



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 13 Sayı 3

2023

Volume 13 Issue 3



K F B D

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

Giresun Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Giresun University
Institute of Natural Sciences

Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi
The Black Sea Journal of Sciences

Cilt 13, Sayı 3, Haziran 2023
Volume 13, Issue 3, June 2023

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)

Yardımcı Editörler / Assistant Editors

Doç. Dr. Selin KALKAN
Giresun Üniversitesi
Doç. Dr. Yasemin HACIOĞLU
Giresun Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Kenan YANMAZ
Giresun Üniversitesi

Alan Editörleri / Field Editors

Prof. Dr. Temel ÖZTÜRK
Prof. Dr. Bahadır KOZ
Prof. Dr. Seydahmet ÇAY
Doç. Dr. Mehmet Soner ENGİN
Doç. Dr. Onur Özdal MENGİ
Doç. Dr. Fulya AYDIN TEMEL
Doç. Dr. Selin KALKAN
Doç. Dr. Volkan BAŞER
Doç. Dr. Murat GÜL
Doç. Dr. Erdiç ŞAHİN
Doç. Dr. Tayfun ARSLAN
Doç. Dr. Eren KÖMÜRLÜ
Doç. Dr. Serdal KAYA
Doç. Dr. Yasemin HACIOĞLU
Doç. Dr. Selen AYAS
Dr. Öğr. Üyesi Kenan YANMAZ
Dr. Öğr. Üyesi Serdar SOYLU
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÇELİK
Dr. Öğr. Üyesi Selçuk ATASOY
Dr. Öğr. Üyesi Zeliha ÇOLAK TOKA
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KILINÇ
Dr. Öğr. Üyesi Süleyman KÖSE

Mizanpaj Editörleri / Manuscript Editors

Doç. Dr. Arzu AYDIN UNCUMUSAOĞLU
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>

Dil Editörleri / Language Editors

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

İstatistik Editörleri / Statistical Editors

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

Editör Kurulu / Editorial Board

Prof. Dr. Alp Yalçın TEPE
Prof. Dr. Birol ERTUĞRAL
Prof. Dr. Birsen Şengül OKSAL
Prof. Dr. Temel ÖZTÜRK
Prof. Dr. Elif Neyran SOYLU
Prof. Dr. Cengiz MUTLU
Prof. Dr. Hakan BEKTAŞ
Prof. Dr. Saim TOPÇU
Prof. Dr. Hasan Hüseyin AKSU
Prof. Dr. Hakan ADATEPE
Prof. Dr. İmdat İŞCAN
Prof. Dr. Mustafa Recep KAÇAL
Doç. Dr. Murat YOLCU
Doç. Dr. Şerif Ali DEĞİRMENÇAY
Dr. Öğr. Üyesi Zuhul YOLCU

Danışma Kurulu / Advisory Board

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)

Yazı İşleri Müdürü / Editorial Manager

Dr. Öğr. Üyesi Kenan YANMAZ

Grafik-Tasarım / Graphic-Design

Dr. Öğr. Üyesi Erkan GÜLER

Redaksiyon / Redaction

Dr. Öğr. Üyesi Fikret USLUCAN

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

Araştırma Makaleleri / Research Articles

Savfa/Page

Batimetri Haritalarının Akustik İskandil ve Uydu Görüntüleri Yöntemi ile Üretimi: Sinop Hurmadibi Örneği Eray YILMAZ Faik Ahmet SESLİ Ömer Faruk UZUN	764-780
Improving the Thermal Efficiency of the Parabolic Trough Solar Collector: An Overview Faruk YEŞİLDAL Ahmet Numan ÖZAKIN Safaa BAAMEL Ahmad ALAGELE	781-800
Floresan Mikroskop Sistemlerinde Yüksek Doğruluklu Nükleer Segmentasyonu için Otomatik Kodlayıcı Tabanlı Modellerin Geliştirilmesi Sümeyye Nur EMİR Sibel DANIŞMAZ Hülya DOĞAN Ramazan Özgür DOĞAN	801-813
Namlu Malzemesi Seçiminde Sezgisel Bulanık Karar Verme Metodolojisi Yaşam KANDEMİR Temel VAROL Uğur Temel YILDIZ	814-832
Calculation of Optimum Transit Times with Real-Coded Genetic Algorithm Nimet IŞIK	833-842
Kare Kanatçıklı Isı Alıcıda Elektrosprey Soğutma ile Isı Transfer Karakteristiklerinin Belirlenmesi Abdüssamed KABAKUŞ Kenan YAKUT	843-857
Otomatik Gerilim Regülatörü Sistemi için Farklı Optimizasyon Teknikleri Ayarlı Denetleyici Tasarımı Özay CAN	858-870
Farklı Hava Üfleme Açılarında Kanat Yüzey Sıcaklığı Değişiminin Deneysel Olarak Araştırılması Birkut GÜLER	871-881
Synthesis and Characterization of Poly(β -Propiolactone) b-Poly(methyl methacrylate) Tri-arm Block Copolymer Using Atom Transfer Radical Polymerization Ergül MEYVACI Efkân ÇATIKER Temel ÖZTÜRK	882-893
GeoEye-1 Uydu Görüntüsü Kullanarak Ormanlık Alanların Nesne Tabanlı Sınıflandırma Yöntemi ile Analizi: Kastamonu İli Örneği Duygu BIYIKLI Aycan MARANGOZ	894-925
Yüksek Sıcaklık Etkisindeki CFRP Donatıların Dayanım Kayıplarının Matematiksel Yöntemlerle Tespiti Şeymanur ARSLAN Ferhat AYDIN	926-942
Investigating the Effects of Different Types of Battery Impacts in Energy Storage Systems on Standalone Hybrid Renewable Energy Systems Aykut Fatih GÜVEN Şaban TÜRKMEN Ertuğrul AŞIKLI Gamze ÖRNEK	943-964
Konut Bölgelerinde Elektrikli Taşıt Şarj İstasyonlarının Elektrik Şebekesine Entegrasyonunun Analizi Recep Buğra MERT Nurettin UMURKAN	965-980
Ergan Dağı'nın Farklı Yükseltilerinde Yaygın Olarak Yetişen Bitkilerde Ağır Metal (Ba, Cd, Co, Cr, Pb) Birikiminin Belirlenmesi Etem OSMA Onur KIYMAZ Tuğçe VAROL Halil İbrahim TÜRKÖĞLU Faruk YILDIZ Ali KANDEMİR Mert ELVERİCİ Engin KILIÇ Aysel AKVERDİ Kader KUŞ Abdullah HASBENLİ	981-996
(E)-2,4-di-tert-bütıl-6-((4-florofenilimino)metil)fenol ve (E)-2,4-di-tert-bütıl-6-((3-iyodo-4-metilfenilimino)metil)fenol Bileşikleri için Moleküler Docking ve ADME Çalışmaları Enis GÜZEL Mustafa MACİT Metin YAVUZ	997-1011
Karbon Emisyonuna Dayalı Araç Muayene İstasyonu Yer Seçimi: Zonguldak Örneği Serkan ÖREN Sefa KOCABAŞ	1012-1023

Araştırma Makaleleri / Research Articles

Savfa/Page

- Araklı ve çevresinde (Trabzon) Sel ve Taşkına Neden Olan Derelerin Morfometrik Analizlerle Taşkın Duyarlılıklarının Belirlenmesi**
Vedat AVCİ İskender DÖLEK Taygun UZELLİ 1024-1054
- Kazein ve Glüten İzolatlarının Bazı Fonksiyonel Özelliklerinin Karşılaştırılması**
Ümran CANSU Gülistan OKUTAN Gökhan BORAN 1055-1069
- An Experimental Investigation into Roughness Transfer in Asymmetrical Rolling of Steel Strips**
Bilal ÇOLAK Zahoor AHMED Batuhan ÖZAKIN Naci KURGAN 1070-1089
- Şebeke Bağlantılı Hibrit Yenilenebilir Enerji Sisteminin Homer ile Ekonomik ve Çevresel Analizi: İzmir Endüstriyel Bölgesi Örneği**
Güler YILMAZ Mertkan ŞAHİN Ömür AKYAZI Barış ÖZTÜRK 1090-1106
- Investigation Mechanical Properties of Shipbuilding Steel Joined By Submerged Metal Arc Welding And Gas Metal Arc Welding Methods**
Dursun Murat SEKBAN Resul KILICASLAN 1107-1116
- Farklı Oluk/Kutup Oranlarına Sahip Sıralı Kutuplu Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Analizi**
İbrahim AYDIN Onur Özdal MENGİ Serdal ARSLAN 1117-1134
- Lactarius deliciosus Biyokütlesi ile Sulu Çözeltilerden Oksitetrasiklin Giderimi**
Aşlı GÖÇENOĞLU SARIKAYA Bilgen OSMAN Elif TUMAY ÖZER 1135-1152
- Bir Kalina Çevriminin Termodinamik ve Ekonomik Açından Değerlendirilmesi**
Osman KARA Önder KAŞKA 1153-1168
- Şehir İçi Raylı Sistem Araçlarında Verimli Dinamik Sürüş Tekniği Modellemesi ve Sürekli Zaman Karınca Kolonisi Algoritması (ACOR) ile Optimizasyonu**
Ramazan GÜNGÜNEŞ Volkan ATEŞ Ertuğrul ÇAM 1169-1191
- Çoruh Deltası (Gürcistan) Kıyı Aşınım ve Birikim Hızlarının DSAS Kullanılarak Analizi**
Mustafa Murat KALE Şevval KOÇ 1192-1212
- Investigation of Fluid Flow Through the Ureteral Canal with A Porous Media Approach in the Ureteral Stone Reduction Process**
Merdin DANIŞMAZ 1213-1226
- Zeytinyağı Üretiminde Verim Artırıcı Maddelerin Kullanımının Bazı Kalite Özellikleri Üzerine Etkileri**
Mustafa OTAĞ Aytaç GÜMÜŞKESEN 1227-1241

Batimetri Haritalarının Akustik İskandil ve Uydu Görüntüleri Yöntemi ile Üretimi: Sinop Hurmadibi Örneği

Eray YILMAZ¹, Faik Ahmet SESLİ², Ömer Faruk UZUN^{3*}

Öz

Çalışmada; akustik iskandil ve uydu kaynaklı yöntemler ile batimetrik haritaların üretilmesi ve yorumlanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda Sinop ili, Gerze ilçesinde yer alan Hurmadibi mevkinde akustik iskandil yöntemi ile batimetri çalışması yapılmıştır. Akabinde elde edilen veriler kullanılarak batimetri haritası üretilmiştir. Uydu kaynaklı batimetri haritası üretimi için Landsat 8 uydu görüntüleri kullanılmıştır. Uydu görüntüsü temin edildikten sonra, uydu sensörlerindeki sistematik hatalar ve atmosferik etkilerin giderilmesi için radyometrik düzeltme işlemi uygulanmıştır. Daha sonra Envi uzaktan algılama yazılımı aracılığıyla görüntüden, bağıl ve mutlak derinlik verileri elde edilmiştir. Uydu görüntüsünden derinliklerin elde edilmesinde, uydu görüntüsündeki bantların oranlanması prensibine dayanan Log Ratio Transformation (LRT) yöntemi kullanılmıştır. Bağıl derinlik değerlerinden mutlak derinlik değerlerine ulaşmak için akustik iskandil yöntemi ile elde edilen 15 kalibrasyon noktası olarak kullanılmıştır. Bağıl derinlikler ile mutlak derinlikler arasında regresyon modeli oluşturulmuş, regresyona ait R^2 değeri 0.78 olarak bulunmuştur. Uydu görüntülerinden batimetri haritası elde edildikten sonra her iki yöntemden elde edilen derinlikler karşılaştırılarak karesel ortalama hata ± 1.07 m olarak hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucunda; diğer yöntemlere nazaran yüksek doğruluk sağlayan ve daha hızlı sonuç veren sonar yöntemlerin, batimetri çalışmaları için en uygun yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Batimetri, Hidrografi, Coğrafi bilgi sistemleri, Uydu görüntüleri, Akustik iskandil, SONAR

Production of Bathymetry Maps by Acoustic Sounding and Satellite Imaging Method: The Example of Sinop Hurmadibi

Abstract

In the study; It is aimed to produce and interpret bathymetric maps with acoustic sounder and satellite sourced methods. In this context, bathymetry study was carried out with acoustic sounding method in Hurmadibi locality in Gerze district of Sinop province. Subsequently, a bathymetry map was produced using the data obtained. Landsat 8 satellite images were used for the generation of satellite-based bathymetry maps. After obtaining the satellite image, the radiometric correction process was applied to eliminate the systematic errors and atmospheric effects in the satellite sensors. Then, relative and absolute depth data were obtained from the image via Envi remote sensing software. The Log Ratio Transformation (LRT) method, which is based on the principle of proportioning the bands in the satellite image, is used to obtain the depths from the satellite image. In order to reach the absolute depth values from the relative depth values, 15 calibration points obtained by the acoustic sounder method were used. A regression model was created between relative and absolute depths, and the R^2 value of the regression was found to be 0.78. After obtaining the bathymetry map from the satellite images, the depths obtained from both methods were compared and the mean square error was calculated as ± 1.07 m. As a result of the study; It has been concluded that sonar methods, which provide higher accuracy and faster results compared to other methods, are the most suitable method for bathymetry studies.

Keywords: Bathymetry, Hydrography, Geographical information systems, Satellite images, Acoustic sounder, SONAR

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Harita Mühendisliği, Samsun, Türkiye, erayyilmazhm@gmail.com

²Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye, fasesli@omu.edu.tr

³Sinop Üniversitesi, Boyabat MYO, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Sinop, Türkiye, ofuzun@sinop.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0002-8946-7541>

²<https://orcid.org/0000-0001-8352-734X>

³<https://orcid.org/0000-0002-0391-4495>

1. Giriş

Türkiye, üç tarafı denizlerle çevrili bir yarımada ülkesidir. Ülkemizin, kıyı bölgelerinde ve karasularındaki güvenliğini ve hâkimiyetini artırmak, denizlerde seyir emniyetini sağlamak, denizlerimizin altındaki potansiyel enerji kaynaklarını tespit etmek gibi konularda ilerleme kaydedebilmek için deniz tabanı topoğrafyasının bilinmesi, dolayısıyla batimetri çalışmalarına önem verilmesi gerekmektedir (Ulu, 2006). Batimetri, kıyılarda yaşanan erozyonun önlenmesi amacıyla yapılan dalgakıranlar, balıkçılığı geliştirmek için yapılan balıkçı barınakları, ticareti ve turizmi geliştirmek için yapılan limanlar için de en önemli çalışmalardan biridir (NOAA, 2021). Bu çalışmalar geçmişte klasik yöntemler olarak adlandırılan ip iskandil, lata iskandil vb. yöntemlerle yapılırken günümüzde SONAR, LİDAR gibi modern yöntemlerle yapılmaktadır.

Çalışmada, bilimsel ve teknolojik gelişmelerle birlikte yeni harita üretim yöntemleri, bu yöntemlerin konumsal doğruluğunun ne olduğu ve hangi çalışmalarda kullanılabileceği, batimetri çalışmalarında kullanılan sonar sistemlerin çalışma prensibi, sonar sistemle batimetrinin avantaj ve dezavantajları, uydu görüntüsünün ne olduğu, uydu görüntülerinde çözünürlük kavramı, uyduların mekânsal, spektral, radyometrik, zamansal çözünürlüklerinin karşılaştırılması ve uydu görüntülerindeki radyometrik, geometrik vb. hata türleri, hataların nedenleri ve bu hataların nasıl düzeltilebileceği, uydu görüntülerinden yararlanılarak batimetrik haritanın nasıl üretilebileceği anlatılarak üretilen batimetrik haritaların doğruluk ve duyarlılığının belirlenmesi amaçlanmıştır (Açar, 2021; Akgül vd., 2018; Güngör, 2019; Sağdıç, 2020; Uzakara, 2021). Uygulamanın daha önce yapılan benzer çalışmalar ile tutarlılığı test edilmelidir ve bu değerlendirmelere yine çalışma kapsamında yer verilmiştir (Ekizoğlu, 2011). Çalışma ve uygulamalar sonucunda akustik sonar ve uydu görüntüleri ile batimetri haritaları üretilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Çalışma Alanı

Çalışma kapsamında Sinop ili Gerze ilçesi Hurmadibi Plajı mevki uygulama alanı olarak belirlenmiş, bu lokasyonda hem akustik iskandil hem de uydu görüntüleri kullanılarak iki ayrı yöntemle batimetri haritası üretilmiştir. Uygulama alanı olarak belirlenen Hurmadibi Plajı, 41° 47' 19.68" - 41° 47' 58.56" Kuzey paralelleri ile 35° 11' 30.32" - 35° 12' 02.89" Doğu meridyenleri arasında yer almaktadır. Şekil 1'de uygulama alanı gösterilmiştir.



Şekil 1. Uygulama alanı

2.2. Kullanılan Yazılım ve Materyaller

Çalışma kapsamında, akustik iskandil (echo sounder) yönteminde derinlik ölçümü için KBS200 Singlebeam Echosounder, deniz içerisinde sesin yayılma hızını tespit etmek için AML Oceanographic Base X2 ses hızı profillemeye cihazı, veri toplama ve görüntüleme yazılımı olarak Kordil Batimetri Studio, ses hızı verilerinin analizi ve dışa aktarımı için Seacast v4.4, veri düzenleme işlemleri için MS Excel 2016, veri işleme, analiz ve değerlendirme için Netcad 8.0 kullanılmıştır. Uydu görüntüleri ile batimetri yönteminde Sentinel 2 uydu görüntüsü kullanılmıştır; uydu 13 spektral banda sahip optik bir sensör taşımaktadır : Bu sensör 10m uzamsal çözünürlükte dört band, 20m çözünürlükte altı band ve 60m uzamsal çözünürlükte üç band kapsayacak şekilde tasarlanmıştır. Uyduların çerçeve genişliği 290 km dir. . Veri işleme ve analizi için ise ArcMap 10.3 ve ENVI 5.3 yazılımı kullanılmıştır.

2.3. Akustik İskandil (Echosounder) Yöntemi ile Batimetri Haritası Üretimi

Echo sounder yöntemi ile batimetri çalışmalarında, çalışma alanına ilişkin rüzgar, yağış, dalga boyu vb. meteorolojik veriler büyük önem taşıdığından yüksek doğrulukta bir batimetri çalışması için yağışın olmadığı, rüzgar ve dalga boyunun az olduğu bir gün tercih edilmiştir. Ayrıca echo sounder; tekne, bot vb. bir deniz aracına entegre edileceğinden kullanılacak deniz aracının çalışmaya uygun olarak seçilmesi gerekmektedir (Aksoy, 2016; Aykut, 2009). Batimetri çalışmalarında kullanılacak deniz aracı; dalgalara karşı olabildiğince stabil, manevra kabiliyetinin yüksek, sığ alanlarda deniz

dibine oturmaması için draft boyunun kısa olması gerekir. Echosounder yöntemi ile batimetri çalışması için öncelikle hava durumunun elverişli olduğu günleri tespit etmek amacıyla yöredeki balıkçılarla iletişim kurulmuş, Windy gibi hava durumu tahmin siteleri incelenmiş ve 16.06.2021 tarihinin çalışma için uygun olduğuna kanaat getirilmiştir.

Şekil 2’de echo sounder yöntemi ile batimetri çalışmasında kullanılan ölçüm cihazlarının görüntüleri yer almaktadır.

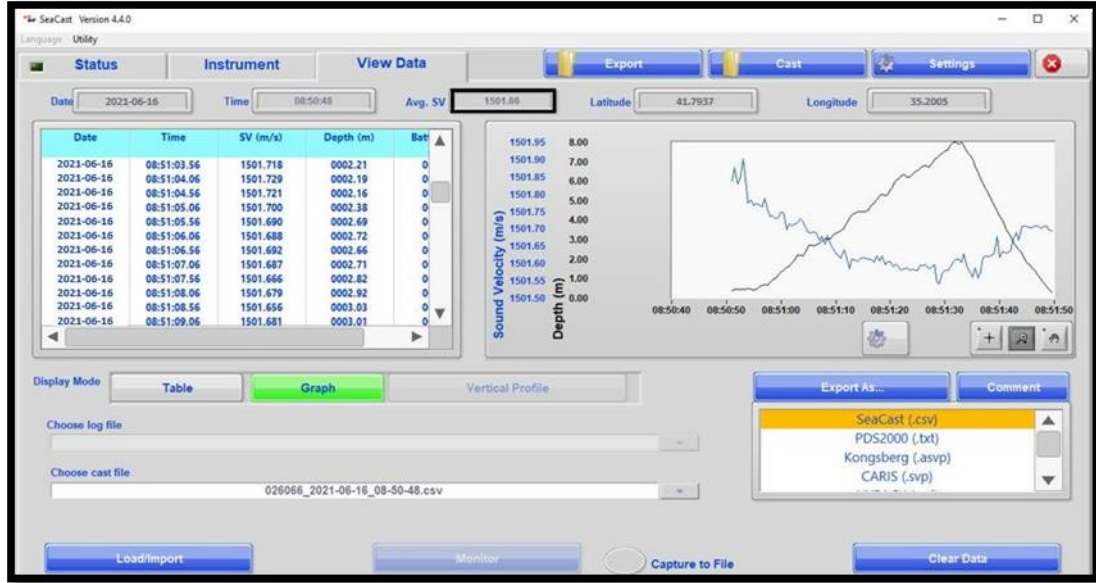


Şekil 2. Çalışmada kullanılan ölçüm sistemleri

Ölçüm tarihinde, öncelikle echo sounder yönteminde akustik sinyal üreten transducer ve yatay konumlandırmayı sağlayan GNSS alıcısının yer aldığı jalon, deniz yüzeyine dik olacak şekilde tekneye entegre edilerek jalon doğrultusu ile çekül doğrultusu arasındaki açıdan kaynaklı yaşanabilecek yatay ve düşey konum hatalarının önüne geçilmiştir. Sonrasında deniz yüzeyinin altına yerleştirilen transducer ile deniz yüzeyi arasındaki dik uzunluk metreyle ölçülmüş ve 0.29 m olarak tespit edilmiştir. Son olarak derinlik verilerini ulusal düşey datuma dayandırmak amacıyla kullanılan deniz seviyesi (su kotu), TUDES’ten (Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi) elde edilebilmektedir ve bu portaldan deniz seviyesi 0.61 m olarak tespit edilmiştir (Önder, 2002; TUDES, 2022).

Ölçüme hazırlık aşamaları tamamlandıktan sonra; sesin, deniz içerisindeki yayılma hızını tespit etmek amacıyla ölçüm sahasının ortalarında ses hızı profilleme cihazı deniz dibine salınıp geri çekilmiştir. Ses hızına ait verilerin toplanması sonrası verilerin SeaCast yazılımında görüntülenip

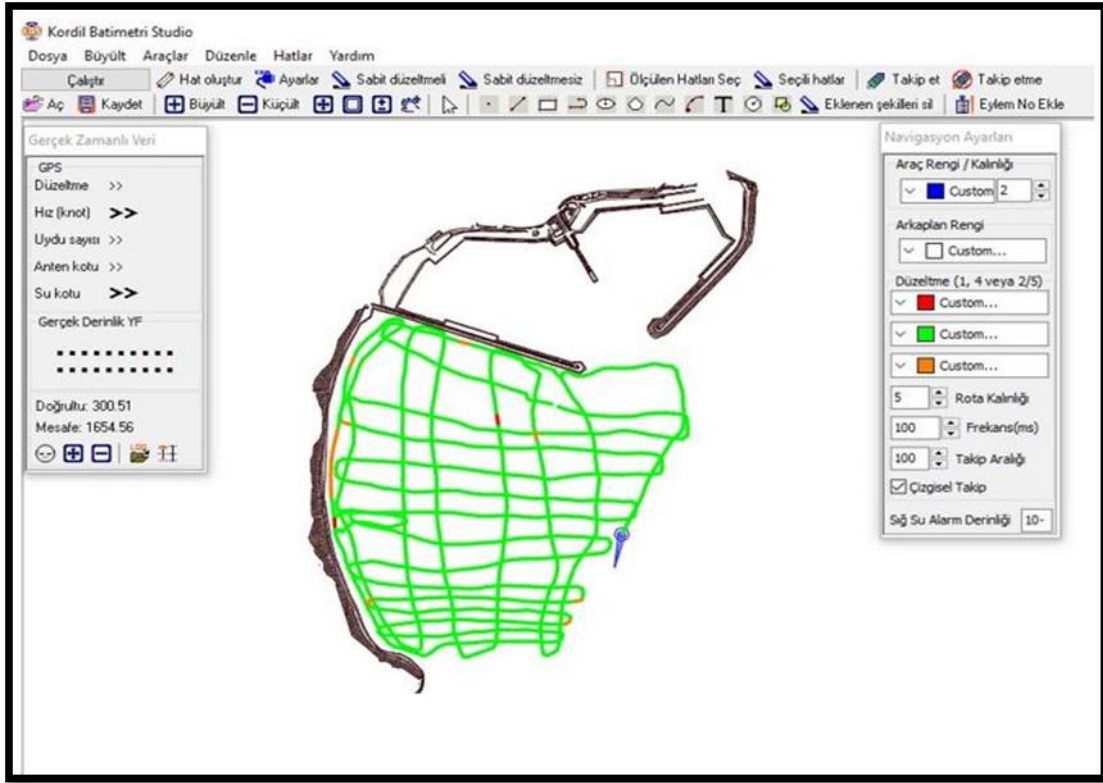
değerlendirilme aşamasına geçilmiştir. Şekil 3'te ölçüme ait ses hızı verilerinin SeaCast yazılımında işleme görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3. SeaCast ses hızı profili oluşturulma görüntüsü

Kordil Batimetri Studio yazılımında transducer ile deniz yüzeyi arasındaki uzunluk, deniz seviyesi (su kotu), ses hızı bilgileri vb. parametreler girilerek derinlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Derinlik ölçümlerinde yatay konumlandırma; GNSS alıcısından, TUSAGA-Aktif istasyonları kullanılarak Cors-RTK yöntemi VRS tekniği ile yapılmıştır. Echo sounder derinlikleri doğru olarak ölçüp ölçmediğini test etmek amacıyla tekne, sahanın çeşitli noktalarında durdurulmuş ve denize ip iskandil salınarak ip iskandilin gösterdiği derinlik ile echo sounder'in gösterdiği derinlik karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonrası iki yöntem arasındaki farkların (3-5 cm) dikkate değer olmadığına, echo sounder ile yapılan ölçümlere güvenilebileceğine kanaat getirilmiştir ve çalışma bu şekilde gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4'te batimetri verileri toplanırken veri akışının gerçek zamanlı takip edildiği Kordil Batimetri Studio programında çalışmaya ilişkin görüntü yer almaktadır.



Şekil 4. Ölçüm anında veri görüntüleme ve değerlendirme

Ölçüm sonrası veriler, .csv uzantılı dosya olarak kaydedilmiş, MS Excel'de ölçüme ait tüm veriler incelenmiş ve hatalı olduğu tespit edilen veriler ayıklanmıştır. Şekil 5'te MS Excel programında görüntülenen ve düzenlenen veriler ile ilgili görsel yer almaktadır.

Nokta No	Enlem	Boylam	H	Gerçek Derinlik	Ham Derinlik	Ses Hızı	Transduser Su Kesimi	Su Kotu
1	41.80042919	35.20104352	-1.26	1.87	1.58	1501.66	0.29	0.61
2	41.80042921	35.20104348	-1.09	1.7	1.41	1501.66	0.29	0.61
3	41.80042922	35.20104343	-1.11	1.72	1.43	1501.66	0.29	0.61
4	41.80042931	35.20104351	-1.65	2.26	1.97	1501.66	0.29	0.61
5	41.80042929	35.20104350	-1.13	1.74	1.45	1501.66	0.29	0.61
6	41.80042928	35.20104340	-1.26	1.87	1.58	1501.66	0.29	0.61
7	41.80042938	35.20104354	-1.15	1.76	1.47	1501.66	0.29	0.61
8	41.80042936	35.20104356	-1.13	1.74	1.45	1501.66	0.29	0.61
9	41.80042932	35.20104352	-1.05	1.66	1.37	1501.66	0.29	0.61
10	41.80042933	35.20104363	-1.05	1.66	1.37	1501.66	0.29	0.61
11	41.80042932	35.20104360	-1.04	1.65	1.36	1501.66	0.29	0.61
12	41.80042932	35.20104356	-1.05	1.66	1.37	1501.66	0.29	0.61
13	41.80042941	35.20104369	-1.13	1.74	1.45	1501.66	0.29	0.61
14	41.80042945	35.20104360	-1.15	1.76	1.47	1501.66	0.29	0.61
15	41.80042935	35.20104346	-1.13	1.74	1.45	1501.66	0.29	0.61

Şekil 5. MS Excel'de veri düzenleme işlemleri

Şekilde ham derinlik, transducer ile deniz tabanı arasında ölçülen mesafeyi, gerçek derinlik, ham derinlik ölçülerine transducer ile deniz yüzeyi (su kesimi) arasındaki uzunluğun eklenmiş hâlini,

H ise deniz seviyesi (su kotu) değerinden gerçek derinliklerin çıkarılarak derinliklerin ulusal düşey datuma dayandırılmış hâlini ifade etmektedir (IPCC, 2001). Excel’de yapılan düzenleme işlemleri sonrası deniz tabanına ait 21517 nokta verisini içeren dosya bir sonraki aşama için kaydedilmiştir.

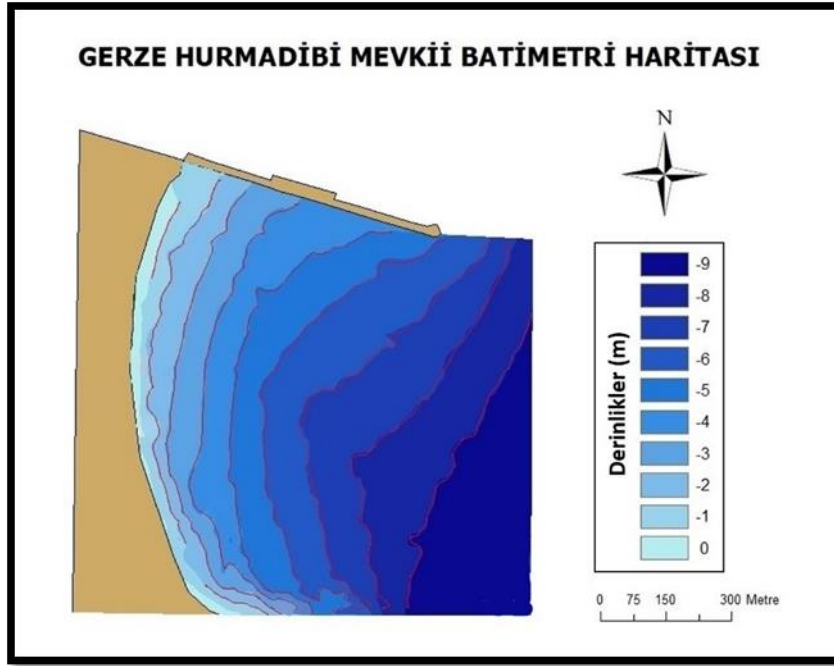
Excel’deki veri düzenleme işlemlerinin ardından nokta verileri, analiz ve haritalama için Netcad 8.0 programına yüklenmiştir. Netcad programında, noktalar incelenmiş, hatalı olduğu düşünölen noktalar silinmiştir. Daha sonra nokta verileri kullanılarak üçgen model oluşturulmuştur.

Şekil 6’da çalışmaya ait üçgen modelin çevrimiçi harita (basemap) üzerindeki görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 6. Üçgen model

Üçgen model oluşturulduktan sonra üçgen modelden 1 m aralıklarla eş derinlik eğrileri geçirilerek batimetri haritası üretilmiştir. Şekil 7’de akustik iskandil yöntemi yapılan ölçümler sonrası oluşturulan batimetri haritası yer almaktadır.

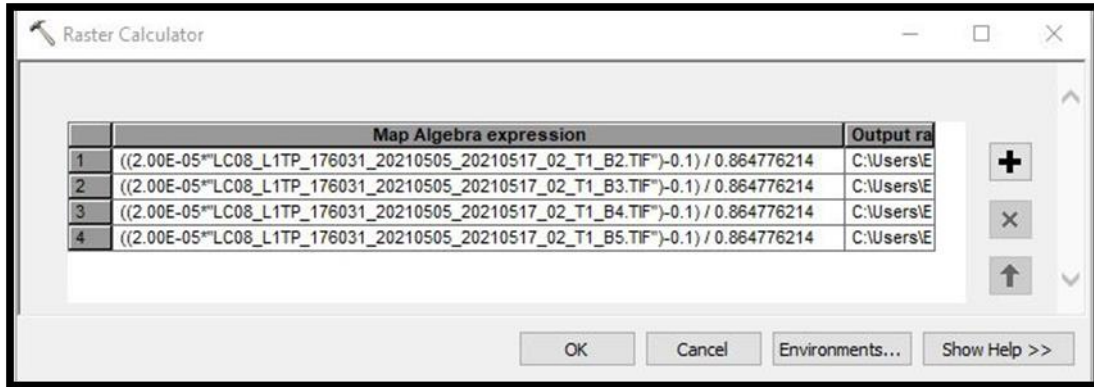


Şekil 7. Akustik iskandil yöntemi kullanılarak üretilen batimetri haritası

2.4. Uydu Görüntüleri ile Batimetri Haritası Üretimi

Batimetrik harita üretimi için USGS Earth Explorer'dan 05.05.2021 tarihli Landsat-8 görüntüsü temin edilmiştir (USGS , 2021).

Uydu görüntüsünün temini sonrası uydu görüntüsünün tüm bantları ArcMap 10.3 programına yüklenmiştir. Daha sonra çalışmada kullanılacak olan mavi, yeşil, kırmızı ve yakın kızıl ötesi bantlara radyometrik kalibrasyon ve düzeltme işlemleri gerçekleştirilmiş, radyometrik düzeltme için uydu görüntüsü ile beraber temin edilen metaveri dosyasından radyometrik düzeltmede kullanılacak olan değerler tespit edilerek ArcMap'te raster calculator aracından bantlara radyometrik düzeltme uygulanmıştır. Şekil 8'de ArcMap'te raster calculator aracı ile bantlara uygulanan radyometrik düzeltme işleminin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 8. Radyometrik kalibrasyon ve düzeltme

Radyometrik düzeltme işlemi sonrası; mavi, yeşil, kırmızı ve yakın kızılötesi bantlar ArcMap'te composite bands aracı ile birleştirilmiştir. Bantların birleştirilmesinin ardından oluşan doğal renkli görüntü şekil 9'da yer almaktadır.



Şekil 9. Bantların birleştirilmesi sonrası oluşan görüntü

Görüntü, geniş bir alanı kapsadığı için bağıl ve mutlak derinliklerin daha doğru bir şekilde hesaplanabilmesi amacıyla çalışma alanını kapsayacak şekilde ArcMap Raster clip aracı ile kesilmiştir. Radyometrik düzeltme, bantların birleştirilmesi ve görüntünün çalışma alanına göre kesilmesi adımları sonrası görüntü, derinliklerin hesaplanması için ENVI 5.3. programına yüklenmiştir. ENVI 5.3'te derinliklerin hesaplanması için SPEAR Tools Relative Water Depth aracı kullanılmıştır.

Görüntü, Relative Water Depth modülüne yüklendikten sonra, Batimetri metodu olarak Log Ratio Transform (LRT) yöntemi, filtreleme seçeneği olarak 3x3 Filtre seçilmiştir. Daha sonra görüntüden direkt olarak mutlak derinlikleri elde etmek için akustik sonar yöntemiyle elde edilen 15 nokta, kalibrasyon noktası olarak belirlenmiştir. Tablo 1'de kalibrasyon noktalarının koordinatları yer almaktadır.

Tablo 1. Kalibrasyon noktalarının koordinatları

NN	Y	X	Z
1	682297.451	4629600.231	-1.55
2	682787.324	4629493.811	-6.12
3	683110.150	4629501.281	-8.72
4	682359.605	4629470.177	-3.18
5	682562.815	4629425.072	-5.44
6	682941.869	4629351.554	-7.85
7	682340.764	4629225.484	-3.52
8	682627.544	4629239.215	-6.93
9	682954.265	4629203.212	-8.82
10	682351.641	4628998.602	-4.49
11	682536.940	4629037.695	-6.32
12	682816.512	4629021.964	-8.52
13	682459.637	4628817.824	-4.47
14	682595.800	4628818.437	-6.24
15	682778.324	4628772.104	-8.29

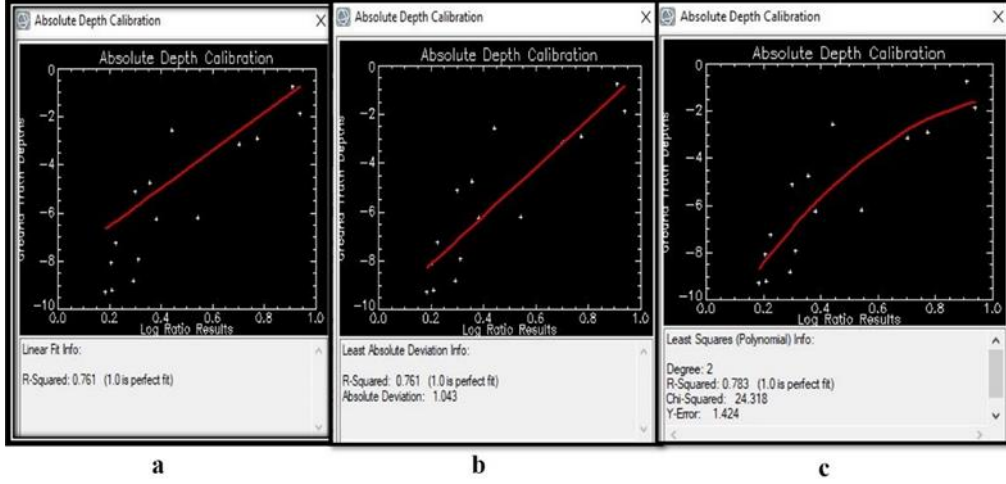
Şekil 10’da kalibrasyon noktalarının uygulama alanına dağılımı gösterilmektedir.

**Şekil 10.** Kalibrasyon noktalarının uygulama alanına dağılımı

Mutlak kalibrasyon noktaları olarak belirlenen noktalar, ascii formatına dönüştürülüp Relative Water Depth modülüne eklenmiştir.

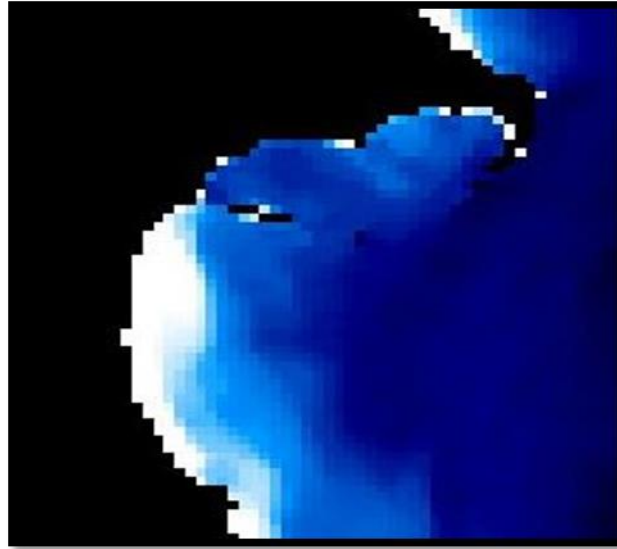
Kalibrasyon noktalarının girilmesi sonrası, kalibrasyon noktalarının koordinatlarına karşılık gelen piksellerdeki bağıl derinlik değerleri ve gerçek derinlikler arasında lineer, en küçük sapma ve

en küçük kareler yaklaşımlarına göre regresyon modelleri programdan elde edilmiştir. Şekil 11’de 15 kalibrasyon noktası kullanılarak oluşturulan regresyon modelleri yer almaktadır.



Şekil 11. Regresyon modelleri

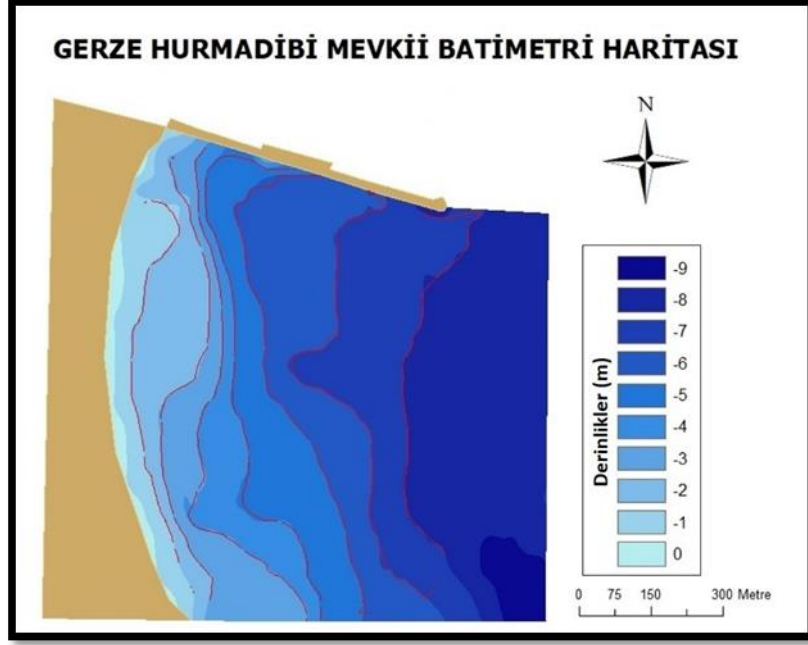
Regresyon modeli seçildikten sonra bağıl derinlikler, mutlak derinliklere dönüştürülür. Şekil 12’de kalibrasyon ve regresyon modeli sonrası oluşturulan görüntü yer almaktadır.



Şekil 12. Mutlak derinlikleri içeren görüntü

ENVI 5.3. programında mutlak derinlikleri içeren görüntü elde edildikten sonra ArcMap programında batimetri haritası oluşturulma aşamasına geçilmiştir. Görüntü ArcMap’e yüklendikten sonra raster to point aracı kullanılarak her bir pikselin merkezinde derinlik bilgisini içeren nokta dosyası oluşturulmuştur.

Raster veriden nokta verileri elde edildikten sonra, nokta verileri kullanılarak bir enterpolasyon yüzeyi oluşturulmuş, oluşturulan bu enterpolasyon yüzeyinden de eş derinlik eğrileri geçirilmiştir. Şekil 13'te uydu görüntülerinden elde edilen batimetri haritası yer almaktadır.



Şekil 13. Uydu görüntüleri kullanılarak üretilen batimetri haritası

Uydu görüntüsünden batimetri haritası elde edildikten sonra, uydu görüntülerinden elde edilen derinlikler ile akustik iskandil yöntemi ile elde edilen derinlikler karşılaştırılmıştır. Akustik iskandil yöntemi ile elde edilen derinlikler kesin değer olarak kabul edilmiş ve iki yöntemde aynı yatay koordinat değerine sahip 796 nokta tespit edilerek bu noktalara ait derinliklerin karesel ortalama hatası MS Excel programında hesaplanmıştır.

Karesel ortalama hata hesaplanırken öncelikle her noktanın akustik iskandil yöntemi ile elde edilmiş ve gerçek kabul edilen derinlik değerinden, uydu görüntüsü ile elde edilen derinlikler çıkarılarak her nokta için hata değerleri elde edilmiştir (1).

$$V = X - L \quad (1)$$

Daha sonra bu hata değerleri kullanılarak karesel ortalama hata hesaplanmıştır (2).

$$m_0 = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}} \quad (2)$$

3. Bulgular

Batimetrik harita üretim yöntemlerinin araştırıldığı bu çalışmada; Akustik iskandil yöntemi ile

yapılan batimetrik ölçüm sırasında deniz gözlemlenmiş, deniz çayırı vb. akustik sinyalleri etkileyebilecek maddelerin varlığı kontrol edilmiş, deniz içerisinde sinyalleri etkileyebilecek herhangi bir madde tespit edilmemiştir. Çalışma alanındaki ses hızının tespiti için ses hızı profillemeye cihazı kullanılmış ve ortalama ses hızı 1501.66 m/s olarak ölçülmüştür. Ölçüm sırasında, akustik iskandil sistemindeki kalibrasyon, ses hızı vb. hatalardan kaynaklı ortaya çıkabilecek yanlışlıkları test etmek amacıyla bazı bölgelerde ip iskandil ile derinlik ölçümü yapılarak iki yöntemden elde edilen derinlikler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonrası, akustik iskandil yöntemi ve ip iskandil yöntemi ile elde edilen derinliklerin tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Akustik iskandil ölçümleri sonrası elde edilen veriler kullanılarak batimetri haritası üretilmiştir.

Akustik iskandil yöntemi ile batimetri haritası üretildikten sonra uydu görüntüleri yardımı ile batimetri haritası üretimi için, ölçüm tarihine yakın tarihli ve bulutluluk oranı düşük uydu görüntüleri araştırılmış ve 05.05.2021 tarihli Landsat 8 uydu görüntüsünün kullanılmasına karar verilmiştir. Uydu görüntüsünden batimetri haritası üretiminde kullanılacak olan bantlara radyometrik düzeltme işlemi uygulanmıştır. Uydu görüntüsünün, mekânsal çözünürlüğünü artırmak amacıyla pan-sharpening işleminin uygulanması düşünülmüş ancak derinliklere olan etkileri tam olarak belirlenemediğinden, kullanılan bantlara pan sharpening işlemi uygulanmamıştır. Çalışmada, uydu görüntüsünden derinliklerin elde edilmesinde literatürdeki çalışmalarda yer alan öneriler göz önünde bulundurularak Log Ratio Transformation (LRT) yöntemi kullanılmıştır.

Uydu görüntüleri ile batimetrik harita üretilmesinin ardından her iki yöntemde ortak noktalar tespit edilmiş, karesel ortalama hata hesaplanmıştır. Karesel ortalama hata hesaplanırken, akustik iskandil yöntemi ile elde edilen derinlikler kesin değer olarak kabul edilmiştir. Yapılan hesaplama sonucu, uydu görüntülerinden elde edilen derinliklerin karesel ortalama hatası ± 1.07 m olarak bulunmuştur. Literatürdeki benzer çalışmalar incelendiğinde karesel ortalama hatalar, genelde itibariyle ± 0.60 m ile 3 m arasında değişmektedir. Şekil 14'te her iki yöntemle elde edilen eş derinlik eğrileri yer almaktadır.



Şekil 14. Eş derinlik eğrileri

Akustik iskandil ile elde edilen eş derinlik eğrileri incelendiğinde, çalışma alanının güney kısımlarında derinliklerde ani bir değişim söz konusudur. İki yöntemle elde edilen derinlik eğrileri karşılaştırıldığında, özellikle çalışma bölgesinin kuzeydoğusundaki eğrilerin birbirinden oldukça farklı olduğu, buna karşın güney kısımlarında ise görece uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durumun uydu görüntülerinden mutlak derinlikler elde edilmesi için kullanılan kalibrasyon noktalarının seçimi ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Kalibrasyon noktaları değiştikçe uydu görüntülerinden elde edilen derinlik eğrilerinde ciddi değişiklikler yaşanmaktadır.

Akustik iskandil yöntemi, klasik iskandil yöntemlerine göre çok kısa zamanda ve daha az enerji sarf ederek yüksek doğrulukta sonuçlar vermektedir. Modern iskandil yöntemlerinden olan uydu görüntüleri ile batimetri çalışmaları ise istenilen doğrulukta sonuçlar elde edilememiştir.

4. Sonuç

Gerçekleştirilen bu çalışmada, ülkemizde ve dünyada önemi gittikçe artan derinlik ölçmeleri ile ilgili batimetrik harita üretimleri yöntemleri araştırılmış, akustik iskandil yöntemi ve uydu görüntüleri kullanılarak iki farklı yöntemle batimetri haritası üretilmiştir. Batimetri çalışmalarında; ip iskandil, lata iskandil, tel iskandil gibi klasik yöntemler ya da sonar, lidar, uydu görüntüleri gibi modern yöntemler kullanılmaktadır. Klasik iskandil yöntemleri, modern iskandil yöntemlerine göre çok daha fazla zaman ve insan gücü gerektirir. Bu sebeple modern iskandil yöntemlerinden olan akustik iskandil (echo sounder) yöntemi, klasik iskandil yöntemlerine göre çok daha hızlı ve doğru sonuçlar vermektedir. Akustik iskandil yöntemi ile yapılan batimetri çalışmalarında, akustik sinyal üreten transducer ve yatay konumlandırmayı sağlayan GNSS alıcısının yer aldığı jalon, deniz aracına (tekne, bot vb.) deniz yüzeyine dik olacak şekilde entegre edilerek ölçüm cihazlarının

doğrultularından kaynaklanacak yatay ve düşey konumlama hatalarının önüne geçilmelidir. Ölçümde kullanılacak deniz aracının; dalgalara karşı olabildiğince stabil, manevra kabiliyetinin yüksek, sığ alanlarda deniz dibine oturmaması için draft boyunun kısa olması gerekir. Ölçüm boyunca, deniz aracının hızının 4 knotu geçmemesine dikkat edilmelidir. Ölçüm sırasında deniz sürekli gözlemlenmeli; deniz içerisinde, deniz çayırı vb. akustik sinyalleri yansıtacak maddelerin var olup olmadığı kontrol edilmelidir. Batimetri, akustik iskandil yöntemi ile yapılıyor olsa da bazı bölgelerde ip iskandil gibi farklı araçlar kullanılarak verilerin doğruluğu test edilmelidir.

