradigması kullandığında ortalama %83,7 doğruluk ile en yüksek başarıyı elde edilmiştir. Al-Hamadani ve ark. bilgi toplama fonksiyonları temelli normalize edilmiş üç farklı ağ mimarisi kullanmıştır: yığın normalleştirilmiş evrişimsel sinir ağları (b-CNN), katman normalize uzun kısa süreli bellek (l-LSTM) ve hibrit tekrarlayan evrişimsel sinir ağları (R-CNN). Dört deneğin her biri için üç sınıflı motor hareket hayali problemlerini sınıflandırmaya çalışmış ve %67,28 ile 90,17 arası değişen sonuçlar almışlardır. Literatür çalışmalarında görüleceği üzere mobil cihazlarla alınan sonuçların çok geniş bir aralığa dağıldığı görülmektedir. Veri kaydının yeterli doğrulukta olmaması veya problemin zorluğuna göre başarı oldukça düşmektedir. Bu çalışmada verilen kayıt alım ve işleme prosedürleri ile oluşturulan sistem literatüre kıyasla oldukça tutarlı sonuçlar elde etmiştir. Elde edilen bulgular, mobil EEG cihazlarının araştırma ve uygulamalardaki potansiyelini güçlendirmekte ve sinyal kalitesi ile sınıflandırma başarısı arasında pozitif yönde bir ilişki olduğunu göstermektedir.

Tablo 1. Mobil EEG tabanlı bazı motor hareket hayali çalışmalarında elde edilen sınıflandırma doğrulukları

Fakhruzzaman ve ark. (2015)	Emotiv EPOC	- Sol el hareketi için %76,67 - Sağ ayak hareketi için %91,67 - Eşzamanlı sol el ve sağ el hareketi için %28,33 - Eşzamanlı sol el hareketi ve baş sallama için %13,33 - Eşzamanlı sağ ayak ve sol ayak hareketi için %60 - Eşzamanlı sağ ayak hareketi ve baş sallama için %76,67
Permana ve ark. (2019)	Neurosky Mindwave Mobile 2	- Varsayılan hareketsizlik için %82,22 - İleri hareket için %70 - Geri hareket için %73,33 - Sağa dönüş için %46,67 - Sola dönüş için %17,78
Saichoo ve ark. (2022)	Emotiv EPOC X	- Bilek hareketleri kullanıldığında %75,3 - Dirsek hareketleri kullanıldığında %80,6 - Ayak bileği hareketleri kullanıldığında %75,0 - Kullanıcı yeterliliğine dayalı uzuv hareketi paradigması ile %83,7
Al-Hamadani ve ark. (2023)	EMOTIV EPOC	- Sol el, sağ el ve eylemsizlik için b-CNN ile ortalama %80,46 - Sol el, sağ el ve eylemsizlik için l-LSTM ile ortalama %77,92 - Sol el, sağ el ve eylemsizlik için R-CNN ile ortalama %81,98
Yilmaz ve ark. (2025)	Emotiv Epoc Flex	Mobil telefonlarda tıklama ve kaydırma hareketleri için ortalama %82±2,76

Duygular, çeşitli his, düşünce ve davranışlardan üretilen psikolojik durumlar dizisini ifade etmekle birlikte, insan iletişimde önemli bir rol oynar (He ve ark., 2020). Dahili ve harici aktivitelerle ilgili karmaşık bir psiko-fizyolojik süreç olan duygu, günlük yaşantımızda önemli bir yer tutar (Zheng ve ark., 2019). İnsan duygusunu anlamak için yüz ifadeleri, ses sinyalleri, mimik gibi dışsal etkenler yanında EEG gibi biyolojik sinyallerde kullanılır (Boehner ve ark., 2007). Duygu

tanıma çalışmalarında veri toplama sürecinin kolaylığı nedeniyle sıklıkla yüz görüntüleri tercih edilmektedir. Ancak geçici yüz hareketleri, ortam gürültüsü, aydınlatma değişiklikleri ve kafa hareketleri gibi faktörler performansı olumsuz etkiler. Kişinin yüz ifadesini kontrol edebilmesi nedeniyle oluşan denek bağımlılığı ise diğer bir problemidir. Yüz tabanlı sistemlerde denek müdahalesi gibi sınırlılıklar nedeniyle, EEG sinyalleri duygu tanımda tarafsız bir alternatif sunabilir.

İkinci çalışmada çok modlu KMED veri setinde komik, korkunç, tiksiniç ve rahatlama kategorilerindeki dört duygunun ikili kombinasyonları kendi aralarında sınıflandırılmıştır. Bu veri setinde değerlendirmeler yaşları 23-35 arasında değişen on dört denek için yürütülmüştür. Performans ölçümü doğruluk metrikleri ile yapılmıştır. Sadece yüz görüntüleri kullanıldığında düşük sonuçlar alınmıştır. Sadece EEG sinyalleri kullanıldığında sonuçlar ortalama %8 iyileşmiştir. Yüz görüntüleri ile EEG sinyalleri özellik seviyesinde birleştirildiğinde ise tüm deneklerde ortalama $89,95 \pm 3,87$ 'ye (iki sınıflı tiksiniç-rahatlama problemi için) kadar çıkan doğruluklar elde edilmiştir. Deneyler hakkında detaylı bilgi ve sonuçlar Hatipoglu Yılmaz ve ark. (2025) tarafından yayınlanmıştır. KMED çalışma bünyesinde oluşturulan yeni bir veri seti olduğundan farklı çalışmalarda kullanılmamıştır. Tablo 2'de çeşitli mobil EEG cihazları ile farklı alanda yürütülen bazı çalışmalar verilmiştir. Cruz-Vazquez ve ark. (2025) Emotiv Epoc+ ile oluşturdukları EEG veri setinde derin öğrenme teknikleri ile mutluluk, üzüntü ve nötr duyguları kendi aralarında tanımaya çalışmıştır. Duyguların ayrılabilirliğini iyileştirmek için Fourier sinir ağları ve kuantum döndürme gibi dönüşüm yöntemlerinin başarısı araştırılmıştır. Sınıflandırmada ise evrişimsel sinir ağları (convolutional neural network, CNN) ve yoğun sinir ağları (dense neural network, DNN) kullanılmıştır. Kuantum döndürmeler ile evrişimli sinir ağları birlikte kullanıldığında tüm duygu durumlarında %90 üzeri başarı elde edilmiştir. Tülay ve Bali (2024) EEG verilerinin olaya ilişkin potansiyel (ERP) bileşenlerinden faydalanarak pozitif, negatif ve nötr duygu durumlarını sınıflandırmayı amaçlamıştır. İlgisiz özellikler ileri öznitelik seçimi algoritması ile kaldırılmış ve sınıflandırma için doğrusal bir destek vektör makinesi kullanılmıştır. Acharya ve ark. (2020) çeşitli film kliplerine yapılan tepkilerini kullanarak duyguları gerçek zamanlı tespit etmeye çalışmıştır. EEG sinyalleri NeuroSky Mind Wave 2 ile kaydedilmiş, öznitelikler hızlı Fourier dönüşümü ile çıkarılmış ve sınıflandırma genetik programlama ile yapılmıştır. Vazquez ve ark. (2024) katılımcıların film videolarına verdikleri duygusal tepkilerden çıkardıkları öznitelikleri destek vektör makineleri (support vector machines), k-en yakın komşu algoritması (k-nearest neighbor algorithm), rastgele orman (random forest) ve yapay sinir ağları (artificial neural networks) gibi temel yaklaşımlarla sınıflandırmıştır. Literatürde, mobil cihazlarla duygu tanımda elde edilen sonuçların geniş bir aralıkta dağıldığı ve doğruluğun problemin zorluğuna bağlı değişmektedir. Bu çalışmada verilen kayıt alım ve işleme prosedürleri ile oluşturulan duygu tanıma sistemi literatüre kıyasla oldukça tutarlı sonuçlar göstermiştir.

Tablo 2. Mobil EEG tabanlı bazı duygu tanıma çalışmalarında elde edilen sınıflandırma doğrulukları

Cruz-Vazquez ve ark. (2025)	Emotiv Epoc+	- Fourier özellikleri + CNN ile mutluluk için %53; üzüntü için %100 ve nötr duygu için %59 - Kuantum döndürme + CNN ile mutluluk için %91; üzüntü için %99 ve nötr duygu için %97
Vazquez ve ark. (2024)	Emotiv Epoc+	Mutlu, üzgün ve nötr durumları için %79,09
Acharya ve ark. 2020	NeuroSky Mind Wave 2	Mutlu, sakin, korku ve üzüntü duygu durumları için ortalama %89,14
Tülay ve Balli, 2024	Brain Products	- Negatif ve nötr uyaranları tanımlamak için %70,16 - Negatif ve nötr uyaranları tanımlamak için %79,84 - Pozitif ve negatif uyaranları tanımlamak için %75,00 - Pozitif ve nötr uyaranları tanımlamak için %68,55
Hatipoglu Yilmaz ve ark. (2025)	Emotiv Epoc Flex	Komik, korkunç, tiksiniç ve rahatlama duygularının ikili kombinasyonları için %86,92±4,61 ile %89,95±3,87 arası doğruluk

Mobil EEG cihazları, sınırlı laboratuvar ortamına bağlı kalmadan, gerçek ortamlarda hareket halindeyken bile beyin sinyallerinin gerçek zamanlı kayıt ve analizine olanak tanır. Bu özellik, dış mekân aktiviteleri, sanal gerçeklik uygulamaları ve doğal koşullarda günlük yaşayış sırasındaki beyin aktivitelerini incelemek için değerlidir. Klinik ve mobil cihazlarla eş zamanlı yapılan çalışmalarda (Kutafina ve ark. 2020; Titgemeyer ve ark., 2020), mobil cihaz sinyallerinin klinik cihazlarla kaydedilen EEG sinyalleri ile uyum gösterdiği gözlenmiştir. Bu çalışmalar mobil EEG'nin güvenilir bir alternatif olabileceğini gösterir. Mobil cihazların klinik alternatiflerine kıyasla düşük maliyetleri, kolay kurulum ve kablolu bağlantı özellikleri ile gelecekte birçok araştırma alanında kullanılması beklenmektedir. Ayrıca, mobil sensör teknolojilerindeki gelişmeler tıbbi araştırmalara dahi yeni olanaklar sunmaktadır. Örneğin, mobil EEG cihazları epilepsi gibi nörolojik ve psikiyatrik bozuklukların düşük maliyetli taramasında potansiyel kullanım alanları doğurmaktadır (Kutafina ve ark., 2020). Deneysel çalışmalar, mobil EEG cihazlarının motor hareket hayali görevleri ve duygu tanıma uygulamalarında başarıyla kullanılabileceği gösterilmiştir. Motor hareket hayali görevlerinde elde edilen sinyaller, ilgili motor hareketlerin örüntülerini yüksek doğrulukla tespit etmiştir. Bu, BBA gibi uygulamaların geliştirilmesinde mobil EEG cihazlarının etkinliğini ortaya koymuştur. Ayrıca, duygu tanıma deneyleri, EEG sinyallerinin duygusal durumları ayırt etme kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Bu bulgular hem mühendislik uygulamaları hem de nörolojik araştırmalar için mobil EEG cihazlarının değerini desteklemektedir. Bu çalışmada elde edilen bulgular, mobil EEG cihazlarının taşınabilirlik ve kullanım kolaylığı gibi avantajlarını göstermenin ötesinde, çeşitli uygulama örneklerinde başarı elde edebileceğini göstermektedir. Mobil cihazlarla çalışırken kafa derisi ile elektrotlar arasındaki iletkenlik seviyesinin sabit tutulmasının sinyal kalitesini etkileyen en önemli faktör olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, mobil EEG cihazlarının sınırlı kanal sayısı ve nispeten düşük uzaysal çözünürlüğü gibi bazı dezavantajlarının olduğu da görülmüştür. Gelecekteki

çalışmalarda mobil cihazlarla alınan sonuçların verimlilikleri ve genelleme yetenekleri irdelenmelidir. Tıbbi cihazlardaki gibi hassasiyet ve güvenilirlik standartlarını karşılamalıdırlar. Özellikle batarya ömrü veya kaliteli elektrot temasının uzun süre korunması konusunda araştırmalar yapılmalıdır. Klinik alternatiflere göre daha konforlu kullanım sağlasa da kafa derisine sürekli temas gerektiren elektrotlara alternatif sensör teknolojileri geliştirilmelidir. Ancak, denek içi ve denekler arası değişkenliklerin detaylı incelenmesi, daha geniş örneklem gruplarıyla deneylerin tekrarlanması ve uzun vadeli kullanım senaryolarının değerlendirilmesi, bu cihazların potansiyelinin tam anlamıyla ortaya çıkarılması için kritik öneme sahiptir. Çalışmanın sağladığı tecrübe, mobil EEG cihazlarının kullanımında metodolojik bir rehber sunarak araştırmalar için önemli bir temel oluşturmaktadır.

5. Sonuçlar ve Öneriler

Mobil EEG sistemleri, düşük kanal sayısı, farklı elektrot konumları ve örnekleme oranlarına rağmen klinik EEG sistemleriyle anlamlı düzeyde korelasyon göstermiştir. Bu sonuç, mobil EEG'nin özellikle saha çalışmaları, ön tanı süreçleri ve kaynak kısıtlı ortamlarda güvenilir bir alternatif olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar, bu sistemlerin motor hareket hayali ve duygu tanıma gibi görevlerde yüksek doğrulukla çalışabildiğini göstermiştir. Bu bulgular, BBA uygulamaları ve nörolojik araştırmalar açısından mobil EEG'nin etkinliğini ve uygulanabilirliğini desteklemektedir. Gelecekte, problemlere özgü mobil EEG cihazlarının tasarlanması EEG'nin farklı problemlerde kullanımda önemli katkılar sağlayacaktır. Örneğin, sanal gerçeklik uygulamaları için sanal gerçeklik başlıkları ile kullanılabilen mobil EEG cihazları tasarlanabilir. Artırılmış gerçeklik ve oyun teknolojileri gibi alanlarda mobil cihazlar oldukça yüksek katkı sağlayabilir. Bu nedenle, sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik gibi teknolojilere entegre cihazların geliştirilmesi duygu tanıma gibi uygulamalarda ilerlemeler sağlayabilir.

Tasarlanacak mobil EEG cihazları düşük maliyetli, küçük boyutlu, kablosuz, sinyal iletim düzeyi uzun süre korunabilen, yüksek hassasiyetli, düşük güç tüketimli olmalıdır. Elektrot teknolojisindeki ilerlemeler sinyal iletim düzeyini artıracak yeni sensörlerin geliştirilmesini mümkün kılabilir. Batarya ömrünü uzatacak ve uzun süreli kullanımda sinyal kalitesini koruyacak teknolojiler geliştirilmelidir. Kullanıcılar arası değişkenliklerin etkilerini azaltmak için adaptif ve bireyselleştirilmiş algoritmalar ile EEG cihazları tasarlanmalıdır. EEG cihazlarının tak-çalıştır şeklinde çalışması kullanıcı deneyimi açısından oldukça faydalı olacaktır. Karmaşık kurulum süreçlerinin kolaylaştırılması ve kayıt için teknik bilgi ihtiyacının azaltılması, EEG cihazlarının daha erişilebilir ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayacaktır. Bu özellikler, kullanıcıların cihazı kolayca bağlayıp sinyalleri hızlıca toplamasına olanak verir. Tak-çalıştır sistemlerin en önemli faydalarından bir kısmı özellikle çeşitli hastalıkların tespit ve izlenmesinde ortaya çıkılacaktır.

Örneğin, beyin dalgaları sürekli izlenerek epileptik nöbetlerin önceden tespiti hastaların kendileri tarafından yapılabilir. Benzer şekilde, Alzheimer hastalığı, Parkinson hastalığı, demans, inme, psikiyatrik, gelişimsel ve nörogelişimsel bozukluklar ve uyku bozukluklarına kadar birçok olguda bu tarz ileri düzeydeki mobil EEG sistemleri önemli fayda ve kolaylıklar sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma 119E397 nolu “EEG Temelli Beyin Bilgisayar Arayüzü Sistemlerine ait Motor Hareket Hayali Görevlerinin Sınıflandırılmasına Yönelik Örüntü Tanıma Yöntemlerin Geliştirilmesi” ve başlıklı TÜBİTAK 1002 Hızlı Destek Programı projesi tarafından desteklenerek edinilen EEG cihazı ve ilişkili çalışmaların katkısıyla gerçekleştirilmiştir. Duygu tanıma çalışmaları ise 121E002 nolu “Sinyal Görüntü Dönüşümü Yöntemi Yardımıyla Çok Yönlü Duygu Tanıma Sisteminin Geliştirilmesi” başlıklı TÜBİTAK 1002 Hızlı Destek Programı projesi kapsamında tamamlanmıştır. Verdikleri destek için TÜBİTAK'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

- Acharya, D., Billimoria, A., Srivastava, N., Goel, S., Bhardwaj, A. (2020). Emotion recognition using fourier transform and genetic programming. *Applied Acoustics*, 164, 107260. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107260>
- Al-Hamadani, A. A., Mohammed, M. J., Tariq, S. M. (2023). Normalized deep learning algorithms based information aggregation functions to classify motor imagery EEG signal. *Neural Computing and Applications*, 35(30), 22725-22736. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08944-9>
- Al-Saegh, A., Dawwd, S.A., Abdul-Jabbar, J.M. (2021). CutCat: An augmentation method for EEG classification. *Neural Networks*, 141: 433-443. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2021.05.032>