Akustik iskandil yöntemleri, ses dalgalarının su ortamında yayılma ve yansıma özelliklerini kullanarak derinlikleri tespit ettiği için bu yöntemde çalışmanın doğruluğunu belirleyecek en önemli etmen ses hızının doğru şekilde tespit edilmesidir. Ses hızının 20 m/s hatalı olarak tespit edilmesi 10 m derinlikte yaklaşık 14 cm ölçüm hatasına neden olmaktadır.

Çalışmada kapsamında akustik iskandil yöntemi ile yapılan batimetride sesin su ortamındaki yayılma hızını tespit etmek için ses hızı profileme cihazı kullanılmış ve ortalama ses hızı 1501.66 m/s olarak tespit edilmiştir. Ses hızı verilerinde derinliklere bağlı olarak dikkate değer bir değişiklik görünmediği için çalışmada ortalama ses hızı kullanılmıştır.

Echo sounder ile elde edilen 15 nokta ile kalibrasyon noktaları arasındaki uyumu gösteren regresyon modelleri oluşturulmuştur. Regresyon modellerinde, uyumu göstermekte ana kriter olan R^2 değeri, 1'e ne kadar yakınsa veriler o derece uyumludur. Çalışmada, R^2 değeri 0.78 olarak bulunmuştur. Kalibrasyon noktalarının yüklenmesi ve regresyon modellerinin oluşturulmasından sonra, derinlikler elde edilmektedir. Derinlikler elde edildikten sonra ArcGIS programında batimetri haritası oluşturulmuştur.

Akustik iskandil ve uydu görüntüleri ile batimetri haritaları üretildikten çalışmanın doğruluğunu tespit etmek için sonra karesel ortalama hata hesaplanmıştır. Karesel ortalama hata hesaplanırken, akustik iskandil yöntemi ile elde edilen derinlikler kesin değer olarak kabul edilmiştir. Her iki yöntemdeki ortak noktalar tespit edilerek yapılan hesaplamalar sonucu karesel ortalama hata ± 1.07 m olarak bulunmuştur.

Uydu görüntüleri kullanılarak batimetri haritası üretilmesinde; haritası üretilmek istenen bölgedeki gerçek derinlikleri gösteren kalibrasyon noktalarına ihtiyaç duyulması, kalibrasyon noktalarının sayısı ve dağılımına bağlı olarak eş derinlik eğrilerinde ciddi farklar oluşması ve bu yöntemle elde edilen derinlik değerlerinin doğruluğunun düşük olması nedeniyle kullanılabilir bir yöntem olmadığı belirlenmiştir. Yöntemin, bölgedeki derinlikler hakkında genel bilgi edinmek amacıyla kullanılmasının daha doğru olacağı düşünülmektedir. Ancak çalışmada; Landsat 8 gibi görece düşük çözünürlüğe sahip uydu görüntüsünün kullanılması, görüntü üzerinde farklı filtreleme seçenekleri, maskeleyme gibi işlemlerin uygulanmaması, farklı bantların oranlanmaması gibi nedenler

dikkate alındığında; daha yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri üzerinde, farklı tekniklerle yapılacak olan batimetri çalışmalarında daha doğru ve etkili sonuçlar elde edilebilir.

Teşekkür ve Bilgilendirme

Bu makale Eray Yılmaz'ın yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

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

- Açar, K. (2021). *Hidrografik mesaha planlama aşamasında uydu tabanlı batimetrik veri kullanımının araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Akgül, M. A., Dağdeviren, M., Biroğlu, İ. (2018). Çok zamanlı uydu görüntüleri kullanılarak uydu kaynaklı batimetri. *Dsi Teknik Bülteni*, (127), 14-27.
- Aksoy, E., Özsoy, G., Karaata, E. U., Karaer, F., Kâtip, A., İleri, S., & Onur, S. (2016). *Ekosounder ve GIS teknikleri kullanılarak Uluabat Gölü'nde batimetrik haritalama*. 6. Uzaktan Algılama-Cbs Sempozyumu (Uzal-Cbs 2016), 5-7 Ekim 2016, Adana.
- Aykut, N. (2009). *Sığ sulardaki hidrografik ölçmelerde çok bimli iskandillerin kullanımı ve hata analizi*. Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Ekizoğlu, İ. (2011). *CBS yardımıyla batimetrik haritaların oluşturulması ve değerlendirilmesi üzerine bir çalışma: Altınapa Barajı (Konya) örneği*. Yüksek Lisans Tezi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.
- TUDES. (2022). *Deniz seviyesi gözlemleri*. <https://tudes.harita.gov.tr/Portal/Index/32?lang=tr/Deniz%20Seviyesi%20G%C3%B6zlemleri> (Erişim Tarihi: 10.04.2022).
- IPCC. (2001). *Climatechange 2001: The Scientific Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change 2001, 643.
- Kılıç Güngör, B. (2019). *Uydu görüntüleri yardımı ile batimetrik harita üretimi: Kozlu Balıkçı Barınağı örneği*. Yüksek Lisans Tezi. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak.

- NOAA. (2021). *What is bathymetry?*
<https://oceanservice.noaa.gov/facts/bathymetry.html#:~:text=Bathymetry%20is%20the%20study%20of,rivers%2C%20streams%2C%20and%20lakes> (Erişim Tarihi: 05.03.2022).
- Önder, M. (2002). *Geçmişten günümüze resimlerle Türk haritacılık tarihi*. Ankara: Harita Genel Komutanlığı.
- Sağdıç, A. (2020). *İnsansız su üstü aracı ve uzaktan algılama teknikleri kullanarak batimetrik harita üretimi: Filyos Limanı örneği*. Yüksek Lisans Tezi. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak.
- Schowengerdt, R. A. (2007). *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing 3rd Edition*. Elsevier Inc., 2.
- Ulu, A. (2006). *Deniz tabanı derinleştirme çalışmalarında batimetrik ve sismik etütlerin önemi*. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Deniz Jeolojisi ve Jeofiziği Programı, İzmir.
- Uzakara, H. (2021). *Uydu görüntüleri ile kıyılarda batimetrik ölçüm*. Yüksek Lisans Tezi. Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Uzay Bilimleri ve Teknolojileri Anabilim Dalı, Antalya.

Improving the Thermal Efficiency of the Parabolic Trough Solar Collector: An Overview

Faruk YEŞİLDAL¹ , Ahmet Numan ÖZAKIN^{2*} , Safaa BAAMEL³ , Ahmed ALAGELE⁴ 

Abstract

This article examines various methods to enhance the thermal efficiency of parabolic trough solar collectors (PTCs), both theoretically and experimentally. These methods include increasing the surface area of the absorber tube to increase its ability to absorb solar energy, placing a tube inserts inside the tube to induce turbulence and hence improve heat transfer. Among other methods are also minimization of reflection by using selective coatings on the surface of the absorber tube. Additionally, increasing the thermal conductivity of the working fluid, or modifying or altering the shape of the absorber tube or the reflective surface have also been shown to have improved thermal performance by minimizing energy losses due to conduction, convection, and radiation. All these and similar approaches that address and improve system parameters lead to improved efficiency and thermal performance, but they also entail a pressure drop and increase the cost of the system. In this study, the techniques that are used to improve the thermal efficiency of PTCs are addressed and presented in detail along with the findings of previous studies.

Keywords: Parabolic trough collector, Thermal efficiency, Absorber tube.

Parabolik Oluklu Solar Kolektörlerin Termal Verimliliğinin Artırılması: Genel Bakış

Öz

Bu çalışmada, parabolik oluklu güneş kolektörlerin termal verimliliğini hem teorik hem de pratik olarak artırmak için çeşitli yöntemler incelenmiştir. Bu yöntemler arasında güneş enerjisini absorbe etme yeteneğini artırmak için emici tüpün yüzey alanını artırmak, ısı transferini iyileştirmek için tüp içine turbülötör yerleştirmek yer almaktadır. Ayrıca emici tüpün yüzeyinden yansımaya azaltmak için seçici kaplamalar kullanarak yansımaya en aza indirmek gibi yöntemler de bulunmaktadır. Bunlara ek olarak, çalışma sıvısı için termal iletkenliği artırmak, emici tüpün şeklini değiştirmek ve kolektör ve yansıtıcı yüzeyin geometrisini iyileştirmek gibi diğer tekniklerin de emicinin termal performansını artırabildiği ortaya konulmuştur. Bu teknikler, parabolik oluklu güneş kolektörünün verimliliğini ve termal performansını artırmaya yol açmaktadır. Ancak aynı zamanda çalışma sıvısının basınç düşüşünü ve malzeme maliyetinde artışı da beraberinde getirmektedir. Bu çalışmada, bu teknikler önceki çalışmaların sonuçlarına bağlı olarak ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Parabolik oluklu kolektör, Termal verim, Absorber tüp.

¹Atatürk University, Department of Mechanical Engineering, Eng. Fac., Erzurum, Türkiye, fyesildal@atauni.edu.tr

²Atatürk University, Department of Mechanical Engineering, Eng. Fac., Erzurum, Türkiye, ahmet.ozakin@atauni.edu.tr

³Atatürk University, Department of Mechanical Engineering, Eng. Fac., Erzurum, Türkiye, safaa.baamer@yahoo.com

⁴Atatürk University, Department of Mechanical Engineering, Eng. Fac., Erzurum, Türkiye, ahmed.ai87@yahoo.com

¹<https://orcid.org/0000-0002-7307-3556>

²<https://orcid.org/0000-0002-2083-8703>

³<https://orcid.org/0000-0002-5828-3301>

⁴<https://orcid.org/0000-0001-6353-1157>

1. Introduction

In recent decades, especially following the industrial revolution, the excessive and unregulated use of fossil fuels has resulted in the emission of harmful gasses and the consequent rise of their levels in the atmosphere. This has led to global warming and climate change, which have caused severe natural disasters such as hurricanes and floods in some regions, drought and desertification in others, and various other damages such as pollution from industrial waste. The use of fossil fuels also poses a direct threat to the environment as it pollutes the soil and rivers, adversely affecting living organisms and human food security. Therefore, it has become increasingly urgent to find alternative, clean, and environmentally friendly sources of energy to replace fossil fuels (Ediger et al., 1999); (Arutyunov et al., 2017); (York et al., 2019).

There have been international agreements and the establishment of organizations aimed at promoting and developing the use of renewable energy sources such as solar energy, wind energy, geothermal energy, hydropower, bioenergy, and other environmentally friendly energy sources. Among these sources, solar energy is one of the most significant due to its potential in many regions. Solar energy is utilized in various applications such as heating, cooling, drying, electricity generation, cooking, and distillation (Ozakin et al., 2020). Solar energy has a major advantage in its abundance, as the earth receives a vast amount of solar radiation each day, providing an almost limitless supply of solar energy. Furthermore, solar energy is a clean source of energy, meaning that it does not emit harmful pollutants that contribute to air pollution and climate change. Especially the increase in oil prices makes solar energy more attractive, and the number of systems that benefit from solar energy is increasing day by day (Kilic et al., 1983). However, it should be noted that the energy density per square meter of solar radiation received at the surface of the earth is low (Mao et al., 2014).

The intensity of solar energy can be increased by using Concentrated Solar Power (CSP), there are several types of solar collectors, such as the parabolic trough collector, solar dish, solar tower and others, these technologies can effectively use solar energy and increase conversion efficiency (Yesildal, 2022); (Öner, 2022); (Özakin, 2022). Among all CSP systems, the parabolic trough solar collector (PTC) stands out, it is a proven, well-developed, low cost and effective system for concentrating solar energy and is currently used for various applications (Wang, 2020).

In this study, various methods were investigated to increase the thermal efficiency of parabolic trough solar collectors both theoretically and practically in light of the studies in the literature. These methods include placing turbulators inside the tube to increase the surface area of the absorber tube, increase the system's ability to absorb solar energy, and improve heat transfer. In addition, these methods

include methods such as minimizing reflection from the surface of the absorber tube, and using selective coatings to reduce direct loss. In addition, other techniques such as increasing thermal conductivity by interfering with the working fluid, changing the geometry of the absorber tube, and improving the geometry of the collector and reflective surface have also been shown to improve the thermal performance of the absorber. These techniques lead to improved efficiency and thermal performance of PTCs. However, it also brings on pressure drop and increase cost. In this study, a detailed literature review of the effects of such techniques on efficiency is presented.

2. General description of parabolic trough solar collector

As shown in Figure 1, a PTC consists of several components, including a reflective surface that reflects solar radiation towards the focus of the collector. The reflecting surface can be made of various materials, such as aluminum sheets, stainless steel, or reflective mirrors, depending on the design. Other components of the collector include the receiver tube that passes into the focal point of the parabola, support structure, connection tubes, water tank or heat exchanger, pump, control unit, measuring and control devices, and other devices or add-ons as required by the design.

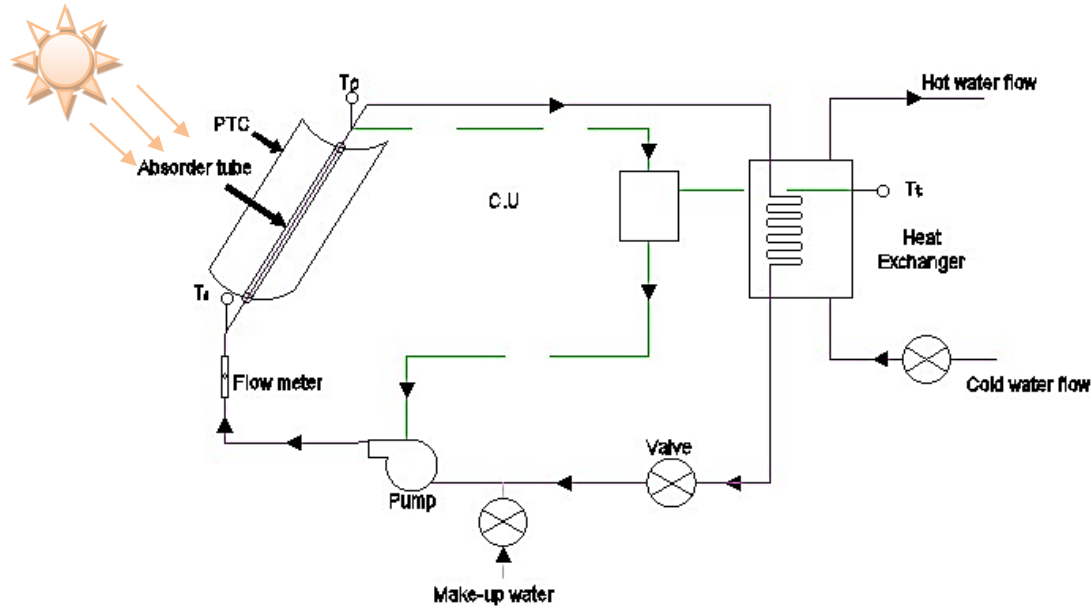


Figure 1. Schematic diagram of the components for a parabolic trough solar collector.

Prior to initiating the device's operation, the working fluid is loaded into the tank and pumped to the solar collector using a pump. As it flows through the absorber tube, the working fluid absorbs heat and exits the solar collector at a high temperature.

The temperature and pressure of the water at the inlet and outlet, as well as the water flow rate, are measured by special sensors, which are connected with a central control unit (CU) that regulates the operation of the device.

2.1. Enhancement of thermal efficiency

Numerous studies have been conducted to improve the thermal efficiency of parabolic trough solar collectors (PTC). The research on improving the thermal efficiency of PTC has been divided into six categories.

2.1.1. By placing turbulators inside the absorber tube

In order to improve the heat transfer rate from the absorber tube to the working fluid, the best of thermal enhancement techniques use turbulators in the flow zone. More specifically, the use of turbulators aims to increase the fluid mixing and working fluid's effective thermal conductivity in order to increase turbulence intensity.

Table 1. Previous researches using inserts inside the receiver tube in PTC

Author	Type of insert	Working fluid	Method	Increase (%)		
				η_{th}	h	Δp
(Jaramillo et al., 2016)	Twisted tape	Water	Thermodynamic model frame work	10	400	2000
(Diwan et al., 2015)	Wire coil	Water	Model	-	330	2200
(Benito et al., 2015)	Wire coil and twisted tape	Compressed air	Model	-	100-300	200-1000
(Sahin et al., 2015)	Wire coil	Water	CFD+ Experimental	-	240	2000
(Jamal-Abad et al., 2017)	Metal foams	water	Experimental	3	-	2000
(Ghasemi et al., 2017)	Porous rings	Syltherm 800	CFD	-	50	1000
(Reddy et al., 2015)	Porous discs	Water	Experimental	6	-	-
(Abed et al., 2021)	Conical strip inserts	SiO ₂	CFD	14.62	-	258.42

As presented in Table 1, the twisted tape insert is the most common insert type used inside the absorber tubes. (Jaramillo et al., 2016) carried out an experimental study about the twisted tape insert and reported a significant thermal enhancement but along with a large increase (by 2000%) in the pressure drop.

The use of wire coil inserts has been investigated by (Diwan et al., 2015); (Sahin et al., 2015); (Benito et al., 2015) contrasted these using two different techniques; they discovered that the addition of twisted tape inserts increased h (330,300,240) % respectively. All of the previous studies made an effort to rotate the flow and enhance the fluid mixing.

Other options that have been examined include the use of metal foams (Jamal-Abad et al., 2017). The study found that the use of copper foam as a filler in the absorber improved the efficiency of the collector. Additionally, filling the absorber with metal foam resulted in a 45% reduction in the overall loss coefficient (UL), thereby increasing efficiency by minimizing energy loss. Similarly, both porous rings (Ghasemi et al., 2017) and porous discs (Reddy et al., 2015) have been employed to increase the surface area for heat exchange and improve the heat transfer from the receiver to the working fluid (see Figure 2). However, the use of turbulators also increase pressure drop, which results in higher pumping power. Thus, it is important to carefully evaluate the impact of pressure drops in such techniques.

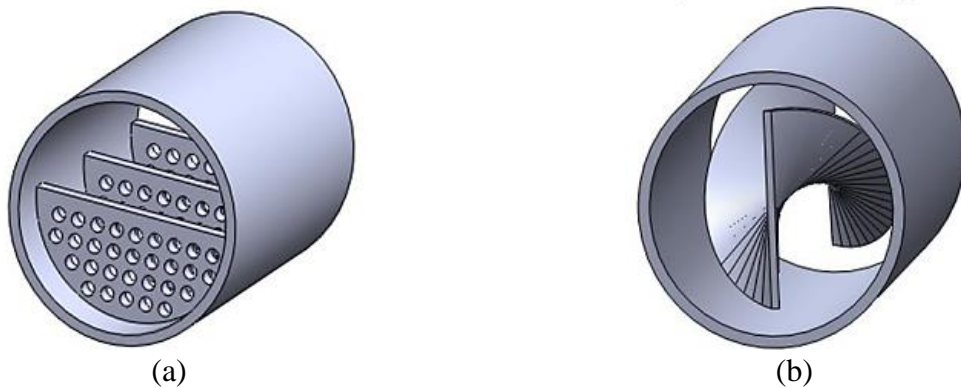


Figure 2. a. porous discs (Reddy, Ravi Kumar, & Ajay, 2015) , b. twisted tape (Jaramillo, Borunda, Velazquez-Lucho, & Robles, 2016)

(Abed et al., 2021) conducted a numerical study to examine the impact of swirl inserts on the performance of a parabolic trough solar collector. The results indicated that using straight conical strips alone increased the Nusselt number by 47.13%. However, incorporating swirl generators reduced thermal losses by 22.3%. The investigation of various swirl generator designs revealed that different configurations led to varying levels of improvement in overall thermal and thermal exergy efficiency.

The largest swirl generator ($H=30$ mm, $\theta=30^\circ$, $N=4$) with 6% SiO_2 nanofluids was identified as the optimal configuration, resulting in a 14.62% increase in overall collector efficiency and a 14.47% increase in thermal exergy, but the pressure drop increased by 258.42% (see Figure 3).

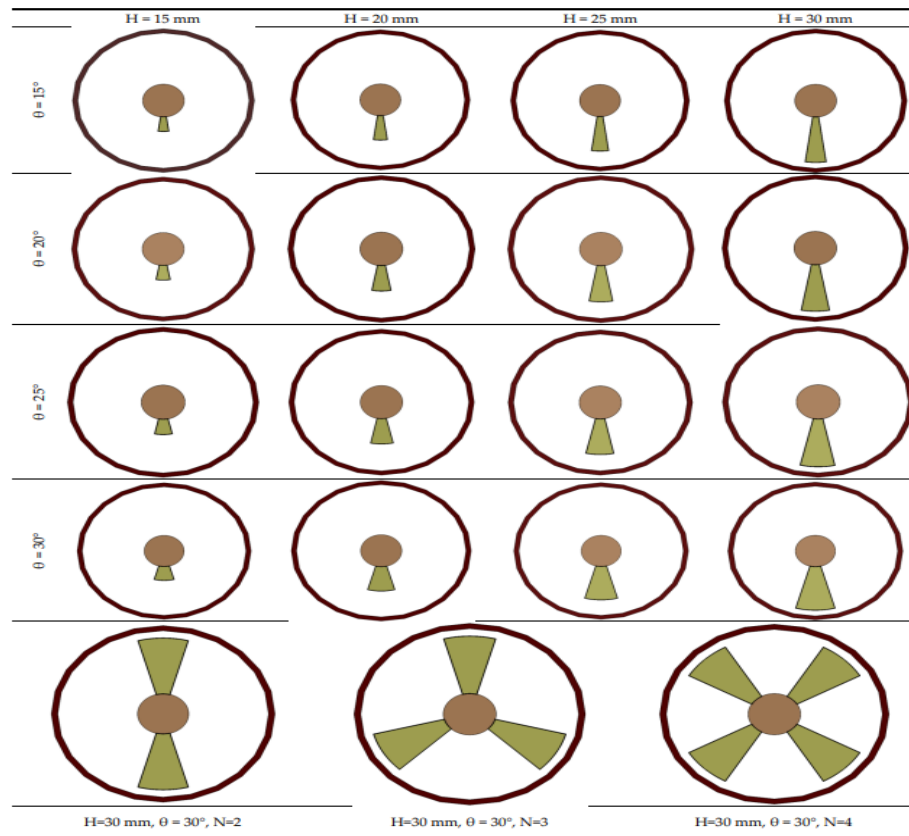


Figure 3. Different configurations of the examined straight conical strips (Abed, Afgan, Iacovides, Cioncolini, Khurshid, & Nasser, 2021)

2.1.2. By increasing surface area of absorber tube

Raising the convective contact area inside the absorber tube or the heat transfer rate within the absorber tube will enhance the useful heat rate. A lot of research has focused on improving geometric designs of absorber tubes to increase their heat transfer surface area.

Because the heat flux is focused in the lower half of the absorber, (Benabderrahmane et al., 2016) have attempted to change this section, they examined the usage of small two fins rectangular or triangular by numerical methods as shown in Figure 4. The results show that when a fin was employed in the low part in absorber, the heat transfer coefficient increased dramatically when compared to a smooth tube model, it increased by 68%. It is observed that cases 1 and 2 have larger Nu , with augmentations ranging from

1.3 to 1.8 times more than with a smooth tube. The scholars ultimately showed that the geometric parameters of the fins have a remarkable effect on improving heat transfer.

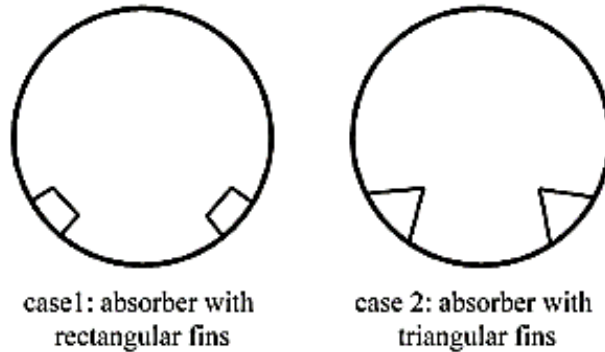


Figure 4. Physical model of absorber with longitudinal fins inserts. (Benabderrahmane et al., 2016)

Utilizing numerical techniques, the efficiency of the collector is improved by 3%, according to Munoz and Abanades's investigation (Muñoz et al., 2011) by using helical fins. However, the parasitic losses related to the pressure losses in the tube would rise with the number of fins and its helix angle (see Figure 5).

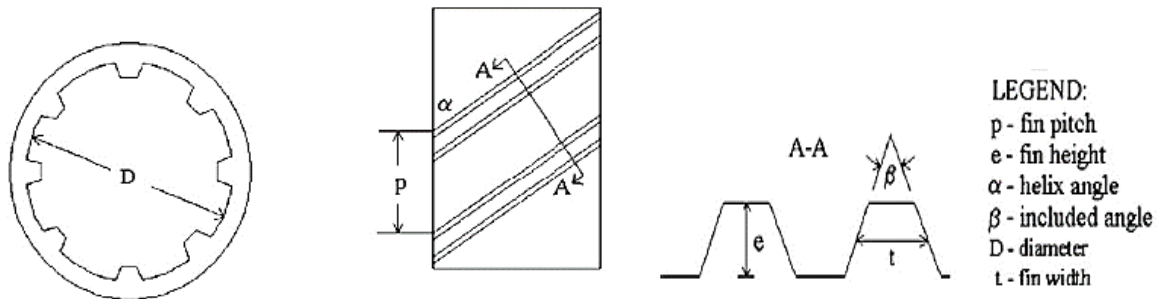


Figure 5. Geometrical parameters for the helical fin. (Muñoz & Abánades, 2011)

(Saedodin et al., 2021) utilized numerical analysis to examine the fluid flow and heat transfer in a parabolic trough solar collector equipped with turbulence-inducing elements on the absorber tube wall. The elements were helically profiled throughout the pipe. The findings indicated that the model with elements having a rectangular cross-section exhibited the highest thermal performance compared to all other cross-sections considered. At an inlet velocity of 0.2 m/s, the models with rectangular and triangular cross-sections had the highest and lowest thermal efficiency enhancements, respectively, with enhancements of 29% and 21.8%. This trend was observed across all the inlet velocities studied. Additionally, they have analyzed five different models, which included two, four, six, and eight turbulence-inducing elements, and the model with eight elements demonstrated the highest thermal performance at different inlet velocities (see Figure 6).

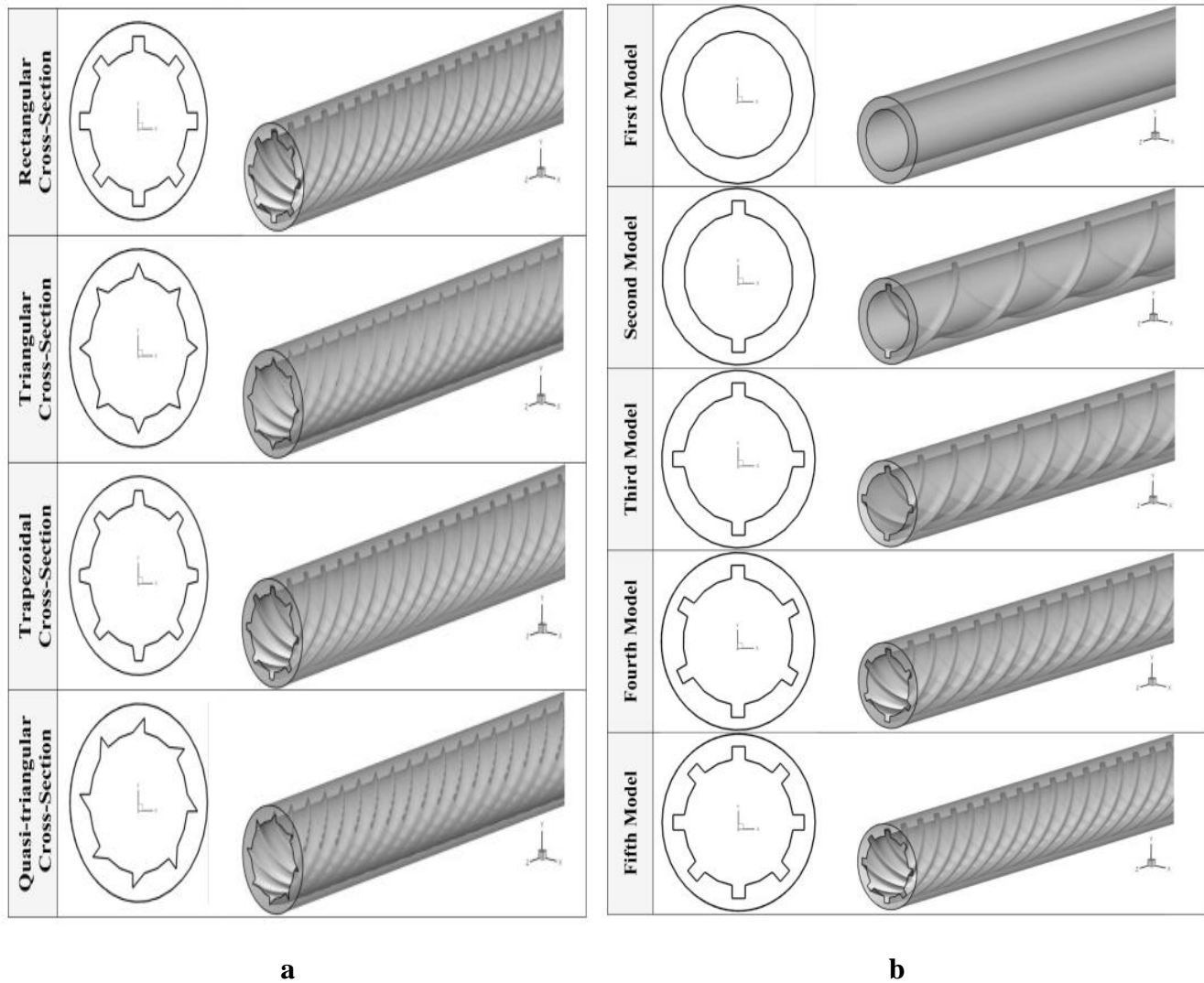


Figure 6. a. various cross-section geometries of the turbulator element.

b. Five models of the same shape turbulator elements. (Saedodin, Zaboli, & Ajarostaghi, 2021)

In an article it is studied twelve rectangular longitudinal fins with lengths that ranged up to 20 mm and thicknesses that ranged up to 6 mm (Bellos et al., 2017). It was determined that larger lengths and thicker walls lead to greater pressure losses and thermal enhancement, Nu increases 65.8%, and η_{th} is improved by about 0.82%.

(Sanaz, 2020) analyzed the effectiveness of nine different corrugated absorber tubes with varying pitch lengths and roughness heights in a parabolic trough collector (PTC). The results indicated that the PTC's thermal efficiency increased with an increase in roughness height to diameter ratio and a decrease in pitch to diameter ratio of the absorber tube. The corrugated tube's wall generated a region of adverse pressure gradient, leading to recirculation and more turbulence, which improved the mixing fluid near the wall and the core, thereby enhancing the PTC's efficiency. The PTC with a helically corrugated

absorber tube with a pitch length of $P=3$ mm and roughness height of $e=1.5$ mm had the highest thermal efficiency of 65.8%, but the friction factor was 1.84 times higher than the plain tube. The study confirmed that the pressure drop did not significantly affect entropy generation, as demonstrated by the variation in the Bejan number (see Figure 7).

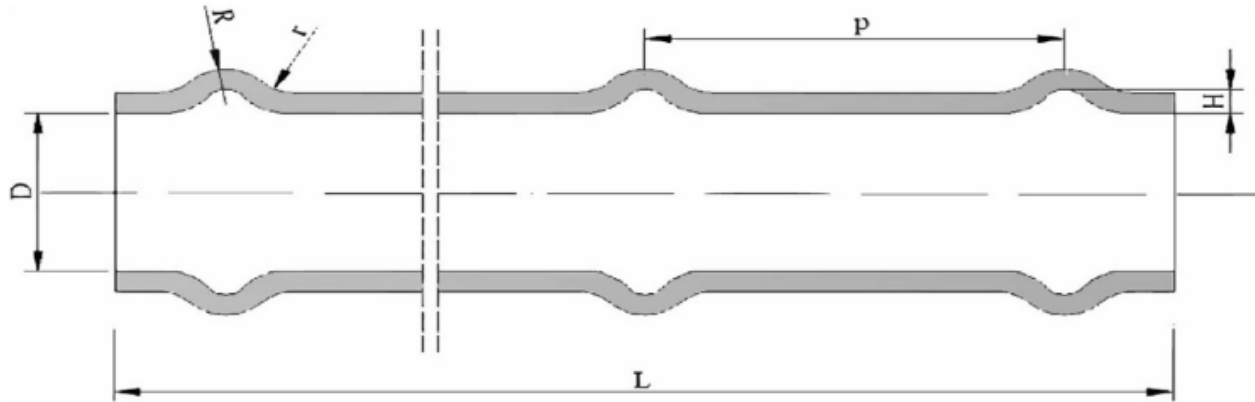


Figure 7. The outlined design of the corrugated tube. (Sanaz, 2020)

2.1.3. By increasing thermal conductivity

One of the most important components of solar collectors that significantly contribute to enhancing heat transfer in PTC is the working fluid. Since the beginning of the use of solar energy, there have been several efforts to improve the performance of thermal conductivity of the working fluid. They are produced by distributing metallic nanoparticles in the primary fluid (water or oils)

Established an empirical model, investigated the effect of two diverse nanofluids CuO/water (0.05vol.%) and Al₂O₃/water (0.01vol.%) compared with water as a base heat transfer fluid (HTF), they discovered that at a maximum \dot{m} , utilizing 0.05 vol. % of CuO and Al₂O₃ has the highest total thermal efficiency of 15.25% for CuO/water, 12.39% for the Al₂O₃/water and 10.58% for the water. This indicates that compared to water, using CuO/water nanofluid increased efficiency by about 44% (Sharma et al., 2014).

(Rehan, et al., 2018) led an examination to determine the impact of Al₂O₃ and Fe₂O₃ nanoparticles distributed in water at different flow rates (1-2 L/min) and weight fractions ranging from 0.2% to 0.3% on η_{th} of PTC in winter season. The results showed that adding Al₂O₃/water nanofluids increased thermal efficiency by 13% and it is increased 11% when they used Fe₂O₃/water, respectively, at 2 L/min flow rate and 0.3wt.% (see Figure 8).

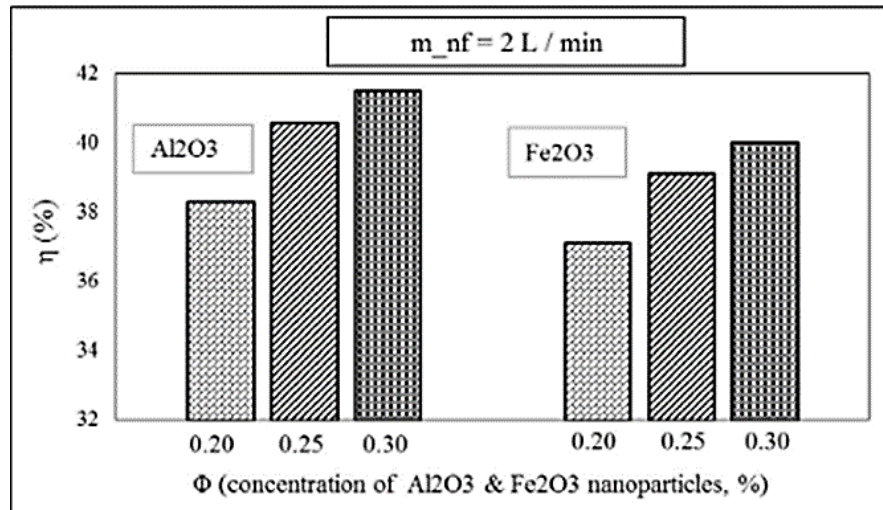


Figure 8. Average variations in PTC Efficiency using Al₂O₃ and Fe₂O₃ nanoparticles. (Rehan, et al., 2018)

At four separate sites in Iran, (Marefati et al., 2018) conducted an experimental investigation into the influence of Al₂O₃, CuO, and SiC mixed with water at a concentration of 1 to 5 vol.% on the thermal performance of the PTC (Tehran, Yazd, Tabriz and Shiraz). The PTC in Shiraz was maximum efficiency it was 37.2%. The results showed that CuO nanofluid increased conduction of heat more than Al₂O₃ nanofluid, and Al₂O₃ nanofluid increased heat transmission more than SiC nanofluid. They added that the use of a CuO/water nanofluid enhanced convective heat transfer by about 33% as compared to water alone. As a result, CuO/water nanofluid is the greatest choice for increasing thermal efficiency.

The Nickel Ferrite nanofluid was prepared using a two-step procedure and its effectiveness in enhancing the efficiency of the parabolic trough solar collector (PTC) was experimentally investigated. The study involved testing the nanofluid at two different volume fractions of 0.01% and 0.05%, as well as using deionized water as a working fluid. The experiments were conducted at three different volume flow rates, ranging from 0.5 to 3 l/min. The analysis showed that the application of the Nickel Ferrite nanofluid at high flow rates was more effective and suitable in the PTC. The highest efficiency recorded was 40%, achieved using Nickel Ferrite nanofluid with a volume fraction of 0.05% at a flow rate of 3 l/min. This is significantly higher than the 28% efficiency recorded using pure water. The findings suggest that the thermal efficiency of the parabolic trough solar collector improves with increasing flow rate and volume fraction of the nanofluid (Mohammad, 2021). Table 2 shows the results of study using water as working fluids using absorber with and without U-tube.

Table 2. Results of study using water and nanofluid at two different volume fractions as working fluids.

Working fluid	Flow rate (L/min)	T _{inlet} (°C)	T _{outlet} (°C)	ΔT (°C)	Efficiency %
water	0.5	50	56.5	6.5	16
	1.5	50	53.8	3.8	27
	3	50	52	2	28
Nanofluid 0.01%	0.5	50	59.1	9.1	21
	1.5	50	54.8	4.8	33
	3	50	52.7	2.7	38
Nanofluid 0.05%	0.5	50	63.9	13.9	27
	1.5	50	56.1	6.1	36
	3	50	53.4	3.4	40

2.1.4. By decreasing heat losses

In order to reduce convection and radiation heat losses even in hot environments a tube made of high transmittance and antireflective glass can be used around the absorber tube and the air evacuate between the tubes. Since evacuated receivers have a high vacuum (i.e., 10-5 mbar) between the absorber and the glass tube, they are widely applied for temperatures up 300 °C. This reduces thermal losses and boosts the PTC's overall efficiency, it also preferable to improve the transmittance of solar radiation using glass tube formed from low-iron borosilicate glass. To increase solar transmittance and improve performance, the glass tube is usually coated with an anti-reflective coating.

(Premjit, 2011) numerically compared the heat loss for three configuration of absorber tube with glass shell, evacuated tube, non-evacuated and vacuum shell (see Figure 9), for an operating temperature 250°C, in comparison to the other configurations at the test temperature, the heat loss from the non-evacuated tube is more sensitive to outside weather conditions. The results of the study are shown in Table 3.

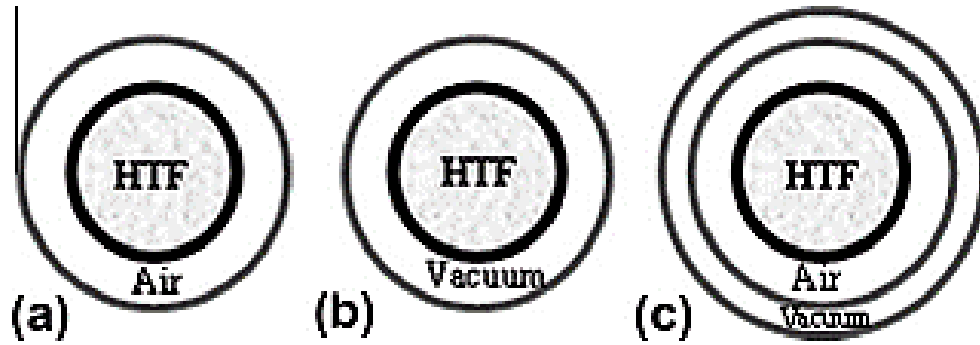


Figure 9. Absorber tube with three different shells. (Premjit, 2011)

Table 3. Comparison of heat loss for different receiver configurations (at 250 °C). (Premjit, 2011)

Velocity (m/s)	Heat loss (W)		
	(a) Non evacuated	(c) Vacuum shell	(b) Evacuated
1	456	282.5	102.5
2	494	290.4	103.2
3	517	294.4	103.7
4	533	296.9	103.7
5	545	298.5	103.8

Other study was done by (Soudani et al., 2017) to analyze the non-evacuated tube using both experimental and theoretical methods. Copper was used to make the receiver, which had diameters of ($d_o = 0.051\text{m}$, $d_i = 0.028\text{ m}$) and ($d_o = 0.053\text{m}$, $d_i = 0.051\text{ m}$) for the glass cover, respectively. The results showed that at 11.30 am, the efficiency reached 77% with the reflector dimensions were (1.8 x 1.6 m), the output temperature was 90 °C, and with different was 9% bigger than efficiency obtained from reflector without cover as shown in fig.10.

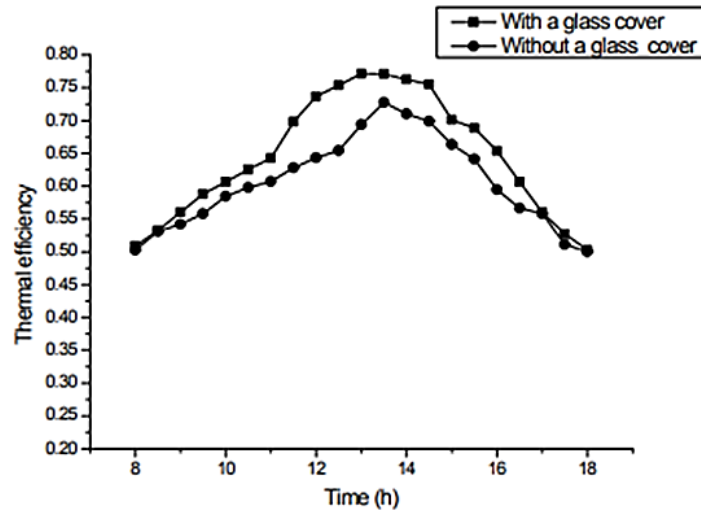


Figure 10. Experimental thermal efficiency during the day (water flow rate: 0.009 kg /s). (Soudani et al., 2017)

(Al-Ansary et al., 2011) propose an alternative method for improving the thermal performance of parabolic trough collectors by incorporating heat-resistant thermal insulation material into the receiver annulus that does not receive concentrated sunlight. This approach is compared to the conventional use of receivers with air-filled annuli, which are currently used mainly for process heat applications and have lower thermal performance than evacuated receivers. Numerical modeling is utilized to calculate conduction and convection heat losses from the proposed receiver, and its performance is compared to that of a conventional receiver with an air-filled annulus. The findings indicate that using fiberglass insulation in the proposed receiver can decrease the combined conduction and convection heat loss by up to 25%. However, the proposed approach's benefit diminishes at high temperatures due to the insulation material's increasing thermal conductivity.

2.1.5. By increasing emissivity and decreasing reflectivity

Black coating can be used to on absorber tubes to decrease the losses that occur when operation temperature is high. In order to improve heat transfer, the absorber must to be coated. PTC uses a variety of coatings, such TiAlN/TiAlON/SiO₂, Au-MgO, HfMoN/HfON/Al₂O₃, Mo-SiO₂, and Ni-25, Al₂O₃, NiCo₂O₄, Ni-5Al, Mo-Al₂O₃, TiAlN/TiAlON/Si₃N₄, CuCoO₄(NiFe)Co₂O₅, W-Al₂O₃, AlNi-Al₂O₃, Ni-SiO₂,

As an ideal absorbance the coating may absorb the most solar radiation as possible ($\alpha \geq 0,95$), which minimizes solar radiation reflection. Additionally, there should be little heat loss through

convection or conduction (including emission $\varepsilon \leq 0.050$) onto the surroundings, having thermal stability (TS) of up to the working temperature of the receiver (Chen, 2011) (see Figure 11).

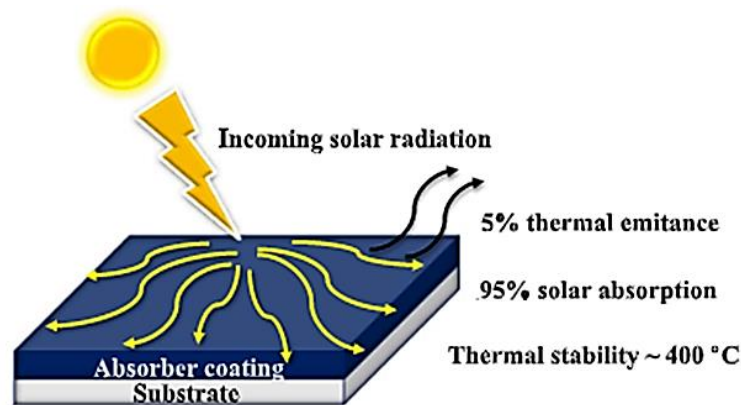


Figure 11. Solar selective absorber. (Chen, 2011)

(Asaad, 2022) reviewed several types of selective coating materials and their properties for various solar power concentrator designs. By reducing thermal losses, the coating used in the absorber tube of PTSC demonstrated an impressive improvement in thermal efficiency. On the other hand, to achieve higher properties, various coatings must be combined with other materials providing better properties.

Sandia National Laboratories (Ambrosini et al., 2015) is investigating solar selective coatings on CSP to improve physical and chemical properties. A thermal spraying coating with using a laser had improved properties for 480 hours and had an absorptivity of more than 90% at 600 and 700 °C.

2.1.6. By changing shape of absorber tube

The receiver tube (absorber) is in charge of transmitting heat to the HTF of the PTC system and the major section to influence the thermal proprieties of the system. Several studies have suggested changes shape of the absorber tube to enhance its thermal performance by expanding the local quantity and the overall inner tube surface.

The results shown in Figure 12 (Bellos et al., 2016), a new design of the tube taking a converging-diverging form was recommended to increase the heat transfer performance of a solar PTC. Their numerical results indicated a mean efficiency improvement up to 4.55% than smooth tube geometry because converging tube pushes the flow to be mixed better and gives a more uniform temperature distribution inside the tube.

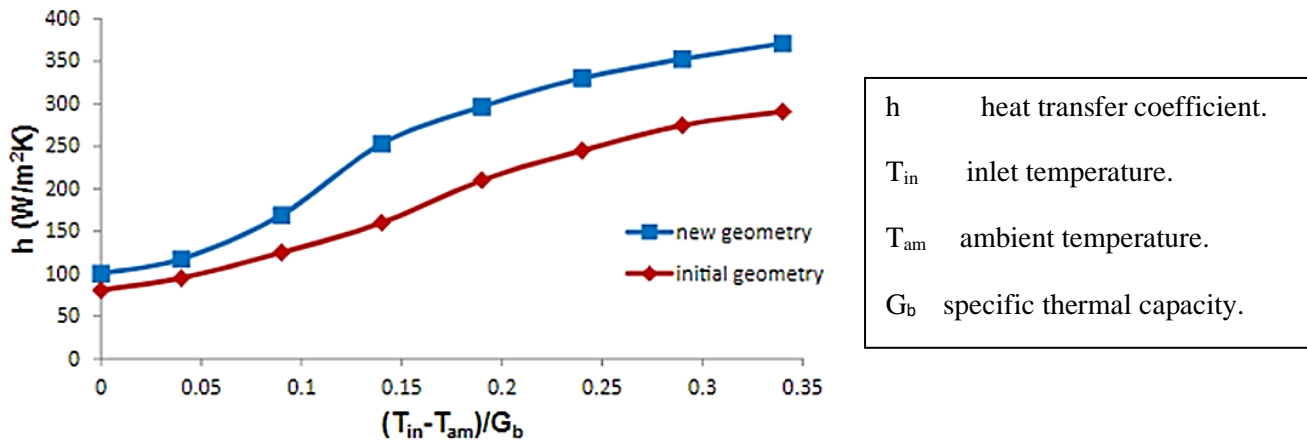


Figure 12. Heat transfer coefficient comparison for the two examined geometry with thermal oil as working fluid. (Bellos et al., 2016)

(Chakraborty, 2021) by simulation the thermal performance of the parabolic trough collector with a helical absorber tube; three models (0 (smooth), 75, 85, and 95 turns) are proposed also they used two mass flow rate of water (0.15 and 0.6 kg/s). The output of the tube with higher number (95) of turns using water as working fluid was the highest thermal efficiency and the exergy efficiency; it was 10% and 5%. As compared to an absorber tube that is smooth. Additionally, the Nusselt number of PTC with a helical absorber tube has boosted in value by up to 25% (See Figure 13, 14).

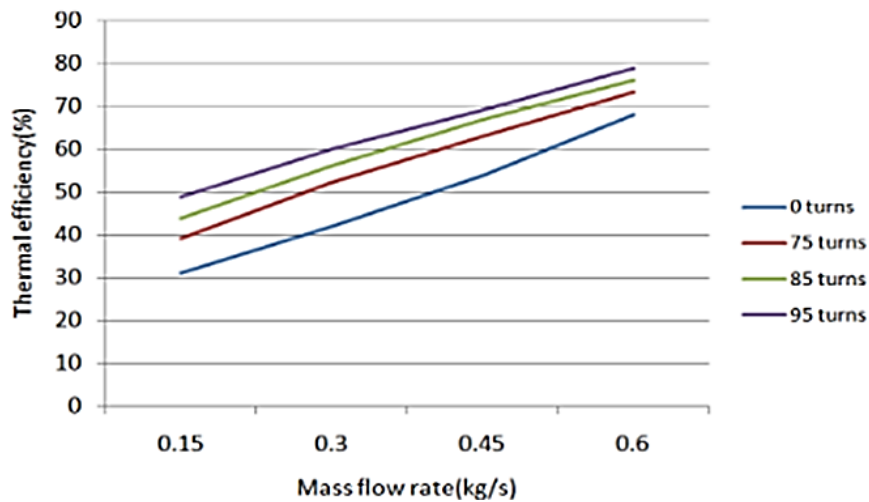


Figure 13. Thermal efficiency of the PTC collector with helical absorber tube. (Chakraborty, 2021)

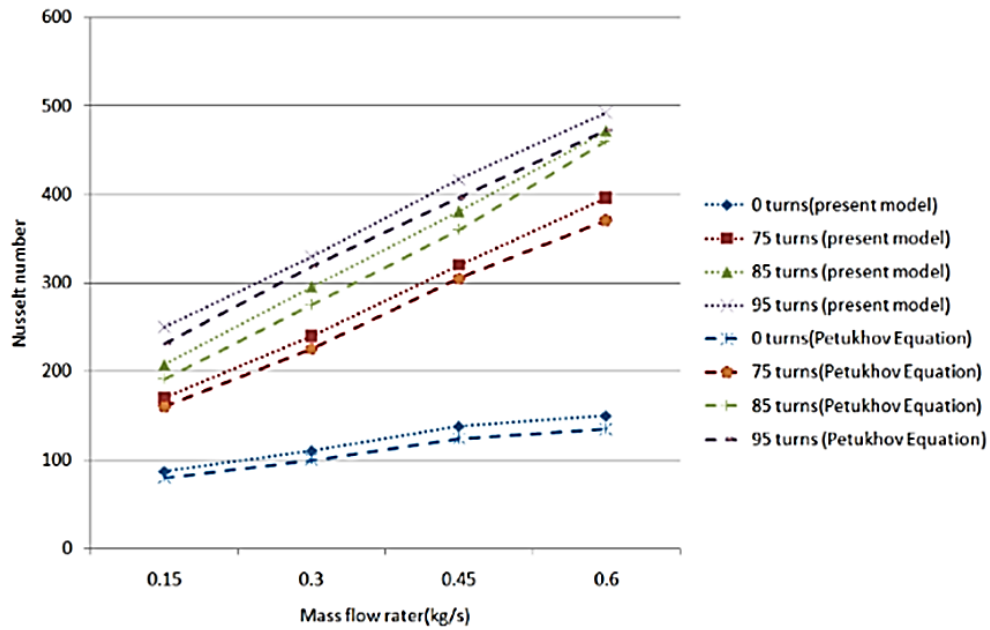


Figure 14. Validation of the model in terms of Nusselt number for helical absorber tube. (Chakraborty, 2021)

The main aim of studies by (Mohammad, 2021) was to evaluate the efficacy of the U-tube as an absorbent in a parabolic trough solar collector. The experiments were conducted at varying volume flow rates, ranging from 0.5 to 3 L/min. The results indicated that using a U-tube as an absorbent was more effective than pipe without the U-tube. In particular, at a flow rate of 3 L/min, the efficiency and the outlet temperature of the pipe with the U-tube was 34% 52.4 °C respectively, while the efficiency and the outlet temperature of the pipe without the U-tube and at the same flow rate was 28% 52 °C (see Figure 15).

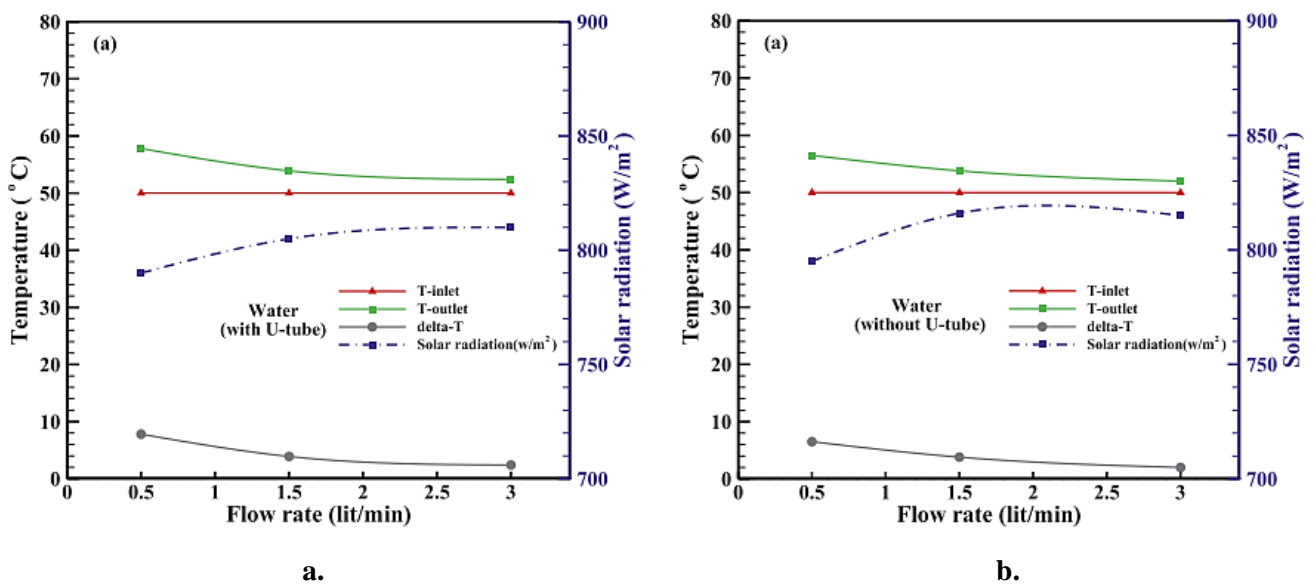


Figure 15. Changes in outlet temperature, solar radiation, and temperature difference between inlet and outlet at different water flow rates; **a.** U-tube **b.** without U-tube. (Mohammad S. D., 2021)

Researchers (Kulahli et al., 2019) present a novel parabolic reflector for the axial focal length variable Parabolic Trough Collector (PTC). The reflector contains a focal length that changes in the longitudinal direction while maintaining a fixed focal line. They showed that because of this geometry, the heat flux around the absorber changes not only circumferentially but also axially. Scholars defined a new geometric design parameter, the ratio of the focal length at the ends, and numerically examined its effects on thermal behavior using a custom code to create the new reflector in SolTrace (a ray tracing software). As a result, they performed flow optimization analysis as well as geometric factor analysis. As a result of parametric analysis, they showed that thermal efficiency increased by 0.21%, and as a result of flow optimization, an increase of 0.63% was achieved in net energy gain.

(Taher et al., 2023) by proposed a new optical design for a PTC that uses the Monte Carlo Ray-Trace (MCRT) method to estimate the solar flux distribution on the absorber tube surface. They applied Taguchi and ANOVA analysis methods to simultaneously investigate multiple control parameters and determine their contribution rates. In addition, multi-objective optimization of optical efficiency and solar flux uniformity was obtained using the Gray Relational Analysis (GRA) method. The proposed design achieved an optical efficiency of 83.01% and a heat flow uniformity of 92.24%, demonstrating its effectiveness in balancing optical efficiency and heat flow uniformity.

3. Conclusions and Recommendations

Due to the importance of the receiver tube in the parabolic trough solar collector since it is the part that absorbs the focused solar rays from the reflecting surface, so this paper collects some results from previous studies to improve heat transfer and obtain higher thermal performance. The following are the list of the outcomes:

- After testing several inputs to change the working fluid stream and increase the Reynolds number and making the flow turbulent, the conical strip inserts was the highest increase ratio in thermal efficiency, which was 14.62%.
- Several shapes of fins were used to expand the inner surface of the receiver tube, and the results showed an increase in the conductivity, Nusselt number and efficiency, in addition as the length and number of the fins rise, thermal enhancement also rises accompanied by a rise in pressure drop. The results from the study involving elements with a helically profiled design throughout the pipe showed that the model with elements featuring a rectangular cross-section

demonstrated the most superior thermal performance. The increase in thermal efficiency of this model was found to be 29%.

- The vacuum glass tube has the lowest heat losses after comparing it with absorber without glass tube and non-evacuated class tube, because it was not affected by the weather unlike with the others, this is also preferable to use glass tubes made of low-iron borosilicate glass to increase the transmittance of solar radiation.
- Previous researchers have noted the benefit of using coating in reducing heat losses by boosting permeability and minimizing reflection from the absorber tube furthermore a thermal spraying coating with using a laser was the best method.
- Changing the shape of the absorber tube that contains the working fluid and the use of a tube with a spiral shape or undulating internal area led to an increase in heat conduction and convection due to the presence of secondary vortices inside the fluid. Despite the increase in thermal efficiency with the increase in the number of turns of the spiral tube, the pressure drop has increased. Moreover, the absorber with a U-tube demonstrated the highest increase in thermal efficiency, reaching 21%.
- The use of nanofluid was efficient in improving the thermal conductivity of the liquid and a significant improvement in the output temperatures, use of CuO nanoparticles was the better and highest thermal efficiency, with Al₂O₃ came in second place. Where, the application of nanofluids as the working fluid yielded the greatest improvement in thermal efficiency compared to all other studies. To be specific, the utilization of CuO nanofluids resulted in a 44% increase
- Based on the results of previous studies, we recommend integrating more than one method to improve the thermal performance of the parabolic trough solar collector, such as using a helical or straight absorber tube with vortex generators (turbulators), coating it with a selective coating, and using a vacuum glass tube, at the same time. Nanofluids can be mixed with the working fluid, taking into account costs, as well as the amount of pressure drop of the working fluid.

Acknowledgements

The authors thank Atatürk University for providing the opportunity to review the literature.

Authors' Contributions

All authors contributed equally to the article.

Statement of Conflicts of Interest

There is no conflict of interest between the authors.

Statement of Research and Publication Ethics





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

References

- Abed, N. et al., (2021). Thermal-Hydraulic Analysis of Parabolic Trough Collectors Using Straight Conical Strip Inserts with Nanofluids. *Nanomaterials*, 11(853), 1-30.
- Al-Ansary, H. et al., (2011). Numerical study of conduction and convection heat losses from a half-insulated air-filled annulus of the receiver of a parabolic trough collector. *Solar Energy*, 85, 3036–3045.
- Ambrosini, A. et al., (2015). Thermal stability of oxide-based solar selective coatings for CSP central receivers. *ASME 9th International Conference on Energy Sustainability Collocated : American Society of Mechanical Engineers Digital Collection*.
- Asaad, Y. A.-R. (2022). Selective Absorber Coatings and Technological Advancements in Performance Enhancement for Parabolic Trough Solar Collector. *Journal of Thermal Science*, 11630-022, 1990-2008.
- Arutyunov, Vladimir S. et al., (2017). Energy resources of the 21st century: Problems and forecasts. Can renewable energy sources replace fossil fuels, *Russian Chemical Reviews* 86.8 777.
- Bellos, E. et al., (2017). Multi-criteria evaluation of parabolic trough collector with internally finned absorbers. *Applied Energy*, 205, 540-561.
- Bellos, E. et al., (2016). Thermal enhancement of solar parabolic trough collectors by using nanofluids and converging-diverging absorber tube. *Renewable Energy* 94, 213–222.
- Benabderrahmane, A. et al., (2016). Heat Transfer Enhancement in a Parabolic Trough Solar Receiver using Longitudinal Fins and Nanofluids. *Journal Of Thermal Science*, 25, 410-417.
- Benito, R. et al., (2015). Enhancing heat transfer in air tubular absorbers for concentrated solar thermal applications. *Applied Thermal Engineering*, 50(1), 1076-1083.
- Chakraborty, O. (2021). Effect of helical absorber tube on the energy and exergy analysis of parabolic solar trough collector – A computational analysis. *Sustainable Energy Technologies*, 44(101), 70-83.
- Chen, C. J. (2011). *Physics Of Solar Energy*.
- Diwan, K. et al., (2015). Heat Transfer Enhancement in Absorber Tube of Parabolic Trough Concentrators Using Wire-Coils Inserts. *Universal Journal of Mechanical Engineering*, 3(3), 107-112.
- Ediger, V. Et al., (1999). Renewable energy potential as an alternative to fossil fuels in Turkey. *Energy Conversion And Management*, 40(7) 743-755.
- Ghasemi, S. E. et al., (2017). Numerical thermal study on effect of porous rings on performance of solar parabolic trough collector. *Applied Thermal Engineering*, 118, 807-816.
- Jamal-Abad, M. T. et al., (2017). Experimental investigation on a solar parabolic trough collector for absorber tube filled with porous media. *Renewable Energy*, 107, 156-163.

- Jaramillo, O. et al., (2016). Parabolic trough solar collector for low enthalpy processes: An analysis of the efficiency enhancement by using twisted tape inserts. *Renewable Energy*, 93, 125–141.
- Kilic, A. et al., (1983). Solar Energy (in Turkish). *Kipas Distribution Inc.*
- Kulahli, M.C. et al., (2019). Numerical simulation of a parabolic trough collector containing a novel parabolic reflector with varying focal length. *Applied Thermal Engineering*, 161, 114210.
- Mao, Q. et al., (2014). Study on radiation flux of the receiver with a parabolic solar concentrator system. *Energy Conversion and Management*, 84, 1-6.
- Marefati, M. et al., (2018). Optical and thermal analysis of a parabolic trough solar collector for production of thermal energy in different climates in Iran with comparison between the conventional nanofluids. *Journal Of Cleaner Production*, 175, 294–313.
- Mohammad, S. D. (2021). Efficiency of the parabolic through solar collector using NiFe₂O₄/Water nanofluid and U-tube. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 120, 136-149.
- Muñoz, J. et al., (2011). A technical note on application of internally finned tubes in solar parabolic trough absorber pipes. *Solar Energy*, 85(3), 609-612.
- Öner. (2022). Investigation of the effects of flipped triangle pipe inserts on thermal efficiency in a parabolic trough solar collector. *Heat Transfer Research*, 54(3), 1-22.
- Özakin. (2022). CFD analysis of using umbrella shaped turbulators to improve heat transfer in a horizontal pipe. *International Journal of Innovative Research and Reviews*, 6(1), 30-34.
- Ozakin, A. N. et al., (2020). Performance analysis of photovoltaic-heat pump (PV/T) combined systems: A comparative numerical study. *Journal of Solar Energy Engineering*, 142(2).
- Premjit, D. (2011). Numerical investigation of parabolic trough receiver performance with outer vacuum shell. *Solar Energy*, 85, 1910–1914.
- Reddy, k. S. et al., (2015). Experimental investigation of porous disc enhanced receiver for solar parabolic trough collector. *Renewable Energy*, 77, 308-319.
- Rehan, M. A. et al., (2018). Experimental performance analysis of low concentration ratio solar parabolic trough collectors with nanofluids in winter conditions. *Renewable Energy*, 118, 742–751.
- Saedodin, S. et al., (2021). Hydrothermal analysis of heat transfer and thermal performance characteristics in a parabolic trough solar collector with Turbulence-Inducing elements. *Sustainable Energy Technologies*, 46, 141-166.
- Sahin, H. M. et al., (2015). Investigation of heat transfer enhancement in a new type heat exchanger using solar parabolic trough systems. *International Journal of Hydrogen*, 40(44), 15254-15266.
- Sanaz, A. (2020). Energy and exergy analysis of a parabolic trough collector using helically corrugated absorber tube. *Renewable Energy*, 155, 735-747.
- Sharma, K. et al., (2014). An Experimental Investigation into the Performance of a Nanofluid Based Concentrating Parabolic Solar Collector (NCPSC). *PhD diss.* Thapar Institute.
- Soudani, M. E. et al., (2017). Experimental and theoretical study of parabolic trough collector (PTC) with a flat glass cover in the region of Algerian sahara (Ouargla). *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(8), 4003-4009.
- Taher, M.A. et al., (2023). A novel design to optimize the optical performances of parabolic trough collector using Taguchi, ANOVA and grey relational analysis methods. *Renewable Energy*, 216, 119105.
- Wang, E. A. (2020). Progress in concentrated solar power technology with parabolic trough collector system: A comprehensive review. *School of Automobile Engineering*.
- Yesildal, F. (2022). Experimental Optimization and CFD Model Verification of the Parabolic Trough Collector with a Staggered Butterfly Finned Pipe Inserts. *Heat Transfer Research*, 53(1).
- York, R. (2019). Energy transitions or additions?: Why a transition from fossil fuels requires more than the growth of renewable energy. *Energy Research & Social Science*, 51, 40-43.

Floresan Mikroskop Sistemlerinde Yüksek Doğruluklu Nükleer Segmentasyonu için Otomatik Kodlayıcı Tabanlı Modellerin Geliştirilmesi

Sümeyye Nur EMİR¹, Sibel DANIŞMAZ², Hülya DOĞAN^{3*}, Ramazan Özgür DOĞAN⁴

Öz

Mikroskopik sistemlerde doku veya hücre numunelerinde nükleer morfoloji veya biyolojik belirteçler gibi bölümleri görselleştirmek için hematoxilen ve eozin (Hematoxylin and eosin - H&E) histolojik boyamalar, immünohistokimyasal (immunohistochemical - IHC) ve immünofloresan (immunofluorescence - IF) boyama yaklaşımları geliştirilmiştir. H&E veya IHC boyamalar ile karşılaştırıldığında, IF boyamaların sayısala aktarılması uzmanlar için daha zorlu ve zaman alıcı olmaktadır. Fakat, IF boyama yaklaşımlarında daha fazla hücresel veya hücre altı belirteç görüntülenebilmektedir. Floresan mikroskoplardan elde edilmiş nükleer segmentasyonun yüksek doğrulukla otomatik gerçekleştirilmesi IF boyama yaklaşımlarındaki hücreler hakkında daha fazla bilgi elde edilmesini sağlamaktadır. Literatürde diğer mikroskopik sistemlerden elde edilmiş görüntülerde hücre veya doku segmentasyonu için birçok çalışma geliştirilmiş ve yüksek doğruluklu sonuçlar elde edilmiştir. Fakat diğer alanlarda gerçekleştirilen bu başarı, floresan mikroskoplardan elde edilmiş görüntülerdeki nükleer segmentasyonu için elde edilmemiştir. Bu kapsamda, çalışmada floresan mikroskop sistemlerinde nükleer segmentasyonu için yüksek doğruluklu otomatik kodlayıcı modelleri geliştirilmektedir. Geliştirilen otomatik kodlayıcı modellerinin analizi uzman kişiler tarafından işaretlenmiş, floresan mikroskop görüntülerinden oluşan veri seti kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Çalışmada kullanılan performans değerlendirme prosedürleri açısından, gerçekleştirilen otomatik kodlayıcı modellerinin başarılarının otomatik nükleer segmentasyon için tatmin edici olduğu açıkça görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Floresan mikroskop, Nükleer segmentasyon, Derin öğrenme, Otomatik kodlayıcı, Transfer öğrenme, U-Net.

Development of Autoencoder Based Models for High Accuracy Nuclear Segmentation in Fluorescent Microscope Systems

Abstract

Hematoxylin and eosin (H&E) histological staining, immunohistochemical (IHC) and immunofluorescence (IF) staining approaches have been developed to visualize sections such as nuclear morphology or biomarkers in tissue or cell samples in microscopic systems. Compared to H&E or IHC staining, digitizing fluorescent staining is more challenging and time consuming for experts. However, more cellular or subcellular markers can be visualized in IF staining approaches. Automated nuclear segmentation obtained from fluorescent microscopes with high accuracy provides more information about cells in IF staining approaches. In the literature, many studies have been developed for cell or tissue segmentation in images obtained from microscopic systems and high accuracy results have been obtained. However, this success in other fields has not been achieved for nuclear segmentation in images obtained from fluorescent microscopes. In this context, high-accuracy autoencoder models are developed for nuclear segmentation in fluorescent microscope systems. The analysis of the developed autoencoder models is carried out using a dataset of fluorescent microscope images marked by experts. In terms of the performance evaluation procedures used in the study, it is clearly seen that the success of the autoencoder models performed is satisfactory for automatic nuclear segmentation.

Keywords: Fluorescent microscope, Nuclear segmentation, Deep learning, Autoencoder, Transfer Learning, U-Net.

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, smyyenr.61@gmail.com

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, sibel.danisalmaz16@gmail.com

³Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, hulya@ktu.edu.tr

⁴Gümüşhane Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, Türkiye, ramazan.dogan@gumushane.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0002-7331-2406>

²<https://orcid.org/0000-0001-6945-6493>

³<https://orcid.org/0000-0003-3695-8539>

⁴<https://orcid.org/0000-0001-6415-5755>

1. Giriş

Günümüzde medikal görüntü işleme, dijital patoloji, hesaplamalı patoloji, sistem patolojisi veya çeşitli mikroskobik sistemler olmak üzere birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadır. Medikal görüntü işleme teknikleri numunenin otomatik yorumlanması, daha iyi çözünürlük, görüntü iyileştirme gibi birçok uygulama sağlayarak bu alanlardaki uzmanların iş yükünü oldukça hafifletmektedir (Ramesh ve ark., 2021).

Dijital patolojide uzmanlar hastalığın derecesini, tipini ve evresini belirleyebilmek için genelde mikroskoplarda doku kesitlerini kullanmaktadırlar. Mikroskobik sistemler ile nükleer özellikler dahil hücre bilgilerinin doğru ölçümü, tümörün heterojenliği ve yapılan tıbbi müdahaleye yanıt gibi karakterizasyonlar için kritik öneme sahiptir. Bu alanda dokularda veya hücre numunelerinde nükleer morfoloji veya biyolojik belirteçler gibi bölümleri görselleştirmek için hematoksilin ve eozin (Hematoxylin and eosin - H&E) histolojik boyamalar, immünohistokimyasal (immunohistochemical - IHC) ve immünofloresan (immunofluorescence - IF) boyama yaklaşımları geliştirilmiştir. H&E ve IHC boyamaları rutin tanı laboratuvarlarında ve patoloji bölümlerinde standart prosedürler iken, IF boyama rutin tanılamadan ziyade araştırma ortamlarında daha sık kullanılmaktadır (Ikeda ve ark., 2021).

H&E veya IHC boyamalar ile karşılaştırıldığında floresan boyamaların sayısala aktarılması uzmanlar için daha zorlu ve zaman alıcı olmaktadır. Fakat, IF boyama yaklaşımlarında daha fazla hücresel veya hücre altı belirteç görüntülenebilmektedir. Bu durum tek tek hücreler veya hücre bölmeleri hakkında daha fazla bilgi edinilmesini sağlamaktadır (Schubert ve ark., 2006). Floresan mikroskoplardan elde edilmiş nükleer segmentasyonunun yüksek doğrulukla otomatik gerçekleştirilmesi, IF boyama yaklaşımlarındaki hücreler hakkında daha fazla bilgi elde edilmesini sağlamaktadır.

1.1. Literatür Çalışmaları

Birbiriyle ayrık durumda olan çekirdeklere sahip doku veya hücre numunelerinin eşiklemeye dayalı daha basit yaklaşımlarla (Jeevitha ve ark., 2020; Pare ve ark., 2020) kolayca segmentasyonu gerçekleştirilebilirken, nükleer görüntülerdeki gibi yoğun şekilde birbiriyle çakışmış doku veya hücre kümelerinin segmentasyonu için daha karmaşık yaklaşımlar gerekmektedir. Klasik segmentasyon yaklaşımları görüntüdeki doku veya hücreleri arka plandan ayırmak için tasarlanmış olmalarına rağmen, yoğun şekilde birbiriyle çakışmış doku veya hücre kümelerini arka plandan ayırmada (segmentasyon) sıklıkla başarısız olmaktadır. Bu durumun üstesinden gelmek ve yoğun şekilde birbiriyle çakışmış doku veya hücre kümelerinin daha yüksek doğruluklu segmentasyonu için

araştırmacılar genelde derin öğrenme tabanlı görüntü segmentasyon yaklaşımları geliştirilmektedirler (Niazi ve ark., 2019; Durkee ve ark., 2021; Jose ve ark., 2021).

Derin öğrenme tabanlı görüntü segmentasyon yaklaşımları eğitim süreçlerinde uzman kişiler tarafından işaretlenmiş veri kümeleri zengin ise çok başarılı sonuçlar elde etmeyi garanti edebilmektedir. Fakat gerçekleştirdiğimiz literatür araştırmalarına göre nükleer görüntülerde kümenin bir veya birden çok çekirdekten oluşup oluşmadığına karar vermenin zor olmasından dolayı herkesin kullanımına açık nükleer görüntülerden oluşan veri seti çok bulunmamaktadır. Bu yüzden literatürde nükleer segmentasyonu gerçekleştiren çalışma sıklıkla gerçekleştirilememektedir. Literatürde floresan mikroskoplarda hücre veya doku segmentasyonu gerçekleştiren çalışmalara örnek verecek olursak; Wang ve ark. (2010) floresan görüntülerinde tek hücrelilerin analizindeki temel adımları otomatikleştirmek için yeni yöntemler geliştirmişlerdir. Du ve ark. (2010) floresan mikroskoplarda hücre görüntü segmentasyonu için birden fazla denetimsiz veri madenciliği tekniğini geliştirmişler ve çalışmalarında tekniklerin performanslarını değerlendirmişlerdir. Rizk ve ark. (2014) çalışmalarında floresan mikroskopi görüntülerinde hücre altı yapıları tespit etmek, tanımlamak ve ölçmek için kullanılan 'Squassh' (hücre altı şekillerin segmentasyonu ve nicelenmesi) adlı bir yöntem için çok yönlü bir protokol sunmuşlardır. Pan ve ark. (2022) çalışmalarında W-Net modelinden esinlenerek Attention-enhanced Simplified W-Net (ASW-Net) adlı yeni bir çerçeve önermişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışmada dikkate değer bir segmentasyon performansına ulaşmışlardır. Caicedo ve ark. (2019) floresan mikroskop görüntülerinde çekirdek segmentasyonunun doğruluğunu artırmak için derin öğrenme algoritmalarının potansiyeli araştırmışlardır. Kromp ve ark. (2019) floresan mikroskop görüntülerinde nükleer segmentasyonu için derin öğrenme tabanlı yaklaşım geliştirmişlerdir. Daniel ve ark. (2022) transfer öğrenmeli konvolüsyonel sinir ağı modeli kullanarak floresan mikroskopi görüntülerinde endoplazmik retikulum ağını çıkarmak için otomatik segmentasyon işlemi uygulamayı amaçlamışlardır. Bu kapsamda çalışmalarında VGG-UNet ve VGG-SegNet modelleri ile %98'lik segmentasyon doğruluğu elde etmişlerdir.

1.2. Literatürdeki Kısıtlamalar ve Çalışmanın Katkıları

Literatürde mikroskobik sistemlerden elde edilmiş görüntülerde hücre veya doku segmentasyonu için birçok çalışma geliştirilmiş ve yüksek doğruluklu sonuçlar elde edilmiştir (Liu ve ark., 2021; Masubuchi ve ark., 2020; Araújo ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2021). Fakat diğer alanlarda gerçekleştirilen bu başarı floresan mikroskoplardan elde edilmiş görüntülerdeki nükleer segmentasyonu için elde edilmemiştir. Floresan mikroskop sistemlerinde nükleer segmentasyonu çalışmalarında hala kısıtlamalar mevcuttur. Bu kısıtlamalar şu şekilde özetlenebilmektedir:

1. Gerçekleştirdiğimiz literatür araştırmalarına göre nükleer görüntülerde bir kümenin bir veya birden çok çekirdekten oluşup oluşmadığına karar vermenin zor olmasından dolayı herkesin kullanımına açık nükleer görüntülerden oluşan veri seti çok bulunmamaktadır.
2. Nükleer segmentasyon için veri setinin bulunmamasından dolayı literatürde bu alanda gerçekleştirilen çalışma az sayıda bulunmaktadır. Bundan dolayı floresan mikroskopik sistemlerde otomatik nükleer segmentasyon başarıları da tatmin edici seviyede değildir.

Literatürde otomatik segmentasyon gerçekleştiren çalışmalarda klasik U-Net, Seg-Net, transfer öğrenmeli U-Net yaklaşımlarının oldukça başarılı olduğu görülmüştür (Cheng ve ark., 2021; Amiri ve ark., 2020; Raj ve ark., 2021). Bu çalışmada ise literatürdeki çalışmalardan esinlenilerek floresan mikroskop sistemlerinde nükleer segmentasyonu için yüksek doğruluklu otomatik kodlayıcı modelleri geliştirilmektedir.

Bu çalışmanın genel yapısı şu şekilde tasarlanmıştır. Bölüm 2’de çalışmada kullanılan veri seti ve otomatik kodlayıcı modelleri detaylı şekilde anlatılmaktadır. Bölüm 3’te çalışmada elde edilen bulgular hakkında genel tartışma gerçekleştirilmektedir. Çalışmamızın son kısmı olan Bölüm 4’te ise çalışmanın sonuçları ve gelecekteki çalışmalar için öneriler verilmektedir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, otomatik nükleer segmentasyonu için uzman kişiler tarafından işaretlenmiş, floresan mikroskop görüntülerinden oluşan veri seti kullanılarak otomatik kodlayıcı modelleri geliştirilmektedir. Çalışmamızın bu bölümünde ilk olarak kullanılan veri setinden bahsedilecek, daha sonra ise geliştirilen otomatik kodlayıcı modelleri detaylı olarak anlatılacaktır.

2.1. Veri Seti

Bu çalışmada geliştirilen otomatik kodlayıcı modellerinin analizi, makine öğrenmesi tabanlı nükleer segmentasyon yaklaşımlarının eğitilmesi amacıyla Kromp ve ark. (2020) tarafından hazırlanmış veri seti üzerinde gerçekleştirilmektedir. Bu veri seti patolojik kökenli farklı biyolojik doku ve hücrelerden oluşmaktadır. Veri setinde 79 adet uzman kişi tarafından işaretlenmiş görüntü bulunmaktadır. Veri setindeki görüntülerin elde edildiği numune çeşitleri şu şekildedir: Schwann hücre stroması bakımından zengin doku (ganglionöroblastomdan) kriyoseksiyonları, Wilms tümör dokusu kriyoseksiyonları, nöroblastom tümör dokusu kriyoseksiyonları, nöroblastom hücreleri ile infiltre edilmiş kemik iliği sitospin preparatları, nöroblastom tümör dokunmatik damgaları, mikroskopi cam slaytlarında sitospinlenmiş iki nöroblastom hücre hattının (CLB-Ma, STA-NB10)

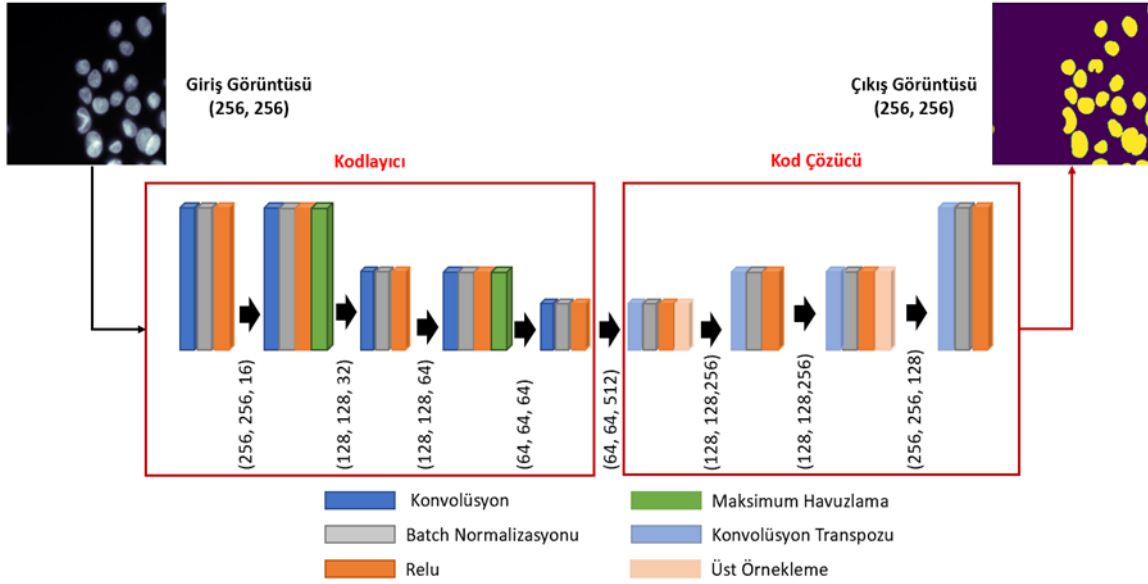
hücreleri ve mikroskopi cam slaytlarında sitospinlenmiş veya büyütülmüş normal bir insan keratinosit hücre hattının (HaCaT) hücreleri. Veri setindeki görüntüler 10x, 20x, 40x ve 63x olmak üzere farklı büyütme objektifleri kullanılarak elde edilmektedir. IF görüntülerindeki çekirdekler, eğitimli biyologlar tarafından işaretlenmektedir.

2.2. Otomatik Kodlayıcı Modelleri

Bu çalışmada floresan mikroskop sistemlerinde nükleer segmentasyonu için yüksek doğruluklu otomatik kodlayıcı modelleri geliştirilmektedir. Çalışmada geliştirilen otomatik kodlayıcı modellerinin detayları şu şekildedir:

2.2.1. Tam Konvolüsyonel Ağ (Fully Convolutional Network - FCN)

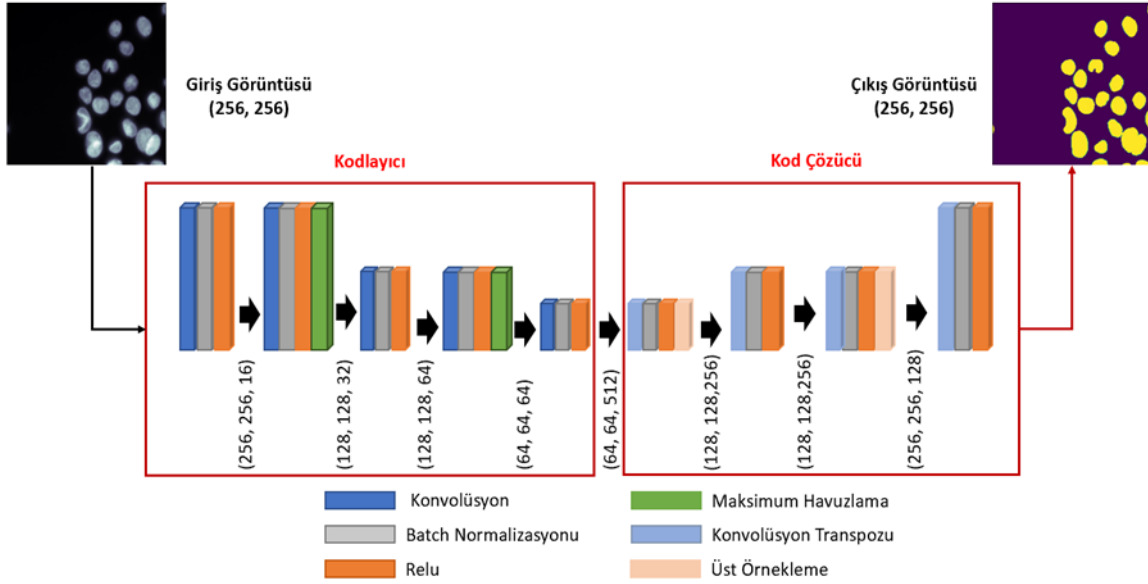
Floresan mikroskop sistemlerinde nükleer segmentasyonu için çalışmada geliştirilen ilk otomatik kodlayıcı modeli Tam Konvolüsyonel Ağ yapısıdır. Çalışmada geliştirilen Tam Konvolüsyonel Ağ modelinin şematik temsili Şekil 1'de verilmektedir. Geliştirilen Tam Konvolüsyonel Ağ modeli giriş olarak nükleer yapılar içeren floresan mikroskop görüntüsünün ham halini almakta ve çıkış olarak giriş ile aynı boyutta nükleer segmentasyonu elde edilmiş görüntüyü vermektedir. Önerilen Tam Konvolüsyonel Ağ modeli kodlayıcı ve kod çözücü olmak üzere iki ana aşamadan oluşmaktadır. Kodlayıcı aşaması giriş olarak floresan mikroskop görüntüsünün ham halini almakta ve çıkış olarak giriş verisini temsil eden özellik haritaları üretmektedir. Kodlayıcı aşaması art arda sıralanmış 5 bloktan oluşmaktadır. 1, 3 ve 5. blok konvolüsyon, batch normalizasyonu ve Relu katmanlarını içerirken, diğer katmanlar ek olarak maksimum havuzlama katmanını kapsamaktadır. Kod çözücü aşaması ise giriş olarak kodlayıcı aşamasında üretilen özellik haritalarını almakta ve çıkış olarak giriş sinyali ile aynı boyutta nükleer segmentasyonu elde edilmiş görüntüyü üretmektedir. Kod çözücü aşaması art arda sıralanmış 4 bloktan oluşmaktadır. 2 ve 4. blok konvolüsyon traspozu, batch normalizasyon ve Relu katmanlarını içermektedir. Diğer katmanlar ise bu üç katmana ek olarak üst örnekleme katmanını kapsamaktadır.



Şekil 1. Çalışmada geliştirilen Tam Konvolüsyonel Ağ modelinin şematik temsili.

2.2.2. U-Net

Floresan mikroskop sistemlerinde nükleer segmentasyonu için çalışmada geliştirilen ikinci otomatik kodlayıcı modeli U-Net yapısıdır. Çalışmada geliştirilen U-Net modelinin şematik temsili Şekil 2’de verilmektedir. Geliştirilen U-Net modeli giriş olarak nükleer yapılar içeren floresan mikroskop görüntüsünün ham halini almakta ve çıkış olarak giriş sinyali ile aynı boyutta nükleer segmentasyonu elde edilmiş görüntüyü vermektedir. Şekil 2’de görüldüğü gibi çalışmada nükleer segmentasyon için U-Net modeli giriş katmanından aldıkları değerleri çıkış katmanına ileten bir yapıya sahiptir. Bu yaklaşım modelinde giriş olarak verilen floresan görüntülerin en iyi özelliklerinin öğrenilmesi amaçlanmaktadır. Önerilen U-Net modeli kodlayıcı ve kod çözücü olmak üzere iki ana aşamadan oluşmaktadır. Kodlayıcı aşaması giriş olarak floresan mikroskop görüntüsünün ham halini almakta ve çıkış olarak giriş verisini temsil eden özellik haritaları üretmektedir. Kodlayıcı aşaması art arda sıralanmış 6 bloktan oluşmaktadır. 1. blok sadece konvolüsyon ve batch normalizasyonu katmanlarını içermektedir. 1. bloktaki katmanlara ek olarak 6. blok Relu katmanını, 2, 3, 4 ve 5. bloklar ise Relu ve maksimum havuzlama katmanlarını içermektedirler. Kod çözücü aşaması ise giriş olarak kodlayıcı aşamasında üretilen özellik haritalarını almakta ve çıkış olarak giriş görüntüsü ile aynı boyutta nükleer segmentasyonu elde edilmiş görüntüyü üretmektedir. Kod çözücü aşaması art arda sıralanmış 5 bloktan oluşmaktadır. İlk 4 blok konvolüsyon traspozu ve conceratenate katmanlarını içermektedir. Son katman ise konvolüsyon ve zero padding katmanlarını kapsamaktadır.



Şekil 2. Çalışmada geliştirilen U-Net modelinin şematik temsili.

2.2.3. Transfer Öğrenmeli U-Net

Tam Konvolüsyonel Ağ ve U-Net gibi klasik otomatik kodlayıcı modelleri yeterli performans sağlayabilmeleri için kapsamlı hesaplama ve zaman kaynakları gerektirmektedirler. Transfer öğrenme önceden eğitilmiş bu modellerin başlangıç noktası olarak kullanıldığı bir yaklaşımdır. Transfer öğrenmenin amacı eğitimi yapıldığı kaynaktaki bilgiyi kullanarak hedef kaynaktaki öğrenmeyi geliştirmek ve eğitim süresini azaltmaktır.

Floresan mikroskop sistemlerinin nükleer segmentasyonu sürecinde daha az bellek kullanımı ve daha kısa eğitim süresi sağlayarak klasik U-Net modelinin başarısını daha da artırmak için bu çalışmada Transfer Öğrenmeli U-Net modelleri geliştirilmektedir. Geliştirilen transfer öğrenmeli modellerde U-Net yapısının kodlayıcı kısmı değiştirilmektedir. Çalışmada önerilen Transfer Öğrenmeli U-Net modellerinin kodlayıcı kısımları MobileNet (Howard ve ark., 2017), VGG (Wang ve ark., 2015), DenseNet (Huang ve ark., 2017) ve ResNet (He ve ark., 2016) ile değiştirilmiştir. Tüm bu modeller, 1000 sınıfa sahip yüzbinlerce görüntü içeren ImageNet'in (Deng ve ark., 2009) bir alt kümesinde eğitilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Cihaz Konfigürasyonu

Çalışmada önerilen otomatik kodlayıcı modellerinin gerçekleştirilmesi için, Intel Core i7-9750 ve 2.60 GHz işlemci, 16 GB RAM ve NVIDIA GeForce RTX 3060 GPU'ya sahip bir PC üzerinde

çalışan Python 3.6 yazılımını Keras arka uç Tensorflow'dan oluşan bir cihaz konfigürasyonu oluşturulmuştur.

3.2. Performans Değerlendirme Prosedürleri

Bu çalışmada hangi nükleer segmentasyon yaklaşımının daha iyi sonuçlar ürettiğini göstermek için Doğruluk, Hassasiyet, Özgüllük ve Jaccard olmak üzere dört farklı performans değerlendirme prosedürü kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan performans değerlendirme prosedürleri şu şekilde hesaplanmaktadır:

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

$$\text{hassasiyet} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

$$\text{ozgulluk} = \frac{TN}{TN+FP} \quad (3)$$

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

Denklem (1) – (4)'te Doğru Pozitif (True Positive - TP) doğru tahmin edilmiş sınıf sayısını, Doğru Negatif (True Negative - TN) doğru tahmin edilmemiş sınıf sayısını, Yanlış Pozitif (False Positive - FP) hatalı tahmin edilmiş sınıf sayısını ve Yanlış Negatif (False Negative - FN) tahmin edilmemiş sınıf sayısını göstermektedir. İdeal nükleer segmentasyon yaklaşımı ile elde edilen Doğruluk, Hassasiyet, Özgüllük ve Jaccard değerlerinin diğer yaklaşımlardan daha yüksek olması beklenmektedir.

3.3. Önerilen Ağ Yapısı Konfigürasyonu

Bu çalışmada floresan mikroskop sistemlerinde nükleer segmentasyonu için Bölüm 2'de ayrıntıları verilen otomatik kodlayıcı modelleri kurulmaktadır. Çalışmada kurulan otomatik kodlayıcı modelleri 60 görüntü kullanılarak eğitilmekte ve 19 görüntü kullanılarak test edilmektedir. Önerilen modellerin eğitim ve test işlemleri beş kat çapraz doğrulama ile gerçekleştirilmektedir. Batch size ve epoch sayıları sırasıyla 10 ve 70 olarak atanmaktadır. Her giriş görüntüsünün boyutu 256 x 256 piksele ölçeklenmekte ve gri seviyeye dönüştürülmektedir.

3.4. Nicel Performans Analizi

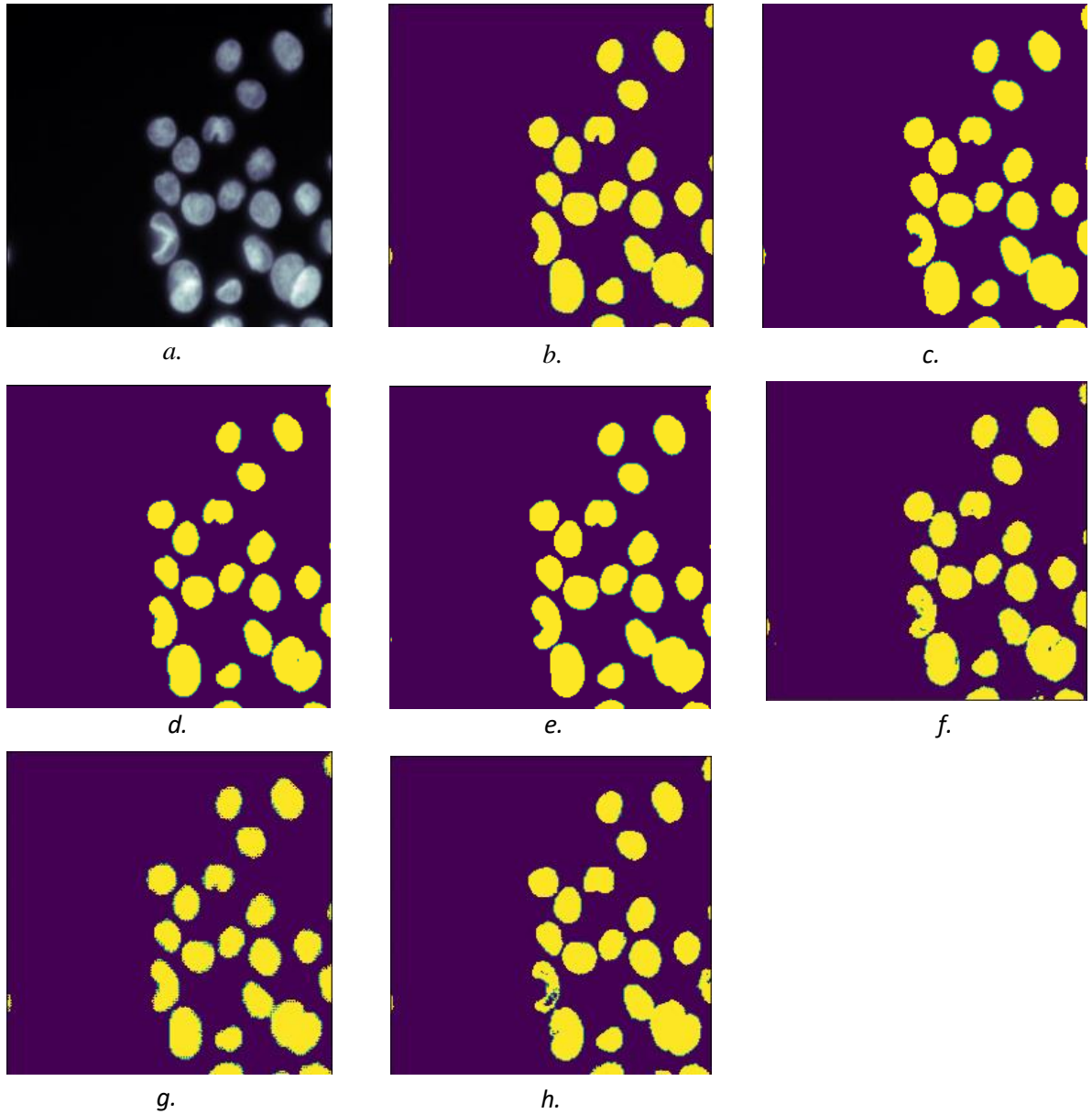
Floresan mikroskop sistemlerinde nükleer segmentasyonu için nicel performans analizi çalışmada geliştirilen otomatik kodlayıcı modelleri ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada floresan mikroskop sistemlerinde nükleer segmentasyonu için kullanılan veri seti ile literatürde çalışma gerçekleştirilmediğinden önerilen otomatik kodlayıcı modelleri literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılamamıştır. Çalışmada gerçekleştirilen tüm otomatik kodlayıcı modelleri (FCN, U-Net, MobileNet + U-Net, VGG + U-Net, DenseNet + U-Net ve ResNet + U-Net) için performans değerlendirme prosedürlerinden elde edilen nicel sonuçlar Tablo 1'de sunulmaktadır. Optimum otomatik kodlayıcı modeli ile segmente edilmiş görüntülerin daha yüksek Doğruluk, Hassasiyet, Özgüllük ve Jaccard değerlerini vermesi beklenmektedir. Tablo 1'de görüldüğü gibi performans değerlendirme prosedürleri açısından MobileNet + UNet modeli etkinliğinin nükleer segmentasyonu için diğer otomatik kodlayıcı modellerinden daha üstün olduğu açıkça görülmektedir. Geliştirilen MobileNet + U-Net modeli Doğruluk, Hassasiyet, Özgüllük ve Jaccard ortalama değerlerini 0.9766, 0.9538, 0.9833 ve 0.8832 olarak üretmektedir. Bu değerler diğer otomatik kodlayıcı modellerinden daha yüksek sonuçlar üretmektedir.

Tablo 1. Nükleer segmentasyon için önerilen otomatik kodlayıcı modellerinin performans değerlendirme prosedürlerinden elde edilen nicel sonuçlar.

Model	Doğruluk	Hassasiyet	Özgüllük	Jaccard
FCN	0.9205	0.9263	0.9348	0.8187
U-Net	0.9750	0.9522	0.9816	0.8045
MobileNet + U-Net	0.9766	0.9538	0.9833	0.8832
VGG + U-Net	0.9672	0.9504	0.9778	0.8820
DenseNet + U-Net	0.9723	0.9400	0.9820	0.8811
ResNet + U-Net	0.9389	0.9101	0.9471	0.8354

3.5. Nitel Performans Analizi

Floresan mikroskop sistemlerinde nükleer segmentasyonu için çalışmanın nitel performans analizi Şekil 3'te verilmektedir. Şekil 3'te sırasıyla otomatik kodlayıcı modellerine verilen giriş görüntüsü, biyologlar tarafından işaretlenmiş referans görüntü, FCN, U-Net, MobileNet + U-Net, VGG + U-Net, DenseNet + U-Net ve ResNet + U-Net modelleri ile elde edilmiş çıkış görüntüleri gösterilmektedir. Çalışmada elde edilen nicel sonuçlarda performans değerlendirme prosedürleri açısından MobileNet + U-Net etkinliğinin nükleer segmentasyonu için diğer otomatik kodlayıcı modellerinden daha üstün olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 3'te elde edilen nitel sonuçlarda ise MobileNet + U-Net modelinin bu üstünlüğü görsel olarak ispatlanmaktadır.