- Arad, E., Bartsch, R. P., Kantelhardt, J. W., Plotnik, M. (2018). Performance-based approach for movement artifact removal from electroencephalographic data recorded during locomotion. *PloS one*, 13(5), e0197153. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197153>
- Arvaneh, M., Guan, C., Ang, K. K. et al. (2011). Optimizing the channel selection and classification accuracy in EEG-based BCI. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 58(6), 1865-1873. <https://doi.org/10.1109/TBME.2011.2131142>
- Biondi, A., Santoro, V., Viana, P. F., Laiou, P., Pal, D. K., Bruno, E., Richardson, M. P. (2022). Noninvasive mobile EEG as a tool for seizure monitoring and management: A systematic review. *Epilepsia*, 63(5), 1041-1063. <https://doi.org/10.1111/epi.17220>
- BioSemi Products. <https://www.biosemi.com/research.htm> (2025, Mart 25).
- Boehner, K., DePaula, R., Dourish, P., Sengers, P. (2007). How emotion is made and measured. *International Journal of Human-Computer Studies*, 65(4), 275-291. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2006.11.016>
- Brain Products Neurophysiology EEG Solutions. Available online: <https://www.brainproducts.com/solutions/> (2025, Mart 25).
- Brunner, C., Naeem, M., Leeb, R., Graimann, B., Pfurtscheller, G. (2007). Spatial filtering and selection of optimized components in four class motor imagery EEG data using independent components analysis. *Pattern Recognition Letters*, 28(8): 957-964. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2007.01.002>
- CGX EEG Headsets and Devices. <https://www.cgxsystems.com/products> (2025, Mart 25).
- Cruz-Vazquez, J. A., Montiel-Pérez, J. Y., Romero-Herrera, R., Rubio-Espino, E. (2025). Emotion recognition from EEG signals using advanced transformations and deep learning. *Mathematics*, 13(2), 254. <https://doi.org/10.3390/math13020254>
- Delorme, A. (2023). EEG is better left alone. *Scientific reports*, 13(1), 2372. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27528-0>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2003.10.009>
- Doma, O.O. (2024). EEG as an Input for Virtual Reality. In: Lee, N. (eds) *Encyclopedia of Computer Graphics and Games*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-23161-2_176
- EEGLAB. <https://scn.ucsd.edu/eeglab/index.php> (2025, Nisan 11).
- EEGLAB Plugins. https://scn.ucsd.edu/eeglab/plugin_uploader/plugin_list_all.php (2025, Nisan 11).
- Emotiv, Emotiv Brain Data Measuring Hardware and Software Solutions. <https://www.emotiv.com/> (2025, Mart 25).
- EmotivPRO. <https://emotiv.gitbook.io/system-requirements/emotivpro-v3.0> (2025, Ocak 02).
- EPOC Flex Cap. <https://www.emotiv.com/products/epoc-flex-cap> (2025, Ocak 02).
- EPOC Flex User Manual. <https://emotiv.gitbook.io/epoc-flex-user-manual> (2025, Ocak 02).
- Fakhruzzaman, M. N., Riksakomara, E., Suryotrisongko, H. (2015). EEG wave identification in human brain with Emotiv EPOC for motor imagery. *Procedia Computer Science*, 72, 269-276. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.140>
- Flex 2 Saline - 32 Channel Wireless EEG Head Cap System. <https://www.emotiv.com/products/flex-saline> (2025, Ocak 02).
- Guger, C., Krausz, G., Allison, B. Z., Edlinger, G. (2012). Comparison of dry and gel based electrodes for P300 brain-computer interfaces. *Frontiers in neuroscience*, 6, 60. <https://doi.org/10.3389/fnins.2012.00060>
- Hatipoğlu Yılmaz, B., (2022). Sinyal Görüntü Dönüşümleri Yardımıyla Çok Modlu Duygu Tanıma Sisteminin Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Hatipoğlu Yılmaz, B., Kose, C., Yılmaz, C. M. A novel multimodal EEG-image fusion approach for emotion recognition: introducing a multimodal KMED dataset. *Neural Comput & Applic* 37, 5187–5202 (2025). <https://doi.org/10.1007/s00521-024-10925-5>
- He Z, Li Z, Yang F, Wang L, Li J, Zhou C, Pan J. Advances in Multimodal Emotion Recognition Based on Brain-Computer Interfaces. *Brain Sciences*. 2020 Sep 29;10(10):687. <https://doi.org/10.3390/brainsci10100687>
- Hu, S., Lai, Y., Valdes-Sosa, P. A., Bringas-Vega, M. L., Yao, D. (2018). How do reference montage and electrodes setup affect the measured scalp EEG potentials?. *Journal of neural engineering*, 15(2), <https://www.doi.org/10.1088/1741-2552/aaa13f>

- Huang, G., Zhao, Z., Zhang, S. et al. (2023). Discrepancy between inter-and intra-subject variability in EEG-based motor imagery brain-computer interface: Evidence from multiple perspectives. *Frontiers in neuroscience*, 17, 1122661. <https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1122661>
- Jain, A., Raja, R., Srivastava, S. et al. (2024). Analysis of EEG signals and data acquisition methods: a review. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization*, 12 (1), 2304574. <https://doi.org/10.1080/21681163.2024.2304574>
- Jiang, X., Bian, G. B., Tian, Z. (2019). Removal of artifacts from EEG signals: a review. *Sensors*, 19(5), 987. <https://doi.org/10.3390/s19050987>
- Kancaoğlu, M., Kuntalp, M. (2024). Low-cost, mobile EEG hardware for SSVEP applications. *HardwareX*, 19, e00567. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2024.e00567>
- Kaveh, R., Schwendeman, C., Pu, L. et al. Wireless ear EEG to monitor drowsiness. *Nat Commun* 15, 6520 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48682-7>
- Kothe, C., The Artifact Subspace Reconstruction Method, <https://sccn.ucsd.edu/githubwiki/files/asr-final-export.pdf> (2025, Nisan 24).
- Kucukler, O. F., Amira, A., Malekmohamadi, H. (2024). EEG channel selection using Gramian Angular Fields and spectrograms for energy data visualization. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133, 108305.
- Kutafina, E., Brenner, A., Titgemeyer, Y., Surges, R., Jonas, S. (2020). Comparison of mobile and clinical EEG sensors through resting state simultaneous data collection. *PeerJ*, 8, e8969. <https://doi.org/10.7717/peerj.8969>
- Li GL, Wu JT, Xia YH, He QG, Jin HG. Review of semi-dry electrodes for EEG recording. *J Neural Eng*. 2020 Oct 23;17(5):051004. doi: 10.1088/1741-2552/abbd50.
- Li, W., Ma, Y., Shao, K., Yi, Z. et. al. "The Human–Machine Interface Design Based on sEMG and Motor Imagery EEG for Lower Limb Exoskeleton Assistance System," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 73, pp. 1-14, 2024, Art no. 6502914, doi: 10.1109/TIM.2024.3375980
- Li, Y., Wang, P. T., Vaidya, M. P., Flint, R. D., Liu, C. Y., Slutzky, M. W., Do, A. H. (2021). Electromyogram (EMG) Removal by Adding Sources of EMG (ERASE)—A novel ICA-based algorithm for removing myoelectric artifacts from EEG. *Frontiers in neuroscience*, 14, 597941. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.597941>
- Mullen, T. R., Kothe, C. A., Chi, Y. M., Ojeda, A., Kerth, T., Makeig, S., Cauwenberghs, G. (2015). Real-time neuroimaging and cognitive monitoring using wearable dry EEG. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 62(11), 2553-2567. <https://www.doi.org/10.1109/TBME.2015.2481482>
- Muse: the brain sensing headband. <https://chooseemuse.com/> (2025, Mart 25).
- NeuroSky brainwave sensing headsets. <https://store.neurosky.com/> (2025, Mart 25).
- Newman, A. J., Neural Data Science, Averaging and Re-Referencing ERPs. https://neuraldatascience.io/7-eeeg/erp_avg_reref.html (2025, Mart 25).
- OpenBCI EEG Hardware and Software. <https://openbci.com/> (2025, Mart 25).
- OpenBCI-Datasets, Publicly Available EEG Datasets. <https://openbci.com/community/publicly-available-eeeg-datasets/> (2025, Nisan 04).
- Paszkziel, S., Rojek, R., Lei, N., Castro, M.A. (2021) A Pilot Study of Game Design in the Unity Environment as an Example of the Use of Neurogaming on the Basis of Brain–Computer Interface Technology to Improve Concentration. *NeuroSci*, 2, 109-119. <https://doi.org/10.3390/neurosci2020007>
- Permana, K., Wijaya, S. K., Prajitno, P. (2019, November). Controlled wheelchair based on brain computer interface using Neurosky Mindwave Mobile 2. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2168, No. 1). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/1.5132449>
- Pion-Tonachini, L., Kreutz-Delgado, K., Makeig, S. (2019). ICLabel: An automated electroencephalographic independent component classifier, dataset, and website. *NeuroImage*, 198, 181-197. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.05.026>
- Saichoo, T., Boonbrahm, P., Punsawad, Y. (2022). Investigating user proficiency of motor imagery for EEG-based BCI system to control simulated wheelchair. *Sensors*, 22(24), 9788. <https://doi.org/10.3390/s22249788>
- Sartipi, S. ve Cetin, M., "Subject-Independent Deep Architecture for EEG-Based Motor Imagery Classification," in *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 32, pp. 718-727, 2024. <https://www.doi.org/10.1109/TNSRE.2024.3360194>
- Shah AK, Mittal S. Invasive electroencephalography monitoring: Indications and presurgical planning. *Ann Indian Acad Neurol*. 2014 Mar;17(Suppl 1):S89-94. <https://www.doi.org/10.4103/0972-2327.128668>

- Shi, T. W., Chang, G. M., Qiang, J. F., Ren, L., Cui, W. H. (2023). Brain computer interface system based on monocular vision and motor imagery for UAV indoor space target searching. *Biomedical Signal Processing and Control*, 79, 104114.
- Soufineyestani, M.; Dowling, D.; Khan, A. Electroencephalography (EEG) Technology Applications and Available Devices. *Appl. Sci.* 2020, 10, 7453. <https://doi.org/10.3390/app10217453>
- Taherysayah, F., Malathouni, C., Liang, H. N., Westermann, C. (2024). Virtual reality and electroencephalography in architectural design: A systematic review of empirical studies. *Journal of Building Engineering*, 108611. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108611>
- Titgemeyer, Y., Surges, R., Altenmüller, D. M., Fauser, S., Kunze, A., Lanz, M. et al. (2020). Can commercially available wearable EEG devices be used for diagnostic purposes? An explorative pilot study. *Epilepsy & Behavior*, 103, 106507. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2019.106507>
- Tülay, E. E., Balli, T. (2024). Decoding functional brain data for emotion recognition: a machine learning approach. *ACM Transactions on Applied Perception*, 21(3), 1-18. <https://doi.org/10.1145/3657638>
- Vazquez, J. A. C., Pérez, J. Y. M., Herrera, R. R. (2024, June). Emotion Recognition Through EEG Signals With Movie Clips Stimuli. In 2024 4th Interdisciplinary Conference on Electrics and Computer (INTCEC) (pp. 1-6). IEEE. <https://www.doi.org/10.1109/INTCEC61833.2024.10602937>
- Wang, Y., Zibrandtsen, I. C., Lazeron, R. H. et al. (2023). Pitfalls in EEG analysis in patients with nonconvulsive status epilepticus: A preliminary study. *Clinical EEG and Neuroscience*, 54(3), 255-264. <https://doi.org/10.1177/15500594211050492>
- Weiergräber, M., Papazoglou, A., Broich, K., Müller, R. (2016). Sampling rate, signal bandwidth and related pitfalls in EEG analysis. *Journal of neuroscience methods*, 268, 53-55. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2016.05.010>
- Why Does Emotiv EPOC+ Stop At 43 Hz In Range? Is There A Way To Expand This Somehow? <https://www.emotiv.com/tools/knowledge-base/faq/emotiv-epoc-stop-at-43-hz-in-range> (2025, Ocak 02).
- William Tatum, D. O., Feyissa, A. M. et al., Technical Aspects of EEG. <https://www.medlink.com/articles/technical-aspects-of-eeeg> (2025, Mart 26).
- Williams, N. S., McArthur, G. M., de Wit, B., Ibrahim, G., Badcock, N. A. (2020). A validation of Emotiv EPOC Flex saline for EEG and ERP research. *PeerJ*, 8, e9713. <https://www.doi.org/10.7717/peerj.9713>
- Yang, K., Tong, L., Shu, J., Zhuang, N., Yan, B., Zeng, Y. (2020). High gamma band EEG closely related to emotion: evidence from functional network. *Frontiers in human neuroscience*, 14, 89, <https://www.doi.org/10.3389/fnhum.2020.00089>
- Yilmaz, C. M., (2021). Motor Hareket Hayali Görevlerine ait EEG Sinyallerinin 2-B Öznitelikler ve Yarı Olasılıksal Dağılım Modelleri ile Sınıflandırılması. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Yilmaz, C. M., Yilmaz, B. H., Kose, C. MI-BMPI motor imagery brain–mobile phone dataset and performance evaluation of voting ensembles utilizing QPDM. *Neural Comput & Applic* 37, 4679–4696 (2025). <https://doi.org/10.1007/s00521-024-10917-5>
- Yuan, H., Li, Y., Yang, J. et al. (2021). State of the art of non-invasive electrode materials for brain–computer interface. *Micromachines*, 12(12), 1521. <https://doi.org/10.3390/mi12121521>
- Zhang, X., Wang, Y., Tang, Y. et al. Adaptive filter of frequency bands based coordinate attention network for EEG-based motor imagery classification. *Health Inf Sci Syst* 12, 11 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13755-024-00270-1>
- Zhao, G., Zhang, Y., Ge, Y. (2018). Frontal EEG asymmetry and middle line power difference in discrete emotions. *Frontiers in behavioral neuroscience*, 12, 225, <https://www.doi.org/10.3389/fnbeh.2018.00225>
- Zhao K, Zhang Z, Wen H, Scano A. Intra-Subject and Inter-Subject Movement Variability Quantified with Muscle Synergies in Upper-Limb Reaching Movements. *Biomimetics* (Basel). 2021 Oct 20;6(4):63. doi: 10.3390/biomimetics6040063. PMID: 34698082; PMCID: PMC8544238.
- Zheng WL, Liu W, Lu Y, Lu BL, Cichocki A. EmotionMeter: A Multimodal Framework for Recognizing Human Emotions. *IEEE Trans Cybern.* 2019 49 (3), 1110-1122, <https://www.doi.org/10.1109/TCYB.2018.2797176>
- Zheng, W. L., Lu, B. L. (2015). Investigating critical frequency bands and channels for EEG-based emotion recognition with deep neural networks. *IEEE Transactions on autonomous mental development*, 7(3), 162-175., <https://www.doi.org/10.1109/TAMD.2015.2431497>

Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenmeye Dayalı Duygu Analizinde Metin Temsil Yöntemlerinin Sınıflandırma Başarımına Etkisinin İncelenmesi

Aleyna KAHRAMAN¹, Durmuş Özkan ŞAHİN^{2*}, Dilara BIYIKLI³,
Feyzanur AYTEKİN⁴, Hasan Basri DARGA⁵

Öz

Bu çalışmada, iki farklı veri seti üzerinde çeşitli metin temsil yöntemleri kullanılarak ikili ve üçlü sınıflandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Metin temsil yöntemleri olarak TF-IDF, GloVe, Word2Vec, FastText ve Bag of Words kullanılmıştır. Makine öğrenimi algoritmalarından Naive Bayes, Lojistik Regresyon, Destek Vektör Makineleri, Rastgele Orman, Yapay Sinir Ağı, En Yakın Komşu Algoritması, Karar Ağacı, XGBoost ve LightGBM uygulanmıştır. Derin öğrenme algoritmaları olarak ise Evrişimli Sinir Ağı, Tekrarlayan Sinir Ağı ve Uzun Kısa Süreli Bellek kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlarla, kullanılan metin temsil yöntemleri ve algoritmaların performansları karşılaştırılmıştır. Amazon veri setinde, makine öğrenimi yöntemleri arasında en yüksek doğruluk oranı LightGBM algoritması, derin öğrenme yöntemleri arasında ise TF-IDF ve FastText kullanan LSTM algoritması tarafından elde edilmiştir. IMDb veri setinde, makine öğrenimi yöntemleri arasında en yüksek doğruluk oranı Lojistik Regresyon algoritması, derin öğrenme yöntemleri arasında ise FastText kullanan LSTM algoritması tarafından elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Makine öğrenimi, Derin öğrenme, Duygu analizi, Metin temsil yöntemleri, Doğal dil işleme, Metin sınıflandırma.

Examining the Effect of Text Representation Methods on Classification Performance in Sentiment Analysis Based on Machine Learning and Deep Learning

Abstract

In this study, binary and multi-class classification were performed on two different datasets using various text representation methods in conjunction with multiple machine learning and deep learning algorithms. The text representation methods employed include TF-IDF, GloVe, Word2Vec, FastText, and Bag of Words. The machine learning algorithms applied were Naive Bayes, Logistic Regression, Support Vector Machines, Random Forest, Artificial Neural Networks, K-Nearest Neighbors, Decision Trees, XGBoost, and LightGBM. For deep learning algorithms, Convolutional Neural Networks, Recurrent Neural Networks, and Long Short-Term Memory were utilized. The performance of the text representation methods and algorithms was compared based on the results obtained. In the Amazon dataset, the highest accuracy among the machine learning methods was achieved by the LightGBM algorithm. Among the deep learning methods, the LSTM algorithm using TF-IDF and FastText achieved the highest accuracy. In the IMDb dataset, the Logistic Regression algorithm provided the highest accuracy among the machine learning methods, while the LSTM algorithm using FastText achieved the highest accuracy among the deep learning methods.

Keywords: Machine learning, Deep learning, Sentiment analysis, Text representation methods, Natural language processing, Text classification.

^{1,2,3,4,5}Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, aleyna.kahraman@bil.omu.edu.tr
durmus.sahin@bil.omu.edu.tr dilara.biyikli@bil.omu.edu.tr feyzanur.aytekin@bil.omu.edu.tr basri.darga@bil.omu.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Son yıllarda internete erişim imkânlarının artması ve sosyal medya platformlarının çoğalmasıyla birlikte büyük miktarda işlenmemiş veri ortaya çıkmıştır. Kullanıcıların bu platformlarda paylaştığı veriler, veri madenciliği ve analitik yöntemler kullanılarak anlamlı bilgi çıkarımı amacıyla analiz edilmektedir. Bu bağlamda öne çıkan çalışma alanlarından biri de duygu analizidir. Duygu analizi, metinlerin olumlu, olumsuz veya nötr olarak sınıflandırılmasını sağlayarak insanların duygusal durumlarını anlamaya yönelik önemli bir araştırma alanıdır.

Duygu analizi, yaklaşık 20 yıl önce ortaya çıkan bir alan olarak önemli gelişmeler kaydetmiş ve ticari uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahip olmuştur. Ancak, (Poria ve ark., 2020) tarafından yapılan çalışmada vurgulandığı gibi, bu alanın olgunlaştığı algısına rağmen hâlâ keşfedilmemiş ve yeterince araştırılmamış yönler bulunmaktadır. Duygu analizi genellikle basit bir olumlu-olumsuz sınıflandırma görevi olarak algılansa da çalışma, bu görevin aslında karmaşık ve çok yönlü olduğunu, insan güdülerini, niyetleri ve bağlamsal nüansları içerdiğini vurgulamıştır. Duygu analizi çalışmalarında duyarlılık analizi, sarkazm analizi ve çok modlu duyarlılık analizi gibi alt alanlardaki çalışmaların önemine işaret edilirken, bu çalışmaların duygu analizi alanında hâlâ çözülmesi gereken sorunlara ışık tuttuğu belirtilmiştir (Poria ve ark., 2020). Bu nedenle çalışma, duygu analizi alanındaki keşfedilmemiş potansiyeli vurgulayarak bu alanda daha fazla araştırma yapma çağrısında bulunmaktadır.

Duygu analizi, özellikle pazarlama, müşteri hizmetleri ve halkla ilişkiler gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, şirketler ürün ve hizmetleri hakkında müşteri geri bildirimlerini analiz ederek, müşteri memnuniyetini artırmaya yönelik stratejiler geliştirebilir. Siyasi partiler ve kampanya yöneticileri, seçmenlerin duygusal tepkilerini ölçerek seçim stratejilerini şekillendirebilir. Aynı şekilde, medya ve eğlence sektörü de izleyici tepkilerini analiz ederek içerik üretiminde bulunabilir.

Makine öğrenimi ve derin öğrenme tekniklerindeki gelişmeler, duygu analizinin doğruluğunu ve verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu teknolojiler sayesinde, büyük veri kümelerinden karmaşık desenlerin çıkarılması mümkün hale gelmiştir.

1.1. Literatür Araştırması

(Rawat ve ark., 2022) yapmış oldukları çalışmada, aşıyla ilgili atılmış tweetleri kullanarak kamuoyunun aşıyla ilgili duyarlılığını duygu analizi yöntemiyle değerlendirmektedirler. Aşıyla ilgili tweetlerin veri seti Kaggle platformundan alınmıştır. Özel karakterler, hashtag'ler, noktalama işaretleri, bağlantılar ve satır sonları gibi metnin ilgisiz kısımlarını kaldırmak için Spacy kütüphanesi

kullanılmıştır. İlgisiz tüm kelime veya sembollerin kaldırılması için Nexttext kütüphanesi kullanılmıştır. TF-IDF yöntemini kullanarak işlenmiş tweetler vektörlere dönüştürülmüştür. Sınıflandırma işlemi için Bernoulli Naïve Bayes (BNB), Destek Vektör Sınıflandırıcı (SVC) ve Lojistik Regresyon (LR) modelleri kullanılmıştır. Veri setinde 78.771 adet olumlu tweet, 23.993 adet olumsuz tweet bulunmuş ve 125.443 tweet'in çoğunun nötr olduğu tespit edilmiştir. En yüksek doğruluk oranı %97 ile SVC modeli kullanılarak elde edilmiştir. BNB modelinin doğruluğu %81, LR modelinin doğruluğu ise %95 olarak raporlanmıştır.