Şekil 3. Nükleer segmentasyon için önerilen otomatik kodlayıcı modelleri kullanılarak elde edilen nitel sonuçlar. a. Giriş görüntüsü b. Biyologlar tarafından işaretlenmiş referans görüntü c. FCN modeli elde edilmiş çıkış görüntüsü d. U-Net modeli elde edilmiş çıkış görüntüsü e. MobileNet + U-Net modeli elde edilmiş çıkış görüntüsü f. VGG + U-Net modeli elde edilmiş çıkış görüntüsü g. DenseNet + U-Net modeli elde edilmiş çıkış görüntüsü h. ResNet + U-Net FCN modeli elde edilmiş çıkış görüntüsü.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada floresan mikroskop sistemlerinde nükleer segmentasyonu için yüksek doğruluklu otomatik kodlayıcı modelleri geliştirilmektedir. Çalışmada geliştirilen otomatik kodlayıcı modelleri Tam Konvolüsyonel Ağ, U-Net ve Transfer Öğrenmeli U-Net'tir. Çalışmada Transfer Öğrenmeli U-Net modellerinin kodlayıcı kısımları MobileNet, VGG, DenseNet ve ResNet ile değiştirilmektedir.

Çalışmanın önceki kısımlarından da değinildiği gibi, literatürde diğer mikroskop sistemlerinden elde edilmiş görüntülerde hücre ve doku segmentasyonu gerçekleştiren birçok çalışma

bulunmaktadır. Bu çalışmalar oldukça yüksek doğruluklu sonuçlar elde etmektedir. Fakat diğer mikroskop sistemlerinde gerçekleştirilen bu performans floresan mikroskop sistemlerinde elde edilememiştir. Floresan mikroskop sistemleri için nükleer segmentasyonu çalışmalarında, kullanıma açık nükleer görüntülerden oluşan veri setinin çok bulunmaması, bu alanda gerçekleştirilen çalışma sayısının az olması gibi kısıtlamalar mevcuttur. Bu kısıtlamalardan dolayı floresan mikroskopik sistemlerde otomatik nükleer segmentasyon başarıları da tatmin edici seviyede değildir. Gerçekleştirilen çalışmada ise literatürdeki derin öğrenme modellerinden esinlenilerek floresan mikroskop sistemlerinde nükleer segmentasyonu için otomatik kodlayıcı modelleri geliştirilmiş ve bu alandaki kısıtlamalar minimize edilmiştir.

Çalışmada gerçekleştirilen otomatik kodlayıcı modellerinin performans analizi için, Doğruluk, Hassasiyet, Özgüllük ve Jacard olmak üzere 4 farklı performans değerlendirme prosedürü kullanılmıştır. Nükleer segmentasyon analizi için çalışmada FCN, U-Net, MobileNet + U-Net, VGG + U-Net, DenseNet + U-Net ve ResNet + U-Net modelleri geliştirilmiştir. Performans değerlendirme prosedürleri ile elde edilen sonuçlardan MobileNet + UNet modeli etkinliğinin nükleer segmentasyonu için diğer otomatik kodlayıcı modellerinden daha üstün olduğu açıkça görülmüştür. Geliştirilen MobileNet + U-Net modeli Doğruluk, Hassasiyet, Özgüllük ve Jaccard ortalama değerlerini 0.9766, 0.9538, 0.9833 ve 0.8832 olarak üretmiştir. Çalışmada elde edilen bu sayısal sonuçlar görsel sonuçlar ile de desteklenmiştir.

Bu çalışmada önceden değinildiği gibi nükleer segmentasyonu için FCN, U-Net, MobileNet + U-Net, VGG + U-Net, DenseNet + U-Net ve ResNet + U-Net modelleri geliştirilmiştir. Gelecek çalışmalarda görüntü dönüştürücü (image transformer) gibi daha performanslı otomatik kodlayıcı modelleri kullanılarak başarının artırılması planlanmaktadır.

Bu çalışmada geliştirilen otomatik kodlayıcı modellerinin analizi, makine öğrenmesi tabanlı nükleer segmentasyon yaklaşımlarının eğitilmesi amacıyla Kromp ve ark. (2020) tarafından hazırlanmış veri seti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu veri seti patolojik kökenli farklı biyolojik doku ve hücrelerden oluşmaktadır. Veri setinde 79 adet uzman kişi tarafından işaretlenmiş görüntü bulunmaktadır. Veri setindeki görüntü sayısının oldukça kısıtlı olduğu görülmektedir. Gelecek çalışmalarda floresan mikroskop görüntüleri içeren yeni veri seti oluşturularak daha objektif değerlendirmenin gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

Yazarların Katkısı

Sümeyye Nur Emir çalışmanın veri toplama, veri analizi ve yorumlama, fikirsel içeriğin eleştirisel incelenmesi, son onay ve tam sorumluluk kısımlarına, Sibel Danışmaz veri toplama, veri analizi ve yorumlama, fikirsel içeriğin eleştirisel incelenmesi, son onay ve tam sorumluluk

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

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Amiri, M., Brooks, R., and Rivaz, H., (2020). Fine-tuning U-Net for ultrasound image segmentation: different layers, different outcomes. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 67(12), 2510-2518.
- Araújo, F. H., Silva, R. R., Ushizima, D. M., Rezende, M. T., Carneiro, C. M., Bianchi, A. G. C., and Medeiros, F. N., (2019). Deep learning for cell image segmentation and ranking. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 72, 13-21.
- Caicedo, J. C., Roth, J., Goodman, A., Becker, T., Karhohs, K. W., Broisin, M., ... and Carpenter, A. E., (2019). Evaluation of deep learning strategies for nucleus segmentation in fluorescence images. *Cytometry Part A*, 95(9), 952-965.
- Cheng, D., and Lam, E. Y., (2021). Transfer learning U-Net deep learning for lung ultrasound segmentation. *arXiv preprint arXiv:2110.02196*.
- Daniel, J., Rose, J. T., Vinnarasi, F., and Rajinikanth, V., (2022). VGG-UNet/VGG-SegNet Supported Automatic Segmentation of Endoplasmic Reticulum Network in Fluorescence Microscopy Images. *Scanning*, 2022.
- Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L. J., Li, K., and Fei-Fei, L., (2009). Imagenet: A large-scale hierarchical image database. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 248-255.
- Du, X., and Dua, S., (2010). Segmentation of fluorescence microscopy cell images using unsupervised mining. *The open medical informatics journal*, 4, 41.
- Durkee, M. S., Abraham, R., Clark, M. R., and Giger, M. L., (2021). Artificial intelligence and cellular segmentation in tissue microscopy images. *The American Journal of Pathology*, 191(10), 1693-1701.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., and Sun, J., (2016). Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 770-778.
- Howard, A. G., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., ... and Adam, H., (2017). Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. *arXiv preprint arXiv:1704.04861*.
- Huang, G., Liu, Z., Van Der Maaten, L., and Weinberger, K. Q., (2017). Densely connected convolutional networks. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 4700-4708.
- Ikeda, J., Ohe, C., Yoshida, T., Kuroda, N., Saito, R., Kinoshita, H., ... and Matsuda, T., (2021). Comprehensive pathological assessment of histological subtypes, molecular subtypes based on immunohistochemistry, and tumor-associated immune cell status in muscle-invasive bladder cancer. *Pathology International*, 71(3), 173-182.

- Jeevitha, K., Iyswariya, A., RamKumar, V., Basha, S. M., and Kumar, V. P., (2020). A review on various segmentation techniques in image processing. *European Journal of Molecular & Clinical Medicine*, 7(4), 1342-1348.
- Jose, L., Liu, S., Russo, C., Nadort, A., and Di Ieva, A., (2021). Generative adversarial networks in digital pathology and histopathological image processing: A review. *Journal of Pathology Informatics*, 12(1), 43.
- Kromp, F., Bozsaky, E., Rifatbegovic, F., Fischer, L., Ambros, M., Berneder, M., ... and Taschner-Mandl, S., (2020). An annotated fluorescence image dataset for training nuclear segmentation methods. *Scientific Data*, 7(1), 1-8.
- Kromp, F., Fischer, L., Bozsaky, E., Ambros, I., Doerr, W., Taschner-Mandl, S., ... and Hanbury, A., (2019). Deep Learning architectures for generalized immunofluorescence based nuclear image segmentation. *arXiv preprint arXiv:1907.12975*.
- Liu, Z., Jin, L., Chen, J., Fang, Q., Ablameyko, S., Yin, Z., and Xu, Y., (2021). A survey on applications of deep learning in microscopy image analysis. *Computers in Biology and Medicine*, 134, 104523.
- Masubuchi, S., Watanabe, E., Seo, Y., Okazaki, S., Sasagawa, T., Watanabe, K., ... and Machida, T., (2020). Deep-learning-based image segmentation integrated with optical microscopy for automatically searching for two-dimensional materials. *NPJ 2D Materials and Applications*, 4(1), 1-9.
- Niazi, M. K. K., Parwani, A. V., and Gurcan, M. N., (2019). Digital pathology and artificial intelligence. *The lancet oncology*, 20(5), e253-e261.
- Pan, W., Liu, Z., Song, W., Zhen, X., Yuan, K., Xu, F., and Lin, G. N., (2022). An Integrative Segmentation Framework for Cell Nucleus of Fluorescence Microscopy. *Genes*, 13(3), 431.
- Pare, S., Kumar, A., Singh, G. K., and Bajaj, V., (2020). Image segmentation using multilevel thresholding: a research review. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, 44(1), 1-29.
- Raj, R., Londhe, N. D., and Sonawane, R., (2021). Automated psoriasis lesion segmentation from unconstrained environment using residual U-Net with transfer learning. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 206, 106123.
- Ramesh, K. K. D., Kumar, G. K., Swapna, K., Datta, D., and Rajest, S. S., (2021). A review of medical image segmentation algorithms. *EAI Endorsed Transactions on Pervasive Health and Technology*, 7(27), e6-e6.
- Rizk, A., Paul, G., Incardona, P., Bugarski, M., Mansouri, M., Niemann, A., ... and Sbalzarini, I. F., (2014). Segmentation and quantification of subcellular structures in fluorescence microscopy images using Squash. *Nature protocols*, 9(3), 586-596.
- Schubert, W., Bonnekoh, B., Pommer, A. J., Philipsen, L., Böckelmann, R., Malykh, Y., ... and Dress, A. W., (2006). Analyzing proteome topology and function by automated multidimensional fluorescence microscopy. *Nature biotechnology*, 24(10), 1270-1278.
- Wang, L., Guo, S., Huang, W., and Qiao, Y., (2015). Places205-vggnet models for scene recognition. *arXiv preprint arXiv:1508.01667*.
- Wang, Q., Niemi, J., Tan, C. M., You, L., and West, M., (2010). Image segmentation and dynamic lineage analysis in single-cell fluorescence microscopy. *Cytometry Part A: The Journal of the International Society for Advancement of Cytometry*, 77(1), 101-110.
- Zhang, Y., Jiang, H., Ye, T., and Juhas, M., (2021). Deep learning for imaging and detection of microorganisms. *Trends in Microbiology*, 29(7), 569-572.

Namlu Malzemesi Seçiminde Sezgisel Bulanık Karar Verme Metodolojisi

Yaşam KANDEMİR^{1,2} , Temel VAROL^{2*} , Uğur Temel YILDIZ^{2,3} 

Öz

Günümüzde silah kullanımı bireysel veya kitlesel olarak artış göstermektedir. Bu artışa paralel olarak silah endüstrisinde namlu üretim aşamasında önemli gelişmeler yaşanmaktadır. Yaşanan gelişmelerin sonucunda namlu üretiminde kullanılan malzemeler ön plana çıkmaktadır. Namlu üretiminde gerek fiziksel ve mekanik özellikleri gerekse de ulaşılabilirlikleri sebebiyle çelik malzemeler tercih edilmektedir. Bununla birlikte namlu malzemesi seçiminde karar verme süreci ortaya çıkmaktadır. Karar verme sürecinin yürütülmesinde çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada namlu malzemesi seçiminde Sezgisel bulanık Topsis yöntemi kullanılmıştır. Alternatif malzemeler X40CrMoV5-1, X12CrS13, 42CrMo4 ve 32CrMoV12-10 ve C45 olarak belirlenmiştir. Kriterler ise akma dayanımı, sertlik, darbe dayanımı ve maliyettir. Alternatifler ve kriterlerin değerlendirilmesinde uzman fikirlerine başvurulmuştur. Uzmanların değerlendirme sonuçları IFWA operatörü ile bütünleşik hale getirilmiştir. Uygulanan sezgisel bulanık TOPSIS yöntemi sonucunda en iyi kriter darbe dayanımı, en uygun namlu malzemelerinin 32CrMoV12-10 ve 42CrMo4 çelikleri olduğu hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Namlu malzemesi, Sezgisel bulanık topsis, Silah sistemi.

Intuitionistic Fuzzy Decision-Making Methodology for Barrel Material Selection

Abstract

Today, both individual and societal gun use is rising. Significant changes are occurring in the barrel production phase of the armaments industry concurrently with this increase. The materials employed to make the barrel come into focus as a result of the developments that were encountered. Due to its favorable mechanical and physical characteristics as well as their accessibility, steel materials are preferred in the manufacturing of barrels. In addition to this circumstance, choosing the material for the barrels also requires decision-making. The decision-making process is carried out using multi-criteria decision-making techniques. The heuristic fuzzy TOPSIS method was applied in this work to choose the barrel material. As alternatives, X40CrMoV5-1, X12CrS13, 42CrMo4, 32CrMoV12-10, and C45 were chosen. Yield strength, hardness, impact resistance, and cost were chosen as the criterion. In order to evaluate the alternatives and criteria, professional judgment was sought. The IFWA operator is integrated with the expert evaluation results. The intuitive fuzzy TOPSIS approach was used to calculate the results, and it was determined that the best criterion is impact resistance, and the best barrel material is 32CrMoV12-10 steel.

Keywords: Barrel material, Intuitionistic fuzzy topsis, Gun system.

¹Tübitak 2244 Sanayi Doktora Programı Bursiyeri, YÖK 100/2000 Doktora Bursiyeri, Trabzon Silah Sanayi A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Trabzon, Türkiye, ykandemir41@gmail.com

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Trabzon, Türkiye, tvarol@ktu.edu.tr

³Tübitak 2244 Sanayi Doktora Programı Bursiyeri, Trabzon Silah Sanayi A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Trabzon, Türkiye, ugurtemelyildiz@trabzonsilah.com

¹<https://orcid.org/0000-0002-5718-6972>

²<https://orcid.org/0000-0002-1159-5383>

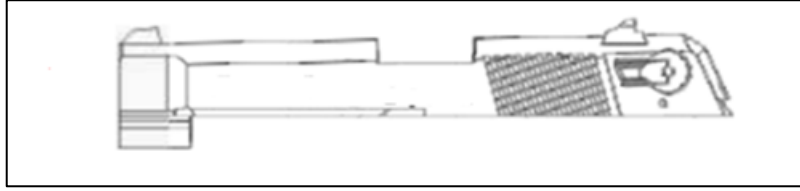
³<https://orcid.org/0000-0002-2172-1873>

1. Giriş

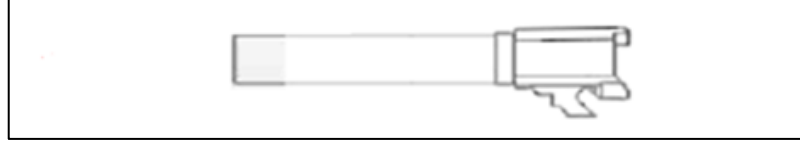
Tek elle kavranabilen ve çalıştırılabilen kısa namlulu silahlara tabanca denir. Günümüzde en sık kullanılan iki tabanca alt tipi revolverler ve yarı otomatik tabancalardır. Tabancalar, ulusal ve bireysel güvenlikte öneme sahip oldukları gibi ticari olarak da yüksek öneme sahip ürünlerdir. 2020 yılında küresel tabanca ticareti hacmi 1,2 milyar ABD dolarını aşarak küresel ticaretin %0.0076'sını oluşturmuştur. En büyük ihracatçının 345 milyon ABD doları değerinde ürün ihraç ederek toplam ihracatın %27,8'ini gerçekleştiren Avusturya'nın olduğu tabanca endüstrisinde, 883 milyon dolar ithalat ile toplam ithalatın %69,4'ünü gerçekleştiren Amerika Birleşik Devletleri en büyük ithalatçı konumundadır. Türkiye 2020 yılında 85 milyon ABD doları değerinde tabanca ihraç ederek toplam küresel tabanca ihracatının %6,73'sini gerçekleştirmiş ve küresel çapta en büyük yedinci ihracatçı ülke olmuştur (URL-1). Endüstriyel rekabetin üst seviye olduğu tabanca sektöründe fiyat ve performans bakımından uygun malzemelerin kullanımı kritik öneme sahiptir. Sektörde rekabet halinde bulunan firmalar bu alanda araştırma ve geliştirme çalışmalarına önemli kaynaklar ayırmaktadırlar.

Tabancalar yaklaşık olarak 50 parçadan oluşan mühendislik ürünleridir (URL-2). Namlu Şekil 1'de gösterildiği üzere, kapak ve gövde ile tabancaların ana bileşenlerinden birisidir. Hazne, boru ve ağız kısmından oluşan namlu, Şekil 2'de ifade edildiği gibi boru kısmında içerdiği yiv ve setlerle merminin isabetli bir şekilde hedefe ulaşmasını sağlamaktadır. Namlular, kullanım esnasında tekrarlı olarak ısı, kimyasal ve mekanik etkilere maruz kalarak hasara uğrarlar. Namluların progresif olarak hasara uğraması atış menzili, atış dağılımı gibi özellikleri olumsuz etkilemekte ve namlu ömrünü azaltmaktadır (Lawton, 2001). Namluların ömrünün uzatılması, atış menzili ve atış dağılımı gibi özelliklerinin korunması, uygun kaplamalar, termokimyasal ve ısı işlemler ile gerçekleştirilebileceği gibi; uygun malzeme seçimi ile de sağlanabilmektedir (Mao ve ark., 2022).

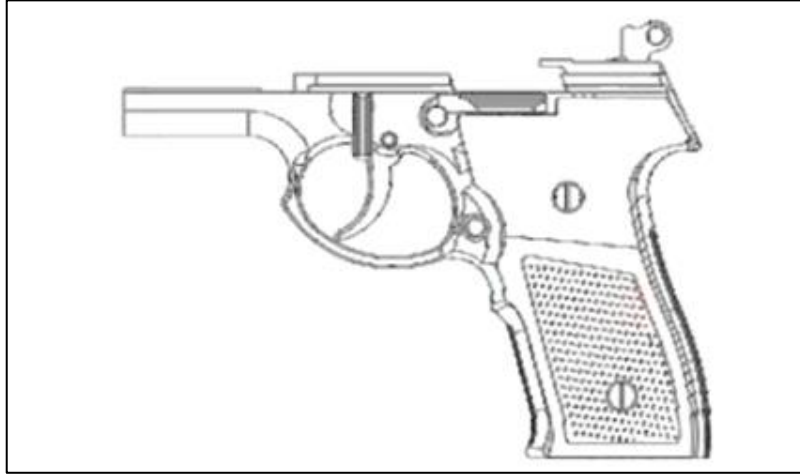
Namlular tabanca sistemlerinde birtakım fonksiyonları yerine getirmek amacıyla tasarlanmaktadır. Namlu tasarımında merminin ağızdan çıkış hızı, minimum geri tepme, ateşleme sonrası namlunun efektif bir şekilde soğuması gibi amaçlar bulunmaktadır (Das ve ark., 2021). Aynı zamanda namluların arzu edilen şekilde görevlerini icra edebilmeleri için kimyasal dirence sahip, yüksek sıcaklıklarda sertliğini koruyabilen, kullanımda meydana gelen ısı ve mekanik şok yüklere dayanacak biçimde tok veya sünek, yüksek hızda hareket eden mermilere karşı yüksek aşınma dayanımına sahip olmalıdır. Üretildikleri malzemelerin birtakım özelliklere sahip olması gerekmektedir (Marshall ve Wagner, 1968).



Şekil 1.a. Kapak



Şekil 1.b. Namlu



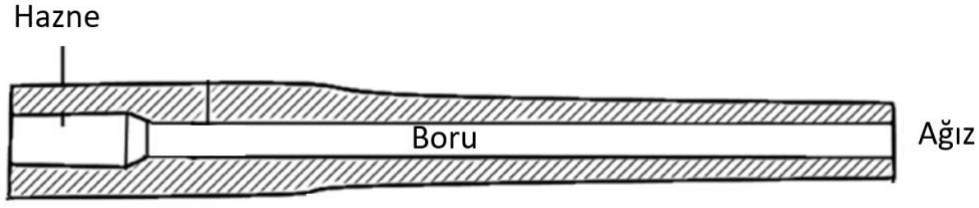
Şekil 1.c. Gövde

Şekil 1. Tabancaların ana bileşenleri; (a) kapak, (b) namlu, (c) gövde (URL-2).

Tabanca namluları genellikle %1.5-3 civarında Cr, Ni, Mo ve V içeren düşük alaşımlı çeliklerden üretilir. Bu malzemeler uygun su verme ve meneviş işlemleri ile temperlenmiş martenzit mikroyapısında kullanılırlar. Bu sayede 1000 MPa seviyesinde akma dayanımı ve -40° C'de 50 Joule'e varan darbe dayanımına sahip olurlar. Namlu malzemesinde Ni içeriği martenzit oluşumunu kolaylaştırırken Cr, Mo ve V karbür yapıcı rolünü üstlenir (Doig, 1998). 1.7225 ve 1.7765 çelikleri namluların üretiminde yaygın olarak kullanılan düşük alaşımlı çeliklerdir. 1.4005 uygun ısıl işlem reçetesi ile martenzitik mikroyapıya sahip olabildiğinden paslanmaz çelik grubunda tercih edilen namlu malzemesidir (Kolbe, 2010). 1.2344 sıcak iş takım çeliği de namlu malzemesi olarak kullanılmış ve beklentileri karşılamıştır (Ablay Rutci, 2019).

Namluların üretiminde demir dışı alaşımlar, seramik malzemeler ve kompozit malzemeler de önerilmiştir (Swab ve ark., 2005; de Rosset ve Montgomery, 2014; Pyka ve ark., 2019). Ancak bahsi geçen malzemeler istenilen özelliklere sahip olsa dahi malzemeye erişim ve maliyet gibi kriterler dolayısıyla endüstriyel anlamda yaygın olarak kullanıma ulaşamamışlardır. Çelik malzemeler üstün mekanik özellikleri, ulaşılabilirlikleri, üretilebilirlikleri ve düşük maliyetleri sebebiyle namlu

üretiminde en çok kullanılan malzemelerdir. Dolayısıyla çalışmada namlu üretimi için en uygun çeliğin belirlenmesi amaçlanmıştır.



Şekil 2. Namlu ve bölgeleri (Das ve ark., 2021).

Bu noktada bir karar verme mekanizması oluşturulması gerekmektedir. Çünkü karar verilecek olan malzeme veya parça, üretime esas teşkil eden malzeme grubu için önemli bir aşama içermektedir. Bunlarla birlikte bu karar sürecini oluşturan çok kriterli kararlarını yöntemleri kullanıcılara ve üreticilere karar noktasında önemli katkılar sağlamaktadır. Bu sebeple savunma sanayi alanında kullanılan malzemeler ile çok kriterli karar verme yöntemlerini birleştiren çalışmalar literatürde yer almaktadır. Savaş gemisi tasarımında kriterlerin ağırlıklarını belirlemek için çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP yönteminin kullanıldığı bu çalışmada LCS sınıfı savaş gemisi tipi seçilmiştir. Çalışmada tasarım kriterlerinin tartışıldığı ve grup karar verme metodolojisi kullanılarak kriter ağırlıklarını hesaplamada 3 ayrı ortalama yöntemi kullanılarak kriter önem derecelerinin belirlenmesine yönelmiştir (Ata ve Sennaroğlu, 2008).

Bulanık çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanıldığı bu çalışmada bulanık değerlendirmeler ile karakterize edilen silah sistemlerini sıralama ve değerlendirme amaçlanmıştır. Yamuk bulanık AHP ile bulanık integral yöntemlerinin kullanıldığı bu araştırma çalışmasında yamuk bulanık sayılar ile kriter performansları sıralanmıştır. Bununla birlikte en iyi savaş tankını değerlendiren bir örnek çalışma eklenmiştir. Çalışma sonuçlarının bu metodun etkinliğini ve mühendislik uygulamalarında kullanılabilirliğini gösterdiği görülmektedir (Zhang ve ark., 2005). Üçgensel bulanık sayılar ile oluşturulan dilsel değerlerin belirsizliği kaldırdığı bulanık ortamda oluşturulan optimal silah seçimi için oluşturulan bu çalışmada AHP yöntemi ile silah seçim probleminin yapısı analiz edilerek kriter ağırlıkları belirlenmiştir. Bulanık TOPSIS metodu ile alternatiflerin son sıralaması oluşturularak bir yaklaşım elde edilmiştir. Gerçek bir hayat uygulamasının yürütüldüğü bu çalışmada uygulamanın, amaçlanan model kapsamında etkinliği ve fizibilitesi gösterilmiştir (Dağdeviren ve ark., 2009). VIKOR ve TOPSIS yöntemlerinin uygulandığı bu çalışmada en uygun silah sistemleri seçimi için karar verme süreci yürütülmüştür. Uzman fikirlerinden yararlanılan çalışmada tutarlılık analizleri ile çalışma pekiştirilmiş ve bir vaka çalışması ile amaçlanan yaklaşımın verimlilik ve kullanılabilirliği ispatlanmıştır (Zhang ve ark., 2016). Pisagor bulanık AHP ile bulanık VIKOR yöntemlerinin uygulandığı çalışmada AHP yöntemi ile risk

parametrelerinin ağırlıkları belirlenmiş, VIKOR metodu ile tehlikelerin önceliklendirilmesi sağlanmıştır. Silah ve tüfek namlusu dış yüzeyi oksidasyon ve renklendirme ünitesi örneği ile oluşan çalışmada amaçlanan yaklaşım ile geçerlilik ve uygulanabilirlik sağlanmıştır. Amaçlanan yaklaşım ve sezgisel bulanık setler yaklaşımları ile karşılaştırmalar yapılmıştır (Gül, 2020). Literatürde anlaşıldığı üzere çalışmamızın literatüre sahada önemli bir katkı sunduğu görülmektedir. Namlu malzeme seçimini esas alan bu çalışma, çok kriterli karar yöntemi olan Topsis yöntemini, sezgisel bulanık sayılar ile temellendirerek oluşan belirsizlik ortamında karar vericilere etkinlik kazandırması amaçlanmaktadır. Namlu malzemeleri günümüz şartlarında spesifik bir malzeme grubu olmakla birlikte savunma sanayinde önemli bir alan oluşturmaktadır. Bu amaçla namlu malzeme seçimini Sezgisel bulanık Topsis yöntemi ile ele alan bu araştırma makalesi alanında özgün ve yaygın bir etki oluşturması hedeflenmiştir.

Bu çalışmada ana tabanca parçalarından birisi olan namluların üretiminde kullanılacak en uygun çelik malzeme seçimi esas alınmıştır. Bu çalışmada kullanılmak üzere 5 çelik grubu ve 4 kriter seçilmiştir. Çeliklerin seçiminde tabanca üreticilerinin genel namlu üretiminde kullandığı malzemeler kullanılmıştır. Kriter seçiminde malzemelerin ayırt edici özelliklerinin kullanılması baz alınmıştır. Alternatif namlu malzemeleri olarak C45, X40CrMoV5-1, X12CrS13, 42CrMo4, 32CrMoV12-10 tercih edilmiştir. Kriterler ise, akma dayanımı, sertlik, darbe dayanımı ve maliyet seçilmiştir. 3 farklı uzman görüşü baz alınarak kriter ve alternatif değerlendirmeleri yapılmış ve çok kriterli karar verme yöntemlerinden olan Sezgisel Bulanık Topsis yöntemi uygulanarak alternatifler arasında sıralama oluşturulmuştur. Bu anlamda sektörde bulunan silah ve namlu üreticilerinin tercihlerinde kolaylık sağlaması ve efektif bir yol izlemeleri amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bu kısımda sezgisel bulanık küme hakkında açıklamalar yapıldıktan sonra karar verme metodolojisini grup halinde entegre etmeye imkân sağlayan Sezgisel Bulanık Topsis yöntemi hakkında açıklamalarda bulunulacaktır.

2.1. Sezgisel Bulanık Küme

Karar vericiler veya uzmanlar çok kriterli karar verme yöntemlerinde kriter ve alternatifleri değerlendirmek için nicel ve nitel yöntemler kullanmaktadırlar. Karar vericiler veya uzmanlar kendi profesyonel tecrübelerine dayanarak değerlendirmeleri yaparlar. Ancak karar problemlerinin karmaşıkları ve insan yargılarının belirsizliği sebebiyle bazen bilgileri değerlendirirken problemler ortaya çıkmaktadır. Sezgisel bulanık küme bu belirsizliği ve karmaşıklığı daha belirgin bir forma

dönüştürmek için kullanılan önemli bir araçtır. Mevcut problemleri değerlendirirken karar vericiler kararı proseslerinde sık sık belirsizliğe düşerler. Bu noktada geleneksel bulanık kümeler yetersiz kalmaktadır. Atanassov tarafından geliştirilen sezgisel bulanık set bu zorlukları aşmak için uygun bir yöntem adımlarını oluşturmaktadır (Atanassov, 1986). Sezgisel bulanık küme belirsizliklerle ilgili karar problemlerinin çoğunda uygulanmakta ve önemli nicel sonuçlar ortaya koymaktadır.

Zadeh tarafından ortaya atılan bulanık küme teorisine göre küme elemanları 0 ile 1 arasında değişen üyelik derecelerine göre değerlendirilir (Zadeh, 1965). Üye olmama derecesi ile üye olma derecesi toplamı 1'e eşittir. Ancak bazı uygulamalarda üye olma derecesi ile üye olmama derecesi toplamı birden az olabilir. Bu sebeple, Atanassov sezgisel bulanık küme teorisini geliştirmiştir. Sezgisel bulanık küme teorisinde üye derecesi, üye olmama derecesi ve belirsizlik derecesi bulunmaktadır ve bu üçünün toplamı 1'e eşittir.

Sonlu elemanlara sahip olan bir X kümesinde A sezgisel bulanık kümesi Eşitlik 1'de ifade edildiği gibidir.

$$A = \{x, \mu_A(x), \nu_A(x) \mid x \in X\} \quad (1)$$

$\mu_A(x)$, x elemanının A kümesine üye olma derecesini ifade ederken, $\nu_A(x)$, x elemanının A kümesine üye olmama derecesini ifade etmektedir. Bu tanımlamalara göre Eşitlik 2 ve Eşitlik 3'e bakıldığında üye olma ve üye olmama dereceleri toplamı 1'den az olmakta ve sezgisel setin imkân verdiği $\pi_A(x)$ ile gösterilen belirsizlik derecesi ile bu toplam 1'e eşitlenmektedir.

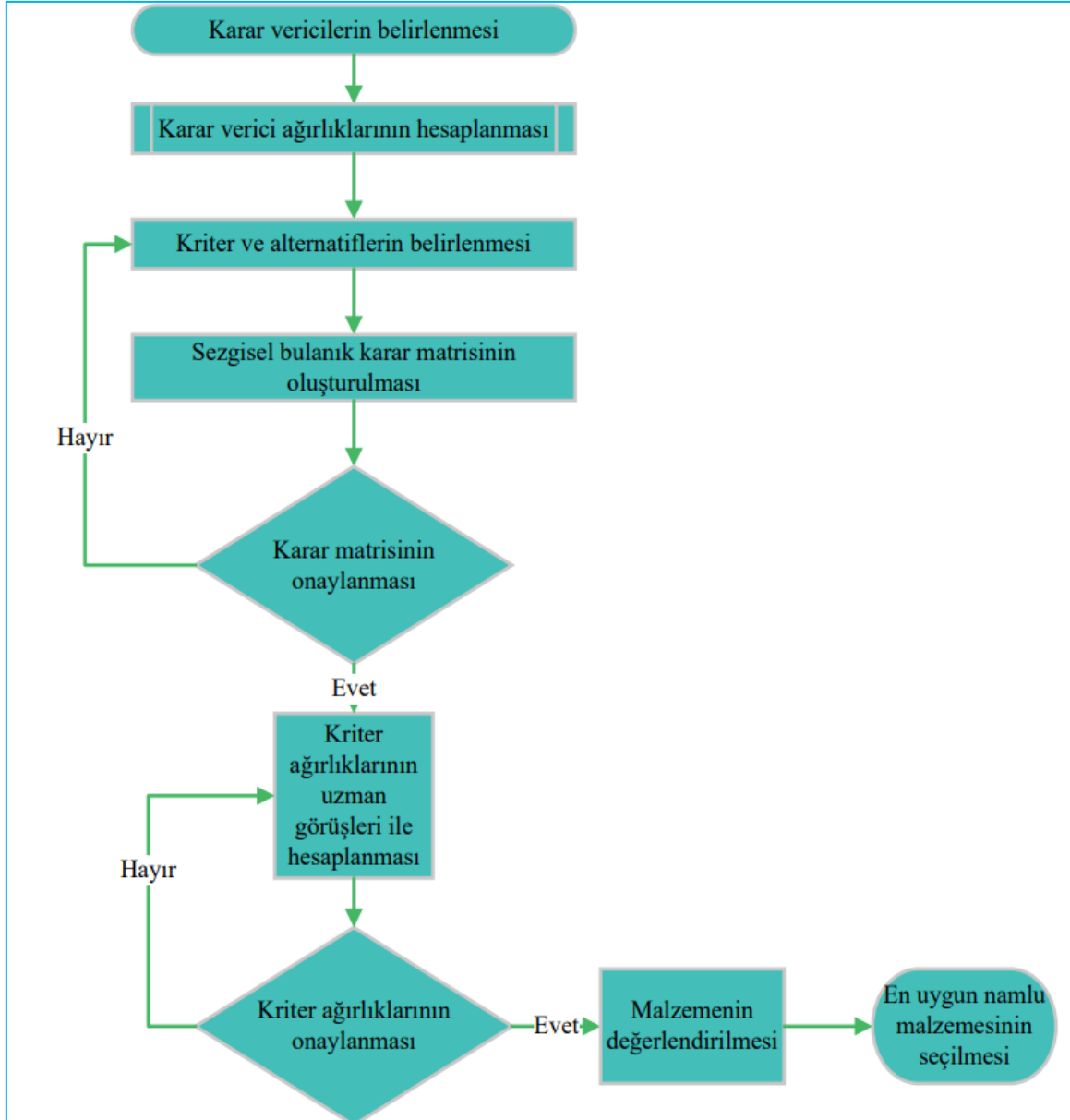
$$0 \leq \mu_A(x) + \nu_A(x) \leq 1 \quad (2)$$

$$\pi_A(x) + \mu_A(x) + \nu_A(x) = 1 \quad (3)$$

2.2. Sezgisel Bulanık Topsis

Sezgisel Bulanık Topsis yöntemi, uygulanan klasik Topsis metodundan farklı olarak sezgisel bulanık setlerin kullanılarak işlem adımlarına daha esnek ve hassas çözümler üreten bir sıralama tekniğidir. Sezgisel Bulanık Topsis yönteminde alternatif setleri $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ şeklinde ifade edilirken, kriter setleri $K = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$ ifade edilmektedir. Kriter ve alternatifler değerlendirmeye tabi tutulurken uzman görüşlerine başvurulmaktadır. Uzmanların her biri kendi tecrübe ve çalışma koşullarına göre farklı ağırlıklandırılırken, ayrı bir önem derecesine sahiptirler. Uzman ağırlıkları ise $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ formunda gösterilmekte olup $\lambda_k \geq 0$ şartını sağlayarak $\sum_{k=1}^n \lambda_k = 1$ olarak literatürde kullanılmaktadır.

$R^{(k)} = (r_{ij}^{(k)})_{m \times n}$ k. uzman için karar algoritmasını ifade ederken $r_{ij}^k = (\mu_{ij}^k, \nu_{ij}^k, \pi_{ij}^k)$, k. uzmanlardan elde edilen bilgiye göre i. alternatifin j. kriterden alınan sezgisel bulanık değeri şematize etmektedir. μ_{ij}^k k. uzman açısından i. alternatifin j. kriterine aidiyet derecesini, ν_{ij}^k k. uzmana göre i. alternatifin j. kriterine üye olmama derecesini, π_{ij}^k ise k. uzmana göre i. alternatifin j. kriterine ait belirsizlik derecesini ifade etmektedir. Bahsi geçen sezgisel bulanık setleri kategorize edildikten sonra Sezgisel Bulanık TOPSIS yaklaşımının temel adımları tanıtılarak Bulgular bölümüne geçilecektir.



Şekil 3. Karar diyagramı

2.2.1. Sezgisel Bulanık Topsis Adımları

Aşama 1

Karar verici ağırlıklarının belirlenmesi: Karar grubu belirli sayıda karar vericilerden oluşmaktadır. Karar vericilerin birbirleriyle olan ilişkisi sezgisel bulanık sayıları içeren linguistik değerlerle gösterilmektedir. Bu kısımda k. karar vericiyi oranlamak için $D_k = (\mu_k, \nu_k, \pi_k)$ sezgisel bulanık gösterimi kullanılmaktadır. Karar vericilerin ağırlıkları eşitlik 4 ile hesaplanmaktadır.

$$\lambda_k = \frac{\left(\mu_k + \pi_k \left(\frac{\mu_k}{\mu_k + \nu_k}\right)\right)}{\sum_{k=1}^l \mu_k + \pi_k \left(\frac{\mu_k}{\mu_k + \nu_k}\right)} \text{ ve } \sum_{k=1}^l \lambda_k \quad (4)$$

Aşama 2

Karar verici görüşlerine göre kümelenmiş sezgisel bulanık karar matrisi oluşturulması: Sezgisel bulanık karar matrisi oluşturmak için grup kararı süreci gerekmektedir. Bütün bu seçimler bir grup fikrini kombine etmelidir. Bu amaçla farklı karar vericilerin belirttikleri dilsel değişkenler Eşitlik 5'te tarif edilen IFWA (Intuitionistic fuzzy weighted average) operatörü ile tek tablosal bir hale dönüştürülür.

$$\begin{aligned} r_{ij} &= IFWA_{\lambda} = \left(r_{ij}^{(1)}, r_{ij}^{(2)}, \dots, r_{ij}^{(l)}\right) = r_{ij}^{(1)} \lambda_1 \oplus r_{ij}^{(2)} \lambda_2 \oplus \dots \oplus r_{ij}^{(l)} \lambda_l \\ &= \left[1 - \prod_{k=1}^l (1 - \mu_{ij}^{(k)})^{\lambda_k}, \prod_{k=1}^l (\nu_{ij}^{(k)})^{\lambda_k}, \prod_{k=1}^l (1 - \mu_{ij}^{(k)})^{\lambda_k} - \prod_{k=1}^l (\nu_{ij}^{(k)})^{\lambda_k}\right] \end{aligned} \quad (5)$$

Bu işlem adımları sonucunda Eşitlik 6'da gösterildiği üzere R ile ifade edilen kombine edilmiş karar matrisi elde edilmektedir.

$$R = \begin{bmatrix} (\mu_{11}, \nu_{11}, \pi_{11}) & \cdots & (\mu_{1n}, \nu_{1n}, \pi_{1n}) \\ (\mu_{21}, \nu_{21}, \pi_{21}) & \ddots & \vdots \\ \vdots & \cdots & (\mu_{mn}, \nu_{mn}, \pi_{mn}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Aşama 3

Kriter ağırlıklarının belirlenmesi: Çok kriterli karar verme yöntemlerinde kullanılan problem kriterleri her zaman eşit öneme sahip olamamaktadır. Kriter ağırlıklarını elde etmek için her bir

kriterin önemine göre karar vericilerin fikirleri birleştirilmektedir. Karar vericiler tarafından kriter ağırlıkları değerlendirilirken $W_j^{(k)} = [\mu_j^{(k)}, v_j^{(k)}, \pi_j^{(k)}]$ gösterimi kullanılmaktadır. Yapılan değerlendirmeler IFWA operatörü birleştirilerek bütünsel hale getirilmektedir.

$$w_j = IFWA_{\lambda} = (w_j^{(1)}, w_j^{(2)}, \dots, w_j^{(l)}) = w_j^{(1)}\lambda_1 \oplus w_j^{(2)}\lambda_2 \oplus \dots \oplus w_j^{(l)}\lambda_l$$

$$= \left[1 - \prod_{k=1}^l (1 - \mu_{ij}^{(k)})^{\lambda_k}, \prod_{k=1}^l (v_{ij}^{(k)})^{\lambda_k}, \prod_{k=1}^l (1 - \mu_{ij}^{(k)})^{\lambda_k} - \prod_{k=1}^l (v_{ij}^{(k)})^{\lambda_k} \right] \quad (7)$$

Sezgisel bulanık sayılar incelendiğinde $w_j^{(k)} = (\mu_j^{(k)}, v_j^{(k)}, \pi_j^{(k)})$ göstergesinin verilen dilsel değişkenler çerçevesinde belirlenen alanında uzmanlardan k. uzmanın j. kriter için yaptığı değerlendirmeyi tanımlamaktadır.

Aşama 4

Ağırlıklı kombine karar matrisinin oluşturulması: R matrisi ile kriter ağırlıklarının çarpımı sonucunda elde edilmektedir.

$$R' = R \otimes W = (\mu'_{ij}, v'_{ij}) = \{ (x, \mu_{ij} \cdot \mu_j, v_{ij} + v_j - v_{ij} - v_j) x \in X \} \quad (8)$$

$$\pi'_{ij} = 1 - -v_{ij} - v_j - \mu_{ij} \cdot \mu_j + v_{ij} \cdot v_j \quad (9)$$

$r'_{ij} = (\mu'_{ij}, v'_{ij}, \pi'_{ij})$ ise ağırlıklı kombine matris değerlerinin gösterimini belirtmektedir.

$$R' = \begin{bmatrix} (\mu_{11}', v_{11}', \pi_{11}') & \dots & (\mu_{1n}', v_{1n}', \pi_{1n}') \\ (\mu_{21}', v_{21}', \pi_{21}') & \ddots & \vdots \\ \vdots & \dots & (\mu_{mn}', v_{mn}', \pi_{mn}') \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11}' & \dots & r_{1n}' \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1}' & \dots & r_{mn}' \end{bmatrix} \quad (10)$$

Aşama 5:

Sezgisel bulanık pozitif ideal çözüm ve sezgisel bulanık negatif ideal çözümün tanımlanması: J_1 maliyet kriterini belirtirken J_2 ise fayda kriterini göstermektedir. A^* pozitif ideal sezgisel bulanık çözüm, A^- ise negatif ideal sezgisel bulanık çözüm kümeleri altta gösterildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$A^* = (\mu'_{A^*j}, v'_{A^*j}) \text{ ve } A^- = (\mu'_{A^-j}, v'_{A^-j}) \quad (11)$$

$$\mu'_{A^*j} = \left(\left(\underbrace{\max}_i \mu'_{ij} \mid j \in J_1 \right), \left(\underbrace{\min}_i \mu'_{ij} \mid j \in J_2 \right) \right) \quad (12)$$

$$v'_{A^*j} = \left(\left(\underbrace{\min}_i v'_{ij} \mid j \in J_1 \right), \left(\underbrace{\max}_i v'_{ij} \mid j \in J_2 \right) \right) \quad (13)$$

$$\mu'_{A^-j} = \left(\left(\underbrace{\min}_i \mu'_{ij} \mid j \in J_1 \right), \left(\underbrace{\max}_i \mu'_{ij} \mid j \in J_2 \right) \right) \quad (14)$$

$$v'_{A^-j} = \left(\left(\underbrace{\max}_i v'_{ij} \mid j \in J_1 \right), \left(\underbrace{\min}_i v'_{ij} \mid j \in J_2 \right) \right) \quad (15)$$

Aşama 6:

İdeal uzaklıkların hesaplanması: Sezgisel bulanık pozitif ve ideal çözümler elde edildikten sonra her bir alternatifin ideal çözümleri arasında Öklid uzaklığı kullanılarak uzaklıklar hesaplanmaktadır. S_i^+ , sezgisel bulanık pozitif ideal çözüm, S_i^- ise sezgisel bulanık negatif ideal çözümü göstermektedir.

$$S_i^+ = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n \left[(\mu'_{ij} - \mu'_{A^*j})^2 + (v'_{ij} - v'_{A^*j})^2 + (\pi'_{ij} - \pi'_{A^*j})^2 \right]} \quad i = (1, 2, \dots, n) \quad (16)$$

$$S_i^- = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n \left[(\mu'_{ij} - \mu'_{A^-j})^2 + (v'_{ij} - v'_{A^-j})^2 + (\pi'_{ij} - \pi'_{A^-j})^2 \right]} \quad i = (1, 2, \dots, n) \quad (17)$$

Aşama 7:

Yakınlık katsayısının hesaplanması: Her bir alternatife göre belirlenen sezgisel bulanık pozitif ve negatif ideal uzaklıklar değerlendirilerek yakınlık katsayıları hesaplanmaktadır.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-} \quad 0 \leq C_i^* \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, n) \quad (18)$$

Aşama 8:

Alternatiflerin sıralanması: Yakınlık katsayıları hesaplandıktan sonra alternatifler sıralamaya tabi tutulmaktadır. Yakınlık katsayısı en yüksek olan alternatif en iyi alternatif olarak belirlenmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

Silah üreticilerine namlu malzeme seçimi konusunda kolaylık sağlaması amaçlanan bu çalışmada 5 farklı çelik grubu (A1;C45, A2;X40CrMoV5-1, A3;X12CrS13, A4;42CrMo4, A5;32CrMoV12-10) ve 4 adet kriter (akma dayanımı, sertlik, darbe dayanımı, maliyet) belirlenmiştir. Bu seçenekler ışığında bir karar verme algoritması oluşturulmuştur.

Akma dayanımı, sertlik ve darbe dayanımı kriterleri fayda maliyeti olmakla birlikte; maliyet kriteri maliyet kriteridir. Birden çok kriter ve alternatif barındıran bu problemin çözümünde ortada belirsiz bir durum bulunduğundan bulanık yöntem tercih edilmiştir. Topsis bu noktada problemlerin çözümünde kolaylık ve önemli çözümler üretmesi ile işlem adımlarının etkin ve verimli izlenebilirliği bakımından kullanılmıştır. Sezgisel Bulanık Topsis yöntemi belirsiz ortamlarda dilsel ifadeler yardımıyla problemlere nicel ve nitel anlamda önemli katkılar sunarken, aralarında uyumsuzluk oluşan uzman fikirleri noktasında bütünlük bir yol takip ederek bizlere kolaylıklar sağlamaktadır. Bu sebeple oluşturulan bu değerler çerçevesinde 3 ayrı uzman görüşü alınarak Sezgisel Bulanık Topsis yöntemi uygulanmıştır.

Seçilen kriterleri uzmanlar değerlendirirken kullandıkları dilsel değişkenler Tablo 1’de gösterilmiştir. Her bir dilsel değişken karşısında bulunan bulanık sayı ile ifade edilmektedir. Dilsel değişkenler 5 ayrı kategoride olup “çok önemsiz ile çok önemli” değişkenleri arasında farklılık göstermektedir. Değişken değerleri her biri için üye olma ve üye olmama derecesini içermektedir.

Tablo 1. Kriterler için belirlenen dilsel ifadeler

Dilsel ifadeler	Sezgisel bulanık sayılar (SBS)
Çok önemli	(0.900 ; 0.100)
Önemli	(0.750 ; 0.200)
Orta	(0.500 ; 0.450)
Önemsiz	(0.350 ; 0.600)
Çok önemsiz	(0.100 ; 0.900)

Sezgisel bulanık yönteminde uygulanan bir diğer farklı aşama ise, karar verici ağırlıklarının hesaplanmasıdır. Karar verici ağırlıklarının hesaplanması; uzmanların tecrübe, bilgi birikimi ve çalışma süresi baz alınarak Eşitlik 4’te gösterildiği gibi oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. KV 1 öğretim üyesi, KV 2 ile KV 3 özel bir firmada malzeme alanında yetkili mühendislerdir. Karar verici ağırlıkları Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Karar verici ağırlıkları

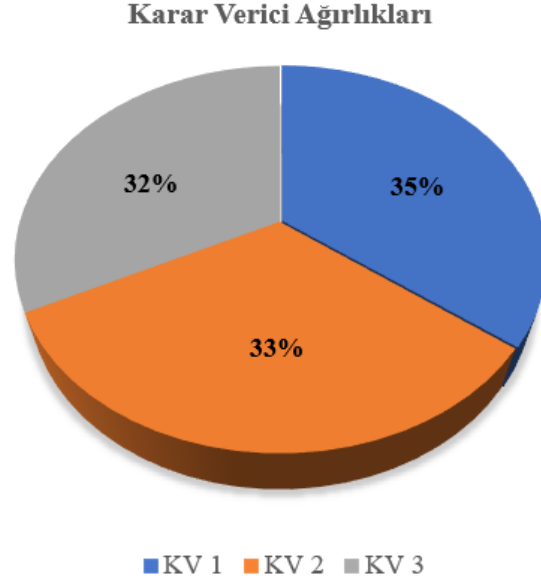
Karar verici 1 (KV 1)	Karar verici 2 (KV 2)	Karar verici 3 (KV 3)
Çok önemli 0.353	Önemli 0.324	Önemli 0.324

Karar verici ağırlıkları hesaplandıktan sonra karar vericilerin her bir alternatif çelik grubu bazında tüm kriterlerin önem derecesine göre dilsel ifadeler ile gösterimi bulunmaktadır. Tablo 3’te gösterilen dilsel değişkenler, karar vericilerin her bir namlu malzemesi için kriterlerin ne denli öneme sahip olduğunu içeren linguistik değerlendirmeleri belirtmektedir. Tablo 3, “kesinlikle iyi (Kİ), çok iyi (Çİ)” gibi değişkenler içermekte ve esnek bir değerlendirme süreci oluşturmaktadır.