(Demir ve Bilgin, 2023) tarafından yapılan çalışmada, Türkçe haber metinlerinden elde edilen veriler üzerinde BERT tabanlı dil modelleri ve makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak duygu analizi gerçekleştirilmiştir. BERT tabanlı dil modelleri olarak ALBERT, DistilBERT ve RoBERTa, makine öğrenme algoritmaları olarak ise Naive Bayes, Destek Vektör Makinesi ve Rastgele Orman yöntemleri kullanılmıştır. Veri seti 5000 adet olumlu ve olumsuz cümle içermektedir ve verilerin %90'ı eğitim, %10'u test için kullanılmıştır. Çalışmaların sonuçları incelendiğinde, dil modelleri ile yapılan çalışmaların doğruluk değerlerinin, makine öğrenmesi algoritmalarına göre daha yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. DistilBERT, RoBERTa ve ALBERT dil modellerinin başarımları sırasıyla %80, %80 ve %77 olarak kaydedilmiştir. Makine öğrenmesi algoritmalarının sıralaması ise Naive Bayes, Destek Vektör Makinesi ve Rastgele Orman olup, elde edilen sonuçlar sırasıyla %71, %68 ve %68 olarak tespit edilmiştir.

(Öge ve Kayaalp, 2021) tarafından yapılan çalışmada, IMDB internet sayfasında yer alan film yorumlarından oluşan bir veri seti kullanılmıştır. Veri setinde 25.000 adet pozitif ve 25.000 adet negatif olarak etiketlenmiş yorum bulunmaktadır. Python programlama dilindeki kütüphaneler kullanılarak Naive Bayes, Lojistik Regresyon, Support Vector Machine, Decision Tree, Random Forest ve Artificial Neural Network sınıflandırma algoritmalarının duygu analizi kapsamında performans karşılaştırması yapılmıştır. Bag of Words, TF-IDF, Word2Vec ve FastText metin temsil yöntemleri kullanılarak temizlenmiş veri seti sayısal olarak temsil edilmiştir. Veri setinin eğitimi ve test edilmesi aşamasında $k=5$ olacak şekilde k -fold cross validation tekniği kullanılmıştır. 6 farklı sınıflandırma yöntemi için elde edilen sonuçlar doğruluk, kesinlik, geri çağırma ve F1 score hesaplanarak ayrıntılı bir karşılaştırma yapılmış ve sonuçlar kaydedilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında en iyi performans, 0.87 doğruluk, 0.87 kesinlik, 0.88 geri çağırma değerleriyle 9.7 saniyede Word2Vec ile Lojistik Regresyon yöntemi kullanılarak elde edilmiştir.

(Rumelli ve ark., 2019) tarafından Türkçe metinler için bir duygu analizi modeli geliştirilmiştir. Bu model geliştirilirken, sözlük tabanlı yaklaşımlar ile makine öğrenmesi algoritmaları birlikte kullanılmıştır. Duygu analizinin en temel yöntemi olarak, cümlenin içindeki her kelimenin sözlükteki puan değerine bakarak toplama dayalı bir model ile hesaplama yapılmıştır. Makine öğrenmesi modelleri, metinlerin polarite puanlarını baz alarak doğru sonuçlar bulan duygu analizi yapmak için

eğitilmiştir. Projede NB, RF, SVM ve k-NN algoritmaları olmak üzere dört farklı makine öğrenmesi yöntemi kullanılmıştır. NB ve SVM için R dilindeki 'e1071' kütüphanesi kullanılmıştır. SVM algoritması için maliyet çekirdeği ve gama değerlerini değiştirme olanağı bu paket tarafından sağlanmıştır. Projede radyal, lineer ve polinom çekirdekler değiştirilerek model hayata geçirilmiş ve RF için "randomForest" isimli paket kullanılarak 'tree' parametresi 100, 425 ve 750 olarak değiştirilerek model eğitilmiştir. kNN algoritması için 'class' kütüphanesi kullanılmış ve k değeri sadece tek sayılar kontrol edilerek 3'ten 71'e çıkarılmıştır. Son olarak doğrulama setindeki performansı yüksek olduğundan k değeri 33 olarak belirlenmiştir. Çapraz doğrulamanın, makine öğrenimi yöntemlerinin değerlendirilmesi üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, 100 defa çapraz doğrulama yapılmıştır. Veri setinin %80'i eğitim, %20'si test verisi olarak bölünmüştür. Tüm modellerin ortalama doğruluğunun 0.73 civarında değiştiği görülmüştür. Bu da modellerin doğrulukları arasında çok büyük bir fark olmadığını göstermektedir. NB ve kNN 1 dakikadan az sürede işlemi tamamlarken, SVM ve RF'nin daha uzun süreye ihtiyaç duyduğu gözlemlenmiştir.

(Poornima ve Priya, 2020) tarafından yapılan çalışmada, Twitter verileri kullanılarak cümle sınıflandırmasında SVM, Multinomial Naive Bayes ve Lojistik Regresyon algoritmalarının performans karşılaştırması yapılmıştır. Twitter'dan alınan ham tweetler genellikle gürültülü bir veri kümesine neden olmaktadır. Çeşitli yöntemler kullanılarak veri seti temizlenmiştir. Bigramlar kullanılarak veri kümesinden özellikler çıkarılmıştır. Bu özellikler, sınıflandırmada olumsuzluğu modellemek için etkili bir yol sağlamıştır. Lojistik regresyonun doğruluğunun %86.23, destek vektör makinesinin doğruluğunun %85.69 ve Multinomial Naive Bayes'in doğruluğunun %83.54 olduğu gözlemlenmiştir.

(Sharma ve ark., 2023) tarafından yapılmış olan çalışmada, çok terimli Naive Bayes, Destek Vektör Makineleri ve Lojistik Regresyon'dan yararlanarak duygu analizi çalışmalarında kullanılan tüm makine öğrenimi yaklaşımları için araştırma yapılmış, karşılaştırma analizi yapılmış ve performans değerlendirme verileri sunulmuştur. CNN ve LSTM gibi derin öğrenme modellerinin, fikir madenciliği ve duygu sınıflandırma görevlerini gerçekleştirmek için kullanıldığında diğer modellerden daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Makine öğrenimi modeli olan Rastgele Orman (RF) ve derin öğrenme modeli olan RNN'in performansının benzer olabileceği, ancak sınıflandırıcıların veri kümelerine göre değişen eğilimlerinin olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlara göre en iyi doğruluk oranı %93.5 ile CNN kullanılarak elde edilmiştir. Aynı veri kümesinde yapılan çalışmada, LSTM'nin %77.75 doğruluğa sahip olduğu gözlemlenmiştir.

(Joshi ve ark., 2023) tarafından yapılan çalışmada, duygusal analiz ve kategorizasyon için Twitter verileri kullanılmıştır. Duygu analizinin uygun veri görselleştirmesi ve ön işleminin gerekli olduğu belirtilmiştir. Makine öğrenimi algoritması kullanılarak olumlu veya olumsuz duyguların

analizi yapılmıştır. Naive Bayes sınıflandırma algoritması kullanılmıştır. Verilerin kesinlik değerlerinin RF yönteminde %75, karar ağacı yönteminde %75.36, eğitimde %84.93 ve testte %78.58 olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

(He ve ark., 2023) tarafından yapılan çalışmada, çevrimiçi ürün deneyimi elde etmeyi amaçlayan ve metin analiz tekniklerini makine öğrenimi algoritmalarıyla birleştiren bir füzyon duyarlılığı analizi yöntemi geliştirilmiştir. Yöntem temel olarak üç adımdan oluşmaktadır. İlk olarak, duygu sözlüğünün duygusal bilgiye duyarlılığından esinlenerek, sözlük duygu özellikleri çıkarılmıştır. Daha sonra, incelemelerin duyarlılık kutuplarını belirlemek için SVM algoritması kullanılmıştır. Buna dayanarak, duyarlılık konuları LDA modeli aracılığıyla incelemelerden çıkarılmıştır. Ayrıca, duygusal bilgilerin atlanmasını önlemek için sözlük anlamsal benzerliğe dayalı olarak genişletilmiştir. Tüketicilerin Amazon'daki çevrimiçi kitap okuma deneyimlerinin araştırılması, yöntemin uygulanabilirliğini ve geçerliliğini doğrulamıştır. Sonuçlar, yöntemin incelemelerin duygusal eğilimlerini doğru bir şekilde belirlediğini ve incelemelerden okuma deneyimlerini etkileyen unsurları yakaladığını göstermektedir. Genel olarak, araştırmanın çevrimiçi ürün deneyimini araştırmak ve müşteri taleplerini takip etmek için etkili bir yol sağladığı, gelecekteki ürün iyileştirme ve pazarlama stratejisi optimizasyonunu güçlü bir şekilde desteklediği görülmüştür.

(Dhariwal ve ark., 2023) tarafından yapılan çalışmada, sesli duygu analizi araçlarından transkripsiyon hizmetlerine ve doğal dil işleme tekniklerine kadar geniş bir yelpazede kullanılan hesaplamalı bir yaklaşım olan "çatallama ve karıştırma" yönteminin önerilmesi amaçlanmıştır. Metin duyarlılığı analizi sözlüklerini, AssemblyAI ve VADER gibi, ses verilerinden duyguları çıkarmak ve kategorilere ayırmak için kullanarak gerçek zamanlı duyarlılık analizi modeli oluşturmak hedeflenmiştir. Bu analizin sonuçları, tüm Hindistan Radyosu'nun 'Akashwani' tarafından yapılan radyo yayınlarında ifade edilen duygulardaki kalıpları ve eğilimleri ortaya koyarak haber servislerinin duygu analizi konusundaki yöntemlerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Metin duyarlılığı analizi ve sesli duyarlılık analizi arasındaki avantaj ve dezavantajları değerlendiren araştırma, bu iki yöntemin birleşimiyle daha kapsamlı ve etkili bir sonuç elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, bu çalışmanın gelecekte afet yönetimi gibi gerçek dünya sorunlarına çözüm bulmak ve radyo sinyallerinin kullanıldığı iletişimdeki rolünü güçlendirmek adına önemli bir araştırma kaynağı olabileceği vurgulanmıştır. Ancak, analiz modellerini çalıştıran bağımsız bir sistem geliştirmenin zorlukları, modelin eğitildiği veri setinin kalitesi ve çeşitliliği, afet yönetimi durumlarında kullanılacak olan NVV veri setlerinin ihtiyaçları gibi konular da ele alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

(Li ve ark., 2020) tarafından yapılan çalışmada, canlı yorumlama platformu Danmaku üzerine odaklanılmıştır. Danmaku, kullanıcıların videoları izlerken gerçek zamanlı olarak yorum yapabildikleri bir sistemdir. Ancak, mevcut duygu sınıflandırma yöntemleri Danmaku verileri için

uygun değildir. Bu sorunu çözmek için makalede bir duygu sözlüğü oluşturulmuş ve Naive Bayes tabanlı yeni bir yöntem önerilmiştir. Tencent Video'dan seçilen Danmaku verileri üzerinde yapılan testler, önerilen SDD-NB modelinin diğerlerine göre %14.8 daha yüksek doğruluk oranına sahip olduğunu göstermiştir.

(Fu ve ark., 2018) tarafından yapılan çalışmada, duygu analizi için kullanılan LSTM'lerin başarılı bir yöntem olarak vurgulandığı ancak yalnızca kelime gömmelerinin yetersiz olduğu belirtilmiştir. Bu eksikliği gidermek amacıyla LE-LSTM adlı bir sözlük ile geliştirilmiş LSTM modeli önerilmiştir. GloVe kullanılarak yapılan deneylerde, LE-LSTM'nin standart LSTM modeline kıyasla %2 daha yüksek doğruluk elde ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, duygu kelimesinin dil bilimsel rolünü modellemek için kayıp fonksiyonuna düzenleyici eklenmesi ve farklı boyutlardaki CNN mimarisi de metin kategorizasyonu için önerilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde, LE-LSTM, Bi-LSTM ve Tree-LSTM modellerinin tüm veri kümelerinde standart LSTM'den daha iyi performans sergilediği gösterilmiştir. Bu modellerin test edildiği beş veri kümesi (IMDB, Yelp2013, NB4000, MR ve Book4000) üzerinde elde edilen sonuçlar tarafından, özellikle LE-LSTM'nin diğer modellere göre daha etkili olduğunu ortaya konmuştur. Bu önerilen model, kelime gömülerinin anlamsal bilgi taşıma sorununu çözmek ve duygu analizi performansını artırmak için etkili bir yöntem sunmaktadır.

(Wang ve ark., 2021) tarafından yapılan çalışmada, geleneksel kelime gösterimine duygu bilgisi ekleyememe sorununu çözmek amacıyla Word2Vec ve GloVe temelli RGWE yöntemi önerilmektedir. RGWE yöntemiyle duyarlılık, konum ve POS özelliklerini ekleyerek duygu analizinin doğruluğunun artırılması hedeflenmektedir. Yapılan deneylerde, RGWE'nin SSWE ve Seninfo+TF-IDF'ye göre daha iyi bir performans sergilediği görülmüştür. İkili sınıflandırma, üçlü sınıflandırma ve CNN için sırasıyla %89.86, %69.1 ve %48.85 ortalama F1 değerleri elde edilmiştir. Bu başarı, SemEval, SST1, SST2, IMDB, Amazon ve Yelp gibi altı klasik veri kümesi üzerinde gözlemlenmiştir. RGWE, duygusal içerikli metin analizi için güçlü bir kelime gömme teknolojisi olarak öne çıkmaktadır.

(Zhang ve Zheng, 2016) tarafından yapılan çalışmada, Çince metinler üzerinde duygu analizi için TF-IDF ile ağırlıklı özellik hesaplaması kullanılmıştır. SVM ve ELM (Extreme Learning Machine) çekirdekli modeli, eğitim örnek kümesini öğrenerek test kümesinde duygu sınıflandırma problemini çözmek için kullanılmıştır. Çalışmada, ELM'nin yüksek verimliliği ve uygulanabilirliği ile duygu analizi alanında önemli bir çözüm sunduğu vurgulanmıştır. Metin dosyaları kullanılarak oluşturulan veri setinde, gürültü temizleme, segmentasyon ve durdurma kelimesi filtreleme gibi adımlar gerçekleştirilmiştir. TF-IDF kullanılarak belgeler arasındaki fark belirlenmiş ve MATLAB ortamında simülasyonlar yapılmıştır. Deney sonuçlarıyla, çekirdekli ELM'nin Çince metinlerde duygu analizi uygulamalarında SVM'ye kıyasla daha etkili olduğu gösterilmiştir. Hem doğruluk oranları hem de eğitim-test süreleri açısından çekirdekli ELM, avantajlı bir performans sergilemiştir.

Bu çalışma ile Çince metinlerde duygu analizinde yeni yaklaşımların ve çözümlerin geliştirilmesine katkı sağlanmıştır.

(Xu ve Song, 2023) yapmış oldukları çalışmada, metin duygu sınıflandırması alanında geleneksel ve derin öğrenme modellerini aşan yeni bir yaklaşım sunmuştur. Çalışmada, BERT ile birleştirilmiş iki hibrit sinir ağı modeli tanıtılmış ve bu modeller Chnsenticrop ve Weibo veri kümeleri üzerinde eğitilmiştir. Veriler, temizlenmiş ve SST-2 formatına dönüştürülmüş olup, 80:20 oranında eğitim-test setlerine ayrılmıştır. Kelime tabanlı metinler, 512 boyutlu Word2Vec vektörleri kullanılarak temsil edilmiştir. Çeşitli yöntemler, örneğin CNN, LSTM, GRU, Bert+BiLSTM ve Bert+CNN karşılaştırılmış ve en etkili yaklaşım belirlenmiştir. Bert+CNN modelinin, diğerlerine göre daha yüksek doğruluk, geri çağırma ve F1 skorlarına sahip olduğu gösterilmiştir. LSTM'nin en yüksek geri çağırma oranını, GRU'nun ise en yüksek F1 puanını elde ettiği belirtilmiştir. Analiz sonuçları, metin duygu sınıflandırmasında Bert+CNN modelinin etkili bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

(Rizk ve Asal, 2021) tarafından yapılan çalışmada, çeşitli makine öğrenimi, sinir ağları ve kelime gömme modellerini değerlendiren kapsamlı bir çalışmanın özeti sunulmuştur. Araştırmada, BERT ile LSTM-çift yönlü kodlama modelinin en yüksek test doğruluğuna ulaştığını ve kelime gövdeleri ile derin öğrenme mimarilerinin geleneksel modellere göre üstün performans sergilediğini gösterilmiştir. Ayrıca, Word2Vec'in farklı modellerle birleştirilmesini inceleyen çalışmada, bu hibrit yaklaşımın %89.2'lik bir doğruluk oranıyla diğer modellere göre daha etkili olduğu ortaya konmuştur. DistilBERT adlı önceden eğitilmiş bir dil modelinin tanıtıldığı ve orijinal BERT'e kıyasla %40 daha küçük, %97 oranında bilgi koruyabilen ve %60 daha hızlı olduğu kanıtlanmıştır. Araştırmada, IMDB film incelemeleri üzerinde yapılan denemelerde, Transformatörden Çift Yönlü Kodlayıcı Temsilleri (BERT) gömülü Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) modelinin %93'lük doğrulukla en iyi performansı sergilediği sonucuna ulaşılmıştır. Bu bağlamda, DistilBERT'in daha küçük boyutta ve hızlı çalıştığı vurgulanmıştır.

(Hammad ve Anwar, 2019) yapmış oldukları çalışmada, Sindhi dilinde duygu analizi gerçekleştirmek için denetimli makine öğrenimi tekniklerinden faydalanmışlardır. Sindhi tweetlerini içeren bir veri kümesi, önceden tanımlanmış sözlüksel veri tabanı ve Google Translate API yardımıyla etiketlenmiştir. Veri kümesi, temizlenmiş ve tokenizasyon işleminden geçirilmiştir. Duygu analizi için SVM, NB, DT ve k-NN algoritmaları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Sindhi tweet veri setinde DT ve k-NN algoritmalarının iyi bir performans sergilediğini, SVM'nin bunları takip ettiğini göstermektedir. Özellikle SVM'nin, doğruluk, kesinlik, geri çağırma ve F1 puanı ölçütlerinde yüksek bir performans sergilediği belirtilmiştir. Veri kümesi boyutları arttıkça doğruluk değerlerinin arttığı, ancak kesinlik ve geri çağırma değerlerinin değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, Sindhi dilinde duygu analizi için denetimli makine öğrenimi

yöntemlerini değerlendiren bu araştırmada, özellikle SVM'nin yüksek performans gösterdiğini vurgulanmıştır.