Tablo 3. Karar vericilerin alternatif değerlendirmeleri için kullandıkları dilsel ifade karşılıkları

Dilsel ifadeler	Sezgisel bulanık sayılar (SBS)
Kesinlikle iyi (Kİ)	(1.000 ; 0.000 ; 0.000)
Çok çok iyi (ÇÇİ)	(0.900 ; 0.100 ; 0.000)
Çok iyi (Çİ)	(0.800 ; 0.100 ; 0.100)
İyi (İ)	(0.700 ; 0.200 ; 0.100)
Orta iyi (Oİ)	(0.600 ; 0.300 ; 0.100)
Orta (O)	(0.500 ; 0.400 ; 0.100)
Orta kötü (OÖ)	(0.400 ; 0.500 ; 0.100)
Kötü (K)	(0.250 ; 0.600 ; 0.150)
Çok kötü (ÇK)	(0.100 ; 0.750 ; 0.150)
Çok çok kötü (ÇÇK)	(0.100 ; 0.900 ; 0.000)

Her bir uzman değerlendirmesini bitirdikten sonra 3 ayrı uzman fikirleri tek bir çerçevede Tablo 4’te gösterilmiştir. Sonrasında Eşitlik 5 kullanılarak IFWA operatörü ile tüm değerlendirmeler bulanık gösterimler ile birlikte birleştirilmiş karar matrisi olarak Tablo 5’te ifade edilmiştir.



Şekil 4. Karar verici ağırlıkları

Tablo 4. Uzmanların her bir alternatife göre kriterler için oluşturduğu dilsel değerlendirmeler

Karar vericiler	Alternatifler	Kriterler			
		K1	K2	K3	K4
KV 1	A1	Oİ	O	O	Çİ
	A2	İ	Kİ	OK	O
	A3	Çİ	İ	O	O
	A4	İ	Çİ	Çİ	İ
	A5	ÇÇİ	Çİ	Kİ	Oİ
KV 2	A1	O	O	O	Çİ
	A2	OK	Oİ	O	O
	A3	Çİ	Çİ	O	İ
	A4	İ	İ	Çİ	Çİ
	A5	Çİ	ÇÇİ	Kİ	Oİ
KV 3	A1	Oİ	O	O	Çİ
	A2	OK	İ	İ	İ
	A3	ÇÇİ	Çİ	İ	İ
	A4	İ	O	İ	ÇÇİ
	A5	Çİ	ÇÇİ	Kİ	İ

Tablo 5. Birleştirilmiş karar matrisi

	K1			K2			K3			K4		
	μ	ν	π	μ	ν	π	μ	ν	π	μ	ν	π
A1	0,570	0,329	0,100	0,500	0,400	0,100	0,500	0,400	0,100	0,800	0,100	0,100
A2	0,530	0,361	0,107	1,000	0,000	0,000	0,548	0,345	0,106	0,576	0,319	0,104
A3	0,840	0,100	0,059	0,769	0,127	0,103	0,576	0,319	0,104	0,640	0,255	0,103
A4	0,700	0,200	0,100	0,693	0,195	0,110	0,771	0,125	0,102	0,815	0,127	0,056
A5	0,843	0,100	0,056	0,872	0,100	0,027	1,000	0,000	0,000	0,635	0,263	0,101

Birleştirilmiş karar matrisi oluşturulduktan sonra uzmanlar, Tablo 6’da gösterildiği üzere kriterler bazında linguistik değerlendirmelerini tamamlamışlardır. Her bir uzman birbirinden bağımsız bir şekilde değerlendirmelerini kategorize etmişlerdir.

Tablo 6. Uzmanların kriter değerlendirmeleri

Karar vericiler	Kriterler	Dilsel ifadeler
KV 1	K1	Önemli
	K2	Çok önemli
	K3	Önemli
	K4	Orta
KV 2	K1	Önemli
	K2	Çok önemli
	K3	Çok önemli
	K4	Orta
KV 3	K1	Önemli
	K2	Önemli
	K3	Çok önemli
	K4	Orta

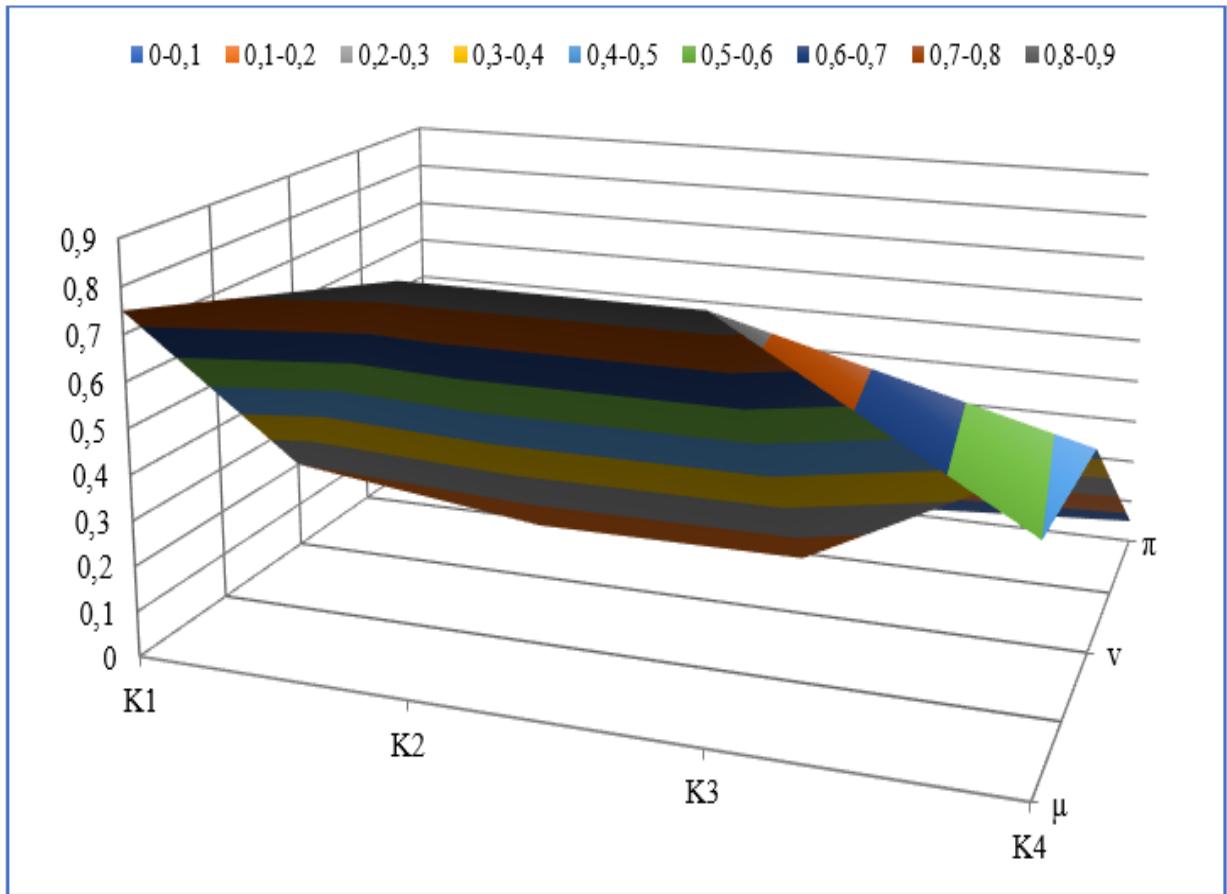
Tablo 7. Kriterler değerlerin bulanık karşılıkları

	KV 1			KV 2			KV 3		
	μ	ν	π	μ	ν	π	μ	ν	π
K1	0.750	0.200	0.050	0.750	0.200	0.050	0.750	0.200	0.050
K2	0.900	0.100	0.000	0.900	0.100	0.000	0.750	0.200	0.050
K3	0.750	0.200	0.050	0.900	0.100	0.000	0.900	0.100	0.000
K4	0.500	0.450	0.050	0.500	0.450	0.050	0.500	0.450	0.050

Kriter ağırlıkları IFWA operatörü kullanılarak Tablo 7 oluşturulmuştur. Bu sayede kriterler ağırlıklarına bütünleşik bir yapı kazandırılmıştır.

Tablo 8. Kriter ağırlıkları

Kriterler	μ	ν	π
K1	0.750	0.200	0.050
K2	0.865	0.125	0.009
K3	0.862	0.128	0.010
K4	0.500	0.450	0.050



Şekil 5. Kriter ağırlıkları

Kriter ağırlıklarının belirlenmesi aşamasından sonra birleştirilmiş karar matrisi Eşitlik 7 ve Eşitlik 8 ile çarpım operatörü kullanılarak Tablo 9 ile, ifade edilen ağırlıklı birleştirilmiş karar matrisine dönüştürülmüştür.

Tablo 9. Ağırlıklı birleştirilmiş karar matrisi

	K1			K2			K3			K4		
	μ	ν	π	μ	ν	π	μ	ν	π	μ	ν	π
A1	0,427	0,463	0,109	0,432	0,475	0,092	0,430	0,476	0,092	0,400	0,505	0,095
A2	0,397	0,489	0,112	0,865	0,125	0,009	0,472	0,429	0,098	0,288	0,625	0,086
A3	0,630	0,280	0,089	0,665	0,236	0,097	0,496	0,406	0,096	0,320	0,590	0,089
A4	0,525	0,360	0,115	0,600	0,296	0,103	0,665	0,236	0,097	0,407	0,520	0,071
A5	0,632	0,280	0,087	0,754	0,212	0,032	0,861	0,127	0,010	0,317	0,594	0,087

Bütünleşik ağırlıklı karar verici matrisi oluşturulduktan sonra, uzman görüşü ile Tablo 10'da oluşturulan her bir alternatif için fayda ve maliyet kriterleri baz alınarak pozitif ve negatif ideal çözüm tablosu kategorize edilmiştir.

Tablo 10. Pozitif ve negatif ideal çözümler

	μ	ν	π	μ	ν	π	μ	ν	π	μ	ν	π
A*	0,632	0,280	0,087	0,865	0,125	0,009	0,861	0,127	0,010	0,288	0,625	0,086
A ⁻	0,397	0,489	0,112	0,432	0,475	0,092	0,430	0,476	0,092	0,407	0,505	0,087

Oluşturulan pozitif ve negatif ideal çözümler ile her bir alternatif malzeme için pozitif ve negatif ideal uzaklıklar Eşitlik 16 ve Eşitlik 17 ile Öklid uzaklığı kullanılmıştır. Eşitlik 18 kullanılarak yakınlık katsayıları oluşturulmuştur.

Bu sayede namlu malzemeleri kıyaslandığında en önemli ve en uygun namlu malzemesinin A5 ve A4, en az uygun namlu malzemesinin A1 olduğu hesaplanmıştır. Silah üreticileri veya namlu malzeme satıcıları için 32CrMoV12-10 (1.7765) ve 42CrMo4 (1.7225) malzemeleri en uygun malzeme seçilmiştir.

Tablo 11. Alternatiflerin ideal uzaklıkları ve sıralama değerleri

Alternatifler	S*	S ⁻	CC	Sıralama
A1	0,495	0,197	0,285	5
A2	0,258	0,252	0,494	4
A3	0,242	0,274	0,531	3
A4	0,177	0,248	0,583	2
A5	0,059	0,450	0,885	1

4. Sonuçlar ve Öneriler

Hafif silahların ana parçalarını oluşturan kapak, gövde, namlu kısımları gerek üretim gerekse atış esnasında yapısında önemli değişimlere maruz kalan kısımlardır. Bu kısımlarda oluşan yapısal, fiziksel değişimler malzeme özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Malzeme özelliklerini olumsuz yönde etkileyen parametreleri en aza indirmek ve pozitif anlamda etkileyen parametreleri desteklemek anlamında malzeme seçimi konusu daha önemli bir hale gelmektedir. Bu noktada kullanılan çok kriterli karar verme yöntemleri çoklu kriter ve çoklu alternatif bulunduran bir karar verme mekanizmasında efektif bir çözüm safhası barındırarak karar vericilere kolaylık sağlamaktadır (Varol ve Kandemir, 2022). Çok kriterli karar verme yöntemleri uygulanırken son zamanlarda çoklukla kullanılan sayılar ise, bulanık sayılardır. Bulanık sayılar, karar vericilerde oluşan belirsizlik durumlarını daha açık ve anlaşılır bir duruma getirmekle birlikte kavramlar arasında oluşan “az, çok, biraz” gibi terimleri sayısal ve dilsel hale dönüştürerek tereddütleri ortadan kaldırmaya çalışmaktadır. Karar verme yöntemlerinden biri olan Topsis, kolay uygulanabilirliği ile birlikte daha etkin sonuçlar ortaya koymasıyla kullanıcılara etkili çözüm imkânı sunmaktadır.

Bu çalışmada namlu malzemesi seçimini belirginleştirmek ve belirsiz durumları netleştirmek adına Sezgisel Bulanık Topsis yöntemi kullanılmıştır. 5 adet namlu malzemesi, 4 kriter, 3 karar verici tercih edilmiştir. Namlu malzemeleri; A1 (C45), A2 (X40CrMoV5-1), A3 (X12CrS13), A4 (42CrMo4), A5 (32CrMoV12-10) olarak belirlenmiştir. Kriterler K1 (akma dayanımı), K2 (sertlik), K3 (darbe dayanımı) ve K4 (maliyet) kriterleridir. Karar vericiler ise öğretim üyesi ve namlu malzemesi üzerine çalışan iki uzman mühendistir. Önem ağırlıkları hesaplanan uzmanlar; kriterler ve alternatifler için ayrı ayrı değerlendirmelerde bulunmuş, tüm değerlendirmeler sezgisel bulanık sayılara dönüştürülmüş ve IFWA operatörü ile bütünleşik hale getirilmiştir. Uzman ağırlıkları 0.353, 0.324, 0.324 olarak hesaplanmıştır. Kriter ağırlıkları K1 (0.750, 0.200, 0.050), K2 (0.865, 0.125, 0.009), K3 (0.862, 0.128, 0.010), K4 (0.500, 0.450, 0.050) şeklindedir. Uygulanan Sezgisel Bulanık Topsis yöntemi ile en uygun namlu malzemesi sırayla 32CrMoV12-10 > 42CrMo4 > X40CrMoV5-

1 > X12CrS13 > C45 malzemeleridir. Yakınlık katsayıları 0.885 > 0.583 > 0.531 > 0.494 > 0.285 şeklindedir.

Bu anlamda uygulanan çalışma, kriterler ve alternatifler genişletilerek küresel ve kübik sayılar ile Dematel, Copras, Aras yöntemleri ile daha etkin çözümler ortaya konarak duyarlılık analizleri ile incelemeler yapılabilir. Uzman sayısı artırılarak kriter değerlendirmeleri detaylandırılabilir. Bu çalışmanın silah üretici firmalara, namlu malzemesi tedarikçilerine karar noktasında ışık tutması amaçlanmaktadır. Bu hedefle çok kriterli karar verme yöntemlerinin sahada kullanılmasının önemi tekrar ortaya çıkmaktadır.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Teşekkür

Çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için vermiş oldukları katkılar adına Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), Yükseköğretim Kurumu (YÖK), Trabzon Silah Sanayi A.Ş. (TİSAŞ) ve Karadeniz Teknik Üniversitesi'ne teşekkür ederiz. C119073 kodlu ve "Yenilikçi Hafif Silah Teknolojilerinin Geliştirilmesi ve Bu Alana Yönelik Nitelikli Araştırmacıların Yetiştirilmesi" isimli bu proje, Tübitak 2244 Sanayi Doktora Programı kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu ve TİSAŞ tarafından desteklenmektedir. Ayrıca bu çalışma YÖK 100/2000 Doktora Burs Programı kapsamında YÖK tarafından desteklenmektedir.

Kaynaklar

- Ablay Rutci, T., (2019). *Hafif silahlarda kullanılan namlu malzemesinin geliştirilmesi ve işleme parametrelerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ata, A., ve Sennaroğlu, B., (2008). Savaş gemisi tasarımındaki kriter katsayı ağırlıklarının saptanmasında çok kriterli karar verme tekniklerinin kullanımı. *Journal of Naval Sciences and Engineering*, 4(1), 1-16.
- Atanassov, K.T., (1986). "Intuitionistic Fuzzy Sets." *Fuzzy Sets and Systems*, 20(1), 87-96.
- Bilgili, F., Zaralı, F., İlgün, M., F., Dumrul, C., ve Dumrul, Y., (2022). The evaluation of renewable energy alternatives for sustainable development in Turkey using intuitionistic fuzzy-TOPSIS method. *Renewable Energy*, 189, 1443-1458.
- Burnaz, E., ve Es, H. A. (2021). Trabzon ilçelerinin cittaslow kriterleri açısından sezgisel bulanık topsis yöntemi ile değerlendirilmesi. *Adıyaman Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (39), 330-363.

- Dağdeviren, M., Yavuz, S., and Kılınc, N., (2009). Weapon selection using the AHP and TOPSIS methods under fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*, Volume 36, Issue 4, Pages 8143-8151.
- De Rosset, W.S., and Montgomery, J.S., (2014). Cobalt-base alloy gun barrel study. *Wear*, Volume 316, Issues 1–2, 2, Pages 119-123, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.05.001>.
- Doig A. (1998). *Military metallurgy*. IOM Communications & Institute of Materials (London England).
- Kolbe, G., (2010) The Making of a Rifled Barrel, <http://www.geoffreykolbe.com/articles/bmart.htm> adresinden 27 Kasım 2022 tarihinde alınmıştır.
- Kumar Das, P., Pratim Das, L., and Pratim Das, D. (2021). *Science and Engineering of Small Arms* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003199397>.
- Lawton, B. (2001). Thermo-chemical erosion in gun barrels. *Wear*, 251, 827-838.
- Mao, B., Zhao, Q., Bai, X., Wang, Z., Zhu, R., and Chen., C., (2022). Review and Prospect on Life Extension Technology for Gun Barrels. *Acta Armamentarii*, doi: 10.12382/bgxb.2021.0787.
- Marschall, C.W., and Wagner, H.J., (1968). *Materials for Small-Arms Gun Barrels*, Defense Metals Information Center, Battelle Memorial Institute, Ohio, USA.
- Muhammet Gül (2020) Application of Pythagorean fuzzy AHP and VIKOR methods in occupational health and safety risk assessment: the case of a gun and rifle barrel external surface oxidation and colouring unit. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 26:4, 705-718.
- Pyka, D., Bocian, M., Jamroziak, K., Kosobudski, M., and Kulisiewicz, M., (2019). "Concept of a gun barrel based on the layer composite reinforced with continuous filament", *AIP Conference Proceedings* 2078, 020043.
- Swab. J.J., Wereszczak, A.A., Tice, J., Caspe, R., Kraft, R.H., and Adams, J.W., (2005). *Mechanical and Thermal Properties of Advanced Ceramics for Gun Barrel Applications*, Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, USA.
- URL-1: <https://oec.world/en/profile/hs/handguns> (Erişim Tarihi: 27 Kasım 2022)
- URL-2: http://www.trabzonsilah.com/wp-content/uploads/kanuni16_S-M16.pdf (Erişim Tarihi: 27 Kasım 2022)
- URL-3:<http://www.interlloy.com.au/our-products/carbon-steels/1045-medium-tensile-carbon-steel-bar/> (Erişim Tarihi: 27 Kasım 2022)
- URL-4: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=84e679b95ef74471865e8543dadbf5> (Erişim Tarihi: 27 Kasım 2022)
- URL-5: <http://www.interlloy.com.au/our-products/stainless-steel/416-martensitic-stainless-steel-bar/> (Erişim Tarihi: 27 Kasım 2022)
- URL-6: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b95a2480a43c41b887d9ae84b5f9c2fe> (Erişim Tarihi: 27 Kasım 2022)
- Varol, T., Kandemir, Y., (2022). Alüminyum Matrisli Kompozitler İçin En Uygun Takviye Malzemesinin AHP Yöntemi ile Seçimi, *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12 (2), 946-963.
- Zadeh, L.A. (1965). "Fuzzy sets". *Information and Control*, 8 (3), 338-353.
- Zhang, Chao & Ma, Cun-bao & Xu, Jia-dong. (2005). A New Fuzzy MCDM Method Based on Trapezoidal Fuzzy AHP and Hierarchical Fuzzy Integral. *Lecture Notes in Artificial Intelligence* (Subseries of Lecture Notes in Computer Science). 3614. 483-483.
- Zhang, X., Jiang, J., Ge B., ve Yang, K., (2016). "Group decision making for weapon systems selection with VIKOR based on consistency analysis," *Annual IEEE Systems Conference (SysCon)*, Orlando, FL, USA, 2016, 1-6.

Calculation of Optimum Transit Times with Real-Coded Genetic Algorithm

Nimet ISIK^{1*} 

Abstract

Electron energy analysers have been designed to analyse charged-particle beams at specific energies. The design is based on the principle that electrons with different energies arrive at the detector at different times. Since electrons with different energies follow different orbits within these analysers. In collision experiments, it is very important to determine the trajectories and transit times of the charged particles in the analyser. In this study, optimum solutions for transit times of charged particles were provided using a real-coded genetic algorithm. Hyper parameters and types of genetic algorithm were obtained using trial and error methods, in this study. The results of this study indicate that genetic algorithm gives time resolution values in a wide data set with high accuracy. The results show that genetic algorithms (GA) are a fascinating approach for solving search and optimization problems.

Keywords: Electron spectroscopy, electron beam, energy analyser, genetic algorithm.

Gerçek Kodlu Genetik Algoritma ile Optimum Geçiş Sürelerinin Hesaplanması

Öz

Elektron enerjisi analizörleri, belirli enerjilerdeki yüklü parçacık ışınlarını analiz etmek için tasarlanmıştır. Tasarım, farklı enerjilerdeki elektronların dedektöre farklı zamanlarda ulaşması prensibine dayanmaktadır. Farklı enerjilere sahip elektronlar bu analizörlerde farklı yörüngeler takip ettiğinden. Çarpışma deneylerinde yüklü parçacıkların analizördeki yörüngelerinin ve geçiş sürelerinin belirlenmesi çok önemlidir. Bu çalışmada, yüklü parçacıkların geçiş süreleri için gerçek kodlu bir genetik algoritma kullanılarak optimum çözümler sağlanmıştır. Bu çalışmada hiper parametreler ve genetik algoritma türleri deneme yanılma yöntemleri kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, genetik algoritmanın geniş bir veri kümesinde zaman çözünürlük değerlerini yüksek doğrulukla verdiğini göstermektedir. Sonuçlar, genetik algoritmaların (GA) arama ve optimizasyon problemlerini çözmek için ilgi çekici bir yaklaşım olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektron spektroskopisi, elektron demeti, enerji analizörü, genetik algoritma.

¹Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Mathematics and Science Education Department, Burdur, Türkiye, nokumus@mehmetakif.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0002-1347-6628>

1. Introduction

Hemispherical energy analysers are the most commonly used analysers in electron spectroscopy because of their high energy resolution (Hedde, 2000). In coincidence studies, these instruments have been designed to analyse a charged particle beam at a specific energy (Dogan et. al., 2007; Zouros 2005). Coincidence timing resolution is an important parameter in the design of these analysers (Zouros and Benis, 2005). Electrons reach the detector at different times because electrons with different energies follow different orbits within these analysers. However, the coincidence peak is desired to be a delta function, for coincidence experiments. It was observed that the coincidence peak had a finite width in the experimental results. The predominant reason for this result is the difference in the transit times of electrons that travel different path lengths in energy analysers.

There are several types of electron spectrometers that utilize time for energy separation. In a time of flight spectrometer, electrons are accelerated by an electric field towards a detector. The time it takes for electrons with different energies to reach the detector is used to separate their energies. Electrons with higher energies will reach the detector faster than those with lower energies. Electrons with higher kinetic energy will have higher velocities and thus shorter flight times (Yildirim et. al. 2009). In velocity map imaging electron spectrometers, electrons are first accelerated by an electric field and then pass through a velocity map imaging system (Baguenard et. al. 2004). Velocity map imaging is a technique used to study the velocity distribution of charged particles, including electrons. This system uses a combination of electric and magnetic fields to map the electron velocities onto a detector. The spatial position on the detector corresponds to the electron's velocity, allowing for energy separation based on time-of-flight.

To date, different methods have been applied to improve the energy and time resolution in energy analysers and significant achievements have been recorded (Zouros and Benis, 2005; Imhof et. al.1976; Völkel and Sandner, 1983; Lower and Weigold, 1989; Caprari, 1995; Kugeler et. al, 2003; Shavorskiy et. al., 2014; Sise and Zouros, 2015; Sise and Zouros, 2016). The calculation of resolution parameters directly using well-known methods is generally limited. The resolution parameter values over a wide range are key to determining optimum solution in coincidence studies. Transit time calculations are presented using an approximate model from various publications in the literature (Imhof et. al.1976; Völkel and Sandner, 1983; Lower and Weigold, 1989; Caprari, 1995; Kugeler et. al, 2003; Shavorskiy et. al., 2014). The transit time and energy distributions of electrons using the trajectory simulation software SIMION 8.1 are given by Sise and Zouros (Sise and Zouros, 2015; Sise and Zouros, 2016). Although successful calculations can be found for certain parameters, none are sufficiently flexible to perform well outside its domain.

This study focuses on the use of an artificial intelligence method to obtain time resolution parameters. In recent years, successful applications have been performed to solve problems in atomic and molecular physics and electron optics (Isik, 2015a; Isik 2015b; Isik 2016; Isik and Isik, 2016a; Isik and Isik, 2016b; Isik et. al, 2017; Ince and Isik, 2020). The artificial intelligence method provides exciting alternative calculation method. Genetic algorithm (GA), one of the sub-branches of artificial intelligence is inspired by the process of natural selection (Goldberg, 1988; Goldberg, 1989; Davis, 1991). The GA has proven to be an important research algorithm for solving nonlinear, multivariate optimization problems. GA approaches have been applied to several computational and design problems (Paszkowicz, 2009; Jiang et. al., 2020). The GA is more efficient in solving difficult and discontinuous functions than traditional optimization techniques. Therefore, an important aspect of GA research is function optimization. Because GA is an intuitive method, it may not find the exact result for a given problem, but it provides solutions that are very close to the exact result for problems that cannot be solved by known methods or whose solution time increases exponentially with the size of the problem. GAs generate possible solutions to the problem. In this generation, crossover and mutation processes to create new solutions and reproduction processes to ensure the survival of the best solution are applied to reach a generation with better solutions.

In this study, GA was used for the time-resolution equations of electrons in energy analyzers. This paper is organized as follows: In the Materials and Methods section, the time resolution equations and the GA method are introduced. The next section presents the calculations of transit time distribution in energy analyser using by GA.

2. Materials and Methods

2.1. Time Resolution Parameters

Hemispherical energy analysers are fundamental instruments used in many experimental studies such as high-resolution charged particle spectroscopy and electron-electron coincidence spectroscopy (e,2e). The improvement of these experimental devices requires the optimization of all parameters in the charged particle detection chain, which influence the time resolution. To obtain careful and reliable results in simultaneous multi-particle measurements, the experimental setup must be precisely designed and tested. One of the most important parts of collision spectrometers is the energy analyser which provides an analysis of charged particles.

Hemispherical energy analysers consist of two hemispherical deflectors and an input optics. The input optics focus on the electron beam at the input of the deflectors. Input optics are used to delay the electrons by the voltages supplied to the lenses and to focus the hemisphere input. Pre-

retardation is an application that increases the resolution. Therefore, it is very important to know the relationships between the aberration coefficients and magnification parameters in the design of analyser systems. The optimal lens magnification, $|M|$ was calculated as follows:

$$|M| = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{FD}{d_s} \right) \left(\frac{d_p}{l} \right)^2 \right]^{1/3} \tag{1}$$

where F is the pre-retardation factor, D is the dispersion, d_s is the incident beam spot and is given by the formula $d_s = \Delta r_0/M$, and Δr_0 is the diameter of the aperture at R_0 , d_p is the diameter of lens entrance aperture. The pre-retardation factor, F is related to the entry bias V_0 . This relationship is given by the following formula:

$$qV_0 = (F - \gamma)E_0 \tag{2}$$

The electrons are distinguished according to their energy and reach the detector because of the voltages applied to the inner and outer deflectors. As shown in Fig. 1, electrons enter the deflectors at a small value of α . Electrons are focused on the analyser input with the help of the input optics. They follow an elliptical trajectory in the electrostatic field of hemispherical electrodes according to their energies.

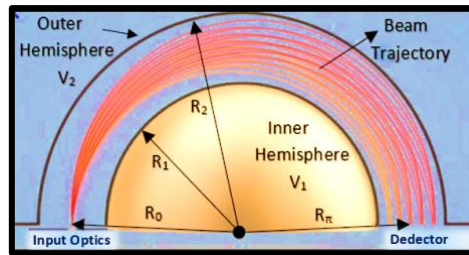


Figure 1. A section through the hemispheres of the HDA. R_0 is circular path radius of charged particle beam in the hemispheres. R_1 and R_2 are the radii of the two concentric inner and outer hemispheres, respectively. V_1 and V_2 stands for the voltages of the inner and outer hemispheres, respectively. In an ideal HDA, an electron with charge q and energy E enters the deflector area through the aperture of diameter Δr_0 with an angle α . The electron exits in r_π after following an elliptical orbit. The central trajectory is defined by a particle that enters the deflector field at $r_0 = R_0$ and exits the deflectors at $r_\pi = R_\pi$.

However, the charged particle beam that follows different trajectories reaches the detector at different times. The differences in the times required to reach the detector affect the time resolution. Within the hemispheres, the transit times of the charged particles, t_π is given by formula (Caprari, 1995),

$$t_{\pi} = \frac{T_0}{2\pi} \left\{ \pi + 2 \arctan \left[\sin \alpha \sqrt{-1 + \frac{2}{\rho_0}} \right] - \frac{4 \left(\sqrt{\frac{\rho_0}{2-\rho_0}} \right) \sin \alpha}{\cos 2\alpha - \left(\frac{2+\rho_0}{2-\rho_0} \right)} \right\} \quad (3)$$

where T_0 stands for the period of the Kepler orbit, which is calculated from $T_0 = 2\pi(ma^3/qk)^{1/2}$, α is the angle of the electrons entering the analyzer, $\rho_0 = r_0/a$ where r_0 is the mean beam radius. a is given by the formula $a = -q \left(\frac{R_1 R_2 (V_2 - V_1)}{R_2 - R_1} \right) / 2E$. R_1 and R_2 are the radii of the concentric inner and outer hemispheres, respectively. V_1 and V_2 represent the voltages of the inner and outer hemispheres, respectively.

2.2. Genetic Algorithm

Knowledge of the difficulty level of the problem enables the application of the best method for solving the problem. Polynomial algorithms perform well when solving practical problems. The polynomial algorithms used in non-polynomial (NP) bounded problems cannot solve the problem. In the solution of NP problems, close solutions are preferred over exact results. Because the exact results of such problems cannot be reached in a short time, approximate solutions are obtained by local and random searches. The GA is a research method that attempt to find a solution using random search techniques. It is an algorithm that attempt to find the most suitable (best for purpose) among the many possible solutions to a problem. The GA is used in cases where there are many factors that affect the problem. In this study, GA was used because the transit time problem of electrostatic lenses is a multicriteria problem.

One of the basic components of the genetic algorithm is a gene. Genes are encoded representations of the optimization parameters of each problem. Chromosomes are formed by arranging genes in a certain order using a genetic algorithm. Chromosomes are alternative solution. Chromosomes can be encoded differently depending on the problem. The first step in the implementation of GA is to choose the coding structure that best represents the problem. In this study, a real-coded GA was selected to represent the problem. A population is a valid set of alternative solutions. It can be defined as the set of chromosomes used by the genetic algorithm uses to search for the most suitable solution. In the flowchart shown in Fig. 2, these steps are applied to the generated chromosomes. This process repeats until the stopping criterion is satisfied.

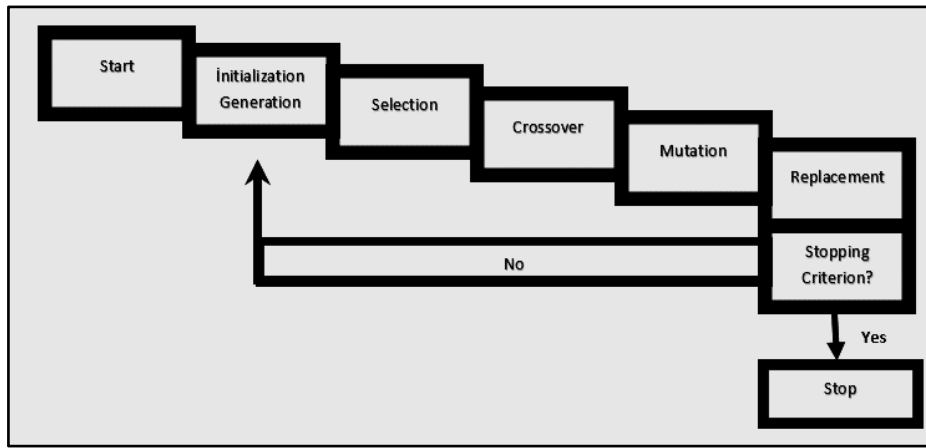


Figure 2: The flowchart of the GA.

The selection mechanism used in this study was roulette wheel selection. In this selection, the circle was divided into n particles. Each range represented a sequence. The fitness value of each sequence was divided by the total fitness value. Thus, each array has its own place among its values in the solution set. For reproduction, a random number between zero and the total fitness is generated and the chromosome is selected by looking at which part of the wheel this number falls on. Similarly, all the chromosomes were identified. The most successful individuals with fitness values are taken into the matching pool and a new generation was obtained.

As there is no generational diversity after certain points when examining the solution stack, a solution cannot be reached. To achieve this, generation diversity is provided by applying cross over and mutation operators to the sequences. Thus, the system is prevented from reaching certain points and getting stuck. Crossover is the displacement of specified parts between two individuals. A very low replacement probability may result in the loss of some features. This hinders the determination of an optimal solution. However, a high probability of replacement may degrade the existing solutions. In this study, a uniform crossover operator with a crossover probability of 0.75 was chosen to ensure gene diversity. In the next step, a multi-point mutation operator with a mutation rate of 0.01 was applied to scan the research space without the problem of early convergence. The search for the roots of the equation continued until 1000 iterations or the exact value of the function value was less than $E=10^{-5}$.

3. Findings and Discussion

In this study, GA was used to find the minimum transit time (t_{π}) as a function of the conserved total energy of electrons (E) using Eq. (3). The specific spectrometer parameters were used in the present calculation: $R_0=82,55$ mm, $R_1=72,40$ mm, $R_2=130,80$ mm, $\gamma=1,50$; $d_s=2,50$ mm, $d_p=4,00$ mm, $l=288,50$ mm. The fitness function to be minimized for transit times can be obtained using Eq. 3 where

the boundaries for the angular spread of the electrons are $0^\circ \leq \alpha_0 \leq 3^\circ$. The first step in GA coding is to select the coding structure that best represents the search space for a problem. Real-coded GA is used in this study. In the next step, the initial population is generated. Population size is 100. Each chromosome was evaluated according to the fitness function. The best fit chromosomes were selected. The selected chromosomes were then reproduced by crossing over and mutating. This process was repeated until the stopping criterion was satisfied. Fig. 3a shows the GA optimum solutions for the time distributions at the exit of the HDA. A representation of the GA approximate solutions obtained by the search is shown in Fig. 3b. Fig. 4 shows pre-retardation values as a function of aperture diameter at the entrance to the deflectors.

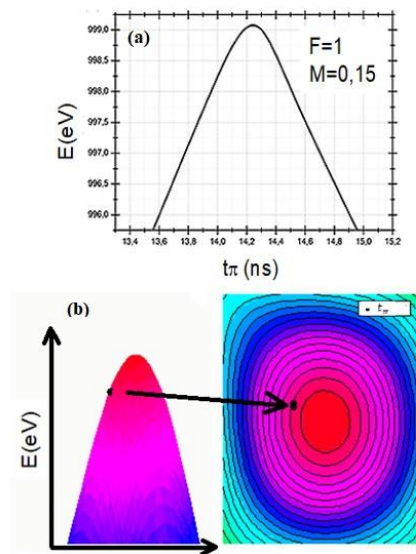


Figure 3. (a) The transit times of the charged particles, t_π as a function of their energies, E. (b) Optimum solutions for the transit times of the charged particles, t_π provided by genetic algorithm search.

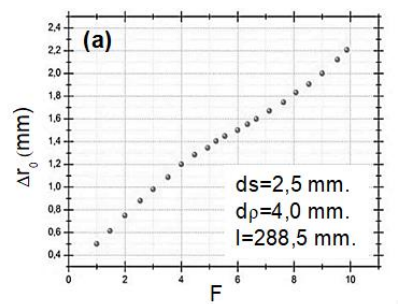


Figure 4: The values of the virtual entry aperture size as a function of the pre-retardation ratio F.

One of the most significant factors determining the performance of the proposed GA is population diversity. The average distance between individuals at each generation is one of the most important factors affecting the performance of GAs. Fig. 5 shows the average distance between individuals at each generation for the time-resolution problem. The graph showing the suitability of the best solution for the problem of transit times either decreases compared to the previous iteration or remains at the

same level until better solutions are found. Fig. 5 presents a critical analysis of the performance of the proposed Genetic Algorithm (GA) in terms of population diversity for the time-resolution problem. Population diversity is a crucial factor influencing the effectiveness of GAs, as it determines the exploration capability of the algorithm across the solution space. The average distance between individuals at each generation serves as a metric to measure this diversity. The graph in Fig. 5 illustrates the trends in the average distance between individuals over successive generations. A higher average distance between individuals indicates greater diversity, implying that the GA is effectively exploring different regions of the solution space. This diverse exploration is essential for avoiding premature convergence and finding better solutions. Furthermore, Fig. 5 also presents a plot depicting the suitability of the best solution found by the GA for the transit times problem. In an efficient GA, this suitability should ideally improve over iterations as better solutions are discovered. However, the graph suggests that in certain cases, the suitability of the best solution may either decrease compared to the previous iteration or remain stagnant until better solutions are found in subsequent generations. The observed fluctuations in the suitability of the best solution can be attributed to the inherent stochastic nature of GAs. During certain iterations, the algorithm may encounter less favorable regions of the solution space, leading to a temporary decrease or stagnation in solution quality. However, as the GA continues its search and maintains population diversity, it is likely to discover more promising regions, leading to improved solutions in the long run.

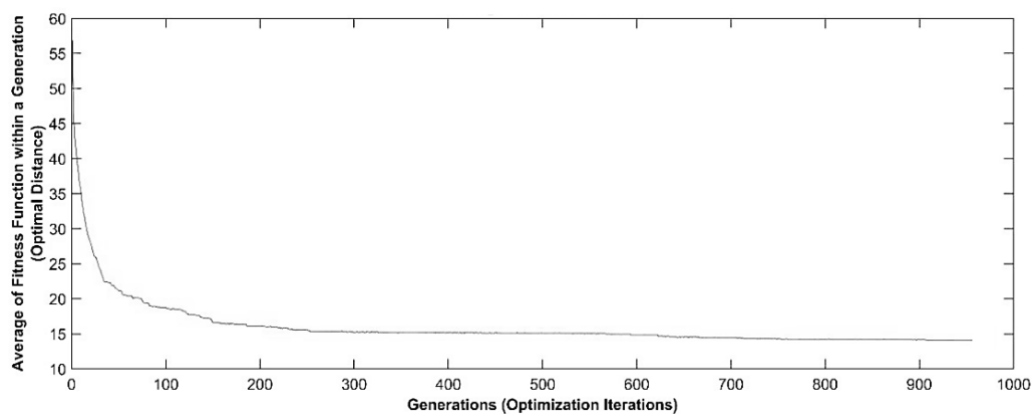


Figure 5: Optimal distance of all individuals in each generation for transit time calculation.

4. Conclusions and Recommendations

Transit time distribution of electrons is characterized by the concept of time resolution. The time resolution depends on many parameters such as the angle and energy of the electron beam. In this study, transit time distributions were determined using the genetic algorithm (GA) method. A genetic algorithm is a research method that attempts to find a solution in a group by using random

search techniques and thus chooses the best solution among many solutions. In this study, the best solution hyper parameters were determined to be uniform crossover with a rate of 0.75 and mutation rate of 0.01. The results of this study indicate that genetic algorithm gives the time resolution values in a wide data set with high accuracy. The results show that genetic algorithms (GA) are a fascinating approach for solving search and optimization problems. Hyper parameters and types of genetic algorithm were obtained using trial and error methods, in this study. This algorithm makes it possible to determine the time resolution parameter significantly more accurately and efficiently than the approximate methods.

Acknowledgments

The authors would like to thank Ali Hakan ISIK and Mehmet BILEN for helpful discussions.

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. This study was presented at the 2nd International Symposium on Characterization.

References

- Baguenard B., Wills J. B., Pagliarulo F., Lépine F., Climen B., Barbaire M., Clavier C., Lebeault M. A., Bordas C., (2004). Velocity-map imaging electron spectrometer with time resolution, *Rev Sci Instrum* 75, 324–328.
- Caprari, R. S., (1995). Exit position and transit-time analysis of hemispherical electrostatic analysers, *Measurement Science & Technology*, 6(7), 1063–1064.
- Davis, L., (1991). Handbook of genetic algorithms,
- Dogan, M., Sise O., Ulu M., (2007). Design of electron energy analyzers for electron impact studies, *Radiation Physics and Chemistry* 76 445-449.
- Goldberg, D.E., (1989). Genetic algorithms in search optimization and machine learning. Addison Wesley, Reading Menlo Park.
- Goldberg, D.E., Holland, J.H. (1988). Genetic algorithms and machine learning. *Machine learning*; 3: 95-99.
- Hedde, D.W.O., (2000). Electrostatic Lens Systems, IOP Press, London,
- Imhof, R. E., Adams A., King G. C., (1976) Energy and time resolution of the 180 degrees hemispherical electrostatic analyser, *Journal of Physics E* 9 138.
- Ince, M., Isik, N., (2020) Optimization of Base Energy Resolution in Hemispherical Deflector Analyzer by using Genetic Algorithm, *Celal Bayar University Journal of Science* 16 345-349.
- Isik N., (2016). Determination of Electron Optical Properties for Aperture Zoom Lenses Using an Artificial Neural Network Method, *Microscopy and Microanalysis* 22 458-462.

- Isik, A.H. (2015a). The investigation of electron-optical parameters using artificial neural networks. *Acta Phys Pol A* 127, 1317–1319.
- Isik, A.H. (2015b). Prediction of two-element cylindrical electrostatic lens parameters using dynamic artificial neural network *Acta Phys Pol A* 127, 1717–1721.
- Isik, A.H., Isik N., (2016a). Time Series Artificial Neural Network Approach for Prediction of Optical Lens Properties 129 514-516.
- Isik, N., Isik, A. H., Sise O., Guvenc U., (2017). Prediction of First Order Focusing Properties of Ideal Hemispherical Deflector Analyzer Using Artificial Neural Network”, *APhysPolA*,131,
- Isik, N., Isik, A.H., (2016b). Classification of Electron Gun Operation Modes Using Artificial Neural Networks, *Acta Phys. Pol. A* 129, 628
- Jiang, J., Chen M. and Fan J. A. (2020). Deep neural networks for the evaluation and design of photonic devices, *Nature Reviews Materials*, 6(8).
- Kugeler, O., Marburger S., and Hergenbahn U., (2003). Calculation and measurement of the time-of-flight spread in a hemispherical electron energy analyzer, *Review of Scientific Instruments*, vol. 74, no. 9, pp. 3955–3961,
- Lower, J., Weigold E., Improved techniques in multiparameter coincidence experiments, *Journal of Physics E* 22 (1989) 421.
- Paszkowicz, W. (2009). Genetic Algorithms, a Nature-Inspired Tool: Survey of Applications in Materials Science and Related Fields, *Materials and Manufacturing Processes*, 24(2), 174-197,
- Shavorskiy, A., Nepl, S. and Slaughter D. S., Cryan James P., Siefermann Katrin R., Weise Fabian, Lin Ming-Fu, Bacellar Camila, Ziemkiewicz Michael P., Zegkinoglou Ioannis, Fraund Matthew W., Khurmi Champak., Hertlein Marcus P., Wright Travis W., Huse Nils, Schoenlein Robert W., Tyliczszak Tolek, Coslovich Giacomo, Robinson Joseph, Kaindl Robert A., Rude Bruce S., Ölsner Andreas, Mähl Sven, Bluhm Hendrik, and Gessner Oliver (2014). Sub-nanosecond time-resolved ambient-pressure X-ray photoelectron spectroscopy setup for pulsed and constant wave X-ray light sources, *Review of Scientific Instruments*, 85(9), 093102.
- Sise, O., Zouros T. J. M., (2016). Transit time spreads in biased paracentric hemispherical deflection analysers, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 369, 95-97.
- Sise, O. and Zouros T. J. M., (2015). Position, Energy, and Transit Time Distributions in a Hemispherical Deflector Analyzer with Position Sensitive Detector, *Journal of Spectroscopy*, 8, 1-20,
- Völkel, M., Sandner W., (1983). Optimisation of electron energy analysers for application in coincidence experiments, *Journal of Physics. E* 16 456-462.
- Yildirim M., Sise O., Dogan M., Kilic H. S., (2009). Designing multi-field linear time-of-flight mass spectrometers with higher-order space focusing, *Int. J. Mass Spect.* 291 1-12.
- Zouros, T. J. M., Benis E. P., (2005), Optimal energy resolution of a hemispherical analyzer with virtual entry, *Applied Physics Letters*, 1, 86-88.

Kare Kanatçıklı Isı Alıcıda Elektrosprey Soğutma ile Isı Transfer Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Abdüssamed KABAKUŞ^{1*} , Kenan YAKUT² 

Öz

Bu çalışmada literatüründe hakkında oldukça sınırlı çalışma olan elektrosprey soğutmada, elektrik geriliminin, soğutucu akışkan debisinin ve nozul çapının ısı alıcı üzerindeki ısı transfer performansına etkileri araştırılmıştır. Deneyler 20 mm ısı alıcı-nozul arası mesafede ve 1,88-2,02-2,19-2,4-2,59-2,75-2,99-3,2 kW/m² ısı akılarında gerçekleştirilmiştir. Soğutucu akışkan olarak etanol kullanılmıştır. 3,4-4,4-5,4 kV gerilimlerde, 0,1-0,2-0,3 ml/dk akışkan debilerinde ve 20-25-30 G nozul çaplarında deneyler yapılmıştır. Sonuç olarak nozul çapının azalması, soğutucu akışkan debisinin ve elektrik geriliminin artmasıyla ısı alıcı üzerinden gerçekleşen ısı transferinin arttığı belirlenmiştir. Herbir değişken parametre için farklı elektrosprey modu gözlemlenmiş, multi jet modunda etkili soğutma elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrosprey soğutma, ısı transferi, Weber Sayısı, Elektrik Weber Sayısı, Isı Alıcı

Determination of Heat Transfer Characteristics with Electrospray Cooling in a Square Fin Heat Sink

Abstract

In this study, the effects of electrical voltage, coolant fluid flow rate and nozzle diameter on the heat transfer performance on the heat sink were investigated in electrospray cooling, which has a very limited study in the literature. The experiments were carried out at a distance of 20 mm between the heat sink and the nozzle and heat fluxes of 1.88-2.02-2.19-2.4-2.59-2.75-2.99-3.2 kW/m². The experiments were carried out at a distance of 20 mm between the heat sink and the nozzle and heat fluxes of 1.88-2.02-2.19-2.4-2.59-2.75-2.99-3.2 kW/m². Ethanol was used as the coolant fluid. Experiments were carried out at voltages of 3.4-4.4-5.4 kV, flow rates of 0.1-0.2-0.3 ml/min and nozzle diameters of 20-25-30 G. As a result, it was determined that the heat transfer over the heat sink increased with the decrease in the nozzle diameter, the increase in the coolant fluid flow rate and the electrical voltage. Different electrospray mode was observed for each variable parameter, and effective cooling was obtained in multi-jet mode.