(Pandya ve ark., 2021) yapmış oldukları çalışmada, makine öğrenimi ve derin öğrenme modelleri kullanarak Twitter duygu analizi yapmayı hedeflemişlerdir. 1.6 milyon tweet, bu çalışmanın veri kümesi olarak kullanılmış ve tweetler olumlu veya olumsuz duygulara göre sınıflandırılmıştır. Bu amaçla Naive Bayes ve Destek Vektör Makineleri gibi geleneksel makine öğrenimi modelleri kullanılmıştır. Makine öğrenimi ve derin öğrenme modellerini eğitmek için Sentiment140 veri kümesi kullanılmış olup, bu küme 800.000 negatif ve 800.000 pozitif tweet içermektedir. Veriler, ön işleme tabi tutulmuş; tweetlerden kullanıcı adı, bağlantı, noktalama işaretleri, rakamlar ve stopwords gibi ifadeler kaldırılmış ve tüm harfler küçük harfe dönüştürülmüştür. Daha sonra bu veriler köklerine ayrıştırılmıştır. Elde edilen veri kümesi görselleştirilerek negatif ve pozitif kelime bulutu oluşturulmuştur. Veri kümesi kelimelerden oluştuğu için, vektöre dönüştürmek amacıyla Word2Vec modeli kullanılmıştır. Veri kümesi %80 eğitim ve %20 test olarak iki ayrı kümeye dönüştürülmüştür; toplam tweet sayısı üzerinden 1.28 milyon tweet eğitim için, 320.000 tweet test için kullanılmıştır. Model eğitimlerinde Naive Bayes (NB), Destek Vektör Makineleri (SVM), RNN, LSTM ve Bi-LSTM kullanılmıştır. Sonuçlar doğruluk, F1 skoru, geri çağırma skoru ve hassasiyete göre karşılaştırılmıştır. Destek Vektör Makineleri %76.53 doğrulukla daha iyi performans sergilemiştir. Ancak, derin öğrenme modelleri makine öğrenimi modellerine göre daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir.

(Singh ve ark., 2022) tarafından yapılan çalışmada, TF-IDF ve makine öğrenimi algoritmaları kullanılmıştır. Veri kümesi olarak ABD Havayolları duyarlılık tweetleri kullanılmıştır. Tweetler olumlu, olumsuz ve nötr olmak üzere üç kategoride sınıflandırılmıştır. Veriler önce ön işleme tabi tutulmuş; gereksiz kelimeler ve noktalama işaretleri gibi karakterler silinmiş ve büyük harfler küçük harflere dönüştürülmüştür. Geriye kalan metin daha küçük parçalara bölünerek tokenizasyon işlemi uygulanmıştır. Daha sonra sözcüklerin köküne indirgemek için stemming işlemi yapılmıştır. Kalan verilere TF-IDF yöntemi uygulanarak kelimelerin uygulanma sıklığı elde edilmiştir. Veri kümesi, %80 eğitim ve %20 test olarak ayrılmıştır. Bu çalışmada RF, GB, XGBoost ve SVM olmak üzere dört sınıflandırma tekniği doğruluk, hassasiyet, hatırlama ve F1 skoru ölçütlerine göre karşılaştırılmıştır. SVM'nin %83.74 oranı ile en yüksek doğruluğu elde ettiği görülmüştür. Aynı zamanda, %84 hassasiyet ve %87.85 F1 skoru ile diğer tekniklerden daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

(Kim, 2021) yapmış olduğu çalışmada, müşteri yorumlarının inovasyon yöneticileri için önemli bir kaynak olduğunu vurgulayarak, duygu analizinin bu yorumlardan elde edilen istatistiksel verilerle mümkün olduğu bir perspektife odaklanmıştır. Metin madenciliği yöntemlerini kullanarak müşteri duyarlılığını değerlendirmek amacıyla çeşitli ölçütler önerilmiş ve Linguistic Inquiry and Word

Count (LIWC) gibi metin madenciliği paketleri üzerindeki alternatifler incelenmiştir. Duyarlılık analizi için pozitif ve negatif eğilimli kelimelerin sayılarına dayanan bir yaklaşım benimsenmiş ve bu yöntemlerin sınırlamaları tartışılmıştır. Çalışmada, duyarlılık puanları ile çevrimiçi inceleme derecelendirmeleri arasındaki dağılım farkını göstererek özellikle çevrimiçi derecelendirmelerin öznel olduğunu vurgulanmıştır. Ayrıca, pazarlamacıların müşteri görüşlerini değerlendirmek ve karşılaştırmak için duyarlılık puanlarını kullanabileceği alternatif yollar sunulmuştur. Sonuç olarak, metin madenciliği ve duygu analizinin pazarlamacılara müşteri geri bildirimlerini etkili bir şekilde değerlendirme ve inovasyon performanslarını ölçme konusunda yardımcı olabileceği öne sürülmüştür.

(Chandra ve Jana, 2020) yapmış oldukları çalışmada, duygu analizi konusundaki araştırmalara ve kullanılan yöntemlere odaklanılarak insanların görüşlerini, duygularını ve tutumlarını belirli konularla ilişkilendiren bir alana dikkat çekilmiştir. Makine öğrenimi ve derin öğrenme tekniklerinin dil işleme istatistiksel yöntemleriyle birleştirilmesi ile duygu analizinin gelişimine önemli katkılar sağlanmıştır. Sosyal medyanın etkisi ve kullanıcıların duygularını dijital medya aracılığıyla ifade etmeleriyle, özellikle Twitter gibi platformlarda zengin bir veri kaynağı oluşturulmuştur. Duygu analizi için kullanılan çeşitli yöntemler ve teknikler, duyarlılık sözlüklerinin algoritmik oluşturulması, duyarlılık endeksi oluşturma ve önem değerlendirmesi gibi aşamaları kapsamaktadır. Çalışmada, bu yöntemlerin yanı sıra derin öğrenme modelleri ve makine öğrenimi sınıflandırıcıları kullanarak gerçekleştirilen duygu analizi için önerilen yaklaşımlar detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Derin öğrenme modelleriyle yapılan deneylerde, çeşitli modellerin performansları karşılaştırılmış ve LSTM-CNN'nin en iyi sınıflandırma sonuçlarını verdiği sonucuna varılmıştır. Deneyler ve sonuçların analizi bölümünde, Twitter API ve çeşitli konulardaki veri kümeleri kullanarak gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarına odaklanılmıştır. Makine öğrenimi modellerinin doğruluk yüzdesinin %81 ile %90 arasında kaldığı belirtilirken, derin öğrenme modellerinin %85 ile %97 aralığında daha iyi sonuçlar elde ettiği vurgulanmıştır. Sonuç ve gelecek kapsamı bölümünde, derin öğrenme modellerinin daha iyi performans gösterdiği ve gelecekte bu alanda yapılacak çalışmaların bu modellerin tasarımı ve uygulanması üzerine odaklanabileceği sonucuna varılmıştır. Sosyal medya verilerinin analizinin, işletmelere bilgilendirici iç görüler ve gelir sağlama potansiyeli sunduğu belirtilmiştir.

(Saraswat ve ark., 2023) yapmış oldukları çalışmada, ses dosyalarının makine öğrenimi kullanılarak duygu analizi yapılması ve ses verilerinin metinsel sınıflandırma ile analiz edilmesi hedeflenmiştir. Duygu analizi, genellikle metin madenciliği teknikleri ile işlenen verilere odaklanmıştır. Ancak, ses verilerinin duygu analizi alanındaki araştırmalar hala erken aşamadır. Ses verilerinin analizinde kullanılan temel özellikler arasında ses frekansı, konuşma öznitelikleri ve zamansal öznitelikler bulunmaktadır. Projenin temelini oluşturan sistem mimarisi, ses dosyalarından

metin transkriptleri oluşturmaya içermektedir. Bu transkriptler, daha sonra çeşitli metin madenciliği araçları kullanılarak işlenir. Metin verileri analize hazırlanırken önce ses dosyalarının metne dönüştürülmesi, ardından ön işleme adımları ile belirli bir özellik kümesinin çıkarılması gerçekleştirilir. Son olarak, denetimli öğrenme teknikleri kullanılarak metin transkriptleri kategorize edilir. Naïve Bayes, Lojistik Regresyon ve Sayım Vektörleştirici gibi çeşitli sınıflandırma algoritmaları kullanılarak duygu analizi gerçekleştirilir. Naïve Bayes sınıflandırıcısı kullanılarak elde edilen sonuçlar, özellikle pozitif ve nötr duyguların tanınmasında yüksek doğruluk göstermektedir. Duygu analizörü, çeşitli duyguları tanıma doğruluğuyla şu sonuçları vermektedir: Neşe %94, Üzüntü %93, Öfke %85, Korku %74, İğrenme %70, Utanç %56, Sürpriz %52. Duygu analizörünün başarı oranının, güçlü duygusal değerlere sahip kelimelerin konuşmada belirgin bir şekilde kullanılmasına bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Bu kelimeler, tahmin skorunu ve doğruluğunu etkilemede önemli bir rol oynamaktadır. Model, 34.000'den fazla veri noktası üzerinde eğitildiği için %86'lık bir doğruluk sağlamaktadır, bu da diğer ses duygu analizörlerine kıyasla (metinsel sınıflandırma tabanlı ve harici donanım cihazına ihtiyaç duymadan) oldukça yüksektir. Daha büyük veri setleri ve gelişmiş veri temizleme teknikleri kullanılarak gelecekteki çalışmaların, duygu analizi alanında daha kesin ve güvenilir sonuçlara ulaşabileceği belirtilmiştir.

(Can ve Alataş, 2017) çalışmasında, sosyal medyanın ve internet üzerindeki sosyal ağların giderek daha fazla önem kazanmasıyla birlikte popülerleşen duygu analizi konusu genel hatlarıyla ele alınmıştır. Bu kapsamda, duygu analizi üzerine yapılan araştırmalar incelenmiş, kullanılan algoritmalar ve uygulamalar detaylandırılmıştır. Güncel bir değerlendirme yapabilmek adına son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar analiz edilmiş ve belirli kategorilere ayrılarak sunulmuştur. Bu araştırmalar, duygu analizi tekniklerini gerçek dünya problemlerine uygulayarak alana önemli katkılar sağlamıştır. İncelemeler sonucunda, duygu sınıflandırması ve özellik seçimi algoritmalarının geliştirilmesinin halen önemli bir araştırma alanı olduğu görülmüştür. Ayrıca, duygu sınıflandırma problemlerinin çözümünde en yaygın kullanılan makine öğrenme algoritmalarının Naive Bayes ve Destek Vektör Makineleri olduğu tespit edilmiştir. Yapılan analizler, İngilizce dilinde birçok çalışma bulunduğunu ve dolayısıyla geniş bir kaynak havuzunun mevcut olduğunu ortaya koymuştur. Ancak, İngilizce dışındaki dillerde, özellikle de Türkçe alanında, kaynak ve araştırma eksikliği göze çarpmaktadır. İngilizceden sonra en yaygın kullanılan veri kaynağı olarak WordNet öne çıkmaktadır. Son dönemde duygu analizi çalışmalarında mikro-bloglar, bloglar ve forumlar gibi yeni bilgi kaynaklarının kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Bu platformlar, insanların güncel konular hakkındaki düşüncelerini ve duygularını anlamak açısından büyük bir öneme sahiptir. Daha derinlemesine analizler için ise sosyal ağ siteleri ve mikro-bloglar kritik veri kaynakları olarak değerlendirilmektedir. Bunun yanı sıra, algoritmaların test edilmesi amacıyla kullanılabilecek çeşitli veri setleri de bulunmaktadır. Genel olarak bakıldığında, duygu analizi alanında hâlâ tartışmaya açık

pek çok konu olduğu ve özellikle Türkçe üzerine yapılan çalışmaların yetersiz kaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

(Satrya ve ark., 2022) tarafından yapılan çalışmada, Twitter üzerindeki kripto para birimleri ile ilgili olumlu ve olumsuz eğilimlerin incelenerek, toplumun bu dijital varlıklara yönelik tutumlarının anlaşılması amaçlanmıştır. Duygu analizi veya fikir madenciliği yöntemleri kullanılarak Twitter'daki veriler sınıflandırılmış ve olumlu ve olumsuz eğilimler ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Bu analiz, özellikle Bitcoin'e odaklanarak kripto para birimlerinin genel algısını belirleyebilir ve yatırımcılar ile işletmeler için önemli bir referans olabilir. Araştırmacılar, daha önceki çalışmaların incelenmesine dayanarak bu çalışmada SVM algoritmasını kullanmışlardır. Literatürde SVM'nin duygu analizi konusunda yüksek doğruluk sağladığı belirtilmiştir. Elde edilen Twitter verileri SVM kullanarak sınıflandırılarak olumlu ve olumsuz eğilimlere dair sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Veri toplama işlemi, Twint kütüphanesi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve Twitter API'sine gerek duyulmamıştır. Elde edilen veriler öncelikle temizlenmiş ve duygu analizi için uygun hale getirilmiştir. Veri kümesinin dengesizliği, alt örnekleme yöntemi kullanılarak ele alınmış ve analiz için hazırlanan veriler SVM algoritmasıyla işlenmiştir. Sonuçlar, kullanılan yöntemin yüksek doğruluk değerleri elde ettiğini göstermiştir. 80:20 oranında eğitim-test bölme durumunda en yüksek doğruluk %94.64 olarak bulunmuştur. Hassasiyet, özgüllük ve F1 skoru gibi değerler de incelendiğinde, SVM algoritmasının kripto para duygu analizi konusunda etkili bir araç olduğu görülmüştür. Bu sayısal değerler, analizin güvenilirliğini ve gerçek dünya uygulamalarındaki potansiyel etkisini daha fazla vurgulamaktadır.

(Sarkar ve Bhowmick, 2017) tarafından yapılan çalışmada Bengalce tweetler üzerinde duygu analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, Multinomial Naive Bayes ve SVM gibi sınıflandırıcılar kullanarak duygu kutupluluğu tespiti yapılmıştır. N-gram Tokenizer ve SentiWordnet gibi yöntemler kullanılarak veriler işlenmiştir. Veriler, olumluluk, olumsuzluk ve tarafsızlık olmak üzere üç duyarlılık puanına göre sınıflandırılmıştır. Öncelikle veriler ön işleme tabi tutulmuş, ardından etiketli vektörlerle bir sınıflandırıcı eğitilmiş ve bu model tweetler üzerinde test edilmiştir. Kullanılan Bengalce veri kümesinde eğitim veri kümesi olarak 356 negatif, 368 pozitif ve 276 nötr tweet, test veri kümesi olarak ise 500 etiketlenmemiş tweet olmak üzere toplamda 1500 tweet bulunmaktadır. Deney sonuçlarına göre, Naive Bayes multinomial unigram ve bigram kullanılarak SentiWordnet ile %44.20 doğrulukla en iyi sonuçlar elde edilmiştir. SVM tarafından unigram ve SentiWordnet özellikleri kullanılarak %45 doğrulukla en iyi performans gösterilmiştir. Ayrıca, önerilen SVM tabanlı sistem, SAIL 2015 yarışmasında kullanılan en iyi tweet duyarlılık tespit sistemleriyle karşılaştırıldığında daha iyi performans sergilediği belirtilmiştir.

(Jayakody ve Kumara, 2021) tarafından yapılan çalışmada, Twitter'daki ürün incelemelerinin kullanılarak duygu analizi üzerinde çalışıldığı belirtilmiştir. Veri olarak 3548 açıklamalı tweet kullanılmıştır. İki farklı vektörleştirme yöntemi kullanılarak üç denetimli makine öğrenimi modeli

karşılaştırılmıştır. Veriler; SVM, Lojistik Regresyon, K-Nearest Neighbor algoritmaları kullanılarak sınıflandırılmıştır. Vektörleştirici olarak TF-IDF ve Sayım Vektörleştirici kullanılmıştır. Veriler olumlu-olumsuz duygulara göre ayrıştırılmıştır. Tweetler pozitif olanlar 1, negatif olanlar ise 0 şeklinde etiketlenmiştir. Daha sonra boş tweetler kaldırılarak kalan tweetler üstünden istenmeyen içerikler silinmiştir. 2 kelimedenden daha az tweetlerde silinerek kalan metinler küçük harfe dönüştürülüp veri hazırlama aşaması tamamlanmıştır. Eldeki veri kümesi eğitim ve test olmak üzere iki veri kümesine ayrılmıştır. Eğitim veri kümesinin oranı %70, test veri kümesinin oranı ise %30 olarak bildirilmiştir. Makine Öğrenimi algoritmaları kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında Sayım Vektörleştirici kullanılarak yapılan çalışmada Lojistik Regresyonun diğer algoritmalarla göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. TF-IDF kullanılarak yapılan çalışmada ise SVM algoritmasının %87.41 ile diğer algoritmalarla kıyasla daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Diğer bir çalışma olarak veri kümesinin bölünmesinin sonuca etkisini belirlemek için eğitim ve test olmak üzere her ikisi de %50 oranla bölünmüş ve çalışma uygulanmıştır. Sayım vektörleştirici kullanıldığında Lojistik Regresyon, TF-IDF kullanıldığında SVM algoritması daha iyi sonuç vermiştir. En doğru sonuçları ise %87.2 doğruluk oranı ile Sayım Vektörleştirici kullanılan Lojistik Regresyon algoritması tarafından verildiği görülmüştür. Genel sonucun veri bölme işleminden etkilenmediği görülmektedir.

(Bhasin ve Das, 2021) yapmış oldukları çalışmada, Apache Hadoop ile makine öğrenimi teknikleri incelenmiştir. Çalışmada ilk olarak hashtag temelinde tweetler toplanmış daha sonra bir ön işleminden geçirilmiştir. Özellik çıkarımı yapılmıştır. Makine öğrenimi modellerinden LR, NB ve SVM kullanılmıştır. Hadoop büyük verileri işlemek için kullanılan açık kaynaklı bir çerçeve olarak tanımlanmıştır. Map-Reduce algoritması bir Hadoop modülü olarak üç aşamadan oluşmaktadır; Eşleyici aşaması, Karıştırma aşaması ve İndirgeyici aşaması. Eşleyici aşaması tweetlerin girdi olarak alınıp işlenir. Karıştırma aşaması karıştırma, kopyalama ve sıralama olarak üç aşamaya ayrılmaktadır. İndirgeyici aşama ise tweetlerin pozitif ve negatif olarak belirlendiği aşamadır. Hadoop Dağıtılmış Dosya Sistemi, bir dosya sisteminin bilgisayarlar üzerinde çalışmasını sağlayan sistemdir. Apache Spark Map Reduce'un kısıtlamalarını kaldırmak için tasarlanan toplu reduce seçimi olarak tanımlanmaktadır. Hızlı sorgu yapmak için kullanılmaktadır. Çalışmanın sonucunda veri kümesinin boyutu çok büyük olduğunda Naive Bayes makine öğrenimi algoritmasının diğer algoritmalarla göre daha sağlam olduğu belirtilmiştir.

(Jagadeesan ve ark., 2022) tarafından yapılan çalışmada, Twitter duygu analizinin gerçekleştirilmesi için makine öğrenimi yöntemi kullanılmıştır. Çalışmanın amacı, Twitter'daki ırkçı, kadın düşmanı, dine ve mültecilere karşı yapılan nefret söylemlerinin makine öğrenimi kullanılarak tespit edilip tanımlanmasıdır. Metodoloji dört adımdan oluşmaktadır. İlk adım olarak, veri koleksiyonları toplanmıştır. Daha sonra, bu koleksiyonlar ön işleme tabi tutulmuş ve istenmeyen

karakterler metinden kaldırılmıştır. Tokenizasyon uygulanmış, lemmatizasyon ve stemming işlemleri uygulanarak bir kelimenin bütün alternatifleri bir kategoride sınıflandırılıp kelimenin köküne yoğunlaştırılmıştır. Bu iki işlem Doğal Dil İşleme yaklaşımıdır. Üçüncü adım olarak, özellik çıkarma uygulanmıştır. Son adımda ise duygu sınıflandırması yapılmıştır. Bu adımda, Rastgele Orman Sınıflandırıcı, Lojistik Regresyon, Karar Ağacı Sınıflandırıcı, Destek Vektör Makinesi ve XGBoost Sınıflandırıcı olmak üzere beş algoritma ile deneyler yapılmıştır. Hata matrisi oluşturularak doğruluk oranları incelenmiştir. Sonuçlara bakıldığında, doğruluk oranı %95 ile Rastgele Orman ve Destek Vektör Makinesi algoritmaları en iyi sonucu verdiği gözlemlenmiştir.

(Aytuğ, 2018) tarafından yapılan çalışmada, Twitter üzerinde duygu analizi için psikodilbilimsel bir yaklaşım benimsenmiş ve çeşitli metodolojik adımlar takip edilmiştir. Veri seti, İngilizce tweet'lerden oluşmakta olup olumlu, olumsuz ve nötr duygular içermektedir. Toplamda 12.600 tweet içeren veri seti, dengeli bir şekilde etiketlenmiş 4200 negatif, 4200 pozitif ve 4200 nötr tweet içermektedir. Veri Seti Koleksiyonu aşamasında, Twitter Streaming API ve Twitter4J kütüphanesi kullanılarak tweet'ler toplanmıştır. Veri Ön İşleme aşamasında, tweet'lerin düzensiz ve gayri resmi doğası dikkate alınarak, baş harfler, gereksiz tekrarlar ve yanlış kullanılan harfler gibi belirli sorunlar ortadan kaldırılmıştır. Özellik Mühendisliği aşamasında, duygu analizi için psikodilbilimsel özellikler çıkarmak amacıyla LIWC (Dil bilimsel Sorgulama ve Kelime Sayısı) kullanılmıştır. Bu çerçevede, dilin duygusal, bilişsel ve yapısal yönlerini tanımlamak için kullanılan bir metin analizi uygulamasıdır. Sınıflandırma Algoritmaları aşamasında, çeşitli özellik mühendisliği şemalarının tahmin performansını değerlendirmek için Naïve Bayes, Destek Vektör Makineleri, k-En Yakın Komşu algoritması ve Lojistik Regresyon kullanılmıştır. En yüksek tahmin performansı Naïve Bayes algoritması ile sağlanmıştır. Ensemble Öğrenme Yöntemleri aşamasında, topluluk öğrenme algoritmaları olan Bagging, AdaBoost ve Rastgele Altuzay yöntemleri kullanılmıştır. Bagging, farklı eğitim setleri üzerinde eğitilmiş zayıf öğrenme algoritmalarını birleştirerek daha yüksek tahmin performansı elde etmeyi amaçlayan bir yöntemdir. AdaBoost ile sınıflandırılması zor olan veri noktalarına odaklanarak sağlam bir sınıflandırma modeli oluşturulması amaçlanmaktadır. Rastgele Altuzay yöntemi, rastgele seçilen özellik altuzayları üzerinde eğitilen birden fazla sınıflandırıcıyı birleştiren bir topluluk öğrenme algoritmasıdır. Deney analizi ve sonuçlar aşamasında, 10 kat çapraz doğrulama yöntemi kullanılarak çeşitli özellik kümeleri ve sınıflandırıcılarla yapılan deneyler değerlendirilmiştir. Psikodilbilimsel özelliklerin ve topluluk öğrenme yöntemlerinin duygu analizi performansını arttırdığı gözlemlenmiştir. Özellikle, dilbilimsel süreçler, psikolojik süreçler ve kişisel kaygıların birleştirildiği topluluk özellik kümeleri, Naïve Bayes sınıflandırıcısı ile birlikte kullanıldığında %89.10'luk bir sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir. F-skoru sonuçları da sınıflandırma doğrulukları ile paralellik göstermiştir. Bu çalışmanın sonuçlarından, tweet verilerinde

duygu analizi için psikodilbilimsel özelliklerin etkili bir şekilde kullanılabileceği ve topluluk öğrenme yöntemlerinin sınıflandırma algoritmalarının performansını arttırabileceği elde edilmiştir.

(Kemaloğlu ve ark., 2021) yapmış oldukları çalışmada, Facebook, Twitter, Instagram, YouTube ve Rss verilerini kullanarak duygu analizi üzerinde çalışmaktadır. LSTM modeli, özellikle Twitter verileriyle eğitilen modeller arasında en yüksek doğruluk oranını elde etmiştir. Multinomial Naive Bayes ise %86.06 başarı oranıyla dikkat çekmektedir. Rastgele Orman algoritması, kelime tabanlı yöntemlerde %89.5 başarı sağlamıştır. Ancak özellikle TF-IDF kullanılarak geliştirilen LSTM modeli %83.3 başarı oranı vermiştir. Bu çalışmada, 5 farklı sosyal medya platformundan API'ler kullanılarak veri toplanmış ve veri seti %30 test, %70 eğitim verisi olarak ayrılmıştır. Python tabanlı bir yazılım kullanılarak geliştirilen sistemde, numpy, pandas, keras ve scikit-learn gibi kütüphaneler kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, en yüksek başarı oranı %84.46 ile LSTM modelinden elde edilmiş ve bu nedenle geliştirilen sistemle birlikte kullanılmak üzere LSTM modeli tercih edilmiştir.

(Hassan ve ark., 2021) yapmış oldukları çalışmada, tweetlerin duyarlılık analizini kullanarak COVID-19 salgınına tespit etmeye yönelik bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda Twitter veri kaynağı olarak seçilmiştir ve COVID-19 ile ilgili anahtar kelimeler içeren birçok tweet toplanmıştır. Toplanan bu veriyi daha sonra filtrelemek ve iki etikete ayırmak amacıyla farklı ön işleme teknikleri uygulanmıştır. Bu tekniklerden biri geçerli veriyi temsil ederken diğeri geçersiz veriyi ifade etmektedir. Ön işlemeden sonra ait olduğu verinin bir dizi kategorisini tanımlamak için sınıflandırma algoritmaları kullanılmıştır. Sınıflandırma için Karar Ağacı Algoritmasını, Naïve Bayes Algoritmasını ve Destek Vektör Makinesi Algoritmasını kullanılmıştır. Deneylerimiz için en uygun yolu belirlemek amacıyla dört farklı k-kat değeri kullanılmıştır. Bu adımı, araştırmanın doğruluk testlerini uyguladığı performans değerlendirme adımı izlemiştir. Deneylerden, SVM'nin verilerin doğruluk açısından sınıflandırılmasına en uygun olduğu gözlemlenmiştir. Bu araştırma, COVID-19 hastası olan ve herhangi bir nedenle test yapılmayan hastaları tespit etmek için bu tür bir yaklaşımın kullanılabileceğini göstermektedir.

(Liu ve ark., 2022) tarafından yapılan çalışma, Çince üzerinden yürütülmüş ve duygular 7 ana kategoride sınıflandırılmıştır. Bu ana kategoriler, iki ana duygu kategorisinde birleştirilmiştir. “Mutlu” ve “iyi” ifadeleri olumlu duygu; “üzgün”, “kızgın”, “korkmuş” ve “şaşkın” olumsuz duygu olarak sınıflandırılmıştır. Olumlu duyguların sıfır puandan büyük, olumsuz duyguların sıfır puandan küçük ve nötr duyguların ise sıfır puan olarak değerlendirilmesi sağlanmıştır. Bu çalışmada bazı kurallar uygulanmıştır. İlk kural olarak, olumsuz bir kelimenin bir duygudan sonra gelmesi durumunda cümlelerin duygusunun tam tersine çevrilmesi ve ona göre puanlandırma yapılması sağlanmıştır. İkinci kural olarak, karşıt bağlaç kullanıldığında cümlelerin olumsuza çevrilmesi ve puan ağırlığının eksi olması sağlanmıştır. Üçüncü kural ise derece zarflarına farklı ağırlıklar verilmesi üzerinedir. Bu kuralların birçok olumlu ve olumsuz yanlarının olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada,

duyarlılık sözlüğü ve TF-IDF yöntemini birleştiren yeni bir yöntem tasarlanmıştır. Tüm duygu kelimelerinin ağırlıkları E olarak değerlendirilmiş ve bir metnin toplam ağırlığı 1 olarak sınırlandırılmıştır. Daha sonra, ağırlığın ikiye bölünmesi ve tüm duygu kelimelerine a, nötr kelimelere ise 1-a ifadesinin TF-IDF değerleriyle orantılı olarak atanması sağlanmıştır. Bu verilerle bir denklem elde edilmiştir. Duygu analizi için Yu Hua'nın "Çiseleyen Yağmurda Çılgınlıklar" adlı romanı 16 bölüm şeklinde ayrıştırılarak veri olarak kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, toplamda 2079 cümlelerin analiz edildiği gözlemlenmiştir. Metindeki verilerin duygu dağılımı incelendiğinde, romanın daha çok olumsuz duygular içerdiği tespit edilmiştir. Değerlendirme olarak kesinlik, geri çağırma ve f1 puanı hesaplanmıştır. Duygu sözlüğüne dayalı kurallar, TF-IDF ve bu çalışmada önerilen yöntemlerin doğruluk oranı karşılaştırıldığında en yüksek oranı önerilen yöntemin sağladığı belirtilmiştir. Geri çağırma için yöntemler karşılaştırıldığında, pozitif duygularda en yüksek oranı duygu sözlüğüne dayalı kurallar, nötr ve negatif duygularda ise önerilen yöntemin sağladığı gözlemlenmiştir. F1 skoru karşılaştırıldığında, üç durumda da en yüksek oranı önerilen yöntemin verdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, önerilen yöntemin en iyi performansı gösterdiği belirtilmiştir.

(Başarslan ve Kayaalp, 2023) yapmış oldukları çalışmada, TripAdvisor ve Rotten Tomatoes gibi web sitelerindeki açık kullanıcı geri bildirimlerine duygu analizi uygulanmıştır. Word2Vec ve TF-IDF yöntemleri kullanılarak dört makine öğrenme ve iki topluluk öğrenme yöntemiyle sonuçlar elde edilmiştir. Topluluk öğrenme, özellikle çoğunluk oylaması, tekli öğrenme yöntemlerinden daha etkili sonuçlar gösterdiği belirtilmiştir. Eğitim-test ayrımları %80-%20 ve %70-%30 olarak iki şekilde yapılmıştır. Metin ön işleme adımları arasında yorum temizleme, özel karakterleri çıkarma, küçük harfe dönüştürme ve stemming yer almaktadır. LR, SVM, NB ve KNN sınıflandırıcıları kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde, scikit-learn kütüphanesi Python ile uygulanmıştır. Bu çalışmada, topluluk öğrenme yöntemlerinin duyarlılık sınıflandırma sürecine önemli katkı sağladığı gösterilmiştir.

(Karayığit ve ark., 2018) tarafından yapılan çalışmanın amacı, öğrenciler tarafından toplanan Türkçe tweetler aracılığıyla sistem hakkındaki düşünceleri öğrenmek ve duygu analizi yapmaktır. Türkçe dilinde duygu analizi için makine öğrenmesi yaklaşımlarının daha iyi performans gerçekleştirdiği yapılan araştırmalarla ortaya konulmuştur. Bu nedenle bu çalışmada makine öğrenimi tabanlı yöntemler tercih edilmiştir. Twitter aracılığıyla konu ile ilgili hashtag kullanılarak 63699 adet tweet toplanmıştır. Veri ön işleme dört adıma ayrılmıştır: temizleme, normalizasyon, tokenizasyon ve durak kelimeleri kaldırma. Temizleme kısmında gereksiz kelimeler, bağlantılar veri kümesinden çıkarılmıştır. Yabancı dil kullanılan tweetler "Language Detection API" ile tespit edilip aynı şekilde veri kümesinden çıkarılmıştır. Geriye 4652 adet tweet kalmıştır. Normalleştirme kısmında ise noktalama işaretleri kaldırılmış ve tüm harfler küçük harfe dönüştürülmüştür. Tokenizasyon kısmında kalan veriyi anlamlı parçalara bölme işlemi yapılmıştır. Son adımda durak

kelimeler çıkarılarak kalan metin daha anlamlı hale getirilmiştir. Duygu analizinde üç ayrı duygu kullanılmıştır; olumlu, olumsuz ve nötr. Vektör uzayı modeli olarak ise Bag of Words ve TF-IDF kullanılmıştır. Duygu sınıflandırması için bu çalışmada Destek Vektör Makinesi, Lojistik Regresyon, K-En Yakın Komşu ve Yapay Sinir Ağları kullanılmıştır. Veri seti 1075 negatif, 3345 nötr ve 232 pozitif veriden oluşmaktadır. Veri setinde açık bir şekilde görülen dengesizlik vardır. Bu sebeple karşılaştırma için F1 skoru kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde Lojistik Regresyon sınıflandırıcının TF-IDF ve BoW vektör uzaylarını kullanarak diğer makine öğrenimi yöntemlerine göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Detaylı incelemede SVM, ANN ve kNN yöntemlerinin BoW vektör uzayı modeli kullanılan çalışmada, LR yönteminin ise TF-IDF modeli kullanan çalışmada çok daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

(Aydın ve ark., 2021) yapmış oldukları çalışmada, duygu analizi ve fikir madenciliği arasındaki ilişkiyi açıklayarak bunlar üzerinde bir inceleme yapmak amaçlanmıştır. Ayrıca bu çalışmada Türkçe'nin diğer dillerden daha farklı olmasına ve bir kelime ile bir cümle kurulabilmesine dikkat çekilmiş, duygu analizi yaparken başka bir dilin modellerinin kullanılamayacağı fakat duygu analizinde kullanılan yöntemlerin kullanılabileceği vurgulanmıştır. Duygu analizi ve fikir madenciliği incelendiğinde fikir madenciliğinin akademik alanda, duygu analizinin ise endüstride kullanıldığı görülmektedir. Farklılıklar olsa dahi iki alanında birlikte çalıştığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar kısmında Türkçe duygu analizi yapmak için veri kümesi bulunmaması gibi zorluklar yaşandığına, bu zorlukların sosyal medyadan veri elde edilmesi ile aşılabileceğine değinilmiştir. Aynı zamanda bu konu ile ilgili yapılan projelerin yetersiz olması gereken bütçenin sağlanması ile aşılabileceği belirtilmiştir. Eğitim setinin kategori olarak düzgün ayarlanmasının analiz üzerinde doğrudan etkili olduğu söylenmiştir.

(Salur ve Aydın, 2022) tarafından yapılmış olan çalışmada, Türkçe tweetler için yeni bir duygu sınıflandırma modeli tasarlanmıştır. Veri ön işlemede silinen karakterlerden, emojiler gibi sözcüklerden özellik çıkarma ve diğer özelliklerle birleştirilmesine dayalı bir çalışma yapılmıştır. Veri kümesinde 6887 adet pozitif ve 7890 adet negatif tweet bulunmaktadır. Tweetler anlamlı veya anlamsız birçok karakter, kelime içermektedir. Bu kelimelerin daha anlamlı olabilmesi için veri ön işleme yapılmıştır. Veri ön işlemede URL bilgisi, fazla boşluklar, noktalama işaretleri, kullanıcı adı, durak kelimeler, rakamlar ve tek karakterler silinmiş karakter tekrarı içerdiği için anlamsız olan kelimeler düzeltilmiştir. Ayrıca daha önce yapılan çalışmalarda Türkçe tweetlerin analizinde kelime gövdeleme işlemi, duygu analizin performansına katkı sağlamadığı için bu çalışmada kullanılmadığına değinilmiştir. Kalan veriler FastText kullanılarak metin temsili oluşturulmuş ve bu veri kümesinden LSTM, BiLSTM ve GRU kullanılarak derin özellik çıkarımı yapılmıştır. Veri ön işleme kısmında silinen içeriklerin aslında duygu belirttiği ve Twitter'a özgü ifadeler olduğu görülmüştür. Bu içeriklerden 12 adet elle özellik çıkarımı yapılmıştır. Bu özellikler, sözdizimsel

olarak; toplam karakter sayısı, büyük harf sayısı, küçük harf sayısı, rakam sayısı, noktalama işareti sayısı ve URL sayısı olarak toplam 6 tane, Twitter'a özgü olarak; Bahsetme (mention) sayısı ve Hashtag sayısı olarak toplam 2 tane ve anlamsal olarak; pozitif emoji sayısı, negatif emoji sayısı, pozitif ünlem sayısı, negatif ünlem sayısı olarak toplam 4 tane özellikten oluşmaktadır. Elle çıkarılan özellikler LSTM, BiLSTM ve GRU kullanılarak derin özellikler çıkarılmıştır. Daha sonra FastText kullanılarak yapılan özellik çıkarımı ile elle yapılan özellik çıkarımı birleştirilerek duygu sınıflandırma katmanına iletilmiştir. Bu çalışmada veriler eğitim için %90 ve test işlemi için %10 olarak ayrılmıştır. Modelin başarısını değerlendirmek için karmaşıklık matrisi kullanılmıştır. Karmaşıklık matrisinden elde edilen değerlerle doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1 skoru hesaplanmıştır. Derin özellik çıkarma modelinde doğruluk oranları incelendiğinde BiLSTM'in daha yüksek doğruluk verdiği gözlemlenmiştir. Genel sonuçlarda en yüksek doğruluk oranı %75.71 oran ile elle özellik çıkarma ve BiLSTM'in birleşiminden oluşan modelde gözlemlenmiştir. Çıkan sonuçlar incelendiğinde en yüksek sonuçların özellik birleştirme modellerinde olduğu görülmektedir. Bu çalışma daha önce yapılan çalışmalar ile karşılaştırıldığında önerilen modelin daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

(Tan ve ark., 2023) tarafından yapılmış olan çalışmada, duygu analizi sırasında alaycılık tespitini artırmaya yönelik bir çerçeve sunulmuştur. Alaycı ifadelerin duygu sınıflandırmasını olumsuz etkilediği belirtilmiş ve bu sorunu çözmek adına çoklu görev öğrenimini içeren bir derin sinir ağı kullanılmıştır. Çerçeve, duygu sınıflandırması ve alaycılık sınıflandırması görevlerini aynı anda gerçekleştirmek üzere Çift Yönlü LSTM ağını eğitmeyi içermektedir. Çalışma, bu yöntemin diğer modellere göre daha iyi performans sergilediğini göstermektedir. Veri kümesi olarak Kaggle'dan elde edilen duyarlılık ve alaycılık veri kümeleri kullanılmıştır. Her iki veri kümesi için aynı doğal dil işleme teknikleri ve ön işleme yöntemleri uygulanmıştır. Çerçeve, özellikle paylaşılan bir katman kullanarak aşırı uyum riskini azaltmayı amaçlayarak duygu analizi performansının artırılması hedeflenmiştir. Önerilen çerçeve, duyarlılık sınıflandırması için %91, alaycılık sınıflandırması için %92 F1 puanları elde edilmiştir. Bağımsız Bi-LSTM modeline kıyasla, çerçeve duyarlılık ve alaycılık sınıflandırmalarında sırasıyla %3 ve %1 iyileşme sağlanmıştır. Çerçeve, çoklu görev öğrenimi kullanarak eğitildiğinden hem eğitim süresini hem de hesaplama gücünü daha verimli bir şekilde kullandığı sonucuna varılmıştır.

(Tsai ve Huang, 2021) yapmış oldukları çalışmada, evcil hayvanların duyguları yapay zekâ sistemleri vasıtasıyla analiz edilmiştir. İnsan duygu analizi çerçevesini evcil hayvanlar için uyarlayarak görüntü ve ses özelliklerini birleştirerek duygu analizi yapılmıştır. Evcil hayvanların yüz kaslarının sınırlamaları nedeniyle duruşları, ses özellikleri ise spektrogram kullanılarak değerlendirilmiştir. Nesne etiketlerini tespit etmek ve tanımlamak için Mask R-CNN kullanılarak derin öğrenme teknolojileriyle evcil hayvanların duygu analizi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan

teknolojiler arasında Logitech Webcam C925 kamera, gömülü sistemlerde çekirdek bilgi işlem platformu, Python programlama dili ve Tensorflow derin öğrenme kütüphanesi bulunmaktadır. Ortalama yürütme süresi 1.32 dakika olan önerilen yöntemin doğruluğu %85.71'dir. Bu yöntemin, temassız bir şekilde evcil hayvan duygu tanımlamasında başarılı bir doğruluk oranına sahip olduğu ve sahibine bilgi sağladığı vurgulanmıştır.