Keywords: Electrospray cooling, heat transfer, Weber Number, Electric Weber Number, Heat Sink

¹Artvin Çoruh Üniversitesi, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Artvin, Türkiye, akabakus@artvin.edu.tr

²Atatürk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye, kyakut@atauni.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0002-3049-9493>

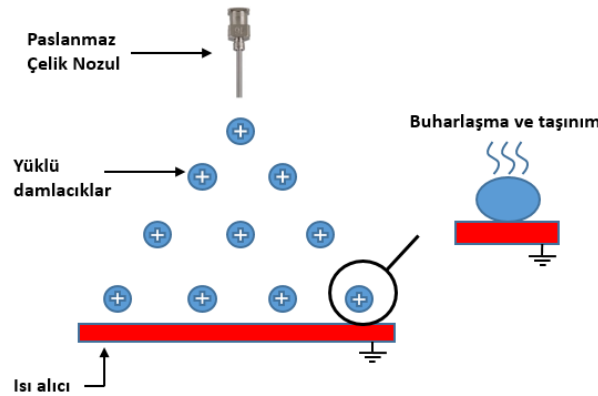
²<https://orcid.org/0000-0001-7822-2445>

1. Giriş

Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesine bağlı olarak kullanılan elektronik ve elektromekanik sistemlerin sayısı gittikçe artmaktadır. Bu sistemlerin ekonomik ömürlerinin uzun olması ve verimli çalışmaları için işletme sıcaklıklarının belirli bir sıcaklık seviyesinde tutulması gerekmektedir. Sistemlerin optimum sıcaklık değerinde tutulabilmesi için literatürde birçok soğutma metodu üzerine çalışmalar yapılmıştır. Çarpan hava jeti (Özakın ve Kabakuş, 2022) ve su jeti (Zhao ve ark., 2013) ile soğutma, mikro kanallar ile soğutma (Manay, 2018), ısı alıcılar ile soğutma (Yakut ve ark, 2015) ve sprej soğutma (Yeşildal ve ark, 2022) yaygın olarak kullanılan ve çalışılan soğutma yöntemleri arasında gösterilebilir.

Literatürde yer alan bu metodların yanında soğutma alanında özellikle son yıllarda hakkında çalışmaların yer aldığı elektrosprej soğutma, yüksek ısı akısı üreten sistemlerde ısı akısını uzaklaştırabilmek için kullanılacak etkin bir metottur (Yakut ve ark., 2021; Kabakuş ve ark., 2021).

Elektrosprej soğutma mekanizması şu şekilde açıklanabilir. Paslanmaz çelik nozul ile nozulun karşısına yerleştirilmiş elektrot (substrate) arasında oluşturulan elektrik gerilim farkı sonucunda nozul içerisindeki soğutucu akışkan yüzeyinde kabarcıklar meydana gelir. Elektrik geriliminin yeteri kadar artırılması sonucu elektriksel kuvvet, akışkanın yüzey gerilim kuvvetini yener ve soğutucu akışkan nozuldan atomize olmuş şekilde ayrılmaya başlar. Atomizasyonu gerçekleştirilen elektrik yüklü damlacıklar ısıtılmış yüzeye (substrate) çarptırılarak yüzeyde gerçekleşen buharlaşma ve taşınım ile ısıtıcı yüzey sıcaklığının düşmesine sebep olur (Karakaya, 2012). Bu olaya elektrosprej soğutma adı verilir (**Şekil 1**). Elektrosprej soğutmada kullanılan soğutucu akışkanlar elektriksel gerilimin etkisiyle atomizasyonu gerçekleşmesi için yüksek dielektrik sabiti, düşük yüzey gerilimine sahip olan akışkanlar arasından seçilir. Yüzeyden daha fazla ısının atılabilmesi için de soğutucu akışkanın düşük buharlaşma sıcaklığına sahip olması gerekir (Kabakuş, 2021).



Şekil 1. Elektrosprej soğutma fenomeni (Kabakuş, 2021)

Elektrosprey ile atomize edilen damlacıkların boyutlarının küçük olması, genelde aynı çapta damlacık oluşumu ve homojen damlacık dağılımının sağlanması, damlacıkların elektrik yüklü olmaları sebebiyle birbirleriyle temas etmeyişi, oluşturulan elektrik alanına göre damlacık hareketi ve yönünün kontrol edilebilir olması ve kolay uygulanabilir bir yöntem olması sebebiyle elektrospreyin oldukça avantajlı bir yöntem olduğu söylenebilir. (Badıllı ve Tarımcı, 2009; Deng ve Gomez, 2011).

Elektrosprey uygulanan gerilim, nozul çapı ve akışkan debisine bağlı olarak; damlama modu, iğ modu, koni jet modu ve multi jet modu olmak üzere farklı elektrosprey oluşum modlarında meydana gelmektedir (Cloupeau ve Prunet-Foch, 1994). Damlama modu, nozula gerilim uygulanmadığı durumda benzer şekilde yerçekimi kuvveti ve elektriksel kuvvetler, sıvının yüzey gerilim kuvvetini yenmesi sonucu akışkanın nozul çıkışında düzenli küreler halini almasıyla oluşur. İğ modu, nozula daha yüksek gerilim uygulanması sonucu nozul çıkışında oluşan damlacığın bir iğ şeklinde uzaması olayıdır. Koni jet modu, gerilimin daha da arttığı durumda nozulun ucunda Taylor konisi adı verilen bir koninin oluşup, sıvının bir miktar jet olarak ilerleyip atomize olma durumudur. Koni jet modunda oluşan damlacıklar diğer modlara göre daha karardır. Multi jet modunda, gerilimin yeteri kadar artırılması sonucu nozul ucunda oluşan koni kaybolup, nozul çıkışında birden çok sprej oluşumu gözlemlenir (Jaworek ve Krupa, 1999).

Elektrosprey soğutma ile ilgili yapılan çalışmalar son yıllarda artış göstermesine rağmen oldukça kısıtlıdır.

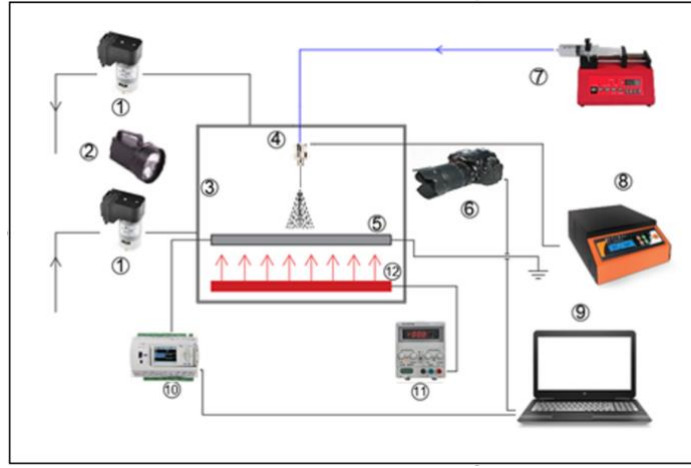
Gibbons ve Robinson (2017) tekli nozul ile koni jet modunda yaptıkları deneyler sonucunda, düşük debilerde elektrosprey soğutmanın konvansiyonel sistemlere göre %18,7 kat daha iyi ısı transferi elde edildiğini belirtmişlerdir. Xu ve ark. (2021) gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, farklı elektrosprey modlarının soğutmaya etkisini incelemişlerdir. Nozul ile ısı alıcı arasındaki gerilimin artırılmasıyla oluşan damlacıkların çaplarının küçüldüğünü ve hızlarının arttığını belirlemişlerdir. Elektrosprey soğutma ile gerilimin uygulanmadığı duruma göre yaklaşık 2,8 kat daha iyi ısı transferi gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Kim ve ark. (2020), sprej soğutmaya göre daha düşük pompa gücü gerektiren ve daha homojen damlacık dağılımı sağlayan elektrosprey soğutmanın ısı transfer performansını artırdığını ifade etmişlerdir. Elektrospreye uygulanan elektrik gerilim artışıyla ısı transferinin tek fazlı bölgede yaklaşık %12, geçiş bölgesinde ise yaklaşık %7 arttığı belirlemişlerdir. Yakut ve ark. (2021) Gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada soğutucu akışkan olarak izopropil alkol kullanmışlardır. İzopropil alkolün ısı akışı uzaklaştırmada oldukça etkin olduğunu ve elektrospreyle gerçekleşen ısı transferinin gerilimsiz oranda gerçekleşen ısı transferine oranını ifade eden iyileştirme oranını 1,75 olarak elde etmişlerdir. Yakut ve ark. (2021) bir diğer çalışmalarında, nozul ile ısı alıcı arasında oluşan gerilimin artışıyla partiküllerin hızının arttığını ve çaplarının küçüldüğünü ifade etmişlerdir. Sonuç olarak en yüksek iyileştirme oranını 1,9 olarak elde etmişlerdir.

Kabakuş ve ark. (2021) deneysel çalışmalarında elektrosprey soğutma performansının kanatçıklı ve kanatçiksız ısı alıcılardaki değişimini incelemişlerdir. Kanatçıklı ısı alıcıda kanatçiksız ısı alıcıya göre yaklaşık 1,3-1,6 kat daha iyi ısı transferi elde etmişlerdir. Boston ve ark. (2022) çalışmalarında, nozul açısının elektrosprey soğutmaya etkisini incelemişlerdir. 90° den 30° ye kadarki açı değişimlerinde ısı transferi performanslarının benzer olduğunu 30° den daha az açılarda ısı transferinde keskin bir düşüş olduğunu belirlemişlerdir. Sonuç olarak elektrosprey soğutmanın ulaştırılması zor yerlerde kullanımının ideal olduğunu belirlemişlerdir. Xu ve ark. (2022), HFE-7100 akışkanını etanol katı maddeleriyle iyileştirerek elektrospreyle soğutma performansını irdelemişlerdir. Nötr duruma göre elektrosprey ile yaklaşık 2,2 kat daha iyi soğutma elde etmişlerdir.

Literatürde henüz kendine yeni yer bulmaya başlayan elektrosprey soğutma ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalarda, nozul çapı, nozul sayısı, nozul açısı, soğutucu akışkan cinsi, elektrik gerilimi, soğutucu akışkan debisi gibi parametrelerin ısı transferine etkileri üzerinde durulmuştur. Bu çalışmaların çok büyük bölümünde ısı alıcı olarak düzlem plaka kullanılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmada, elektrosprey soğutma ile kare kanatçıklı ısı alıcı üzerinde gerçekleşen ısı transferini etkileyen parametrelerin (Gerilim, soğutucu akışkan debisi, nozul çapı) soğutucu akışkanın tam buharlaştığı durumda kare kanatçıklı ısı alıcı üzerindeki soğutma performansı araştırılmıştır. Ayrıca belirlenen deney parametrelerinde oluşan sprej modları görüntülenerek, farklı sprej modlarının ısı transferine etkisi irdelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, sabit şartlarda gerilimin, soğutucu akışkan debisinin ve nozul çapının elektrosprey soğutma ile kare kanatçıklı ısı alıcı üzerindeki ısı transferine etkileri araştırılmıştır. Deneyler 20 mm ısı alıcı-nozul arası mesafe ve 1,88-2,02-2,19-2,4-2,59-2,75-2,99-3,2 kW/m² ısı akılarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 30 G çapında paslanmaz çelik nozul kullanılmıştır. Isı alıcıya, mikro işlemciler ve elektronik devre elemanlarının soğutulması durumunda optimum çalışma sıcaklığı aralığı olan 45-100 °C sıcaklık değer aralığını sağlayacak şekilde ısı akıları uygulamıştır. Ayrıca belirlenen deney parametreleri ile ısı alıcı üzerinde soğutucu akışkan birikmesi önlenerek tam buharlaşma gerçekleşmesi sağlanmıştır. Deney düzeneğinin şematik görünümü **Şekil 2'** de verilmiştir.



Şekil 2. Deney düzeneği şematik görünümü

(1) Vakum pompası, (2) Stroboskop, (3) Sprey odası, (4) Nozul, (5) Isı alıcı, (6) Kamera, (7) Şırınga pompası, (8) Statik elektrik yükleyici, (9) Bilgisayar, (10) Data logger, (11) DC güç kaynağı, (12) Silikon ısıtıcı.

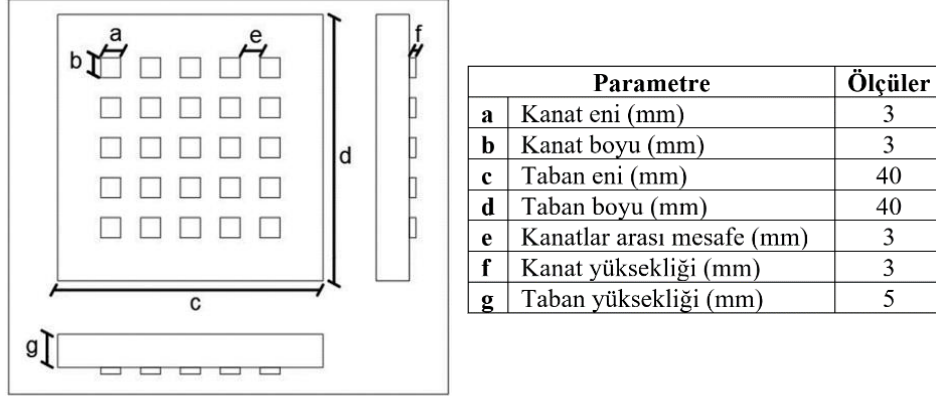
Deneylerde atomize edilecek soğutucu akışkan olarak yüksek dielektrik sabitine, düşük yüzey gerilimine ve düşük buharlaşma sıcaklığına sahip olan etanol kullanılmıştır. Etanolün fiziksel özellikleri **Tablo 1**' de verilmiştir.

Tablo 1. Etanolün fiziksel özellikleri (URL-1)

Fiziksel Özellik	Etanol
Kaynama noktası (C°)	78,3
Yoğunluk (kg/m ³)	790
Yüzey gerilimi (N/m)	0,0245
İletkenlik (pS/m)	130000

Etanol paslanmaz çelik nozula şırınga pompası (New Era, NE-300) ile sabit debide gönderilmiştir. Deneylerde 30 G ($d_i=0,15$ mm) çapında, 13 mm uzunluğunda paslanmaz çelik nozul kullanılmıştır. Nozul ile ısı alıcı (substrate) arasında sabit elektrik gerilimi oluşturmak için statik elektrik yükleyici olarak (Puls Electronic, HVDC-20) kullanılmıştır. DC güç kaynağı (Instek, GPS-3030DD) ile voltaj ve akım ayarı yapılarak silikon ısıtıcı ile ısı alıcıya 1,88-2,02-2,19-2,4-2,59-2,75-2,99-3,2 kW/m² ısı akıları uygulanmıştır. Isı akıları (q'') silikon ısıtıcı ile ısı alıcıya uygulanan güç değerinin birim alandaki değerini ifade etmektedir. Deneylerin dış ortam şartlarından etkilenmemesi ve statik elektrik yükleyicinin ürettiği yüksek gerilimden zarar görmemek için deneyler spray odasında gerçekleştirilmiştir. Spray odasına taze hava sağlanması için yan yüzeyinden iki adet, buharlaşan etanolün deşarjı için üst yüzeyinden 2 adet delik açılarak spray odası içerisindeki nem dengesi korunmuştur. Açılan delikler spray akışımı etkilemeyecek şekilde konumlandırılmıştır. Airpo D2028B marka vakum pompaları ile ortama taze hava takviyesi yapıp, buharlaşan akışkan deşarj edilmiştir. Deneylerde alüminyum 5000 serisinden imal edilmiş 40x40x5 mm taban ölçülerine sahip

kare kanatçıklı ısı alıcı kullanılmıştır. Kullanılan ısı alıcının geometrik özellikleri Şekil 3' de verilmiştir.



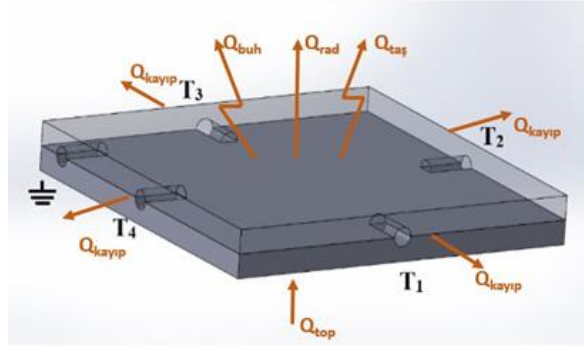
Şekil 3. Isı alıcı geometrik özellikleri

Isı alıcının üst yüzey dışındaki bütün yüzeyleri cam yünü izolasyonla yalıtılarak, ısı transferinin sadece üst yüzeyden gerçekleşmesi sağlanmıştır. Isı alıcının yan yüzeylerinin ortalarından açılan 5-10-15-20 mm derinliğindeki deliklere 4 adet ısı çift yerleştirilerek ısı alıcının sıcaklık ölçümleri homojen bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Ortam sıcaklığı ölçümü için spray odası içerisine 1 adet ısı çift yerleştirilmiştir. Kararlı hal sıcaklıkları Novus, Fieldlogger marka veri kaydedici ile okunarak bilgisayara aktarılmıştır. Oluşturulan spray modlarını görüntülemek için Nikon D90 kamera ve Nikon 18-105 lens kullanılmıştır. Spray görüntüleri karanlık ortamda Lutron DT-2199 stroboskop ile spray görüntüsü netleştirilerek gerçekleştirilmiştir.

2.1. Hesaplamalar

Isı alıcı üzerinden konvektif taşınım ($Q_{taş}$), ışıınım (Q_{rad}), buharlaşma (Q_{buh}) ve kayıplar ($Q_{kayıp}$) yolu ile ısı transferi gerçekleşmektedir (Şekil 4). Isı alıcı üzerinde gerçekleşen ısı transferi mekanizmalarının denklemi Eş. 1' deki gibidir.

$$Q_{top} = Q_{taş} + Q_{buh} + Q_{rad} + Q_{kayıp} \quad (1)$$



Şekil 4. Isı alıcıda gerçekleşen ısı transfer mekanizmaları

Isı alıcı yüzey alanının çok küçük oluşu ve düşük sıcaklık değerlerinde deneylerin yapılmış olması dikkate alınarak, sistemden ışınlam ile gerçekleşen ısı transferi hesabı yapılmış ve ısı alıcı yüzeyinden gerçekleşen ısı transfer miktarının %1' inden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Sistemden gerçekleşen ısı kayıpları hesaplandığında ısı alıcıdan gerçekleşen toplam ısı transfer miktarının %3 ünden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Sistemden ışınlam ve kayıplardan dolayı gerçekleşen ısı transfer miktarının ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmektedir. Radyasyon ve kayıplar ile gerçekleşen ısı transfer miktarı ihmal edildiğinde, ısı transfer denklemi Eş. 2' de gösterildiği şekilde ifade edilebilir.

$$Q_{top} = Q_{taş} + Q_{buh} \quad (2)$$

Isı alıcıya verilen toplam ısı miktarı (Q_{top}) DC güç kaynağından sağlanan akım (I) ve voltaj (V) değerinin çarpımına eşittir. Bu durumda ısı transfer denkleminin son hali Eş. 3' deki gibi olur.

$$Q_{top} = Q_{taş} + Q_{buh} = VI \quad (3)$$

Weber Sayısı, atalet kuvvetlerin yüzey gerilme kuvvetlerine oranıdır. Weber sayısının artışı daha küçük damlacık dağılımı oluşumunu ifade etmektedir (Yeşildal, 2014). Modifiye edilmiş Weber sayısı Eş.4' teki gibi ifade edilebilir. Modifiye edilmiş Weber Sayısının kullanılmasının sebebi, nozul çapı, soğutucu akışkan debisi ve nozul sayısı değişiminin atomizasyonu gerçekleşen partiküllerin çaplarına etkisini belirlemektir. (Wang ve Mamishev 2012). ρ akışkan yoğunluğunu, D_0 nozul dış çapı, σ akışkanın yüzey gerilimini, Q toplam hacimsel debiyi, D_i nozul iç çapını ve N ise nozul sayısını göstermektedir.

$$We = \frac{16 \rho D_0}{\sigma} \times \frac{Q^2}{(N \pi D_i^2)^2} \quad (4)$$

Elektrik Weber Sayısı, elektrik kuvvetlerinin yüzey gerilimine oranını ifade eder. Elektrik alanının akışı nasıl etkilendiğini belirlemek için kullanılır. Elektrik Weber Sayısı' nın artışıyla spray damlacıklarının ayrılmaları da artmaktadır (Eow ve ark., 2001). Elektrik Weber Sayısının belirlenmesi için Eş.5' daki eşitlik kullanılır (Wang ve Mamishev, 2012). D_0 nozul dış çapı, E_0 ortalama elektrik alan şiddeti, ε akışkan elektrik geçirgenliği ve σ akışkanın yüzey gerilimini ifade etmektedir.

$$We_E = \frac{\varepsilon E_0^2 D_0}{2\sigma} \quad (5)$$

Elektrik Weber Sayısı' nın hesap edilmesinde kullanılan elektrik alan eşitliği Eş.6' deki gibidir. r_0 nozul dış yarıçapını, H nozul – ısı alıcı arası mesafeyi, E_0 ortalama elektrik alan şiddeti, V ise uygulanan gerilimi ifade etmektedir (Zhong ve ark., 2009; Wang ve Mamishev 2012).

$$E_0 = \frac{\sqrt{2} V}{r_0 \ln\left(\frac{4H}{r_0}\right)} \quad (6)$$

Belirsizlik analizi Eş.7 kullanılarak yapılmıştır. Eşitlikteki (x_1, x_2, \dots, x_n) bağımsız değişkenleri, R bağımsız değişkenlerin fonksiyonunu, (w_1, w_2, \dots, w_n) bağımsız değişkenlerin belirsizliğini, w_R ise sistem belirsizliğini ifade etmektedir (Kline ve McClintock, 1953).

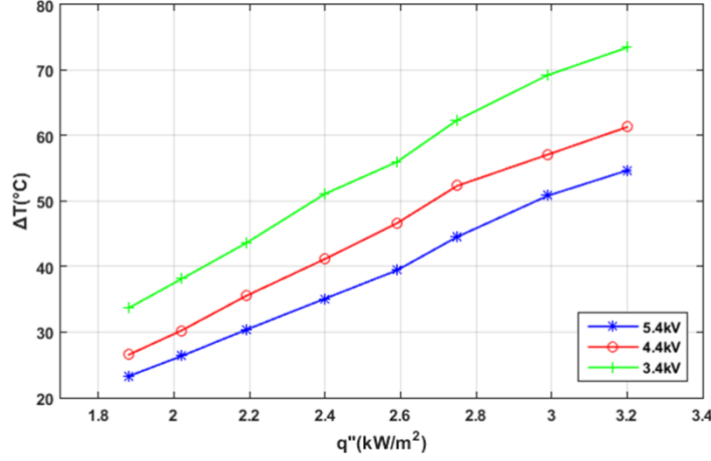
$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{0,5} \quad (7)$$

Yukarıda belirtilen eşitlik kullanılarak, deneysel belirsizlik Elektrik Weber Sayısı için (We_E) %2,95, Weber Sayısı (We) içinse %3,47 olarak hesaplanmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

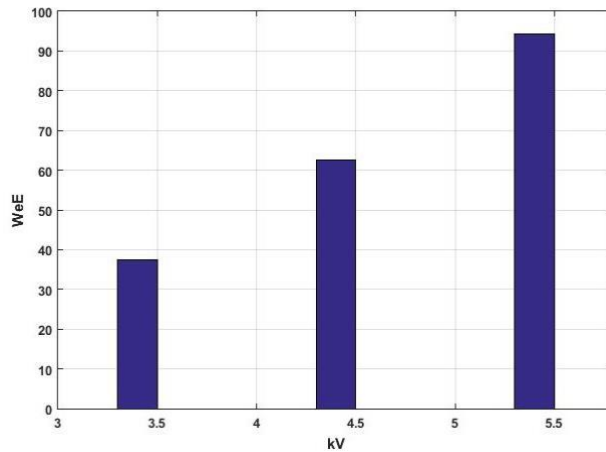
Kare kanatçıklı ısı alıcı üzerinde deneyler yapılarak, farklı değişken parametrelerin ısı transferine etkilerini araştırılmıştır. İlk olarak 0,2 ml/dk debi, 30 G nozul çapı, 20 mm nozul ısı alıcı arası mesafe ve sekiz farklı ısı akısında gerilimin ısı transferine etkisini görebilmek için üç farklı gerilimde (3,4-4,4-5,4 kV) deneyler yapılmıştır. Şekil 5' te de görüldüğü gibi üç farklı gerilim için en iyi soğutma 5,4 kV elektrik gerilimi için gerçekleşmiştir. Gerilimin artışıyla ısı transfer miktarı da artmıştır. Grafikte x eksenini ısı alıcıya uygulanan ısı akısını, y ekseninde yer alan sıcaklık farkı ifadesi (ΔT) ise ısı alıcı yüzeyinin ortalama sıcaklığı ile ortam sıcaklığının farkını ifade etmektedir.

En yüksek ısı akısında 3,4 kV gerilime göre, 4,4 kV gerilimde %17, 5,4 kV gerilimde ise %25 daha iyi soğutma elde edilmiştir. En düşük ısı akısında ise 3,4 kV gerilime göre, 4,4 kV gerilimde %21, 5,4 kV gerilimde ise %31 daha iyi soğutma elde edilmiştir.



Şekil 5. Kare ısı alıcıda farklı gerilimler için ısı akısı-sıcaklık değişim grafiği

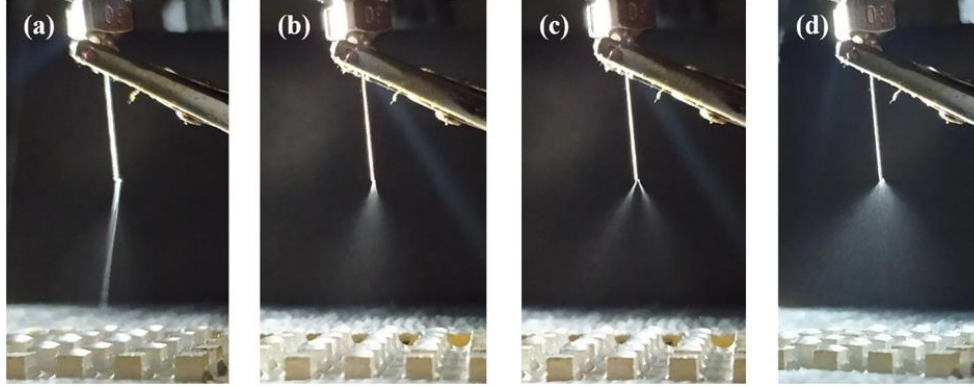
Elektrik geriliminin değişiminin partikül boyutuna etkisini karakterize eden Elektrik Weber Sayısı değişimi Şekil 6' da verilmiştir. Gerilim artışıyla We_E artış göstermiştir. We_E artışıyla nozuldan çıkış yapan soğutucu akışkanda damlacık ayrışması artarak daha küçük partiküller elde edilmiştir. Elektrik Weber Sayısı 3,4 kV gerilime göre, 4,4 kV gerilimde %40, 5,4 kV gerilimde %60 artış göstermiştir.



Şekil 6. Weber elektrik sayısının gerilimle değişim grafiği

Elektrik gerilim artışının ısı alıcı üzerinde daha iyi bir soğutmaya gerçekleştirmesinin sebebi, akışkana uygulanan yüksek voltajın artışıyla sprey atomizasyonun iyileşmesi ve daha küçük partikül çapı elde edilebilmesidir. Partikül çapı küçüldükçe, ısı alıcı yüzeyine çarpan sıvı partikülleri daha kolay buharlaşıp daha hızlı ısı atımına sebep olmaktadır. Alınan sprey görüntülerinde, 3,4 kV

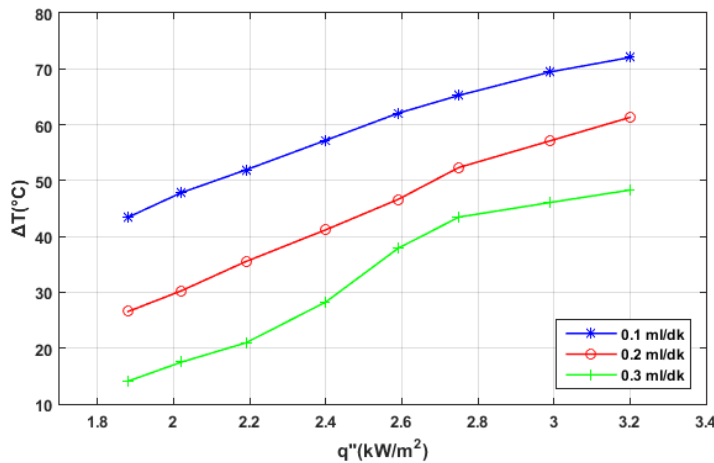
gerilimde koni jet modu, 4,4 kV gerilimde kararsız multi jet modu ve 5,4 kV gerilimde multijet modu oluşumu gözlenmiştir (Şekil 7). Koni jet modu kararlı partikül çapı ve stabil akış imkanı sunmasına rağmen, elektrik gerilim artışı ile oluşan multi jet modunda daha küçük partiküller oluşmuş ve daha iyi soğutmaya sebep olmuştur.



Şekil 7. Kare ısı alıcıda (a) 3.4 kV, (b-c) 4.4 kV, (d) 5.4 kV gerilimleri için elektrosprey oluşumu

4,4 kV gerilim, 30 G nozul çapı, 20 mm nozul ısı alıcı arası mesafe, sekiz farklı ısı akısı ile gerilimin ısı transferine etkisini görebilmek için 0,1-0,2-0,3 ml/dk olmak üzere üç farklı debide deneyler yapılmıştır. Soğutma performansının en iyi gerçekleştiği debi 0,3 ml/dk olarak belirlenmiştir. Şekil 8 incelendiğinde akışkan debisinin artışıyla soğutmanın iyileştiği görülmektedir.

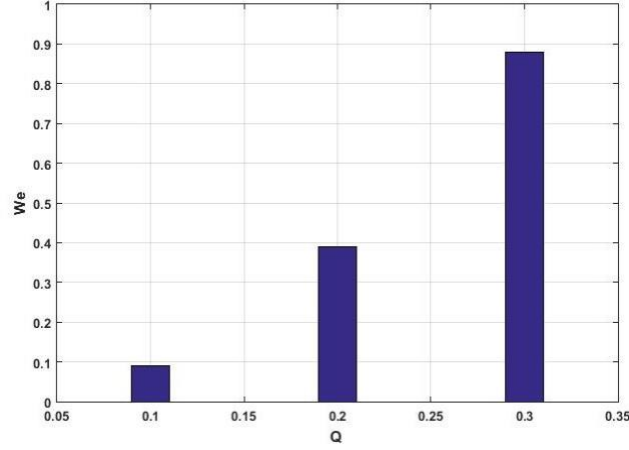
En yüksek ısı akısında 0,1 ml/dk debiye göre, 0,2 ml/dk debide %15, 0,3 ml/dk debide ise %33 daha iyi soğutma elde edilmiştir. En düşük ısı akısında ise 0,1 ml/dk debiye göre, 0,2 ml/dk debide %40, 0,3 ml/dk debide ise %67 daha iyi soğutma elde edilmiştir.



Şekil 8. Kare ısı alıcıda farklı debiler için ısı akısı-sıcaklık değişim grafiği

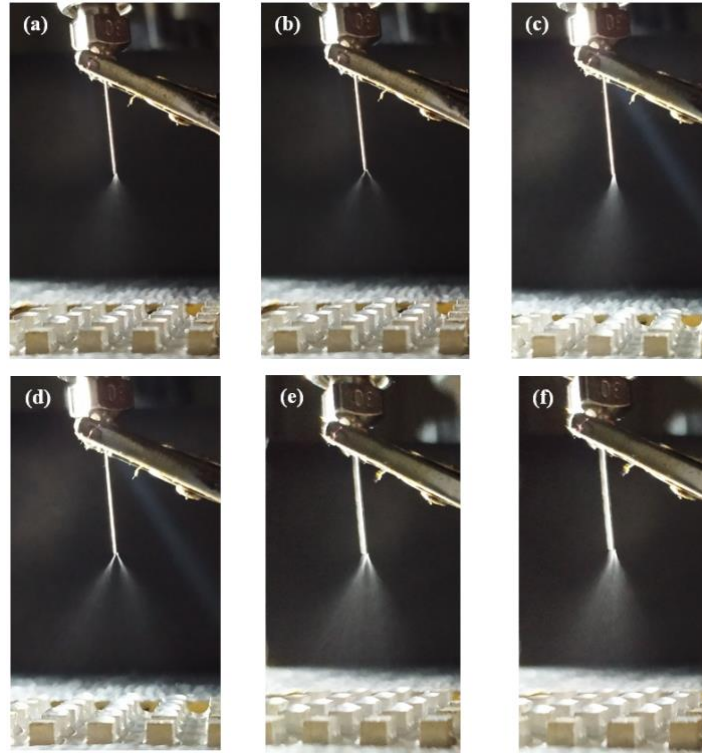
Debi değişiminin partikül boyutuna etkisini incelemek için Weber Sayısı hesaplanmıştır. Soğutucu akışkan debisinin artışıyla We sayısı artış göstermiştir. We sayısı artışıyla nozuldan çıkış yapan soğutucu akışkanın atomizasyonu iyileşmiştir ve bu sayede ısı alıcı yüzeyinden atılan ısı

miktarı artmıştır. Weber Sayısı 0,1 ml/dk debiye göre, 0,2 ml/dk debide %75, 0,3 ml/dk debide %89 artış göstermiştir (**Şekil 9**).



Şekil 9. Weber sayısının debiyle değişim grafiği

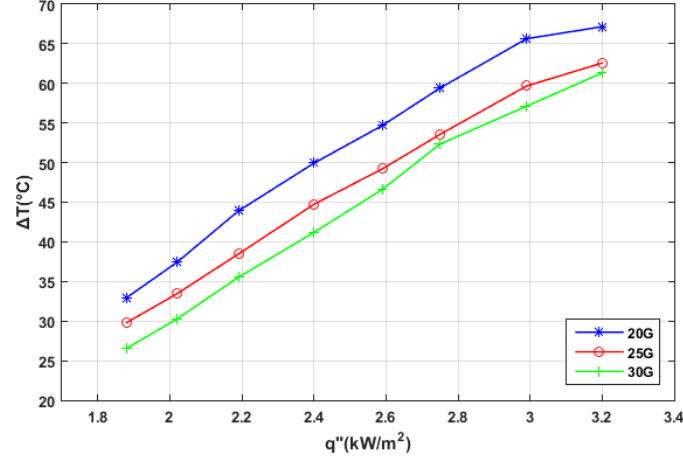
Farklı debilerde yapılan deneyler için alınan elektrosprey görüntüleri **Şekil 10**' da verilmiştir. Çalışılan üç debide de elektrosprey modunun kararsız multi jet modunda olduğu, 0,3 ml/dk debide diğer debilere kıyasla kararlı duruma daha yaklaştığı görülmektedir. Debinin artışı atomize olan partikül miktarını artırmış ve partiküllerin buharlaşması sonucu ısı alıcı üzerinden daha fazla ısı uzaklaştırılarak daha iyi bir soğutma gerçekleşmiştir.



Şekil 10. Kare kanatçıklı ısı alıcıda (a-b) 0,1 ml/dk, (c-d) 0,2 ml/dk, (e-f) 0,3 ml/dk debileri için elektrosprey oluşumu

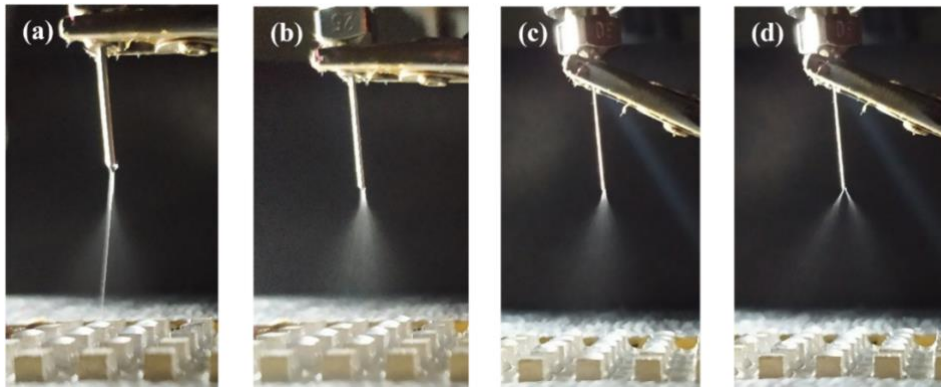
20-25-30 G nozul çaplarında, kare kanatçıklı ısı alıcıda yapılan deneylerde gerçekleşen soğutma grafiği Şekil 11' de verilmiştir. En iyi soğutmanın 30 G nozul çapında gerçekleştiği, nozul çapı azaldıkça ısı alıcı yüzeyinden gerçekleşen ısı transferi arttığı belirlenmiştir.

En yüksek ısı akısında 20 G nozul çapına göre, 25 G nozul çapında %7, 30 G nozul çapında ise %9 daha iyi soğutma elde edilmiştir. En düşük ısı akısında ise 20 G nozul çapına göre, 25 G nozul çapında %10, 30 G nozul çapında ise %19 daha iyi soğutma elde edilmiştir. Düşük ısı akılarında yüksek ısı akılarına göre daha iyi ısı transferi gerçekleştiği belirlenmiştir.



Şekil 11. Kare kanatçıklı ısı alıcıda farklı nozul çapları için ısı akısı-sıcaklık değişim grafiği

Farklı nozul çapları için yapılan deneyler sonucu nozul çapının düşmesiyle koni jet modundan multi jet moduna geçiş evreleri Şekil 12' de görülmektedir. Nozul çapı düştükçe sprej atomizasyonun daha da iyileştiği belirlenmiştir. Atomizasyonun iyileşmesi neticesinde ısı alıcıdan gerçekleşen ısı transferinde artış meydana gelmiştir. 20 G nozul çapında belirgin bir koni jet modu oluşurken, 25 G nozul çapında taylor konisi daralmış fakat koni jet modu devam etmiş, 30 G nozul çapında ise elektrosprej multi jet moduna geçiş yapmıştır.



Şekil 12. Kare kanatçıklı ısı alıcıda (a) 20 G, (b) 25 G, (c-d) 30 G nozul çapları için elektrosprej oluşumu

4. Sonuçlar ve neriler

Elektrosprey soğutma ile kare kanatçıklı ısı alıcıda soğutucu akışkan debisinin, elektrik geriliminin ve nozul çapının etkilerini araştırmak için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Sonuç olarak;

- Elektrik gerilimi arttıça spreyc partiklerinin boyutlarının küçüldüğü, buna bağlı olarakda ısı alıcıdan gerçekleşen ısı transfer miktarının önemli ölçüde arttığı belirlenmiştir. Gerilim artışı ile elektrosprey modu koni jet modundan multijet moduna geçiş yapmıştır.
- Soğutucu akışkan debisinin artışı, ısı alıcı üzerine düşen partikül miktarını artırmış ve ısı alıcıda gerçekleşen soğutma performansını artırmıştır. Çalışılan her debide elektrosprey modunun kararsız multijet modu olduğu belirlenmiştir.
- Nozul apı azaldıkça ısı alıcıdan uzaklaştırılan ısı miktarı artmıştır. Nozul apı azaldıkça elektrosprey modunun koni jet modundan multijet moduna geçiş yaptığı belirlenmiştir.
- Gerçekleştirilen bu çalışmada değişken parametrelerin ısı transferi üzerine etkileri ayrı ayrı irdelenmiştir. Deneyc parametreleri farklı varyasyonlar için belirlenip deneyler yapılarak parametrelerin kendi aralarındaki birleşik etkileri belirlenebilir. Ayrıca deneylerde soğutucu akışkan olarak fiziksel özellikleri sebebiyle etanol kullanılmıştır. Elektrosprey oluşumuna elverişli farklı akışkanlar ile deneyler yapılarak ısı transfer performansları incelenebilir.

Teşekkür

Bu alışma Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FBA-2018-6965 numaralı proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Atatürk Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne teşekkür ederiz

Yazarların Katkısı

Bu alışma Prof. Dr. Kenan YAKUT danışmanlığında 14.09.2021 tarihinde tamamladığımız “Isı alıcılarda elektrosprey soğutma analizi” başlıklı doktora tezinin bir bölümü kullanılarak hazırlanmıştır.

ıkar atışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar atışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Badıllı, U., Tarımcı, N. (2009). Elektrosprey püskürtme yöntemi ve nanoteknolojideki uygulamaları. *Ankara Eczacılık Fakültesi Dergisi*, 38, 117-135.
- Boston, L., Huang, P., Chiarot, P. (2022). Effect of nozzle orientation on electrospray cooling. *Applied Thermal Engineering*, (210), 118360. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118360>
- Cloupeau M., Prunet-Foch B. (1994). Electrohydrodynamic spraying functioning modes: a critical review. *Journal of Aerosol Science*, 25 (6), 1021–1036. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(94\)90199-6](https://doi.org/10.1016/0021-8502(94)90199-6)
- Deng, W., Gomez, A. (2011). Electrospray Cooling for Microelectronics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 2270-2275. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.02.038>
- Eow, J. S., Ghadiri, M., Sharif, A. (2001). Deformation and break-up of aqueous drops in dielectric liquids in high electric fields. *Journal of Electrostatics*, (51-52), 463-469. [https://doi.org/10.1016/S0304-3886\(01\)00035-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3886(01)00035-3)
- Gibbons, M.J., Robinson, A.J. (2017). Heat transfer characteristics of single cone-jet electrosprays. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (113), 70-83.
- Jaworek, A., Krupa, A. (1999). Classification of the modes of EHD spraying, *Journal of Aerosol Science*. 30 (7), 873–893. [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(98\)00787-3](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(98)00787-3)
- Kabakuş, A. (2021). Isı alıcılarda elektrosprey soğutma analizi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.
- Karakaya, M. C. (2012). Elektrosprey enjeksiyon sistemi tasarımı ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Kim, Y., Jung, S., Kim, S., Choi, S.T., Kim, M., Lee, H. (2020). Heat transfer performance of water-based electrospray cooling. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, (118), 104861. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104861>
- Kline, S.J., McClintock, F.A. (1953). Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mechanical Engineering*, (75), 3-8.
- Manay, E. (2018). Çoklu Mikrokanallarda Ferroakışkanların Isı Transferi ve Basınç Düşümü Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(4), 247-258. DOI: 10.21597/jist.398234
- Özakın, A. N., Kabakuş, A. (2022). Düzlem yüzey ısı alıcılarda tekli ve çoklu hava jetinin ısı ve akış karakteristiklerine etkisinin sayısal analizi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12 (3) , 839-847 . DOI: 10.17714/gumusfenbil.1020711
- URL-1: <https://www.interlab.com.tr/assets/upload/services/document/920-026-ethanol-absolute64-17-5-en-r-2-pdf24062022094202.pdf>, (Erişim tarihi: 10.02.2023)
- Wang, H., Mamishev, A.V. (2012). Heat transfer correlation models for electrospray evaporative cooling chambers of different geometry types. *Applied Thermal Engineering*, (40), 91-101. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.01.061>
- Xu, H., Wang, J., Li, B., Yu, K., Wang, H., Tian, J., Li, B. (2022). Electrospray characteristics and cooling performance of dielectric fluid HFE-7100. *Energy*, (259), 125072. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125072>
- Xu, H., Wang, J., Li, B., Yu, K., Tian, J., Wang, D., Zhang, W. (2021). Effect of spray modes on electrospray cooling heat transfer of ethanol, *Applied Thermal Engineering*, (189), 116757. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116757>
- Yakut, R., Yakut, K., Sabolsky, E., Kuhlman, J. (2021). Experimental determination of cooling and spray characteristics of the water electrospray. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, (120), 105046. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.105046>

- Yakut, R., Yakut, K., Sabolsky, E., Kuhlman, J. (2021). Determination of heat transfer and spray performances of isopropyl alcohol electro-spray. *Sensors and Actuators A: Physical*, 332(1), 113135. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.113135>
- Yakut, K., Kabakuş, A., Yeşildal, F., Karabey, A., Kanal akışında optimize edilmiş ısı alıcıların çarpan jetle ısı transferi ve akış karakteristikleri analizi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31(1), 43-55.
- Yeşildal, F. (2014). *Sprey soğutmada ısı ve akış karakteristiklerinin belirlenmesi*. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye.
- Yeşildal, F., Özakın, A. N., Yakut, K. (2022). Optimization of operational parameters for a photovoltaic panel cooled by spray cooling. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 100983. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.04.002>
- Zhao, Z., Peles, Y., Jensen, M. K. (2013). Water jet impingement boiling from structured-porous surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 63, 445-453. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.085>
- Zhong, X., Yi, R., Holliday, A.E., Chen, D.D. (2009). Field distribution in an electro-spray ionization source determined by finite element method. *Rapid Communications In Mass Spectrometry*, (23), 689-697. DOI: 10.1002/rcm.3914

Otomatik Gerilim Regülatörü Sistemi için Farklı Optimizasyon Teknikleri Ayarlı Denetleyici Tasarımı

Özay CAN^{1*} 

Öz

Otomatik gerilim regülatörü (OGR), güç sistemlerindeki senkron generatörün uç gerilimini kontrol etmek ve düzenlemek amacıyla kullanılan önemli bir kontrol sistemidir. Bu amaçla, bu çalışmada, OGR sistemi için çeşitli meta-sezgisel optimizasyon teknikleri ayarlı denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. OGR sisteminde denetleyici olarak oransal – integral – türev (PID) denetleyici kullanılmıştır ve bu denetleyicinin parametreleri son yıllarda geliştirilmiş olan açlık oyunları algoritması (HGS), INFO algoritması ve goril birlikleri optimizasyonu (GTO) gibi optimizasyon teknikleri yardımıyla optimal olarak ayarlanmıştır. Amaçlanan optimizasyon teknikleri ayarlı PID denetleyicisinin geçici zaman performansları simülasyon çalışmaları yardımıyla incelenmiştir ve aşma değeri, yükselme süresi, yerleşme süresi gibi performans değerleri açısından karşılaştırılmıştır. Ek olarak, denetleyiciler arasında kutup/sıfır analizi, bode analizi ve gürbüzlük analizi açısından karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan PID denetleyicinin parametrelerinin ayarlanması amacıyla kullanılan HGS, INFO ve GTO optimizasyon tekniklerinin birbirine yakın ve dikkate değer performans gösterdiği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Otomatik gerilim regülatörü, PID denetleyici, Açlık oyunları algoritması, INFO algoritması, Goril birlikleri optimizasyonu.

The Controller Design Tuned by Numerous Optimization Techniques for Automatic Voltage Regulator System

Abstract

The automatic voltage regulator (AVR) is an important control system used to control and regulate the terminal voltage of the synchronous generator in power systems. For this purpose, in this study, various meta-heuristic optimization techniques tuned controller design for the AVR system has been carried out. A proportional – integral – derivative (PID) controller is used as the controller in the AVR system and the parameters of this controller are optimally adjusted using optimization techniques such as the hunger games algorithm (HGS), INFO algorithm and gorilla troops optimization (GTO) developed in recent years. The transient time performances of the PID controller tuned to the proposed optimization techniques were investigated with the help of simulation studies and compared in terms of performance values such as overshoot, rise time, settling time. In addition, comparisons were made between the controllers in terms of pole/zero analysis, bode analysis and robustness analysis. From the results obtained, it is seen that the HGS, INFO and GTO optimization techniques used for adjusting the parameters of the PID controller have close to each other and remarkable performance.

Keywords: Automatic voltage regulator, PID controller, Hunger games algorithm, INFO algorithm, Gorilla troops optimization.

¹Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Rize, Türkiye, ozay.can@erdogan.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0003-1802-3502>

1. Giriş

Senkron generatörlerin uyarım kontrolü, güç sistemlerinin kararlılığını ve elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden birisidir. Otomatik gerilim regülatörü (OGR), senkron generatörün uç gerilimini belirlenen değerler arasında tutmak amacıyla kullanılan bir kontrol sistemidir. Uç gerilimi, generatörün uyarıcı gerilimi değiştirilerek kontrol edilmektedir. Generatör alan sargılarındaki yüksek empedans ve yük değişimi gibi nedenlerden dolayı regülatörün kararlı ve hızlı çalışması zorlaşmaktadır. Bu nedenle, güç sistemlerindeki generatörlere OGR eklenmesi gerekmektedir. Buna rağmen, OGR sistemi salınımlı geçici cevap, maksimum aşma ve kalıcı durum hatası gibi problemlere sahiptir. Bu problemler, OGR sisteminin bir denetleyici ile kontrol edilmesiyle ortadan kaldırılmalıdır.

Basit yapıda olması ve kolay uygulanabilirliği gibi özellikleri nedeniyle oransal – integral – türev (PID) denetleyiciler OGR sisteminde en sık kullanılan denetleyici çeşididir (Bhullar et al., 2020; Burnaz & Ayas, 2020; Çelik, 2018; İzci & Ekinici, 2021; Micev, Čalasan, & Oliva, 2021; Mosaad et al., 2019). PID denetleyicinin K_p , K_i ve K_d olmak üzere üç adet parametresinin optimal olarak belirlenmesi karmaşık bir problemdir. Bu problem, Ziegler-Nichols ve Cohen-Coon (CC) gibi geleneksel yöntemler veya deneme yanılma yolu ile çözülebilir. Ancak, bu iki yöntem optimal değerleri bulamayabilir ve sistemde uzun süreli salınımlara ve istenmeyen aşmalara neden olmaktadır (Ayas ve Sahin, 2021; Hekimoğlu, 2019). Bu nedenle, araştırmacılar PID parametrelerini ayarlamak amacıyla böbrek ilhamlı algoritma (IKA) (Ekinici & Hekimoğlu, 2019), simbiyotik organizma arama algoritması (SOS) (Çelik ve Durgut, 2018), atom arama optimizasyonu (ASO) (Özgenç ve ark., 2020), yerçekimi arama algoritması (GSA) (Duman ve ark., 2016), hayalet vatoz arama algoritması (MRFO) (Micev ve ark., 2021b), ağaç tohumu algoritması (TSA) (Kose, 2020) gibi çeşitli optimizasyon teknikleri kullanmıştır. Buna ek olarak, PID denetleyici ile kıyaslandığında λ ve μ olmak üzere iki adet fazla parametreye sahip olan kesir dereceli PID (FOPID) denetleyiciler (Jumani ve ark., 2020; Khan ve ark., 2019; Micev ve ark., 2020), PIDD² denetleyiciler (Ekinici et al., 2023; İzci et al., 2023; Micev, Čalasan, & Radulović, 2021) ve kesir dereceli PIDD² (FOPIDD²) (Tabak, 2021) denetleyiciler OGR sistemlerinde tercih edilmektedir. Ancak, söz konusu çalışmaların sayısı PID denetleyicilere kıyasla daha az sayıdadır.

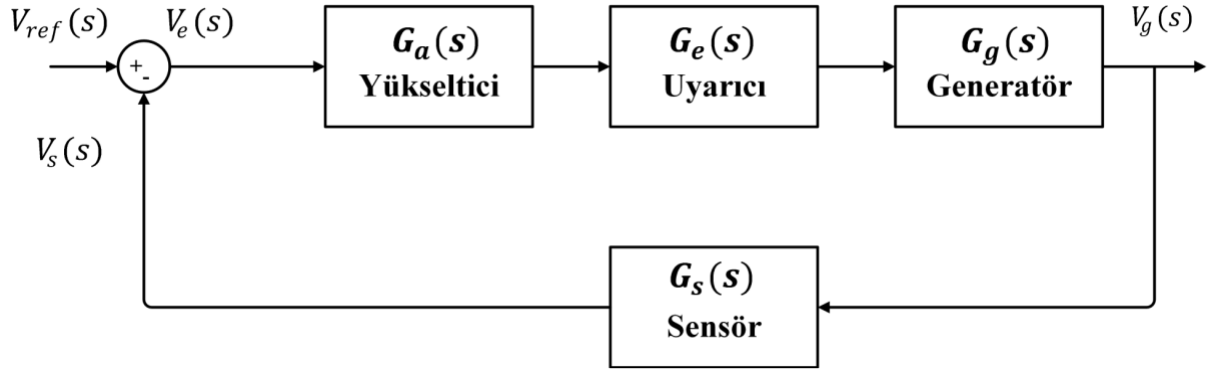
Konu ile ilgili literatür araştırmasından görüldüğü üzere, OGR sisteminde kullanılan denetleyici kadar bu denetleyicinin parametrelerinin optimal olarak ayarlanması amacıyla kullanılan optimizasyon tekniği de dikkate değer sonuçlar alma noktasında büyük önem arz etmektedir. Ancak OGR sisteminde şu ana kullanılan optimizasyon tekniklerinin tam olarak istenen performansı sağladığı söylenemez. Bu doğrultuda, OGR sisteminde sıkça kullanılan PID denetleyicinin parametrelerinin yeni optimizasyon teknikleriyle belirlenmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu

çalışmada, açlık oyunları algoritması (HGS), INFO algoritması ve goril birlikleri optimizasyonu (GTO) gibi yeni geliştirilmiş ve daha önce OGR sisteminde kullanılmamış olan optimizasyon yöntemleri yardımıyla PID denetleyicinin parametrelerinin ayarlanması amaçlanmıştır. Söz konusu optimizasyon teknikleri ayarlı PID denetleyicinin performansı geçici durum analizi, kutup/sıfır analizi, bode analizi ve gürbüzlük analizi gibi durumlar altında incelenmiştir ve üç yöntemin de sistemin aşma değeri, yükselme süresi ve yerleşme süresi bakımından birbirine yakın ve dikkate değer sonuçlar verdiği görülmüştür.

Çalışmanın geri kalan kısımları şu şekilde oluşturulmuştur: OGR sistemi modeli hakkında bilgi Bölüm 2’de verilmiştir. PID denetleyicinin parametrelerini ayarlamak amacıyla kullanılan optimizasyon teknikleri Bölüm 3’te verilmiştir. Bölüm 4’te simülasyon çalışmaları ve bulgular verildikten sonra Bölüm 5’te çalışma sonlandırılmıştır.

2. PID Denetleyicili OGR Sistemi

Denetimsiz bir OGR sistemi, Şekil 1’de gösterildiği gibi, yükseltici, uyarıcı, generatör ve sensör olmak üzere dört farklı bileşenden meydana gelmektedir. Bu bileşenlerin her biri bir kazanç (K) ve bir zaman sabitinden (τ) oluşan birinci dereceden transfer fonksiyonları ile temsil edilmektedir. Şekilde, $V_{ref}(s)$ referans giriş gerilimini, $V_s(s)$ sensör çıkış gerilimini, $V_e(s)$ hata gerilimini ve $V_g(s)$ generatör çıkış gerilimini ifade etmektedir.



Şekil 1. Denetimsiz OGR sistemi modeli.

Tablo 1. OGR sistem bileşenlerinin transfer fonksiyonları ve parametreleri.

Bileşen	Transfer fonksiyonu	Kazanç aralığı	Zaman sabiti aralığı
Yükseltici	$G_a(s) = \frac{K_a}{1 + \tau_a s}$	$10 \leq K_a \leq 40$	$0,02 \leq \tau_a \leq 0,1$
Uyarıcı	$G_e(s) = \frac{K_e}{1 + \tau_e s}$	$1 \leq K_e \leq 10$	$0,4 \leq \tau_e \leq 1$
Generatör	$G_g(s) = \frac{K_g}{1 + \tau_g s}$	$0,7 \leq K_g \leq 1$	$1 \leq \tau_g \leq 2$
Sensör	$G_s(s) = \frac{K_s}{1 + \tau_s s}$	$0,9 \leq K_s \leq 1,1$	$0,001 \leq \tau_s \leq 0,06$

Tablo 1’de OGR sistem bileşenlerinin transfer fonksiyonları ve parametre aralıkları verilmiştir. Yükseltici, uyarıcı, generatör ve sensör bileşenlerinin kazanç değerleri sırasıyla 10, 1, 1 ve 1 seçilmiştir. Ek olarak, bileşenlerin zaman sabiteleri sırasıyla 0,1 sn, 0,4 sn, 1 sn ve 0,01 sn olarak belirlenmiştir (Ekinci ve ark., 2022).

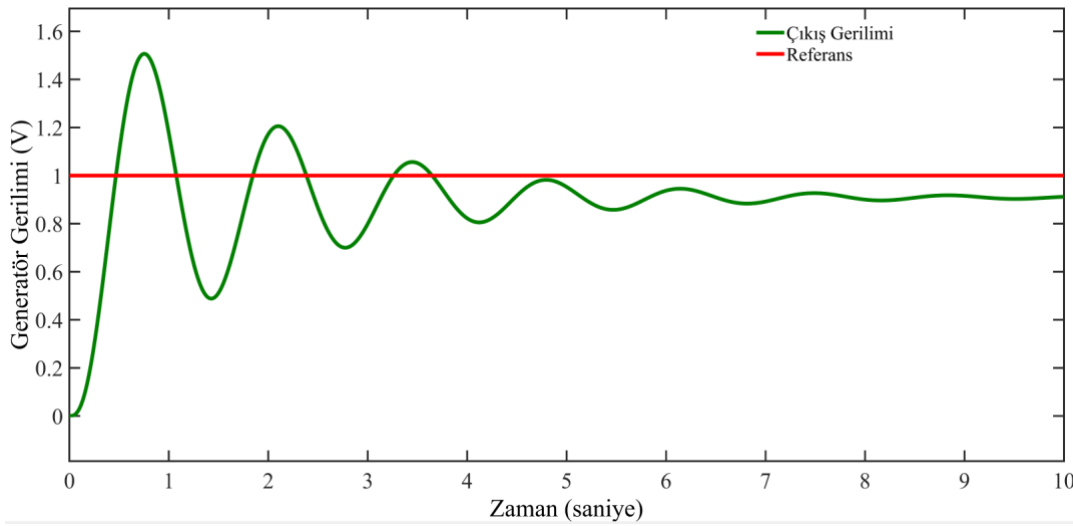
Sistem bileşenlerinin birinci dereceden transfer fonksiyonları kullanılarak elde edilen denetimsiz OGR sisteminin kapalı çevrim transfer fonksiyonu eşitlik (1)’de verilmiştir.

$$G_{OGR}(s) = \frac{V_g(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{G_a(s)G_e(s)G_g(s)}{1 + G_a(s)G_e(s)G_g(s)G_s(s)} \quad (1)$$

Seçilen parametre değerleri eşitlik (1)’de yerine yazıldığında aşağıdaki eşitlik (2) elde edilir.

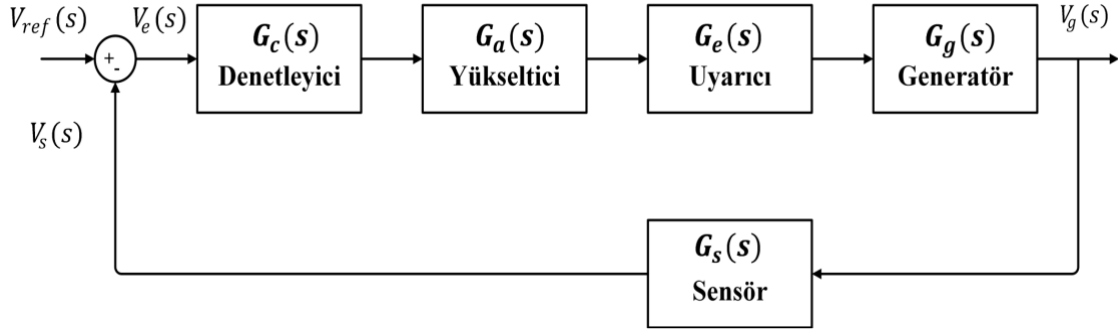
$$G_{OGR}(s) = \frac{0,1s + 10}{0,0004s^4 + 0,0454s^3 + 0,555s^2 + 1,51s + 11} \quad (2)$$

Eşitlik (2)’deki transfer fonksiyonuna sahip denetimsiz OGR sisteminin birim basamak cevabı Şekil 2’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, sistem kararlı olmasına rağmen sistemin birim basamak cevabı yüksek salınım içermektedir.



Şekil 2. Denetimsiz OGR sisteminin birim basamak cevabı.

Sistem, $s_{p1,2} = -0,5198 \pm 4,6642j$ olmak üzere iki adet karmaşık kutba ve $s_{p3} = -99,971$ ile $s_{p4} = -12,489$ olmak üzere iki adet gerçek kutba sahiptir. Sistemin yükselme süresi 0,261 sn, yerleşme süresi 6,99 sn, aşması %65,7 ve kalıcı durum değeri 0,909 pu değerindedir. Bu değerlerden görülmektedir ki OGR sistemine Şekil 3’te görüldüğü gibi bir PID denetleyici eklenmesi gerekmektedir.



Şekil 3. PID denetleyicili OGR sistemi modeli.

PID denetleyici, sistemin dinamik performansını arttırmak ve kalıcı durum hatasını azaltmak veya ortadan kaldırmak amacıyla kullanılmaktadır. PID denetleyicinin transfer fonksiyonu eşitlik (3)'te verilmiştir. Eşitlikte, K_p oransal kazancı, K_i integral kazancını, K_d ise türev kazancını temsil etmektedir. Oransal kazanç, yükselme zamanını, integral kazanç kalıcı durum hatasını azaltırken türev kazanç aşmayı azaltmaktadır.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3)$$

Optimizasyon probleminin çözümünde kullanılan çeşitli amaç fonksiyonları bulunmaktadır. Mutlak hatanın toplamı (IAE), hata karelerinin toplamı (ISE), zaman ağırlıklı mutlak hatanın toplamı (ITAE), zaman ağırlıklı hata karelerinin toplamı (ITSE) bunlardan en popüler olanlarıdır. Söz konusu amaç fonksiyonlarından IAE ve ISE küçük değerde aşma değeri sağlamasına rağmen uzun oturma süresi vermektedir. Buna karşın, ITAE ve ITSE oturma süresinin daha kısa olmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada amaç fonksiyonu olarak ITAE kullanılmıştır. ITAE eşitlik (4)'te gösterildiği gibidir. Ayrıca, ilgili literatür çalışması gözönünde bulundurularak denetleyici parametrelerinin alt sınırı 0,2 olarak üst sınırı ise 2 olarak belirlenmiştir (Ekinci & Hekimoğlu, 2019).

$$ITAE = \int_0^t t|e|dt \quad (4)$$

3. Optimizasyon Teknikleri

Çalışmanın bu bölümünde, OGR sistemi için PID denetleyicinin parametrelerinin optimal olarak belirlenmesi amacıyla kullanılan açıklık oyunları algoritması (HGS), INFO algoritması ve goril birlikleri optimizasyonu (GTO) isimli yenilikçi meta-sezgisel optimizasyon teknikleri hakkında bilgi verilmiştir. Çalışmada amaç, bu algoritmaların matematiksel modellerinin oluşturulması hakkında

bilgiler vermek olmadığı için kısa bilgiler verildikten sonra OGR sistemi ile ilgili benzetim çalışmaları ve bu çalışmaların sonuçlarına geçilmiştir.

3.1. Açlık Oyunları Algoritması (HGS)

Açlık oyunları algoritması (HGS), sürü halinde yaşayan canlıların avlanma sürecini temel olarak geliştirilmiş bir optimizasyon tekniğidir (Yang ve ark., 2021). Söz konusu algoritmanın matematiksel modeli oluşturulurken “yiyecek yaklaşımı” ve “açlık rolü” olmak üzere iki farklı aşama gerçekleştirilir. Bu aşamalar ve gerekli matematiksel formüller ile ilgili daha fazla bilgiye (Yang et al., 2021) kaynağından ulaşılabilir.

3.2. INFO Algoritması

INFO algoritması, bir arama uzayındaki vektör dizilerinin ortalama ağırlıklarını hesaplayan popülasyon tabanlı bir optimizasyon tekniğidir (Ahmadianfar ve ark., 2022) Söz konusu algoritmanın matematiksel modeli oluşturulurken “kural güncelleme”, “vektör birleşimi” ve “yerel arama” olmak üzere üç farklı aşama gerçekleştirilir. Bu aşamalar ve gerekli matematiksel formüller ile ilgili daha fazla bilgiye (Ahmadianfar et al., 2022) kaynağından ulaşılabilir.

3.3. Goril Birlikleri Optimizasyonu (GTO)

Goril birlikleri optimizasyonu (GTO), gorillerin yiyecek arama davranışı ve sosyal yaşamı temel olarak geliştirilmiş bir optimizasyon tekniğidir (Abdollahzadeh ve ark., 2021). Söz konusu algoritmanın matematiksel modeli oluşturulurken “keşif” ve “işleme” olmak üzere iki farklı aşama gerçekleştirilir. Bu aşamalar ve gerekli matematiksel formüller ile ilgili daha fazla bilgiye (Abdollahzadeh et al., 2021) kaynağından ulaşılabilir.

4. Benzetim Çalışmaları ve Bulgular

Çalışmanın bu bölümünde, HGS, INFO ve GTO ayarlı PID denetleyicinin performansı MATLAB/SIMULINK ortamında gerçekleştirilen benzetim çalışmaları yardımıyla değerlendirilmiştir. İlk olarak, Bölüm 2’de aktarılan OGR sistemi modeli oluşturulmuştur. Daha sonra, amaçlanan optimizasyon teknikleri için denetleyici davranışı geçici cevap analizi, kutup/sıfır analizi, bode analizi ve gürbüzlük analizi gibi durumlar altında incelenmiştir. Benzetim çalışmalarında, her bir algoritma için popülasyon sayısı 30 iterasyon sayısı ise 50 olarak alınmıştır.

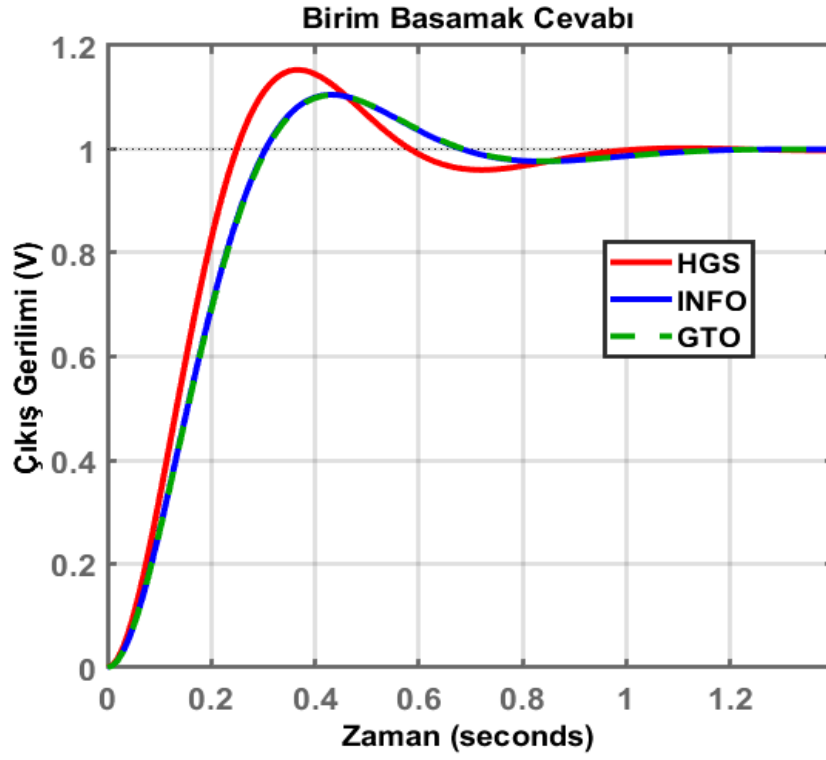
4.1. Geçici Cevap Analizi

Yüzde aşma ($%M$), yükselme süresi (t_r) ve yerleşme süresi (t_s) gibi büyüklükler bir birim basamak girişi için sistemin geçici davranışını tanımlayan performans özellikleridir. Bu nedenle çalışmanın bu bölümünde, kullanılan optimizasyon teknikleri ayarlı PID denetleyicinin geçici cevap davranışı Tablo 2’de verilen optimal denetleyici parametreleri kullanılarak incelenmiştir.

Tablo 2. Üç optimizasyon tekniği için optimal denetleyici parametreleri.

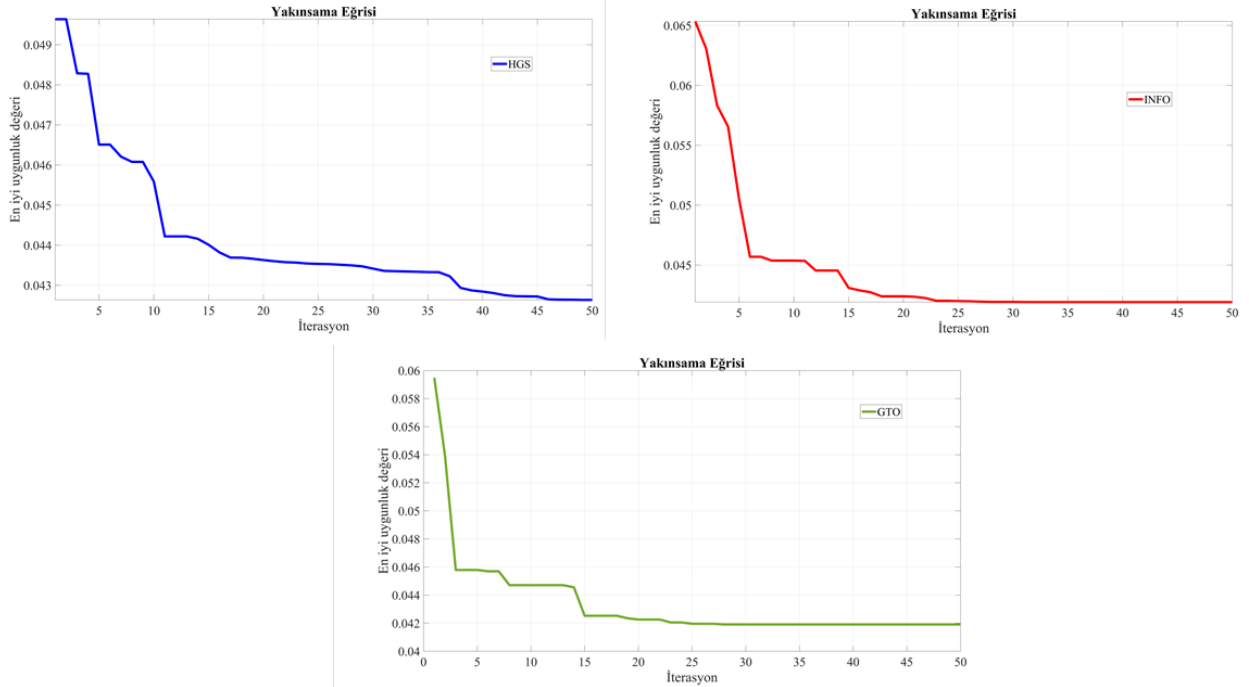
Optimizasyon Tekniği	K_p	K_i	K_d
HGS	1,1795	0,8126	0,37789
INFO	0,9584	0,6656	0,3004
GTO	0,9538	0,6628	0,2983

Tablo 2’de verilen denetleyici parametreleri kullanılarak elde edilen geçici cevap analizleri Şekil 4’te gösterilmiştir. Bu şekillerden elde edilen sistem parametre değerleri ise Tablo 3’te verilmiştir. Tablo ve şekilden görüldüğü üzere, üç optimizasyon tekniğinden INFO ve GTO algoritmaları sistemin $%M$ değeri bakımından HGS algoritmasına göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Sistemin t_r ve t_s değeri açısından ise HGS yönteminin söz konusu iki yönetime göre daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, kullanılan algoritmalar ayarlı PID denetleyicinin performansı, çekirge algoritması (GOA) ayarlı PID denetleyici (Hekimoğlu & Ekinci, 2018) ve diferansiyel evrim (DE) ayarlı PID denetleyici (Gozde & Taplamacioglu, 2011) gibi yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Tablo 3’te verilen değerlerden bu çalışmada kullanılan algoritmalar ayarlı PID denetleyicinin söz konusu çalışmalardan daha iyi performans sergilediği görülmektedir.



Şekil 4. Üç optimizasyon algoritması için geçici cevap analizi.

Ek olarak, her üç yöntem de birbirine yakın değerlerde ITAE değeri vermiştir. ITAE için üç algoritmaya ait yakınsama grafikleri Şekil 5’te gösterilmiştir.



Şekil 5. Üç algoritma ayarlı PID denetleyicisi için yakınsama eğrileri.

Tablo 3. Sistem parametre değerleri.

Optimizasyon Tekniği	%M	t_r (sn)	t_s (sn)	ITAE
HGS	15,3	0,168	0,869	0,042635
INFO	10,5	0,205	0,921	0,041907
GTO	10,4	0,206	0,92	0,0419
GOA	20,5	0,130	0,971	---
DE	33	0,156	0,952	---

4.2. Kutup/Sıfır Analizi

Bir sistem için kutup/sıfır analizi kapalı çevrim kutuplarının konumları ile onlara karşılık gelen sönüm oranlarını verir ve sistemin karakteristik kararlılığını belirler. Bu çalışmada kullanılan üç yöntem ayarlı PID denetleyici için kapalı çevrim kutupları ve sönüm oranları Tablo 4’te verilmiştir. Tablodan görülmektedir ki tüm yöntemler için denetleyicinin kutupları sol yarı düzlemde yani sistem kararlıdır. Ek olarak, üç farklı optimizasyon tekniği için de sönüm oranlarının 1’e yakın olduğu anlaşılmaktadır.

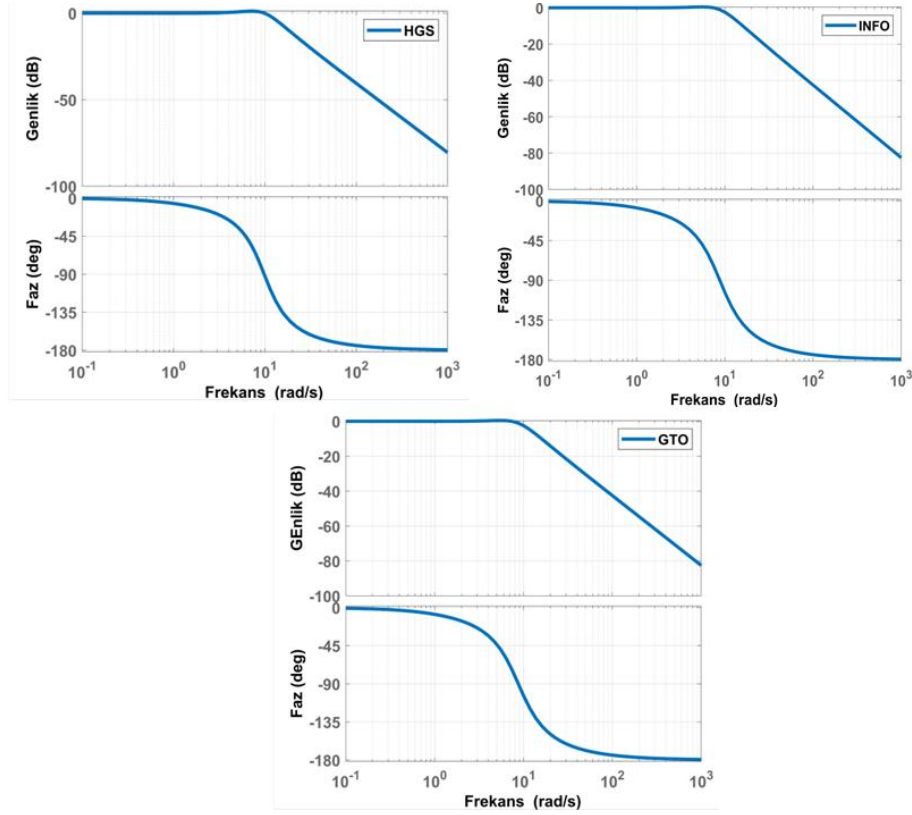
Tablo 4. Sistem kutupları ve sönüm oranları.

Optimizasyon Tekniği	Kapalı Çevrim Kutupları	Sönüm Oranları
HGS	-1,03	1
	-2,01	1
	-4,71-8,65j	0,479
	-4,71+8,65j	0,479
	-102	1
INFO	-1,03	1
	-2,08	1
	-4,79-7,39j	0,544
	-4,79+7,39j	0,544
	-102	1
GTO	-1,02	1
	-2,08	1
	-4,79-7,35j	0,546
	-4,79+7,35j	0,546
	-102	1

4.3. Bode Analizi

Bode analizi, bir kontrol sisteminin frekans cevabını analiz etme noktasında faydalı bir yöntemdir. Çalışmada kullanılan HGS ayarlı PID, INFO ayarlı PID ve GTO ayarlı PID denetleyici için bode diyagramları Şekil 6’da gösterilmiştir. Ayrıca diyagramlardan elde edilen sayısal veriler Tablo 5’te verilmiştir. Yüksek faz ve gecikme marjini ile düşük maksimum kazanç sistemin frekans

cevabının iyi olduğunu göstergesidir. Tablodan, INFO ve GTO yöntemlerinin HGS yöntemine göre daha iyi performans sağladığı görülmektedir.



Şekil 6. Üç algoritma ayarlı PID denetleyicisi için bode diyagramları.

Tablo 5. Frekans cevabı için sayısal veriler.

Optimizasyon Tekniği	Maksimum Kazanç (dB)	Faz Marjini (derece)	Gecikme Marjini (sn)
HGS	1,22 (7,25 rad/sn)	88,6	0,156
INFO	0,493 (5,46 rad/sn)	106	0,249
GTO	0,481 (5,45 rad/sn)	106	0,252

4.4. Gürbüzlük Analizi

Çalışmanın bu bölümünde, amaçlanan optimizasyon yöntemleri ayarlı PID denetleyicinin gürbüzlüğünü göstermek amacıyla sistem bileşenlerinin zaman sabitleri (τ_a, τ_e, τ_g) +%50, -%50, +%25 ve -%25 oranında değiştirilerek sistem davranışı incelenmiştir. Tablo 6'da τ_a değerinin değişmesi durumunda, Tablo 7'de τ_e değerinin değişmesi durumunda, Tablo 8'de ise τ_g değerinin değişmesi durumunda elde edilen sonuçlar verilmiştir. Tablodaki sonuçlardan her üç yöntem için de

zaman sabitlerinin değişimi durumunda sistemin %M, t_r ve t_s değerleri bakımından az etkilendiği görülmektedir. Bu sayede amaçlanan PID denetleyicinin gürbüzlüğü kanıtlanmış olur.

Tablo 6. τ_a değişimi durumunda sistem performans değerleri.

Optimizasyon Tekniği	$\tau_a + \%50$			$\tau_a - \%50$		
	%M	t_r	t_s	%M	t_r	t_s
HGS	23	0,188	1,06	3,52	0,153	0,371
INFO	18	0,223	1,17	0,167	0,199	0,309
GTO	17,9	0,224	1,18	0,132	0,2	0,312
	$\tau_a + \%25$			$\tau_a - \%25$		
	%M	t_r	t_s	%M	t_r	t_s
HGS	19,5	0,178	0,969	10,1	0,159	0,748
INFO	14,6	0,214	1,06	5,63	0,198	0,537
GTO	14,5	0,215	1,06	5,55	0,199	0,54

Tablo 7. τ_e değişimi durumunda sistem performans değerleri.

Optimizasyon Tekniği	$\tau_e + \%50$			$\tau_e - \%50$		
	%M	t_r	t_s	%M	t_r	t_s
HGS	16	0,217	0,835	15,7	0,112	1,03
INFO	12,9	0,263	1,04	8,81	0,137	1,12
GTO	12,9	0,264	1,04	8,64	0,138	1,12
	$\tau_e + \%25$			$\tau_e - \%25$		
	%M	t_r	t_s	%M	t_r	t_s
HGS	15,5	0,193	0,683	15,4	0,142	0,786
INFO	11,6	0,235	0,817	9,56	0,173	0,9
GTO	11,6	0,236	0,822	9,45	0,174	0,903

Tablo 8. τ_g değişimi durumunda sistem performans değerleri.

Optimizasyon Tekniği	$\tau_g + \%50$			$\tau_g - \%50$		
	%M	t_r	t_s	%M	t_r	t_s
HGS	11	0,231	0,841	25,3	0,104	1,13
INFO	8,04	0,285	1,51	18,5	0,124	1,39
GTO	8,03	0,286	1,53	18,4	0,124	1,39
	$\tau_g + \%25$			$\tau_g - \%25$		
	%M	t_r	t_s	%M	t_r	t_s
HGS	12,7	0,2	0,672	19,2	0,137	0,793
INFO	8,79	0,244	0,803	13,5	0,165	0,925
GTO	8,75	0,246	0,809	13,4	0,166	0,929

5. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, güç sistemlerindeki senkron generatörlerin uç gerilimini belirlenen değerlerde tutmak amacıyla kullanılan OGR sistemi için PID denetleyici tasarımı amaçlanmıştır. Bu amaçla, PID denetleyicinin parametrelerinin optimal olarak ayarlanması için HGS, INFO ve GTO gibi son yıllarda geliştirilmiş ve daha önce OGR sisteminde kullanılmamış olan yöntemler kullanılmıştır.

Amaçlanan denetleyicinin geçici cevap analizleri benzetim çalışmaları yardımıyla incelenerek optimizasyon teknikleri arasında karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca, kutup/sıfır analizi, bode analizi ve gürbüzlük analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan üç optimizasyon tekniğinin sistemin aşma değeri, yükselme süresi ve yerleşme süresi bakımından birbirine yakın ve dikkate değer performans gösterdiği görülmektedir. Bunun sonucunda, söz konusu algoritmalar ayarlı PID denetleyicinin OGR sisteminde güvenilir ve etkili bir yöntem olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Abdollahzadeh, B., Soleimani Gharehchopogh, F., & Mirjalili, S. (2021). Artificial gorilla troops optimizer: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems. *International Journal of Intelligent Systems*, 36(10), 5887–5958. <https://doi.org/10.1002/int.22535>
- Ahmadianfar, I., Heidari, A. A., Noshadian, S., Chen, H., & Gandomi, A. H. (2022). INFO: An efficient optimization algorithm based on weighted mean of vectors. *Expert Systems with Applications*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116516>
- Ayas, M. S., & Sahin, E. (2021). FOPID controller with fractional filter for an automatic voltage regulator. *Computers and Electrical Engineering*, 90. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106895>
- Bhullar, A. K., Kaur, R., & Sondhi, S. (2020). Enhanced crow search algorithm for AVR optimization. *Soft Computing*, 24(16), 11957–11987. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-04640-w>
- BURNAZ, S. A. N., & AYAS, M. Ş. (2020). Effects of objective function in PID controller design for an AVR system. *International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers*, 245–255. <https://doi.org/10.18100/ijamec.803257>
- Çelik, E. (2018). Incorporation of stochastic fractal search algorithm into efficient design of PID controller for an automatic voltage regulator system. *Neural Computing and Applications*, 30(6), 1991–2002. <https://doi.org/10.1007/s00521-017-3335-7>
- Çelik, E., & Durgut, R. (2018). Performance enhancement of automatic voltage regulator by modified cost function and symbiotic organisms search algorithm. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(5), 1104–1111. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.08.006>
- Duman, S., Yörükeren, N., & Altaş, I. H. (2016). Gravitational search algorithm for determining controller parameters in an automatic voltage regulator system. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 24(4), 2387–2400. <https://doi.org/10.3906/elk-1404-14>
- Ekinci, S., & Hekimoğlu, B. (2019). Improved Kidney-Inspired Algorithm Approach for Tuning of PID Controller in AVR System. *IEEE Access*, 7, 39935–39947. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2906980>
- Ekinci, S., Izci, D., Eker, E., & Abualigah, L. (2022). An effective control design approach based on novel enhanced aquila optimizer for automatic voltage regulator. *Artificial Intelligence Review*. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10216-2>
- Ekinci, S., Izci, D., Eker, E., & Abualigah, L. (2023). An effective control design approach based on novel enhanced aquila optimizer for automatic voltage regulator. *Artificial Intelligence Review*, 56(2), 1731–1762. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10216-2>
- Gozde, H., & Taplamacioglu, M. C. (2011). Comparative performance analysis of artificial bee colony algorithm for automatic voltage regulator (AVR) system. *Journal of the Franklin Institute*, 348(8), 1927–1946. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2011.05.012>

- Hekimoğlu, B. (2019). Sine-cosine algorithm-based optimization for automatic voltage regulator system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 41(6), 1761–1771. <https://doi.org/10.1177/0142331218811453>
- Hekimoğlu, B., & Ekinci, S. (2018). *5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE 2018) : May 3-5, 2018, Istanbul, Turkey.*
- İzci, D., & Ekinci, S. (2021). Comparative performance analysis of slime mould algorithm for efficient design of proportional–integral–derivative controller. *Electrica*, 21(1), 151–159. <https://doi.org/10.5152/ELECTRICA.2021.20077>
- İzci, D., Ekinci, S., & Zeynelgil, H. L. (2023). Controlling an automatic voltage regulator using a novel Harris hawks and simulated annealing optimization technique. *Advanced Control for Applications*. <https://doi.org/10.1002/adc2.121>
- Jumani, T. A., Mustafa, M. W., Hussain, Z., Md. Rasid, M., Saeed, M. S., Memon, M. M., Khan, I., & Nisar, K. S. (2020). Jaya optimization algorithm for transient response and stability enhancement of a fractional-order PID based automatic voltage regulator system. *Alexandria Engineering Journal*, 59(4), 2429–2440. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.03.005>
- Khan, I. A., Alghamdi, A. S., Jumani, T. A., Alamgir, A., Awan, A. B., & Khidrani, A. (2019). Salp Swarm Optimization Algorithm-Based Fractional Order PID Controller for Dynamic Response and Stability Enhancement of an Automatic Voltage Regulator System. *Electronics*, 8(12), 1472. <https://doi.org/10.3390/electronics8121472>
- Kose, E. (2020). Optimal Control of AVR System with Tree Seed Algorithm-Based PID Controller. *IEEE Access*, 8, 89457–89467. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993628>
- Micev, M., Čalasan, M., Ali, Z. M., Hasanien, H. M., & Abdel Aleem, S. H. E. (2021). Optimal design of automatic voltage regulation controller using hybrid simulated annealing – Manta ray foraging optimization algorithm. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 641–657. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.010>
- Micev, M., Čalasan, M., & Oliva, D. (2020). Fractional order PID controller design for an AVR system using Chaotic Yellow Saddle Goatfish Algorithm. *Mathematics*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/math8071182>
- Micev, M., Čalasan, M., & Oliva, D. (2021). Design and robustness analysis of an Automatic Voltage Regulator system controller by using Equilibrium Optimizer algorithm. *Computers and Electrical Engineering*, 89. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106930>
- Micev, M., Čalasan, M., & Radulović, M. (2021, February 16). Optimal design of real PID plus second-order derivative controller for AVR system. *2021 25th International Conference on Information Technology, IT 2021*. <https://doi.org/10.1109/IT51528.2021.9390145>
- Mosaad, A. M., Attia, M. A., & Abdelaziz, A. Y. (2019). Whale optimization algorithm to tune PID and PIDA controllers on AVR system. *Ain Shams Engineering Journal*, 10(4), 755–767. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.07.004>
- ÖZGENÇ, B., AYAS, M. Ş., & ALTAŞ, İ. (2020). Otomatik Gerilim Regülatörü için Evrimsel Algoritma Tabanlı Filtreli PID Denetleyici Tasarımı. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 10(1), 74–90. <https://doi.org/10.31466/kfbd.719953>
- Tabak, A. (2021). Maiden application of fractional order PID plus second order derivative controller in automatic voltage regulator. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(12). <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13211>
- Yang, Y., Chen, H., Heidari, A. A., & Gandomi, A. H. (2021). Hunger games search: Visions, conception, implementation, deep analysis, perspectives, and towards performance shifts. *Expert Systems with Applications*, 177. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114864>

Farklı Hava Üfleme Açılarında Kanat Yüzey Sıcaklığı Değişiminin Deneysel Olarak Araştırılması

Birkut GÜLER¹ 

Öz

Kanatla soğutma uygulamalarının endüstride uygulamalarını görebilmekteyiz. Motorlarda ve soğutma ihtiyacı olan yerlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Mühendislik çalışmalarında, kanat uygulamalarının bir yüzeyden çevredeki havaya veya akışkana ısı transferini iyileştirmek önemli bir yer tutmaktadır. Kanat kullanmanın amacı etkili yüzey alanını artırarak yüzeyden ısı transferini artırmaktır. Bununla birlikte kanadın bağlı olduğu alt taban da bir iletim direnci oluşturmaktadır. Bu nedenle kanatçık kullanmak her zaman ısı transferini artırmayabilir. Bu da kanat etkinliği ile ifade edilir. Bu çalışma, 450 W gücünde bir ısıtıcı kullanılarak alüminyum bir kanadın farklı hava üfleme konumlarında termal davranışını incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ısıtıcı üzerine alüminyum plaka ve yüzeyine termal macun uygulanmış ve ardından üzerine alüminyum kanatlar (finler) yerleştirilmiştir. Ayrıca, ısı transferinin nasıl etkilendiğini anlamak için farklı fan konumları denenmiştir. Fan, kanatlara dik, paralel ve 45 derece açıyla yerleştirilmiştir. Sonuçlar, fanın plakanın yüzeyiyle dik olarak yerleştirildiği durumda kanadın alt tutucusunun en düşük yüzey sıcaklığına sahip olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, termal yönetimde fan konumunun kritik bir faktör olduğunu vurgulayarak ısı transferini optimize etmek için pratik uygulamalarda kullanılacak önemli bilgiler sunmaktadır. Bu tür bilimsel çalışmalar, enerji verimliliğini artırmak ve ısı sistemlerin tasarımını geliştirmek isteyen endüstri ve mühendislik alanlarında uygulama potansiyeli taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Taşınım Katsayısı, Isı Transferi, Soğutma.

Experimental Investigation of Fin Surface Temperature Change at Different Air Flow Angles

Abstract

We can observe the practical applications of fin cooling systems in various industrial contexts, particularly in engines and places where cooling is essential. In engineering studies, the implementation of fins plays a significant role in enhancing heat transfer from a surface to the surrounding air or fluid. The primary objective of using fins is to increase the effective surface area, thus improving heat transfer from the surface. However, the base to which the fin is attached introduces a resistance to heat conduction, making the use of fins not always beneficial. This efficiency of fins is expressed as their effectiveness. In this study, an aluminum fin was investigated under different air blowing conditions using a 450 W heater. The study involved applying thermal paste to the heater's surface and attaching aluminum fins to it. Different fan orientations were tested to understand their effect on convective heat transfer. The fan was placed perpendicular to the fins, parallel to them, and at a 45-degree angle. The results showed that the configuration with the fan perpendicular to the surface exhibited the lowest surface temperature on the lower base of the fin. These findings emphasize the critical role of fan orientation in thermal management, providing valuable insights for optimizing heat transfer in practical applications. Such scientific research has the potential for application in industries and engineering fields seeking to enhance energy efficiency and improve the design of thermal systems.

Keywords: Convection Coefficient, Heat Transfer, Cooling.

¹Giresun Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri, Giresun, Türkiye, birkut.guler@giresun.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0001-5541-5279>

1. Giriş

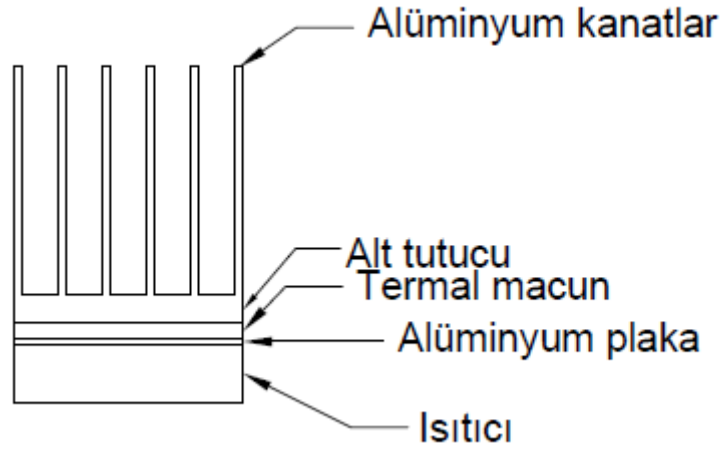
Isı transferi temel olarak üç şekilde gerçekleşmektedir. Bunlar sırasıyla, iletim, taşınım ve ışınım'dır. Bina yüzeylerinde veya soğutma yapılacak ekipmanlarda aynı zamanda termal iletim, taşınım ve radyasyon ısı transferi gerçekleşmektedir (Lv ve ark., 2020). Taşınım ile ısı transferinde etkili parametrelerden biri olan ısı taşınım katsayısını belirlemek problemlerin çözümü açısından temel aşamadır. Taşınım ısı transferinin altında yatan fiziksel mekanizmalarını anlamak ve taşınım ile ısı transfer hesaplamalarını gerçekleştirmek için çeşitli araçlar geliştirilmiştir. Taşınım ile ısı transfer mekanizmasını anlamak için fiziksel kökenler araştırılarak bir takım boyutsuz sayılar geliştirilmiştir (Bergman ve ark., 2011). Isı taşınım problemlerinin analizlerinde, katı yüzeydeki ortalama ısı akısının kolayca hesaplanabilmesi için ısı transfer katsayısı h 'nin kullanılması geleneksel çözüm yöntemidir. h 'yi bulmak için, kütle, momentum ve enerjinin korunumu için geçerli denklemleri aynı anda çözmek gerekir. Bazı araştırmacılar analizi büyük ölçüde basitleştirebilen, ancak taşınım özelliklerinin korunmasına izin veren bir ısı taşınım uzunluğu Δs de önermektedir (Shih ve ark., 2011). Taşınım ısı transfer katsayısı hem soğutma uygulamalarında hem de ısıtma uygulamalarında iyi çözümlenmesi gereken parametredir. Çalışmalar, binanın dış yüzeyinin konvektif ısı transfer katsayısının rüzgar hızı, rüzgar yönü ve sıcaklık farkı ile ilişkili olduğunu göstermiştir (Xue ve ark., 2022). Farklı çalışmalar da hava akızsız koşulda, hava akışı koşulu altındaki Nu sayısından her zaman daha yüksek olduğunu gösterirken hava hızının varlığı ve geliş açısının ısı transferi üzerindeki etkisi ortaya koyulmaktadır (Wu ve ark., 2015). Isı transferinde özellikle ekipmanların soğutulmasında genişletilmiş yüzey ya da kanat adı verilen bir yöntemle soğutma yapılmaktadır. Genişletilmiş yüzey terimi, genellikle bir katı içinde iletim yoluyla ısı transferini ve katının sınırlarından taşınım yoluyla ısı transferini içeren önemli bir özel durumu tasvir etmek için kullanılmaktadır. Genişletilmiş yüzey kabulüyle yapılan çözümlerlerde farklı yaklaşımlar vardır. Yapılan çalışmalarda çift yönlü kanatlarda kanatlarda ısı transfer miktarının sıcaklık farkıyla ve eksenel yüzey alanıyla arttığı ortaya koyulmaktadır (Khaled., 2018). Kanat ucu sıcaklığının yanı sıra, uniform kalınlıktaki kanatlı boru kesitlerinin verimliliklerinin tahmini için yeni ve kullanımı basit bir korelasyon formüle etmeye yönelik çalışmalar da yapılmıştır (Bahaduri ve Vuthaluru., 2010). Zorlanmış taşınım katsayısı artan hava hızıyla artmaktadır (Ghafroki ve ark., 2017). Isıtıcı fırın tasarımlarında fırının içinde farklı bölgelerde hava hızına bağlı olarak verim farkları oluşabilmektedir. (Illes ve Harsanyi 2009). Taşınım ile ısı transfer katsayısının belirlenmesinde kullanılan ifadelerin doğruluğunu araştırmak amacıyla yapılan çalışmalar sınır tabakası teorisinden gelen hava akış yönüne göre belirlenen taşınım katsayısını kullanan, laminer ve türbülanslı akışların belirlenmesini de dikkate alan modelin farklı deneysel çalışmalarla doğrulandığını göstermektedir (Sartori., 2006). Farklı uygulamalar için zorlanmış taşınım katsayısını belirleyen ampirik ifadeler elde etmeye yönelik çalışmalar da

yapılmıştır(Rajasekaran ve ark., 2019). Boru etrafındaki enine akış için ısı transfer katsayılarının deneysel değerleri Borunun eksenine boyunca hava akışı için ısı transfer katsayılarından %22 daha yüksek olduğu ortaya konulmuştur(Niezdoda_Zelasko ve Zelasko., 2014)

2. Materyal ve Metot

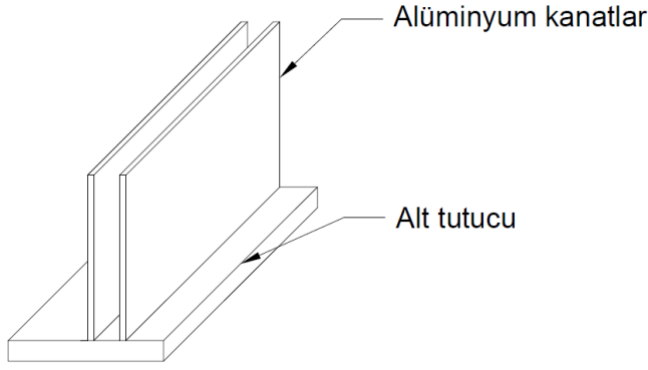
2.1 Deneysel Çalışma

Yapılan çalışmada 450 W gücünde elektrikli bir ısıtıcının üzerine 1 mm kalınlığında alüminyum plaka ve onun üzerine de termal macun sürülmüştür. Termal macunun üzerine de 6 adet kanattan oluşan genişletilmiş yüzey yerleştirilmiştir. Şekil 1 Çalışmada kullanılan düzeneği göstermektedir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan deney düzeneği

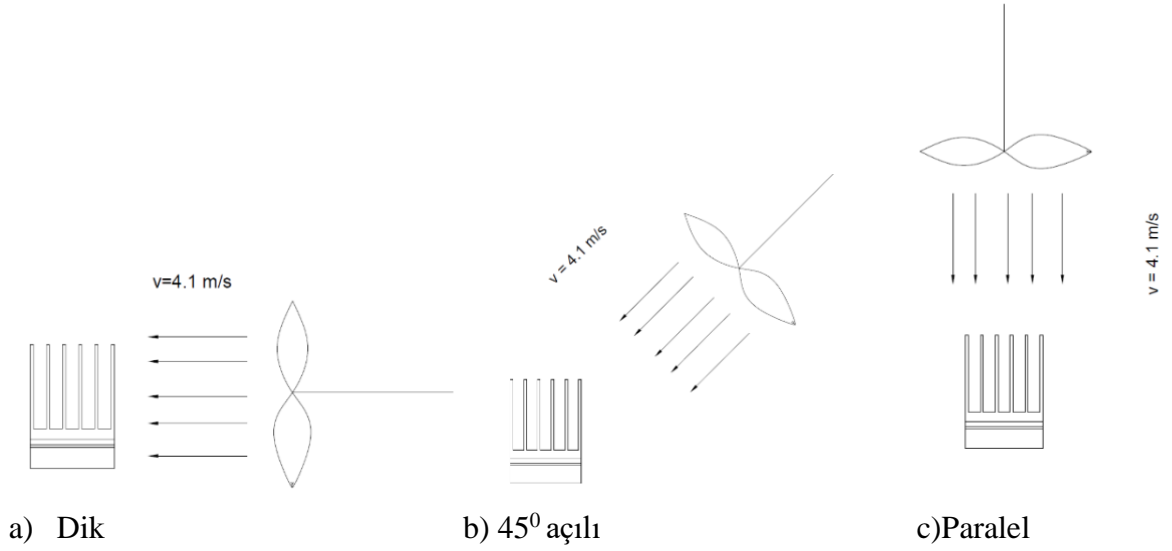
Şekil 2 çalışmada kullanılan alüminyum kanatların duruşunu temsili olarak göstermektedir. Buna göre 1,2 mm kalınlığında olan kanatlar 42x30 mm lik plaka üzerine aralarında 5 mm boşluk olacak şekilde yerleştirilmiştir. 450 Watt gücünde olan ısıtıcı 5 dakika süre ile çalıştırılarak, bu süre sonunda kanadın bağlı olduğu alt yüzeyden sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Sıcaklık ölçümünde problu dijital termometre kullanılmıştır. Ölçüm yapılan ortam sıcaklığı 20 °C olarak tespit edilmiştir.