(Chen ve ark., 2020) tarafından yapılan çalışmada, askeri alandaki duygu analizi için özel olarak geliştirilen MILSentic adlı duygu sözlüğünün performansı değerlendirilmiştir. Yapılan deneylerde, mevcut duygu sözlükleri ile MILSentic'in kombinasyonları kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde, MILSentic'in eklenmesinin kutupluluk tahmininde %1,5 ve %1,4 daha yüksek doğruluk ve F1-ölçümü sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, çalışma, LSTM ve Bi-LSTM modelleri kullanılarak gerçekleştirilen parametre kalibrasyonunu içermektedir. Bu bağlamda, ağ katmanları ve aktivasyon fonksiyonları üzerinde yapılan ayarlamalarda, doğruluk ve F1-ölçümü değerlerindeki değişiklikler gözlemlenmiştir. Bi-LSTM modelinin, özellikle Tanh aktivasyon fonksiyonu ve belirli bir ağ katmanı sayısı ile birlikte kullanıldığında en iyi performansı sergilediği belirtilmiştir. Bu çalışmada, askeri duygu analizi için özel veri kaynaklarının etkili bir şekilde kullanılmasının, duygu sözlüklerinin geliştirilmesinin ve derin öğrenme modellerinin parametre ayarlarının performans artışına nasıl katkı sağlayabileceğini detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Bu çalışmalar, duygu analizi alanında çeşitli teknikler ve metodolojilerin geliştirilmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Yapay zekâ ve makine öğrenimi tekniklerinin kullanımıyla, metinlerden duygusal içeriklerin daha doğru ve derinlemesine analiz edilmesi mümkün olmuştur. Özellikle, dil ve kültürel farklılıkları dikkate alan çalışmalar tarafından duygu analizinin evrensel bir uygulama alanı olduğunu gösterilerek bu alandaki bilimsel ilerleme desteklenmiştir. Yeni duygu sözlükleri ve büyük veri setleri oluşturma çabaları, analizlerin doğruluğunu ve kapsamını artırarak endüstriyel ve akademik kullanımlarda yeni olanaklar sunmaktadır.

1.2. Motivasyon ve Katkı

Sosyal medya platformlarının yaygınlaşması ve kullanıcıların bu platformlarda yoğun şekilde veri üretmesi, duygu analizine olan ilgiyi artırmıştır. Duygu analizi, sosyal medya verilerinden anlamlı bilgi çıkarımı sağlayarak çeşitli alanlarda önemli uygulamalara olanak tanımaktadır. Bu çalışmanın motivasyonu, makine öğrenimi ve derin öğrenme tekniklerini kullanarak duygu analizinde yüksek doğruluk oranları elde etmek ve farklı algoritmalar ile veri temsili yöntemlerini karşılaştırarak en etkili yaklaşımları belirlemektir.

Var olan çalışmalar genellikle sınırlı sayıda veri kümesi ve algoritma kullanarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ise daha kapsamlı bir yaklaşım benimsenmiş, farklı veri kümeleri

ve çeşitli algoritmalar kullanılarak duygu analizinin performansı değerlendirilmiştir. Bu sayede, duygu analizinde hangi yöntemlerin daha etkili olduğunu belirlemek ve bu alandaki literatüre katkıda bulunmak amaçlanmıştır. Bu çalışmanın ana katkıları şöyle özetlenebilir:

- **Kapsamlı Literatür İncelemesi:** Çalışma kapsamında 39 farklı makale incelenmiş ve mevcut yöntemler ile yaklaşımlar hakkında derinlemesine bilgi sunulmuştur. Bu literatür taraması, çalışmanın temellerini güçlendirerek literatürdeki mevcut boşlukları ve geliştirme alanlarını belirlemeye yardımcı olmuştur.
- **Çeşitli Veri Kümelerinin Kullanımı:** İki farklı veri kümesi kullanılarak, farklı veri kaynaklarından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu yaklaşım, duygu analizi modellerinin genellenebilirliğini ve farklı veri kümelerindeki performansını değerlendirme imkânı sunmaktadır.
- **Çok Sınıflı Karşılaştırmalar:** Hem iki sınıflı hem de üç sınıflı sınıflandırma yapılmış, böylece farklı sınıflandırma düzeylerinde elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Bu, duygu analizinin farklı sınıflandırma senaryolarındaki performansını karşılaştırma imkânı sunmaktadır.
- **Çeşitli Metin Temsil Yöntemleri:** Çalışmada, beş farklı metin temsil yöntemi kullanılmış ve metinlerin farklı şekillerde temsil edilmesinin duygu analizine etkisi araştırılmıştır. Bu yöntemlerin karşılaştırılması, hangi temsil yöntemlerinin daha etkili olduğunu belirlemeye yardımcı olmaktadır.
- **Geniş Algoritma Yelpazesi:** Dokuz makine öğrenimi algoritması ve üç derin öğrenme algoritması kullanılarak sınıflandırma yapılmıştır. Bu geniş algoritma yelpazesi, farklı algoritmaların duygu analizi performansını karşılaştırma ve en etkili olanları belirleme imkânı sunmaktadır.

Bu çalışma, duygu analizi alanında mevcut literatürde yer alan çalışmalardan birkaç önemli noktada ayrılmaktadır. İlk olarak, çoğu çalışma belirli bir metin temsil yöntemi ve sınıflandırma algoritmasına odaklanırken, bu çalışmada beş farklı metin temsil yöntemi (TF-IDF, GloVe, Word2Vec, FastText ve Bag of Words) ile dokuz makine öğrenimi ve üç derin öğrenme algoritması detaylı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Bu kapsamlı yaklaşım, farklı veri kümelerinde en etkili yöntemin belirlenmesine olanak tanımaktadır. İkinci olarak, literatürde çoğu duygu analizi çalışması tek bir veri kümesi üzerinde gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada ise iki farklı veri kümesi (Amazon ve IMDb) üzerinde detaylı analizler yapılarak yöntemlerin genel uygulanabilirliği test edilmiştir. Üçüncü olarak, literatürde yaygın olarak ikili sınıflandırma yöntemleri kullanılmasına rağmen, bu çalışmada hem ikili hem de üçlü sınıflandırma senaryoları incelenerek farklı sınıflandırma düzeylerinde yöntemlerin başarımı karşılaştırılmıştır. Son olarak, elde edilen sonuçlar, literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslanarak hangi yöntemlerin daha başarılı olduğu gösterilmiştir.

1.3. Organizasyon

Çalışmanın geri kalan bölümleri şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2'de çalışmanın altyapısını oluşturan programlama dili, kullanılan kütüphaneler ve veri kümeleri açıklanacaktır. Bölüm 3'te, yapılan sınıflandırma çalışmalarının sonuçlarına odaklanılacak ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı bir şekilde incelenerek analiz edilecektir. Bölüm 4'te ise çalışmanın genel değerlendirmesi yapılacak, elde edilen sonuçlar üzerinden çalışmanın başarısı ve etkinliği değerlendirilecektir.

2. Deneysel Ayarlamalar

Bu bölümde, duygu analizi çalışmasının altyapısını oluşturan tekniklere değinilecektir.

2.1. Programlama Dili ve Kütüphaneler

Bu çalışmada Python programlama dili ve çeşitli Python kütüphanelerinden yararlanılmıştır. Veri analizi ve işlemesi için Pandas, bilimsel hesaplamalar için NumPy, makine öğrenimi algoritmaları için Scikit-Learn, derin öğrenme modelleri için Tensorflow, metin madenciliği için Gensim bu kütüphanelerden bazılarıdır.

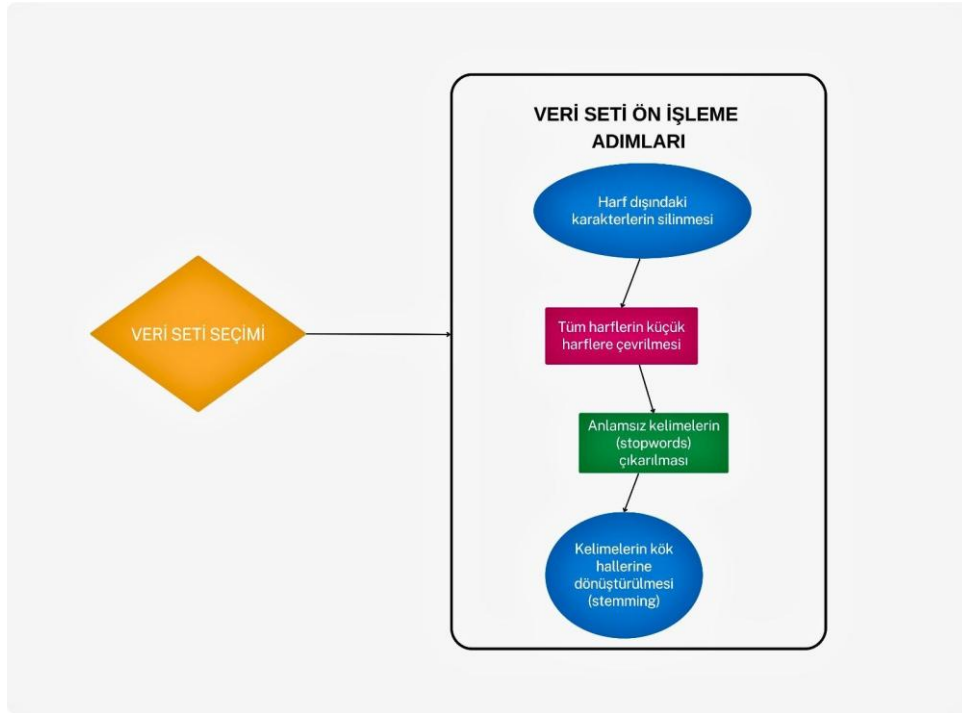
2.2. Kullanılan Veri Kümeleri

Çalışmada iki farklı veri kümesi kullanılmıştır. Bu veri kümeleri Kaggle platformundan alınmıştır. İlk veri kümesi Amazon sitesindeki müzik ürünlerine aittir ve olumlu, olumsuz ve nötr duyguları içeren toplam 10.000 veriden oluşmaktadır. Diğer veri kümesi ise IMDb film yorumlarından oluşmakta olup, olumlu ve olumsuz duyguları içeren ilk 20.000 veriden meydana gelmektedir.

Her iki veri setini analiz etmek için verilerin belirli bir oranı eğitim ve test setleri olarak ayrılmıştır. Çalışmada, model performansının tutarlı bir şekilde değerlendirilebilmesi için veri kümelerinin %80'i eğitim, %20'si ise test seti olarak ayrılmıştır. Rastgelelik tohumu olarak 42 değeri belirlenmiş ve bu parametrenin, verilerin her çalışmada aynı şekilde ayrılmasını sağlayarak sonuçların tekrarlanabilirliğini garanti ettiği görülmüştür. Bu yöntem, model performansının değerlendirilmesi için tutarlı ve güvenilir bir temel oluşturmuştur.

2.3. Veri Ön İşleme

Veri ön işleme aşaması, metin verilerinin analiz için uygun hale getirilmesini sağlar. Bu çalışmada, Şekil 1’de gösterilen adımlar izlenerek boş satırların temizlenmesi, her bir metin ögesinin küçük harfe dönüştürülmesi, sayıların ve noktalama işaretlerinin kaldırılması, durak kelimelerin (stopwords) çıkarılması ve kelimelerin kök hallerinin bulunması gibi işlemler uygulanmıştır. Bu adımlar, metin verilerinin analiz edilebilir ve tutarlı bir formata getirilmesine katkıda bulunarak daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 1. Veri ön işleme adımları

2.4. Performans Metrikleri

Bu çalışmada, duygu analizi modellerinin performansını değerlendirmek amacıyla Doğruluk, Hassasiyet, Duyarlılık ve F1-Skor metrikleri kullanılmıştır. Eşitliklerde yer alan TP gerçek pozitifleri, TN gerçek negatifleri, FP yanlış pozitifleri ve FN yanlış negatifleri ifade etmektedir. Bu metrikler, modelin doğru ve yanlış tahminlerini detaylı bir şekilde analiz ederek, duygu analizi performansının kapsamlı bir değerlendirmesini sağlamaktadır. Çalışmada kullanılan algoritmaların her biri için bu metrikler hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılarak en etkili yöntemlerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Doğruluk, modelin doğru tahmin ettiği örneklerin toplam örnek sayısına oranıdır. Eşitlik 1’de doğruluk metriğinin matematiksel gösterimi verilmiştir.

$$Doğruluk = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

Hassasiyet, pozitif sınıf olarak tahmin edilen örnekler arasından gerçekten pozitif olanların oranını göstermektedir. Yanlış pozitifleri minimize etmek için önemlidir. Eşitlik 2’de hassasiyet metriğinin matematiksel gösterimi verilmiştir.

$$Hassasiyet = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

Duyarlılık, gerçek pozitif örneklerin model tarafından doğru tahmin edilme oranını göstermektedir. Eşitlik 3’te duyarlılık metriğinin matematiksel gösterimi verilmiştir.

$$Duyarlılık = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

F1-Skor, hassasiyet ve duyarlılığın harmonik ortalamasıdır ve sınıflandırma modelinin genel performansını değerlendirir. Özellikle dengesiz veri setlerinde faydalıdır. Eşitlik 4’te F-1 skor metriğinin matematiksel gösterimi verilmiştir.

$$F - 1 \text{ Skor} = 2 \times \frac{Hassasiyet \times Duyarlılık}{Hassasiyet + Duyarlılık} \quad (4)$$

3. Yöntem

Bu bölümde, makine öğrenmesi temelli duygu analizi sisteminin altyapısında kullanılan metin temsil yöntemleri ve sınıflandırma algoritmaları detaylı olarak açıklanmaktadır.

3.1. Metin Temsil Yöntemleri

Metin temsil yöntemleri, ham metni makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmalarının işleyebileceği sayısal vektörlere dönüştürmek amacıyla uygulanmaktadır. Bu çalışmada, TF-IDF, Bag of Words, GloVe, FastText ve Word2Vec gibi yöntemler kullanılmıştır. Her bir yöntem, farklı prensiplere dayanarak kendine özgü avantajlar sunmaktadır.

TF-IDF, belgelerdeki terimlerin önemini sayısal olarak ölçen bir tekniktir. Terim frekansı (TF), belirli bir kelimenin belgede kaç kez geçtiğini ifade ederken, ters belge frekansı (IDF), kelimenin tüm belgeler arasındaki yaygınlığını ölçerek sık rastlanan kelimelerin ağırlığını düşürür (Patil ve ark., 2023). Bir kelimenin TF ve IDF değerlerinin çarpımı, o kelimenin TF-IDF ağırlığını belirler. Bag of Words yöntemi, metni kelime dizilimini dikkate almadan, her kelimenin kaç kez geçtiğini sayarak sayısal verilere dönüştürür (Patil ve ark., 2023). Bu yaklaşım, duygu analizi gibi uygulamalarda, belirli duyguları ifade eden kelimelerin tespitini kolaylaştırır. Word2Vec, büyük veri kümelerinden sözcük yerleştirmelerini öğrenmek için geliştirilen, sinir ağı tabanlı bir modeldir (Patil ve ark., 2023).

Bu model, her kelimeyi yüksek boyutlu bir vektör uzayında temsil ederek, kelimeler arasındaki anlamsal benzerlikleri yakalamayı amaçlar. Word2Vec, kelimelerin bağlamını dikkate alarak, metin içindeki ilişkileri öğrenir ve her kelimeyi, benzer anlamlara sahip diğer kelimelere yakın konumlandıran bir vektörle ifade eder (Öge ve Kayaalp, 2021). FastText, Word2Vec'in geliştirilmiş bir versiyonu olarak, kelimeleri alt birimlerine ayırarak analiz eder (Patil ve ark., 2023). Bu sayede dilde nadir görülen veya hiç görülmemiş kelimeler için bile anlamlı vektörler oluşturabilir. GloVe, kelimeler arasındaki ortak görülme istatistiklerini kullanarak vektör temsilleri oluşturan bir modeldir (Patil ve ark., 2023). Büyük metin verilerindeki kelime ilişkilerini yakalayarak, anlamsal ve sözdizimsel benzerlikleri matematiksel olarak modelleyebilir.

3.2. Sınıflandırma Algoritmaları

Bu çalışmada, sosyal medya verileri üzerinde duygu analizi gerçekleştirmek amacıyla çeşitli makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmalarından faydalanılmıştır. Makine öğrenimi algoritmaları kapsamında, Scikit-learn kütüphanesinden K-Neighbors Classifier, Random Forest Classifier, Lojistik Regresyon, Decision Tree Classifier, Bernoulli Naive Bayes, Support Vector Machine (SVM) ve Multi-Layer Perceptron (MLP) Classifier algoritmaları uygulanmıştır. Ayrıca, LightGBM ve XGBoost gibi gelişmiş gradient boosting algoritmalarından yararlanılarak metin verilerinin sınıflandırılması sağlanmıştır. Derin öğrenme algoritmaları ise TensorFlow ve Keras kütüphaneleri kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, LSTM, SimpleRNN ve Conv1D katmanları ile modeller oluşturulmuştur. Bu geniş algoritma yelpazesi, duygu analizi performansını optimize etmek ve farklı yöntemlerin etkinliğini karşılaştırmak amacıyla tercih edilmiştir.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu bölümde sonuçlar tablolar halinde verilerek detaylandırılmıştır. Tablo 1 ve Tablo 2, Amazon veri seti üzerindeki derin öğrenme ve makine öğrenmesi yöntemlerinin performanslarını karşılaştırmaktadır. Tablo 3 ve Tablo 4 ise IMDb veri seti üzerinde gerçekleştirilen analizlerde derin öğrenme ve makine öğrenmesi yöntemlerinin sonuçlarını sunmaktadır.

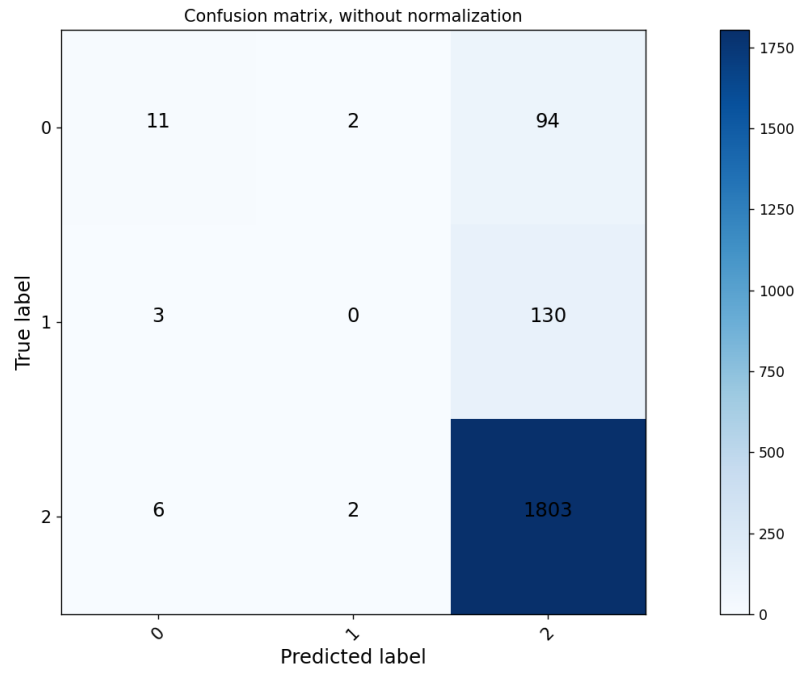
Tablo 1, Amazon veri setinde gerçekleştirilen derin öğrenme çalışmalarının sonuçlarını detaylı bir şekilde sunmaktadır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, derin öğrenme modellerinin doğruluk oranları %88.00 ile %88.44 arasında değişmektedir. En yüksek doğruluk oranı %88.44 ile FastText temsil yöntemi ve LSTM algoritması kombinasyonu tarafından elde edilmiştir. Genel olarak, TF-IDF, GloVe, ve FastText temsil yöntemleri, CNN, RNN, ve LSTM algoritmaları ile birlikte kullanıldığında yüksek doğruluk oranları sergilemiştir. Özellikle CNN ve LSTM algoritmaları, çoğu temsil

yöntemiyle yüksek performans göstermiştir. Bununla birlikte, LSTM algoritması, özellikle FastText ve TF-IDF ile birlikte kullanıldığında, genellikle yüksek doğruluk oranları sağlamıştır.

Tablo 1. Amazon veri seti derin öğrenme sonuçları.

Metin Temsil Yöntemi	Sınıflandırma Algoritması	Doğruluk(%)	Hassasiyet	Duyarlılık	F1-Score
TF-IDF	CNN	88.29	0.90	0.88	0.83
	RNN	88.00	0.83	0.88	0.83
	LSTM	88.29	0.90	0.88	0.83
WORD2VEC	CNN	88.10	0.79	0.88	0.83
	RNN	88.15	0.78	0.88	0.83
	LSTM	88.00	0.81	0.88	0.84
GLOVE	CNN	88.29	0.90	0.88	0.83
	RNN	88.29	0.90	0.88	0.83
	LSTM	88.24	0.80	0.78	0.83
FASTTEXT	CNN	88.29	0.90	0.88	0.83
	RNN	88.29	0.87	0.88	0.83
	LSTM	88.44	0.90	0.88	0.83
BINARY	CNN	88.05	0.90	0.88	0.83
	RNN	88.29	0.90	0.88	0.83
	LSTM	88.29	0.78	0.88	0.83

Şekil 2’de verilen karışıklık matrisi, Amazon veri seti ile duygu analizi çalışmasında kullanılan FastText + LSTM modellerinin performansını göstermektedir. Model, pozitif duygu sınıfını (2) çok iyi tahmin etmektedir; 1803 doğru tahmin ile bu sınıfta başarılı olmuştur. Ancak, negatif (0) ve nötr (1) duygu sınıflarında performansı düşüktür; negatif duyguları sadece 11 doğru tahminle, nötr duyguları ise hiç doğru tahmin edememiştir. Genel olarak, model pozitif duyguları tespit etmekte başarılı, ancak negatif ve nötr duyguları ayırt etmede yetersizdir.



Şekil 2. LSTM karşılık matrisi - Amazon veri seti

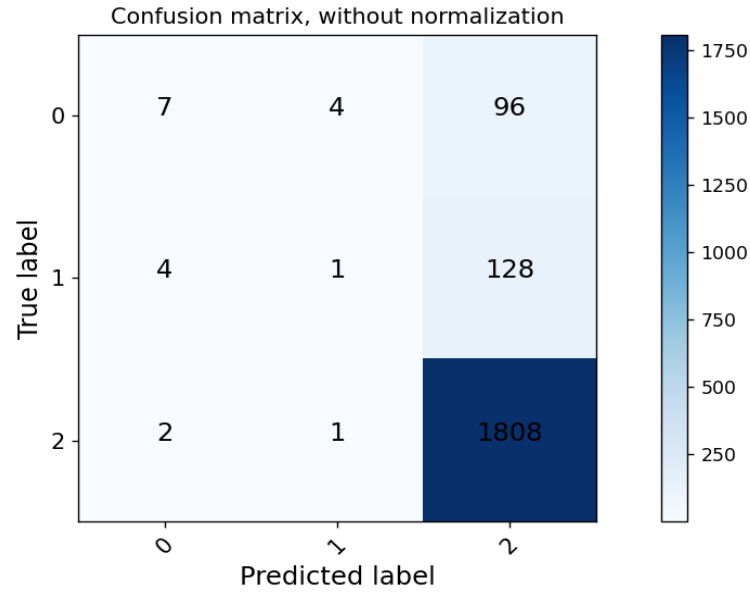
Tablo 2. Amazon veri seti makine öğrenimi sonuçları.

Metin Temsil Yöntemi	Sınıflandırma Algoritması	Doğruluk(%)	Hassasiyet	Duyarlılık	F1-Score
TF-IDF	BNB	84.05	0.79	0.84	0.81
	LR	88.34	0.82	0.88	0.83
	RF	88.24	0.78	0.88	0.83
	DT	83.32	0.82	0.83	0.83
	SVM	88.29	0.84	0.88	0.83
	ANN	87.03	0.84	0.87	0.85
	KNN	87.51	0.79	0.88	0.83
	XGBOOST	88.20	0.83	0.88	0.84
	LightGBM	88.29	0.84	0.88	0.84
WORD2VEC	BNB	88.10	0.81	0.88	0.83
	LR	88.05	0.81	0.88	0.83
	RF	88.34	0.87	0.88	0.83
	DT	80.30	0.82	0.80	0.81
	SVM	88.29	0.84	0.88	0.83
	ANN	83.71	0.83	0.84	0.83
	KNN	86.44	0.81	0.86	0.83
	XGBOOST	88.54	0.84	0.89	0.84
	LightGBM	88.39	0.83	0.88	0.84
GLOVE	BNB	84.73	0.79	0.85	0.82
	LR	87.95	0.80	0.88	0.83
	RF	88.20	0.83	0.88	0.83
	DT	77.96	0.80	0.78	0.79
	SVM	88.29	0.90	0.88	0.83

	ANN	87.56	0.81	0.88	0.83
	KNN	87.03	0.80	0.87	0.83
	XGBOOST	88.10	0.83	0.88	0.83
	LightGBM	88.20	0.83	0.88	0.83
FASTTEXT	BNB	82.35	0.80	0.82	0.81
	LR	88.05	0.82	0.88	0.83
	RF	88.29	0.85	0.88	0.83
	DT	77.86	0.80	0.78	0.79
	SVM	88.29	0.90	0.88	0.83
	ANN	87.46	0.81	0.87	0.83
	KNN	86.15	0.80	0.86	0.83
	XGBOOST	88.20	0.80	0.88	0.83
	LightGBM	88.10	0.78	0.88	0.83
BINARY	BNB	83.95	0.79	0.84	0.81
	LR	86.78	0.84	0.87	0.85
	RF	88.29	0.78	0.88	0.83
	DT	83.08	0.82	0.84	0.83
	SVM	88.29	0.78	0.88	0.83
	ANN	86.25	0.83	0.86	0.84
	KNN	88.29	0.85	0.88	0.83
	XGBOOST	88.34	0.83	0.88	0.84
	LightGBM	88.34	0.84	0.88	0.85

Tablo 2, Amazon veri setinde yapılan makine öğrenimi çalışmalarının sonuçlarını kapsamlı bir şekilde sunmaktadır. Makine öğrenimi modellerinin doğruluk oranları %77.86 ile %88.54 arasında değişmektedir. En yüksek doğruluk oranı %88.54 ile Word2Vec temsil yöntemi ve XGBOOST algoritması kombinasyonu tarafından elde edilmiştir. Genel olarak, XGBOOST, LightGBM, ve SVM algoritmaları, farklı metin temsil yöntemleriyle kullanıldığında yüksek doğruluk oranları sağlamıştır.

Şekil 3'te verilen karışıklık matrisi, Amazon veri seti ile yapılan duygu analizi çalışmasında Word2Vec + XGBoost yapısının performansını göstermektedir. Model, pozitif duyguları (2) tespit etmekte oldukça başarılı olup 1808 doğru tahmin yapmıştır, ancak negatif (0) ve nötr (1) duyguları ayırt etmede yetersiz kalmaktadır. Negatif duyguları sadece 7 doğru tahminle, nötr duyguları ise sadece 1 doğru tahminle sınıflandırmıştır. Bu durum, modelin negatif ve nötr duyguları pozitif olarak sınıflandırma eğiliminde olduğunu göstermektedir.



Şekil 3. XGBoost karışıklık matrisi - Amazon veri seti

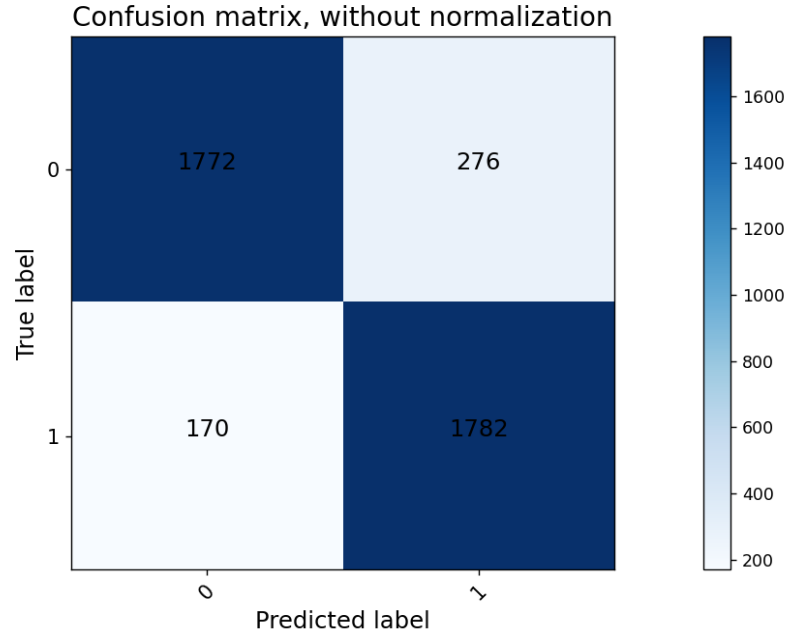
Tablo 3, IMDb veri setinde gerçekleştirilen makine öğrenimi çalışmalarının derinlemesine incelenmesini sunmaktadır. Çalışma %51.25 ile %88.85 arasında doğruluk oranları göstermiştir. En yüksek doğruluk oranı %88.85 ile TF-IDF ve SVM kombinasyonu tarafından elde edilmiştir. Genel olarak, TF-IDF ve Binary metin temsil yöntemleri, SVM ve LR algoritmaları ile yüksek doğruluk oranları sağlamıştır. TF-IDF ve SVM en iyi performansı verirken, GloVe temsil yöntemi genellikle daha düşük doğruluk oranları göstermiştir.

Tablo 3. IMDb veri seti makine öğrenimi sonuçları.

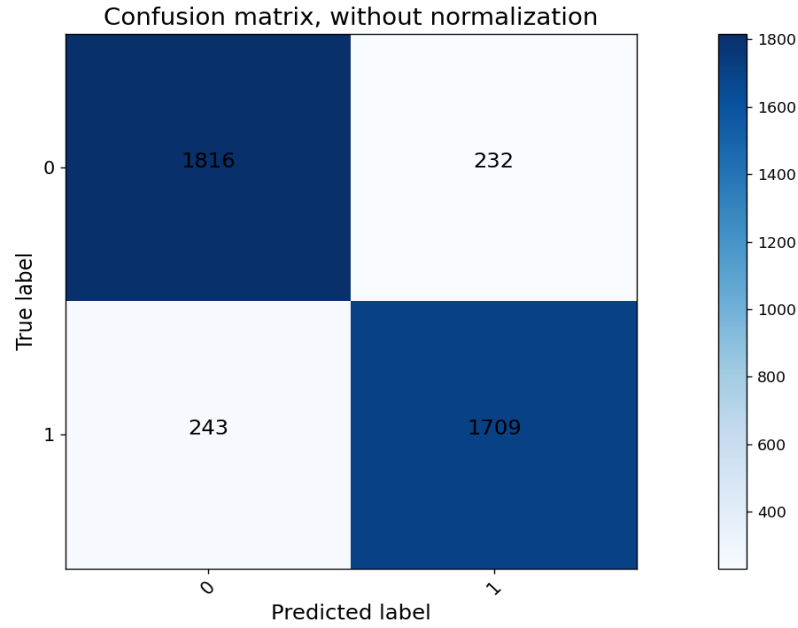
Metin Yöntemi	Temsil	Sınıflandırma Algoritması	Doğruluk(%)	Hassasiyet	Duyarlılık	F1-Score
TF-IDF		BNB	85.65	0.86	0.86	0.86
		LR	88.37	0.88	0.88	0.88
		RF	84.05	0.84	0.84	0.84
		DT	70.17	0.70	0.70	0.70
		SVM	88.85	0.89	0.89	0.89
		ANN	87.45	0.87	0.87	0.87
		KNN	74.52	0.75	0.75	0.74
		XGBOOST	83.52	0.84	0.84	0.84
		LightGBM	84.70	0.85	0.85	0.85
WORD2VEC		BNB	51.25	0.59	0.51	0.35
		LR	86.65	0.87	0.87	0.87
		RF	83.02	0.83	0.83	0.83
		DT	71.97	0.72	0.72	0.72
		SVM	86.87	0.87	0.87	0.87

	ANN	84.47	0.85	0.85	0.85
	KNN	80.55	0.81	0.81	0.81
	XGBOOST	85.20	0.85	0.85	0.85
	LightGBM	84.77	0.85	0.85	0.85
GLOVE	BNB	67.00	0.67	0.67	0.67
	LR	75.75	0.76	0.76	0.76
	RF	73.15	0.73	0.73	0.73
	DT	61.65	0.62	0.62	0.62
	SVM	75.05	0.75	0.75	0.75
	ANN	72.60	0.73	0.73	0.73
	KNN	66.12	0.66	0.66	0.66
	XGBOOST	74.02	0.74	0.74	0.74
	LightGBM	73.77	0.74	0.74	0.74
FASTTEXT	BNB	71.75	0.72	0.72	0.72
	LR	85.07	0.85	0.85	0.85
	RF	79.85	0.80	0.80	0.80
	DT	69.35	0.69	0.69	0.69
	SVM	85.22	0.85	0.85	0.85
	ANN	81.70	0.82	0.82	0.82
	KNN	77.05	0.77	0.77	0.77
	XGBOOST	82.82	0.83	0.83	0.83
	LightGBM	82.67	0.83	0.83	0.83
BINARY	BNB	85.72	0.86	0.86	0.86
	LR	87.12	0.87	0.87	0.87
	RF	84.22	0.84	0.84	0.84
	DT	70.70	0.71	0.71	0.71
	SVM	88.07	0.88	0.88	0.88
	ANN	86.15	0.86	0.86	0.86
	KNN	59.87	0.62	0.60	0.57
	XGBOOST	84.10	0.84	0.84	0.84
	LightGBM	85.07	0.85	0.85	0.85

Şekil 4’te verilen karışıklık matrisi, IMDb veri seti ile yapılan duygu analizi çalışmasında TF-IDF + SVM algoritmasının performansını göstermektedir. Model, pozitif (1) ve negatif (0) duyguları oldukça başarılı bir şekilde ayırt edebilmektedir. Negatif duygular için 1772 doğru tahmin ve 276 yanlış tahmin yapılmıştır. Pozitif duygular içinse 1782 doğru tahmin ve 170 yanlış tahmin yapılmıştır. Bu sonuçlar, modelin genellikle yüksek doğrulukla çalıştığını ve her iki duygu sınıfını da iyi ayırt edebildiğini göstermektedir.



Şekil 4. SVM karışıklık matrisi - IMDB veri seti



Şekil 5. LSTM karışıklık matrisi - IMDB veri seti

Tablo 4, IMDB film incelemeleri veri seti üzerinde gerçekleştirilen derin öğrenme çalışmalarının sonuçlarını detaylandırmaktadır. Çalışma %48.00 ile %88.12 arasında değişen doğruluk oranları göstermiştir. En yüksek doğruluk oranı %88.12 ile FastText temsil yöntemi ve LSTM algoritması kombinasyonu tarafından elde edilmiştir. Genel olarak, TF-IDF ve FastText temsil yöntemleri CNN ve LSTM algoritmaları ile yüksek doğruluk oranları sağlamıştır. Glove ve Binary temsil yöntemleri ise genellikle daha düşük doğruluk oranları sergilemiş, özellikle RNN algoritmaları ile düşük performans göstermiştir.

Tablo 4. IMDb veri seti derin öğrenme sonuçları.

Metin Temsil Yöntemi	Sınıflandırma Algoritması	Doğruluk(%)	Hassasiyet	Duyarlılık	F1-Score
TF-IDF	CNN	87.24	0.88	0.87	0.87
	RNN	51.80	0.75	0.49	0.32
	LSTM	51.20	0.75	0.51	0.35
WORD2VEC	CNN	84.77	0.85	0.85	0.85
	RNN	76.67	0.80	0.77	0.76
	LSTM	85.37	0.85	0.85	0.85
GLOVE	CNN	75.02	0.77	0.75	0.75
	RNN	69.57	0.71	0.70	0.69
	LSTM	80.54	0.82	0.81	0.80
FASTTEXT	CNN	85.07	0.86	0.85	0.85
	RNN	73.65	0.79	0.74	0.73
	LSTM	88.12	0.88	0.88	0.88
BINARY	CNN	78.50	0.79	0.79	0.78
	RNN	48.00	0.49	0.48	0.33
	LSTM	52.00	0.75	0.52	0.36

Şekil 5’te verilen karışıklık matrisi, IMDb veri seti ile yapılan duygu analizi çalışmasında FastText + LSTM algoritmasının performansını detaylı olarak vermektedir. Model, negatif duyguları (0) 1816 doğru tahmin ve 232 yanlış tahminle, pozitif duyguları (1) ise 1709 doğru tahmin ve 243 yanlış tahminle sınıflandırmıştır. Bu sonuçlar, modelin duygusal sınıflandırmada oldukça başarılı olduğunu, ancak 232 ve 243 yanlış tahminle bazı hatalar yapabildiğini göstermektedir.

4.1. Önceki Çalışmalar ile Kıyaslama

Tablo 5’te, literatür çalışmasında incelenen çalışmaların sonuçları ile bu çalışmadaki veri setlerinden elde edilen en yüksek doğruluk oranı sonuçları karşılaştırılmaktadır. Bu tablo, farklı metin temsil yöntemleri ve algoritmaların performansını değerlendirmek için önemli bir referans sağlar. Genel olarak, en çok kullanılan metin temsil yöntemleri arasında TF-IDF, Word2vec ve Glove bulunmaktadır. Bu yöntemler, farklı veri setlerinde çeşitli makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmaları ile birleştirilerek test edilmiştir. Doğruluk oranları, veri seti ve kullanılan yöntemlere bağlı olarak geniş bir yelpazede değişmektedir.

Çalışmada, Amazon veri seti için Word2vec temsili ve XGBoost algoritması kullanılarak %88.54 doğruluk oranına, IMDb veri seti için ise TF-IDF temsili ve SVM algoritması kullanılarak

%88.85 doğruluk oranına ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, literatürdeki benzer çalışmalara kıyasla yüksek doğruluk oranlarına işaret etmektedir ve kullanılan metin temsil yöntemleri ile algoritmaların etkinliğini göstermektedir. Genel olarak, çalışmamızdaki sonuçlar, farklı metin temsil yöntemleri ve algoritmaların performansını değerlendirmek için önemli bir referans sağlar ve duygu analizi alanında seçilen yöntemlerin ve algoritmaların güçlü performansını ortaya koymaktadır.

Tablo 5 göz önüne alındığında, literatürde yer alan benzer araştırmalarla bu çalışma karşılaştırıldığında belirli tutarlılıklar ve farklılıklar görülmektedir. Örneğin, (Öge ve Kayaalp, 2021) tarafından yapılan çalışmada IMDB veri seti kullanılarak çeşitli makine öğrenimi algoritmalarının duygu analizi performansları incelenmiş ve Lojistik Regresyon algoritmasının en yüksek doğruluk oranına ulaştığı raporlanmıştır. Bu çalışmada da IMDB veri seti üzerinde Lojistik Regresyon algoritması %88 doğruluk oranı ile en yüksek başarılarından birini göstermiştir, bu sonuç literatürdeki bulgularla uyumludur. Benzer şekilde, (Fu ve ark., 2018) tarafından yapılan çalışmada, metin duygu analizi için LSTM modellerinin kelime gömme yöntemleri ile birleştirildiğinde yüksek performans sergilediği ortaya konulmuştur. Çalışmamızda da FastText temsili ile LSTM algoritması, IMDB veri setinde %88.12 doğruluk oranı ile en iyi sonucu vermiştir, bu da LSTM'in uzun vadeli bağıntıları yakalama konusunda literatürde belirtilen avantajlarını desteklemektedir. Bununla birlikte, (Rumelli ve ark., 2019) tarafından yapılan çalışmada, Türkçe metinler için klasik makine öğrenimi algoritmalarının belirli durumlarda derin öğrenme yöntemlerine kıyasla daha verimli çalıştığı vurgulanmıştır. Amazon veri setinde elde edilen sonuçlar da LightGBM algoritmasının %88.39 doğruluk oranı ile en iyi makine öğrenimi modeli olduğunu göstermekte ve bu bulgu literatürdeki benzer çalışmalara örtüşmektedir. Bu karşılaştırmalar, çalışmada elde edilen bulguların mevcut literatürdeki yöntemlerle büyük ölçüde uyumlu olduğunu ve duygu analizi alanındaki genel eğilimleri desteklediğini göstermektedir.

Çalışmada elde edilen yüksek doğruluk oranlarının başlıca sebepleri arasında kullanılan metin temsil yöntemlerinin ve sınıflandırma algoritmalarının dikkatli bir şekilde seçilmesi ve farklı kombinasyonlarla test edilmesi yer almaktadır. Öncelikle, TF-IDF ve FastText gibi metin temsil yöntemleri, kelime sıklığı ve kelimeler arası ilişkiyi daha iyi modelleyerek metinlerin daha anlamlı bir şekilde temsil edilmesini sağlamıştır. Ayrıca, LightGBM ve XGBoost gibi gelişmiş gradient boosting algoritmaları, büyük veri kümeleri üzerinde daha yüksek doğruluk oranları elde edilmesini mümkün kılmıştır. Bu algoritmalar, veri içindeki önemli özellikleri belirleme ve sınıflandırma kararlarını optimize etme konusunda daha etkili çalışmaktadır. Bunun yanı sıra, LSTM modeli, metinlerdeki uzun vadeli bağıntıları başarılı bir şekilde yakalayarak derin öğrenme tabanlı duygu analizinde diğer yöntemlere kıyasla daha iyi sonuç vermiştir. Literatürde yapılan çalışmaların çoğunda, tek bir metin temsil yöntemi veya sınıflandırma algoritması kullanılırken, bu çalışmada birden fazla yöntem detaylı olarak karşılaştırılmış ve en iyi performans gösteren kombinasyon

belirlenmiştir. Ayrıca, iki farklı veri kümesi üzerinde yapılan deneyler sayesinde yöntemin genel uygulanabilirliği test edilmiş ve yüksek doğruluk oranlarının veri setlerine bağlı olmadığı gösterilmiştir. Bu faktörler bir araya geldiğinde, çalışmada elde edilen sonuçların literatürdeki diğer çalışmalara kıyasla genel olarak daha başarılı olmasını sağlamıştır.

Tablo 5. Var olan çalışmalar ile kıyaslama.

Çalışmalar	Metin Temsil Yöntemi	Algoritmalar	Doğruluk %	Veri Kümesi
(Rawat ve ark., 2022)	TF-IDF	BNB SVC LR	81 97 95	Twitter
(Demir ve Bilgin, 2023)	-	DistilBERT RoBERT AlBERT NB SVC RF	80 80 77 71 68 68	Haber Metinleri
(Öge ve Kayaalp, 2021)	-	LR	87	IMDb
(Fu ve ark., 2018)	Glove	WALE-LSTM LSTM	96 80.8	Kitap İncelemesi
(Rumelli ve ark., 2019)	Bigram	k-NN NB SVM RF	73.8 73.2 73.4 73.3	Hepsiburada Kullanıcı Yorumları
(Wang ve ark., 2021)	RGWE	CNN Bİ-LSTM	90.1 91.0	IMDb
(Hassan ve ark., 2021)	N-Grams	SVM k-NN DT NB	81.8 58.1 63.7 51.6	Twitter
(Başarslan ve Kayaalp, 2023)	Word2vec	SVM LR k-NN NB	87.8 81.9 80.6 81.6	Film Yorumları
(Poornima ve Priya, 2020)	TF-IDF	LR MNB SVM	86.23 83.54 85.69	Twitter

(Zhang ve Zheng, 2016)	TF-IDF	ELM kernels	88.74	Çince Metinler
		SVM	88.54	
(Sharma ve ark., 2023)	-	CNN	93.5	Çince Ürün
		LSTM	77.5	İncelemeleri
(Xu ve Song, 2023)	Word2vec	CNN	97.9	Chnsenticorp
		LSTM	97.68	veri seti
		GRU	97.89	
		Bert+BiLSTM	97.37	
		Bert + CNN	98.34	
(Aydın ve ark., 2021)	TF-IDF	SVM	73.50	Twitter
		LR	75.84	
		k-NN	62.03	
		ANN	70.39	
(Salur ve Aydın, 2022)	Fasttext	LSTM	74.33	Twitter
		Bİ-LSTM	74.68	
		GRU	74.32	
		BERT	75.34	
(Singh ve ark., 2022)	TF-IDF	RF	77.90	Twitter
		SVM	83.76	
		GB	80.46	
		XGBoost	81.55	
(Saraswat ve ark., 2023)	Bag-of-Words	ANN	84	Ses Dosyası
(Pandya ve ark., 2021)	Word2vec	SVM	76.53	Twitter
		RNN	78.15	
		LSTM	80.21	
		Bi-LSTM	81.33	
(Kemaloğlu ve ark., 2021)	Bag-of-Words	MLR	80.91	Twitter
		RF	83.93	
(Hammad ve Anwar, 2019)	N-gram	SVM	66.00	Twitter
		NB	62.30	
		DT	68.20	
		K-NN	67.40	
(Jayakody ve Kumara, 2021)	TF-IDF	SVM	86.47	Twitter
		LR	87.2	
		K-NN	83.87	

<i>BU ÇALIŞMA</i>	<i>Word2vec</i>	<i>XGBoost</i>	<i>88.54</i>	<i>AMAZON</i>
<i>BU ÇALIŞMA</i>	<i>TF-IDF</i>	<i>SVM</i>	<i>88.85</i>	<i>IMDb</i>

5. Genel Değerlendirme ve Sonuçlar

Bu çalışmada, Amazon ve IMDb veri setleri kullanılarak duygu analizi gerçekleştirilmiş ve çeşitli metin temsilleri ile sınıflandırma algoritmalarının performansları karşılaştırılmıştır. Amazon veri setinde üç sınıflı (olumlu, olumsuz, tarafsız), IMDb veri setinde ise iki sınıflı (olumlu, olumsuz) sınıflandırma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, derin öğrenme ve makine öğrenmesi yöntemlerinin farklı sınıflandırma problemlerindeki performansını ortaya koymaktadır.

Amazon veri seti üzerinde yapılan analizlerde, derin öğrenme yöntemleri arasında en yüksek doğruluk oranı %88.30 ile TF-IDF ve FastText kullanan LSTM algoritması tarafından elde edilmiştir. Bu sonuç, LSTM'in metinlerdeki uzun süreli bağıntıları yakalamadaki üstün başarısını ortaya koymaktadır. CNN ve RNN modelleri de benzer doğruluk oranlarına ulaşmış, ancak LSTM biraz daha yüksek performans sergilemiştir. Öte yandan, makine öğrenmesi yöntemleri arasında LightGBM algoritması %88.39 doğruluk oranı ile en yüksek performansı gösterirken, Lojistik Regresyon algoritması %88.34 doğruluk oranı ile dikkat çekici bir performans sergilemiştir. Elde edilen bulgular, makine öğrenmesi algoritmalarının da yüksek doğruluk oranlarına ulaşabildiğini ve bazı durumlarda derin öğrenme yöntemlerine kıyasla daha hızlı ve verimli olduğunu ortaya koymaktadır.

IMDb veri seti üzerinde gerçekleştirilen analizlerde, derin öğrenme yöntemleri arasında en yüksek doğruluk oranı %87.84 ile FastText kullanan LSTM algoritması tarafından elde edilmiştir; bu sonuç LSTM'in metinlerdeki uzun süreli bağıntıları başarılı bir şekilde yakaladığını göstermektedir. Ayrıca, Word2Vec ile LSTM %85.37 doğruluk oranı ile yüksek bir performans sergilemiştir. Makine öğrenmesi yöntemleri arasında ise Lojistik Regresyon %88.85 doğruluk oranı ile en yüksek performansı gösterirken, Support Vector Machine algoritması %88.07 doğruluk oranı ile dikkat çekici bir başarı elde etmiştir. Bu sonuçlar, iki sınıflı duygu analizinde makine öğrenmesi algoritmalarının oldukça etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışmada Amazon ve IMDb veri setlerinde duygu analizi gerçekleştirilmiş ve derin öğrenme ile makine öğrenmesi yöntemleri karşılaştırılmıştır. Amazon veri setinde en yüksek doğruluk oranı LightGBM algoritması ile elde edilirken (%88.39), IMDb veri setinde Lojistik

Regresyon algoritması %88.85 ile en yüksek doğruluk oranına ulaşmıştır. Derin öğrenme modelleri, özellikle büyük ve karmaşık veri setlerinde daha avantajlı olmasına rağmen, bazı durumlarda makine öğrenmesi modelleri daha hızlı ve verimli sonuçlar sunabilmektedir. İki sınıflı ve üç sınıflı sınıflandırma problemleri, model performansı ve sınıflandırma zorluğu açısından farklılıklar göstermektedir. Bu bulgular, duygu analizi projelerinde kullanılacak yöntemi belirlerken dikkate alınması gereken önemli faktörleri ortaya koymaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmada açık kaynaklı iki veri kümesi kullanılmıştır. İlk veri kümesine <https://www.kaggle.com/datasets/eswarchandt/amazon-music-reviews> bağlantından erişilebilir. İkinci veri kümesine ise <https://www.kaggle.com/datasets/lakshmi25npathi/imdb-dataset-of-50k-movie-reviews> bağlantından erişilebilir. Bu veri kümelerini hazırlayıp kullanıma sunan kuruluşlara 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

- Aydın, Z. E., Ozturk, Z. K., & Cıcek, Z. I. E. (2021). Turkish sentiment analysis for open and distance education systems. *Turkish Online Journal of Distance Education*, 22(3), 124-138.
- Başarslan, M. S., & Kayaalp, F. (2023). Sentiment analysis with ensemble and machine learning methods in multi-domain datasets. *Turkish Journal of Engineering*, 7(2), 141-148.
- Bhasin, A., & Das, S. (2021, May). Twitter sentiment analysis using Machine Learning and Hadoop: A comparative study. In *2021 2nd International Conference on Secure Cyber Computing and Communications (ICSCCC)* (pp. 267-272). IEEE.
- Can, U., & Alatas, B. (2017). Duygu analizi ve fikir madenciliği algoritmalarının incelenmesi. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 3(1), 75-111.

- Chandra, Y., & Jana, A. (2020, March). Sentiment analysis using machine learning and deep learning. *In 2020 7th international conference on computing for sustainable global development (INDIACom)* (pp. 1-4). IEEE.
- Chen, L. C., Lee, C. M., & Chen, M. Y. (2020). Exploration of social media for sentiment analysis using deep learning. *Soft Computing*, 24(11), 8187-8197.
- Dhariwal, N., Akunuri, S. C., & Banu, K. S. (2023). Audio and Text Sentiment Analysis of Radio Broadcasts. *IEEE Access*, 11, 126900-126916.
- Demir, E., & Bilgin, M. (2023, September). Sentiment Analysis from Turkish News Texts with BERT-Based Language Models and Machine Learning Algorithms. *In 2023 8th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)* (pp. 01-04). IEEE.
- Fu, X., Yang, J., Li, J., Fang, M., & Wang, H. (2018). Lexicon-enhanced LSTM with attention for general sentiment analysis. *IEEE Access*, 6, 71884-71891.
- Hammad, M., & Anwar, H. (2019, November). Sentiment analysis of sindhi tweets dataset using supervised machine learning techniques. *In 2019 22nd International Multitopic Conference (INMIC)* (pp. 1-6). IEEE.
- Hassan, S. M., Khan, J., Khan, M. A., Khan, M. S., Ahmad, I., & Khan, M. (2021). Detecting COVID-19 Pandemic Using Sentiment Analysis of Tweets. *Artificial Intelligence Theory and Applications*, 1(2), 39-47.
- He, H., Zhou, G., & Zhao, S. (2022). Exploring E-commerce product experience based on fusion sentiment analysis method. *IEEE Access*, 10, 110248-110260.
- Jagadeesan, M., Saravanan, T. M., Selvaraj, P. A., Ali, U. A., Arunsivaraj, J., & Balasubramanian, S. (2022, December). Twitter Sentiment Analysis with Machine Learning. *In 2022 International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems (ICACRS)* (pp. 681-686). IEEE.
- Jayakody, J. P. U. S. D., & Kumara, B. T. G. S. (2021, December). Sentiment analysis on product reviews on twitter using Machine Learning Approaches. *In 2021 International Conference on Decision Aid Sciences and Application (DASA)* (pp. 1056-1061). IEEE.
- Joshi, V., Patel, S., Agarwal, R., & Arora, H. (2023, March). Sentiments Analysis using Machine Learning Algorithms. *In 2023 Second International Conference on Electronics and Renewable Systems (ICEARS)* (pp. 1425-1429). IEEE.
- Karayığit, H., Acı, Ç., & Akdağlı, A. (2018). A Review of Turkish Sentiment Analysis and Opinion Mining. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 6(2), 94-98.
- Kim, R. Y. (2021). Using online reviews for customer sentiment analysis. *IEEE Engineering Management Review*, 49(4), 162-168.
- Kemaloğlu, N., Küçükşille, E., & Özgünsür, M. (2021). Turkish sentiment analysis on social media. *Sakarya University Journal of Science*, 25(3), 629-638.
- Li, Z., Li, R., & Jin, G. (2020). Sentiment analysis of danmaku videos based on naïve bayes and sentiment dictionary. *IEEE Access*, 8, 75073-75084.
- Liu, H., Chen, X., & Liu, X. (2022). A study of the application of weight distributing method combining sentiment dictionary and TF-IDF for text sentiment analysis. *IEEE Access*, 10, 32280-32289.
- Onan, A. (2018). Sentiment analysis on Twitter based on ensemble of psychological and linguistic feature sets. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 6(2), 69-77.
- Öge, B. C., & Kayaalp, F. (2021). Farklı Sınıflandırma Algoritmaları ve Metin Temsil Yöntemlerinin Duygu Analizinde Performans Karşılaştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(6), 406-416.
- Pandya, V., Somthankar, A., Shrivastava, S. S., & Patil, M. (2021, December). Twitter sentiment analysis using machine learning and deep learning techniques. *In 2021 2nd International Conference on Communication, Computing and Industry 4.0 (C2I4)* (pp. 1-5). IEEE.
- Patil, R., Boit, S., Gudivada, V., & Nandigam, J. (2023). A survey of text representation and embedding techniques in nlp. *IEEE Access*, 11, 36120-36146.
- Poornima, A., & Priya, K. S. (2020, March). A comparative sentiment analysis of sentence embedding using machine learning techniques. *In 2020 6th international conference on advanced computing and communication systems (ICACCS)* (pp. 493-496). IEEE.
- Poria, S., Hazarika, D., Majumder, N., & Mihalcea, R. (2020). Beneath the tip of the iceberg: Current challenges and new directions in sentiment analysis research. *IEEE transactions on affective computing*, 14(1), 108-132.
- Rawat, A., Maheshwari, H., Khanduja, M., Kumar, R., Memoria, M., & Kumar, S. (2022, May). Sentiment analysis of Covid19 vaccines tweets using NLP and machine learning classifiers. *In 2022 International*

- Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COM-IT-CON)* (pp. 225-230). IEEE.
- Rizk, Y. E., & Asal, W. M. (2021, October). Sentiment analysis using machine learning and deep learning models on movies reviews. In *2021 3rd Novel Intelligent and Leading Emerging Sciences Conference (NILES)* (pp. 129-132). IEEE.
- Rumelli, M., Akkuş, D., Kart, Ö., & Isik, Z. (2019, October). Sentiment analysis in Turkish text with machine learning algorithms. In *2019 Innovations in intelligent systems and applications conference (ASYU)* (pp. 1-5). IEEE.
- Salur, M. U., & Aydın, İ. (2022). Türkçe tweetler için derin özellik çıkarımı tabanlı yeni bir duygu sınıflandırma modeli. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 34(1), 1-13.
- Satrya, R. N., Pratiwi, O. N., Fa'rifah, R. Y., & Abawajy, J. (2022, November). Cryptocurrency sentiment analysis on the twitter platform using support vector machine (svm) algorithm. In *2022 International Conference Advancement in Data Science, E-learning and Information Systems (ICADEIS)* (pp. 01-05). IEEE.
- Sarkar, K., & Bhowmick, M. (2017, December). Sentiment polarity detection in bengali tweets using multinomial Naïve Bayes and support vector machines. In *2017 IEEE Calcutta Conference (CALCON)* (pp. 31-36). IEEE.
- Saraswat, S., Bhardwaj, S., Vashistha, S., & Kumar, R. (2023, March). Sentiment Analysis of Audio Files Using Machine Learning and Textual Classification of Audio Data. In *2023 6th International Conference on Information Systems and Computer Networks (ISCON)* (pp. 1-5). IEEE.
- Sharma, S., Pandey, A., Kumar, V., Ohdar, D., Pillai, A. R., & Mahajan, M. (2023, May). Recent Trends in Sentiment Analysis using Different Machine Learning based Models: A Short Review. In *2023 2nd International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing (ICAAIC)* (pp. 474-481). IEEE.
- Singh, S., Kumar, K., & Kumar, B. (2022, May). Sentiment analysis of Twitter data using TF-IDF and machine learning techniques. In *2022 International Conference on Machine Learning, Big Data, Cloud and Parallel Computing (COM-IT-CON)* (pp. 252-255). IEEE.
- Tan, Y. Y., Chow, C. O., Kanesan, J., Chuah, J. H., & Lim, Y. (2023). Sentiment analysis and sarcasm detection using deep multi-task learning. *Wireless personal communications*, 129(3), 2213-2237.
- Tsai, M. F., & Huang, J. Y. (2021). Sentiment analysis of pets using deep learning technologies in artificial intelligence of things system. *Soft Computing*, 25(21), 13741-13752.
- Wang, Y., Huang, G., Li, J., Li, H., Zhou, Y., & Jiang, H. (2021). Refined global word embeddings based on sentiment concept for sentiment analysis. *IEEE Access*, 9, 37075-37085.
- Xu, L., & Song, Y. (2023, April). Comparison of text sentiment analysis based on traditional machine learning and deep learning methods. In *2023 4th International Conference on Computer Engineering and Application (ICCEA)* (pp. 692-695). IEEE.
- Zhang, X., & Zheng, X. (2016, July). Comparison of text sentiment analysis based on machine learning. In *2016 15th international symposium on parallel and distributed computing (ISPDC)* (pp. 230-233). IEEE.

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 yardımları 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 verilmek 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 aldığını ve bu nedenle doğabilecek tüm uyuşmazlıklardan sorumlu olacağını 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. Gerekli olduğu 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 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).