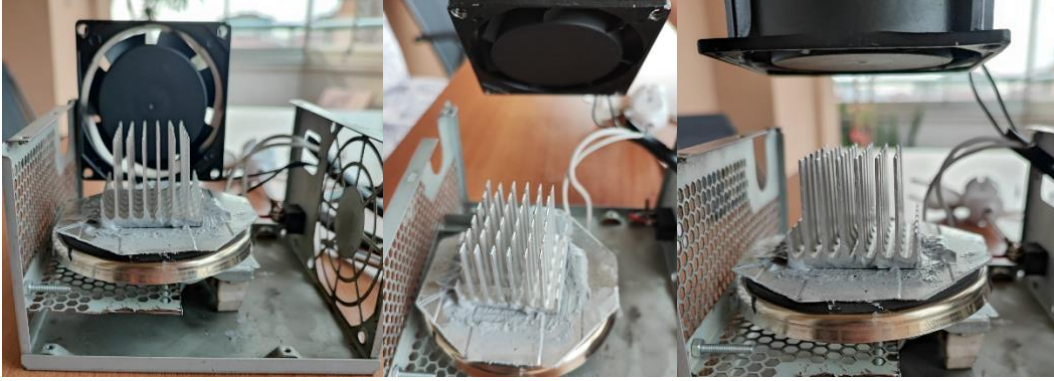
Şekil 2. Çalışmada kullanılan kanat yapısı

2.2. Hava akış açısının taşınım katsayısı üzerine etkisinin belirlenmesi

Rüzgâr açısının soğutma üzerine etkili olduğu daha önce yapılan çalışmalarda ortaya koyulmuştur(Sartori, 2006). Önceki literatür çalışmalarında rüzgarın aksenal ve radyal ısı taşınım katsayıları üzerindeki etkisi ağırlıklı olarak vurgulanırken, bu çalışmada benzersiz bir yaklaşım benimseyerek üç farklı açıda deneyler gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmada Isıtıcı ve fan eş zamanlı olarak çalıştırılarak genişletilmiş yüzeyin bağlı olduğu tutucu üzerinden sıcaklık okumaları yapılmıştır. Çalışmada fan ilk olarak kanada dik, daha sonra 45° açıyla sonra ise fana paralel yerleştirilerek ölçümler yapılmıştır. Şekil 3. sırasıyla fanın kanada dik, 45° ve paralel yerleştirilme konumunu göstermektedir. Fan hızı ölçümü, anemometre kullanılarak yapılmış ve bu ölçümler deneyin güvenilirliğini sağlamak için belirli aralıklarla tekrarlanmıştır. Kanatçıkların dik ve 45° derece konumu sağlamak için bir tutucu kullanılmıştır. Fan alüminyum kanatlara 30 mm mesafede tutularak hava dağılım bölgesi içerisinde tutulmuştur. Şekil 4 çalışmada kullanılan deney düzeneği üzerinde fanın farklı pozisyonlarını göstermektedir.



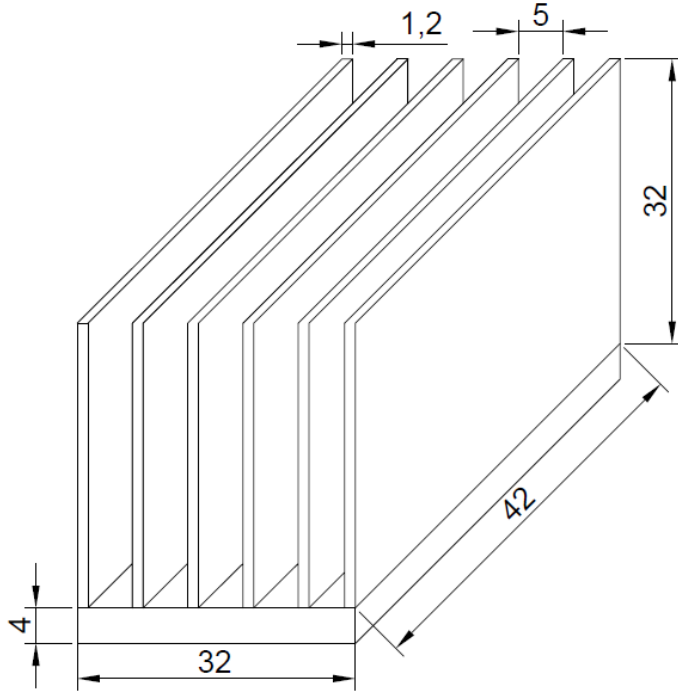
Şekil 3. Soğutucu fanın farklı konumlarda yerleştirilmesi



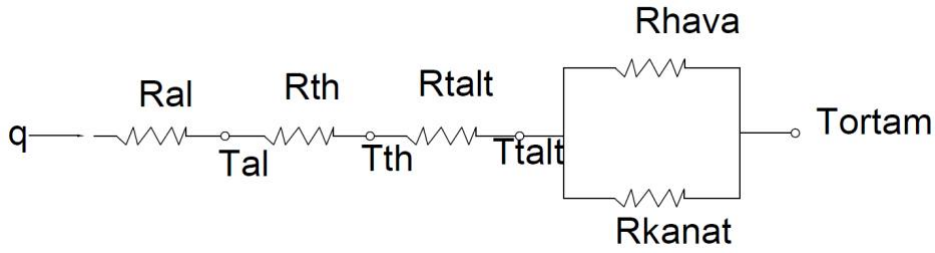
Şekil 4. Soğutucu fanın farklı konumlarındaki deneysel düzenek

2.3. Problemin çözümü

Yapılan çalışmada 450 W elektrik gücündeki ısıtıcı 5 dakika boyunca çalıştırılarak yaklaşık 350.000 W/m² sabit ısı akısı oluşturulmuştur. Çalışmada ısı akısı çok yüksek olduğundan rejim koşullarına gelmesi beklenmeden 300 s sürelerle ölçümler yapılmıştır Soğutma havasını üflemek için 220 V gerilimde çalışan fan kullanılmıştır. Fanın her üç durumda da kanada olan mesafesi 30 mm olarak sabit tutulmuştur. Şekil 5. Çalışma esnasında kullanılan kanadın ölçülerini, Şekil 6. oluşan ısı dirençleri göstermektedir.



Şekil 5. Kanat yapısının gösterimi



Şekil 6. Oluşan ısıl dirençlerim şematik gösterimi

Yapılan çalışmada aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

1. 5 dakika süresi sonundaki oluşan sıcaklık değeri hesaplanmıştır.
2. Isıtıcının kenarlarından ve ön tarafından transfer olan ısı miktarları ihmal edilmiştir.
3. Soğutucu aracılığıyla gerçekleşen ısı transferinin, bu çalışma bağlamında tek boyutlu olduğu varsayılmıştır. Yani, ısı transferi süreci, sadece bir tek boyutlu uzamsal yönde meydana gelmekte ve diğer boyutlar göz ardı edilmektedir.
4. Adyabatik kanat kabulü yapılmıştır
5. Özelliklerin sıcaklıkla değişmediği sabit olduğu kabul edilmiştir.
6. Işımla ısı transfer etkileri ihmal edilmiştir.

$R_{t,al}$ Isıtıcının üzerindeki alüminyum plakanın ısı direnci; L, plakanın kalınlığı, k alüminyum ısı iletim katsayısı

$$R_{t,al} = \frac{T_{al}-T_l}{q_x} = \frac{L}{k \times A} \quad (1)$$

$R_{t,therm}$ Termal macunun ısı direnci; L, termal macunun kalınlığı, k termal macun ısı iletim katsayısı

$$R_{t,therm} = \frac{T_{th}-T_{al}}{q_x} = \frac{L}{k \times A} \quad (2)$$

$R_{t,kanat\ taban}$ Kanadın alt taban yüzeyinin ısı direnci L, kanadın alt kısmının kalınlığı, k kanat malzemesinin ısı iletim katsayısı

$$R_{t,kanat\ taban} = \frac{T_{kanat,taban}-T_{th}}{q_x} = \frac{L}{k \times A} \quad (3)$$

Kanatların arasında kalan hava kısmının ısı direnci; h ısı taşınım katsayısı, a kanadın oturduğu yüzeyin genişliği, N kanat sayısı, t_f kanadın kalınlığı, b kanadın oturduğu yüzeyin uzunluğu

$$R_{t,hava} = \frac{1}{h \times (a - N \times t_f) \times b} \quad (4)$$

$R_{t,kanat}$ Adyabatik kanat kabulüyle; tek kanat için ısı direnci; θ_k taban ile akışkan arasındaki sıcaklık farkı, q_k kanattan ortama olan ısı akısı

$$R_{t,kanat} = \frac{\theta_k}{q_k} \quad (5)$$

h, kanattan çevreye olan ısı taşınım katsayısı, P_k kanadın temas uzunluğu, A_k kanadın yüzey alanı, m kanat performans sayısı

$$R_{t,kanat} = \frac{(h \times P_k \times A_k)^{-1/2}}{\tan(m \times d)} \quad (6)$$

$$P = (b + tf) \quad (7)$$

$$A_c = (b \times tf) \quad (8)$$

$$m = \sqrt{\frac{h \times P}{k \times A_c}} \quad (9)$$

$$R_{t,kanat} = \frac{(h \times P \times k \times A_c)^{-1/2}}{\tan(m \times d)} \quad (10)$$

Tüm kanatlar için ısı direnci;

$$N \text{ kanat sayısı} = R_{t,kanat(N)} = \frac{R_{t,kanat}}{N} \quad (11)$$

Sistemin genel direnci; alüminyum plaka, termal macun ve kanat dirençlerinin toplamıyla bulunabilir.

$$R_{toplam} = R_{t,al} + R_{t,therm} + R_{t,kanat \text{ taban}} + R_{t,eşdeğer} \quad (12)$$

Kanadın ısı direnci ise kanat aralarındaki hava ve kanadın alüminyum kısmının dirençlerinden oluşacaktır. $R_{t,eşdeğer}$ kanadın eşdeğer direnci aşağıdaki gibi verilebilmektedir.

$$R_{t,eşdeğer} = [R_{t,hava}^{-1} + R_{t,kanat}^{-1}]^{-1} \quad (13)$$

Isıtıcıdan ortama olan ısı akısı;

$$q = \frac{T_1 - T_\infty}{R_{toplam}} = \frac{T_1 - T_\infty}{R_{t,al} + R_{t,therm} + R_{t,kanat \text{ taban}} + R_{t,geniş \text{ yüzey}}} \quad (14)$$

Aynı zamanda; kanat tabanından ortama geçen ısı akısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$q = \frac{T_{kanat,taban} - T_\infty}{R_{t,geniş \text{ yüzey}}} \quad (15)$$

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmada kullanılan malzemelerin özelliklerinin sıcaklıkla değişmediği kabul edilerek aşağıda Tablo 1’de verilen değerler kullanılmıştır.

Tablo 1. Kullanılan malzemelerin ısı iletim katsayıları

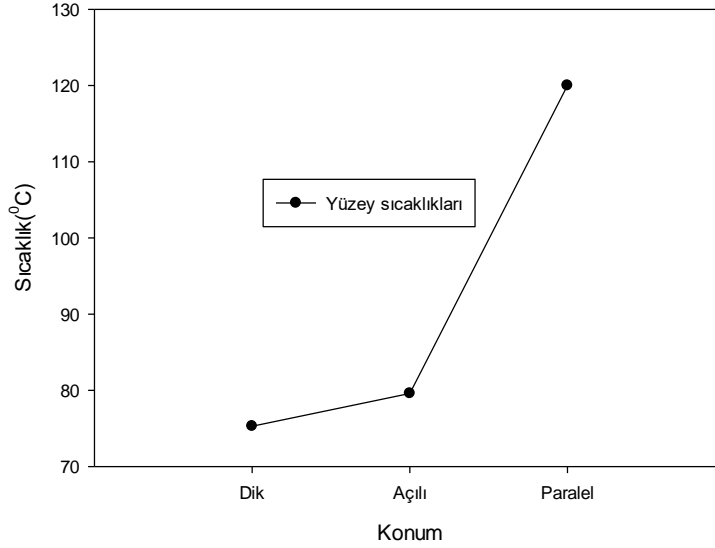
Malzeme	Isı iletim katsayısı (W/mK)
Alüminyum	238,48
Thermal macun	0,68
Kanat taban (alüminyum)	238,48

Çalışmada kullanılan malzemelerin hepsi için yüzey alanı 0,00126 m² olarak hesaplanmıştır. Çalışmada oluşan ısı direnç değerleri ise sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. Tablo 2. hesaplanan ısı dirençleri göstermektedir.

Tablo 2. Çalışmada hesaplanan ısı dirençler

Malzeme	Isıl direnç değerleri (K/W)
Alüminyum	0,003327955
Thermal macun	3,5014006
Kanat taban (alüminyum)	0,013311821

Yapılan çalışmada fanın açılarının sırasıyla dik, 45 derece ve paralel olması durumları için kanadın dip kısmından sıcaklık ölçümleri yapılarak; oluşan yüzey sıcaklıkları belirlenmiştir. Buna göre belirlenen yüzey sıcaklık değerleri aşağıdaki Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Farklı üfleme konumlarında oluşan yüzey sıcaklıkları

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, 450 W gücündeki ısıtıcının kullanıldığı bir ortamda alüminyum plakanın zorlanmış taşınım şartlarında ısıl davranışı incelenmiştir. Çalışmada, plakanın üzerine termal macun uygulanmış ve termal macunun üstüne alüminyum kanatlar yerleştirilmiştir. Bu kanatlar, plaka yüzeyinden dışarıya doğru ısı transferini artırmak amacıyla kullanılmıştır. Dışarıdan bir fan kullanılmış ve kanadın tutucu alt kısmından sıcaklık ölçümleri yapılmış ve farklı fan konumları denenmiştir. Sınır tabaka, bir akışkanın katıyla temas halinde olduğu bölgedir. Çalışmada, sıcaklığı düşürmek istediğimiz yüzey, alüminyum kanatlarla kaplıdır. Sınır tabaka içinde akışkanın hızı yavaşlamakta ve ısı transferi bu bölgede yoğunlaşmaktadır. Fanın dik olarak yerleştirildiği durumda, akışkanın kanatlara çarpması ve ardından ayrılması, sınır tabakasının incelmesine neden olmaktadır. Bu durum ise sıcaklığın daha hızlı bir şekilde yüzeyden uzaklaştığı anlamına gelmekte ve daha iyi bir soğutma sağlanmaktadır. Sonuç olarak, fanın dik olarak yerleştirilmesi, sınır tabakasının incelmesine ve ısı transferinin artmasına neden olmaktadır. Bu durum ise ısının daha hızlı bir şekilde kanatlardan uzaklaştığı ve daha etkili bir soğutma sağlandığı anlamına gelmektedir.

Çalışma sonuçları, fanın kanada dik olarak yerleştirildiği durumun, kanadın alt tutucusunun en düşük yüzey sıcaklığına sahip olduğunu göstermiştir. Bu sonuç, termal yönetimde fan konumunun ve kanat yerleşiminin ısı transferini optimize etmek için önemli bir etken olduğunu göstermektedir. Bu bilimsel bulgular, endüstriyel uygulamalarda ve ısıl sistem tasarımında ısı transferini verimli bir şekilde kontrol etmek isteyen mühendisler için fayda sağlayabilir.

Sistemin kanatlar arasındaki basınç düşüşünü de içeren daha ayrıntılı bir çalışmayla analizi konunun daha iyi anlaşılmasına olanak sağlayacaktır. Adyabatik kanat ucu kabulü kısa süreli çalışma olması nedeniyle geçerli kabul edilebilmektedir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Bahadori,A., Vuthaluru, H.B.,(2010). Predictive tool for estimation of convection heat transfer coefficients and efficiencies for finned tubular sections. *International Journal of Thermal Sciences*, 49,1477-1483
- Bergman, T.L., Lavine, A.S.,Incropera, F.P., Dewitt, D.P. (2011). Fundamentals of Heat and Mass Transfer (7th ed.) United States of America. John Wiley & Sons.
- Ghafroki, P.S., Kallaste, A., Vaimann, T., Rassolkin, A., Belahcen, A.(2017). Determination of Forced Convection Coefficient Over a Flat Side of Coil. *58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*, 978-1-5386-3846.
- Illés, B., Harsányi, G.(2009). Investigating direction characteristics of the heat transfer coefficient in forced convection reflow oven. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33, 642–650
- Khaled, A-R.A., (2009). Analysis of heat transfer through Bi-convection fins. *International Journal of Thermal Science*, 48,122-132
- Lv, L., Xiang,Y.,Gu, Z., Huang, C., (2020). Dynamic characteristics of convection heat and radiation heat on building surfaces under cyclic heat flow. *Science Progress*, 105(1), 1–21.
- Niezgoda- Zelasko, B., Zelasko, J.(2014). Free and forced convection on the outer surface of vertical longitudinally finned tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 57,145–156.
- Rajasekaran, E., Kumar, B., Muruganandhan, R., Raman,S.V., Antony, U.(2018). Determination of forced convection heat transfer coefficients and development of empirical correlations for milk in vessel with mechanical agitators. *J Food Sci Technol*,55(7), 2514–2522.
- Sartori, E.(2006). Convection coefficient equations for forced air flow over flat surfaces, *Solar Energy*, 80,1063–1071
- Shih, T., Thamire, C., ve Zhang, Y., (2011). Heat convection length for boundary-layer flows. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38, 405–409.
- Xue, X., Han, S., Guo, D., Zhao, Z., Zhou, B., Li, F., (2022). Study of the Convective Heat Transfer Coefficient of Different Building Envelope Exterior Surfaces. *Buildings*, 12,860.
- Wu, S-Y., Wang, K., Xiao, L., & Chen, S-M., (2016). Wind Effect on Combined Convection and Surface Radiation Heat Losses of a Fully Open Cylindrical Cavity With Insulation. *Heat Transfer Engineering*, 37(5):456–467

Synthesis and Characterization of Poly(β -Propiolactone)-*b*-Poly(methyl methacrylate) Tri-arm Block Copolymer Using Atom Transfer Radical Polymerization

Ergül MEYVACI¹, Efkân ÇATIKER², Temel ÖZTÜRK^{3*}

Abstract

Terminally dibrominated poly(β -propiolactone) was prepared through sequentially ring-opening polymerization of β -propiolactone and dibromination of the former product. Synthesis of poly(β -propiolactone)-*b*-poly(methyl methacrylate) tri-arm block copolymer was achieved by atom transfer radical polymerization of methyl methacrylate onto the poly(β -propiolactone) with bromide end groups. The characterization of the polymers was carried out using ¹H-NMR, DSC, TGA, and GPC. GPC analysis of the final product resulted in an unimodal curve corresponding to the weight average molecular weight of 9353 g.mol⁻¹. TGA analysis of the tri-arm block copolymer exhibited a two-step decomposition curve corresponding to the β -propiolactone and the methyl methacrylate blocks at 212 °C and 411 °C, respectively. DSC analysis of poly(β -propiolactone)-*b*-poly(methyl methacrylate) tri-arm block copolymer showed two glass temperatures corresponding to the β -propiolactone and the methyl methacrylate blocks at -22.02 °C and 86.55 °C, respectively. The spectroscopic and thermal analyses proved that the tri-arm block copolymer was successfully synthesized through ring-opening polymerization and atom transfer radical polymerization, respectively.

Keywords: Atom Transfer Radical Polymerization, Macro Initiator, Poly(β -Propiolactone), Ring-Opening Polymerization, Tri-Arm Block Copolymer.

Poli(β -Propiyolakton)-*b*-Poli(Metil Metakrilat) Üç Kollu Blok Kopolimerinin Atom Transfer Radikal Polimerizasyonu ile Sentezi ve Karakterizasyonu

Öz

Son uçları dibromlanmış poli(β -propiyolakton), sırasıyla β -propiyolaktonun halka açma polimerizasyonu ve poli(β -propiyolakton)un dibrominasyonu yoluyla hazırlandı. Poli(β -propiyolakton)-*b*-poli(metil metakrilat) üç kollu blok kopolimer sentezi, metil metakrilatın bromür uç gruplarına sahip poli(β -propiyolakton) üzerine atom transferiyle radikal polimerizasyonu ile elde edildi. Polimerlerin karakterizasyonu, ¹H-NMR, DSC, TGA ve GPC kullanılarak gerçekleştirildi. Son ürünün GPC analizi, 9353 g.mol⁻¹ ortalama molekül ağırlığına karşılık gelen bir tek dağılımlı eğri gösterdi. Üç kollu blok kopolimerin TGA analizi, 212 °C ve 411 °C'de sırasıyla β -propiyolakton ve metil metakrilat bloklarına karşılık gelen iki basamaklı bozunma eğrisi sergiledi. Poli(β -propiyolakton)-*b*-poli(metil metakrilat) üç kollu blok kopolimerinin DSC analizi, -22.02 °C ve 86.55 °C'de sırasıyla β -propiyolakton ve metil metakrilat bloklarına karşılık gelen iki camı geçiş sıcaklığı gösterdi. Spektroskopik ve termal analizler, üç kollu blok kopolimerin sırasıyla halka açma polimerizasyonu ve atom transfer radikal polimerizasyonu yoluyla başarılı bir şekilde sentezlendiğini kanıtladı.

Anahtar Kelimeler: Atom Transfer Radikal Polimerizasyonu, Makro Başlatıcı, Poli(β -propiyolakton), Halka Açılması Polimerizasyonu, Üç Kollu Blok Kopolimer.

¹Giresun University, Department of Chemistry, Giresun, Turkey, mey2828@hotmail.com

²Ordu University, Department of Chemistry, Ordu, Turkey, ecatikerc@gmail.com

³Giresun University, Department of Chemistry, Giresun, Turkey, temel.ozturk@giresun.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0003-3530-1316>

²<https://orcid.org/0000-0003-2493-7570>

³<https://orcid.org/0000-0002-7856-9809>

1. Introduction

Ring-opening polymerization was greatly used to obtain novel copolymers (Coulembier et al., 2006; Çatiker et al., 2020; Öztürk et al., 2018; Öztürk, Yavuz et al., 2016; Öztürk et al., 2013; Öztürk et al., 2010; Savaş et al., 2021). The polymerization has been carried out many monomers with initiators and catalyst systems (Janata et al., 2003; Göktaş et al., 2014; Kurcok et al., 1992; Arkin et al., 2001; Arslan et al., 1999; Öztürk, and Yörümez, 2019; Öztürk and Türkoğlu, 2022). Polyesters polymerized from lactones have specific characteristics: biocompatibility, excellent mechanical properties, biodegradability, no toxicity, etc. (Chausson et al., 2008; Öztürk and Cavicchi, 2018; Öztürk and Meyvacı, 2017; Savaş et al., 2022). There are a lot of studies in the literature describing the mechanisms of ring-opening polymerization of lactones (Wang et al., 2017; Albertsson and Varma, 2003; Olsén et al., 2016; Lecomte and Jérôme, 2011). Copolymers have significant interest owing to mechanical properties and practices of them (Ruzette and Leibler, 2005; Zhang et al., 2018; Öztürk et al., 2014; Öztürk et al., 2020; Öztürk, Kaygın et al., 2016; Meyvacı and Öztürk, 2022). Block and graft copolymers have applications in industry (Altıntaş et al., 2011; Altıntaş and Tunca, 2011; Çatiker, Meyvacı et al., 2019; Bolton and Rzayev, 2012; Mitra et al., 2018; Hizal et al., 2005; Yigit et al., 2018; Muftuoglu et al., 2009; Dag et al., 2012; Durmaz et al., 2008). Atom transfer radical polymerization as a controlled/living radical polymerization technique has been widely used in copolymer synthesis (Öztürk, Yavuz et al., 2016; Ribelli et al., 2019; Król and Chmielarz, 2014) since first reported in 1995 (Wang and Matyjaszewski, 1995).

This study showed the synthesis of poly(β -propiolactone)-*b*-poly(methyl methacrylate) tri-arm block copolymer by atom transfer radical polymerization of poly(β -propiolactone) with bromide end groups and methyl methacrylate. The polymers were characterized using spectroscopic and thermal methods.

2. Experimental

2.1. Chemicals

β -propiolactone (Across Organics, 98 %), methyl methacrylate (Sigma-Aldrich, 99 %, a column including aluminum oxide powder was used to remove the inhibitors), sodium tert-butoxide (Sigma-Aldrich, 97%), bromine (Sigma-Aldrich, 98.0-102.0 %), toluene (Sigma-Aldrich, anhydrous \geq 99.8 %), methanol (Sigma-Aldrich, anhydrous 99.8 %), copper(I) bromide (Sigma-Aldrich, 98 %), and N,N,N',N',N''-pentamethyl diethylenetriamine (Sigma-Aldrich, 99 %) were used as purchased.

2.2. Synthesis of poly(β -propiolactone) by ring-opening polymerization

Synthesis of poly(β -propiolactone) was carried out according to the literature (Wang et al., 2017). For example: 0.711 g of β -propiolactone and 0.048 g of sodium tert-butoxide were placed in a Schlenk tube equipped with an argon source and magnetic stirrer. After vigorous stirring at ambient temperature mixture solidified in a short time. The solid was treated with a few mL of methanol to remove possible unreacted monomer and the initiator. The white product was filtered and dried using a vacuum pump at ambient temperature.

2.3. Synthesis of poly(β -propiolactone) with bromide end groups (ATRP macro initiator, ATRP MI)

Poly(β -propiolactone) with bromide end groups was obtained as the reference (Çatiker, Atakay et al., 2019). For example: 0.200 g of poly(β -propiolactone) was dissolved in 2.0 mL of chloroform. A drop of bromine was added to the solution and the mixture was stirred at room temperature overnight. Then the excess bromine and solvent were evaporated using a vacuum pump. The remaining yellowish solid was regarded as an ATRP macro initiator.

2.4. Synthesis of poly(β -propiolactone)-*b*-poly(methyl methacrylate) tri-arm block copolymer

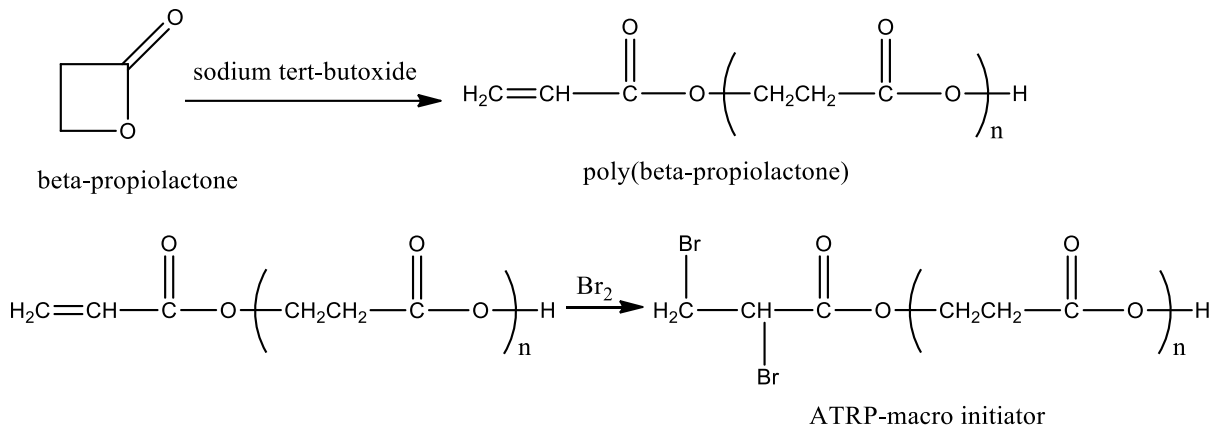
0.1411 g of poly(β -propiolactone) with bromide end groups (ATRP macro initiator, ATRP MI) as the macro initiator, 0.4725 g of methyl methacrylate as the monomer, 0.07 mL of N,N,N',N',N''-pentamethyl diethylenetriamine as the ligand and 5 mL of toluene as the solvent were placed in a glass tube. After dissolution, 0.0188 g of copper(I) bromide as the catalyst was poured into the tube, followed by N₂ gas injection for 3 minutes. The tube was set in an oil bath on a hot plate with a stirrer for 18 hours at 90 °C. At the end of the block copolymerization, the content of the tube was precipitated using excess methanol. After decantation, poly(β -propiolactone)-*b*-poly(methyl methacrylate) tri-arm block copolymer was dried in a vacuum at ambient temperature.

3. Results and Discussion

3.1. Syntheses of poly(β -propiolactone) and ATRP macro initiator (ATRP MI)

The synthesis outline of poly(β -propiolactone) was shown in Scheme 1 (line 1). Reaction yield

was quantitatively determined as 98.2 % wt. Scheme 1 (line 2) showed the synthesis pathway of ATRP macro initiator. Reaction yield was nearly 100 % wt. The $^1\text{H-NMR}$ spectrum (Bruker UltraShield Plus 400 MHz) of poly(β -propiolactone) in Figure 1 showed signals at; (δ , ppm): 7.2 (CDCl_3), 5.8-6.5 ($-\text{CH}=\text{CH}_2$), 4.4 ($-\text{CH}_2\text{O}$), and 2.7 ($-\text{CH}_2\text{C}=\text{O}$). The peaks of the vinyl group at 5.8-6.5 ppm in the NMR spectrum (Jedliński et al., 1991) proved the synthesis of poly(β -propiolactone) with the vinyl end group.



Scheme 1. Reaction outlines in the syntheses of poly(β -propiolactone) and poly(β -propiolactone) with bromide end groups (ATRP macro initiator, ATRP MI).

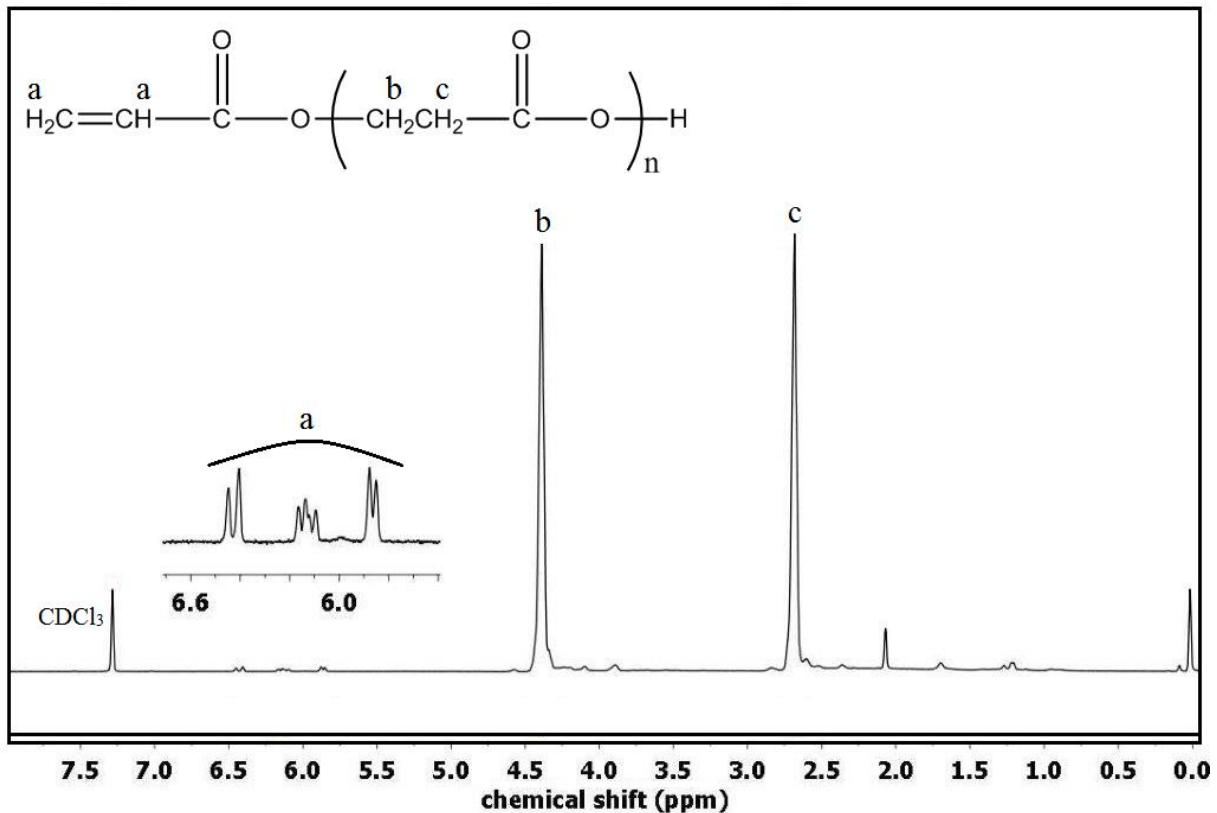
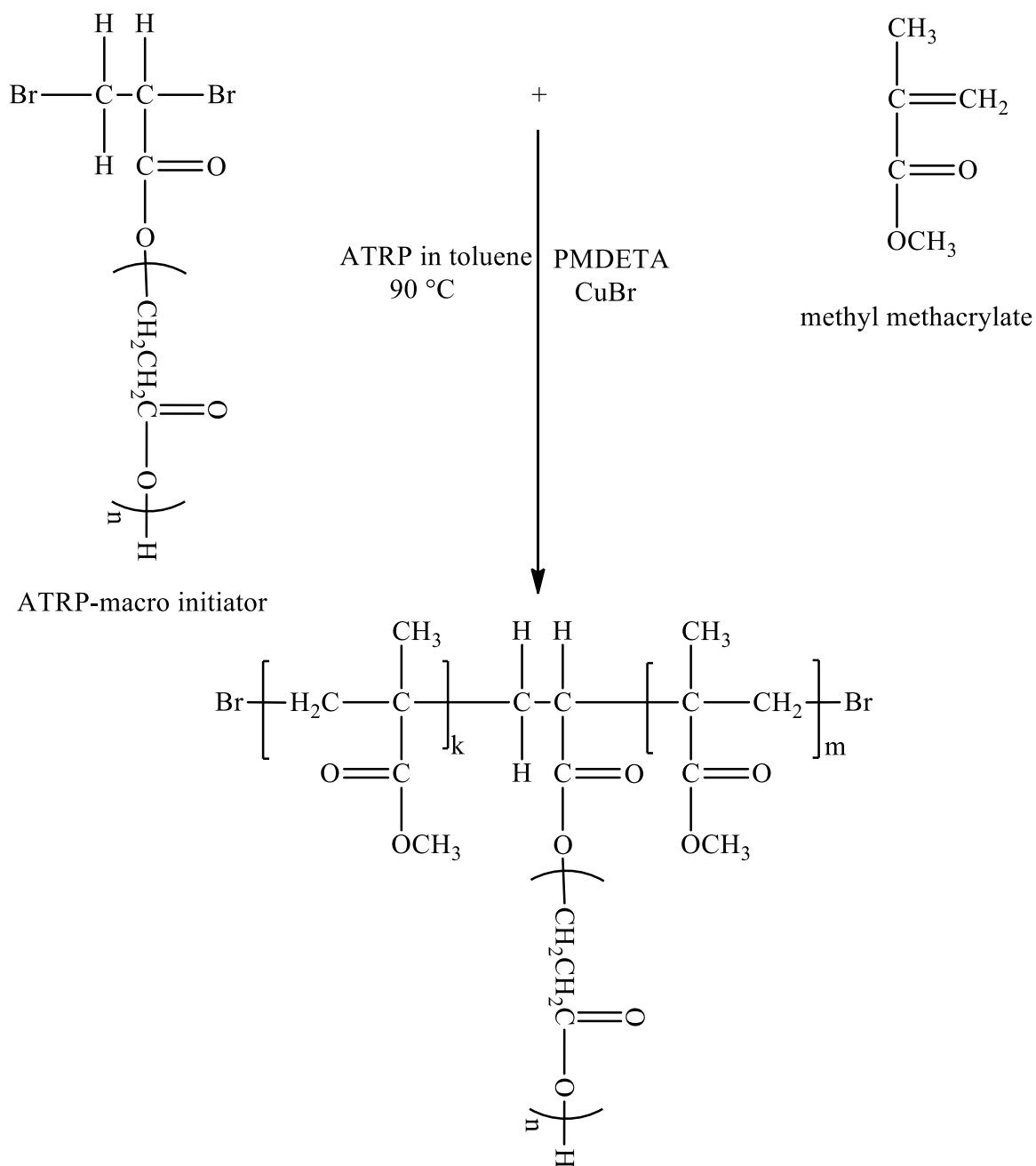


Figure 1. $^1\text{H-NMR}$ of poly(β -propiolactone) synthesized by ring-opening polymerization.

3.2. Synthesis of poly(β -propiolactone)-*b*-poly(methyl methacrylate) block copolymer

Synthesized poly(β -propiolactone)-*b*-poly(methyl methacrylate) tri-arm block copolymer was weighed as 0.1950 g. The block copolymerization outline was shown in Scheme 2. The $^1\text{H-NMR}$ spectrum of tri-arm block copolymer in Figure 2 monitored signals at; (δ , ppm): 4.4 ($-\text{CH}_2\text{O}$ of poly(β -propiolactone) unit), 3.6 ($-\text{CH}_3$ of poly(methyl methacrylate) unit), 2.7 ($-\text{CH}_2\text{C}=\text{O}$ of poly(β -propiolactone) unit), 1.8 ($-\text{CH}_2$ of poly(methyl methacrylate) unit), and 0.9 ($-\text{CH}_3$ of poly(methyl methacrylate) unit). GPC analysis (HPLC/GPC-Shimadzu, LC-20AD with tetrahydrofuran at rate of $1 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$. Poly(methyl methacrylate) standards: 2950, 5100, 12000, 35300, 73000 and 123000 $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$) of poly(β -propiolactone)-*b*-poly(methyl methacrylate) tri-arm block copolymer (Figure 3) resulted in a unimodal curve corresponding to the weight average molecular weight of $9353 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. The dispersity of the tri-arm block copolymer was 2.42. TGA analysis (Seiko II Exstar 6000, $10 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ under N_2) of the tri-arm block copolymer (Figure 4) exhibited a two-step decomposition curve corresponding to the β -propiolactone and the methyl methacrylate blocks at $212 \text{ }^\circ\text{C}$ and $411 \text{ }^\circ\text{C}$, respectively. Furthermore, DSC analysis (TA, DSC Q 2000, $20 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ under N_2) of poly(β -propiolactone)-*b*-poly(methyl methacrylate) tri-arm block copolymer (Figure 5) showed two glass temperatures corresponding to the β -propiolactone and the methyl methacrylate blocks at $-22.02 \text{ }^\circ\text{C}$ and $86.55 \text{ }^\circ\text{C}$, respectively.



Scheme 2. Reaction pathway in the synthesis of poly(β -propiolactone)-*b*-poly(methyl methacrylate) tri-arm block copolymer.

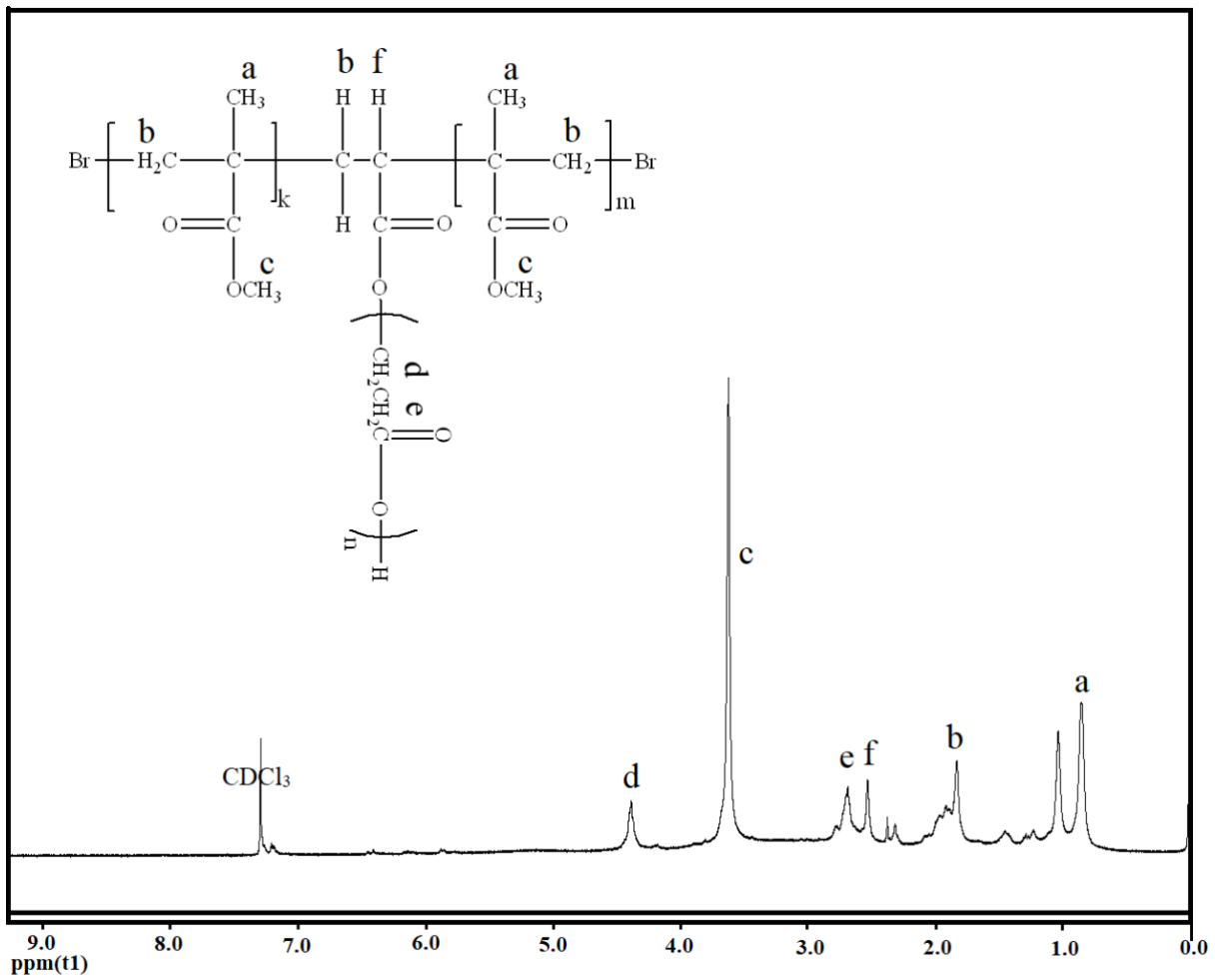


Figure 2. ¹H-NMR of poly(β-propiolactone)-*b*-poly(methyl methacrylate) tri-arm block copolymer.

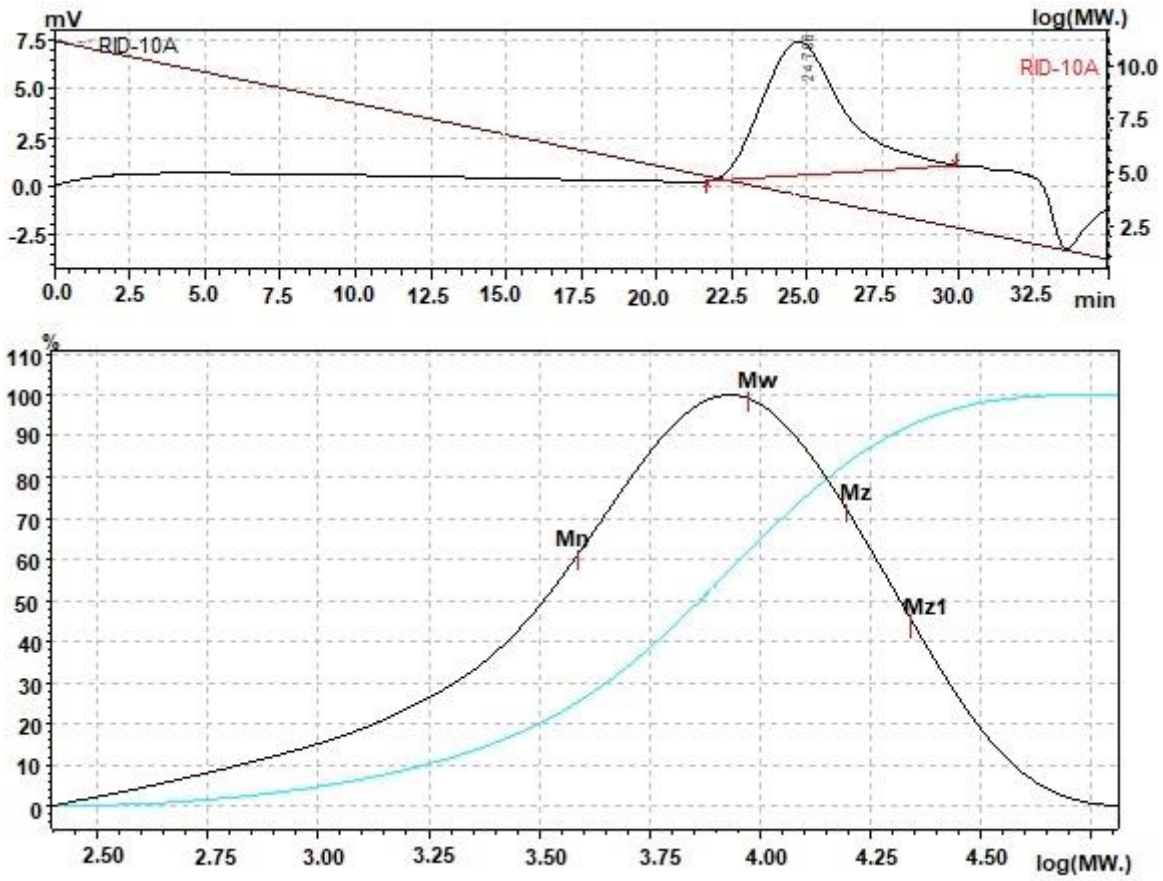


Figure 3. GPC curves of poly(β -propiolactone)-*b*-poly(methyl methacrylate) tri-arm block copolymer.

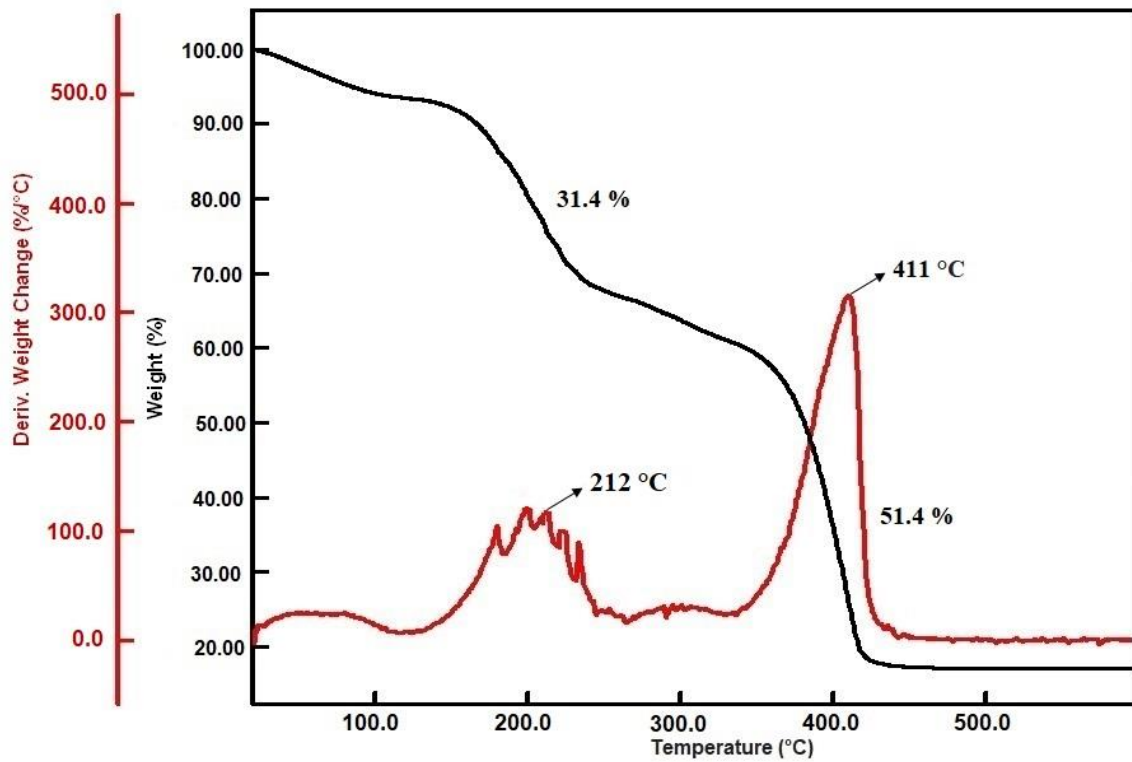


Figure 4. TGA curve of poly(β -propiolactone)-*b*-poly(methyl methacrylate) tri-arm block copolymer.

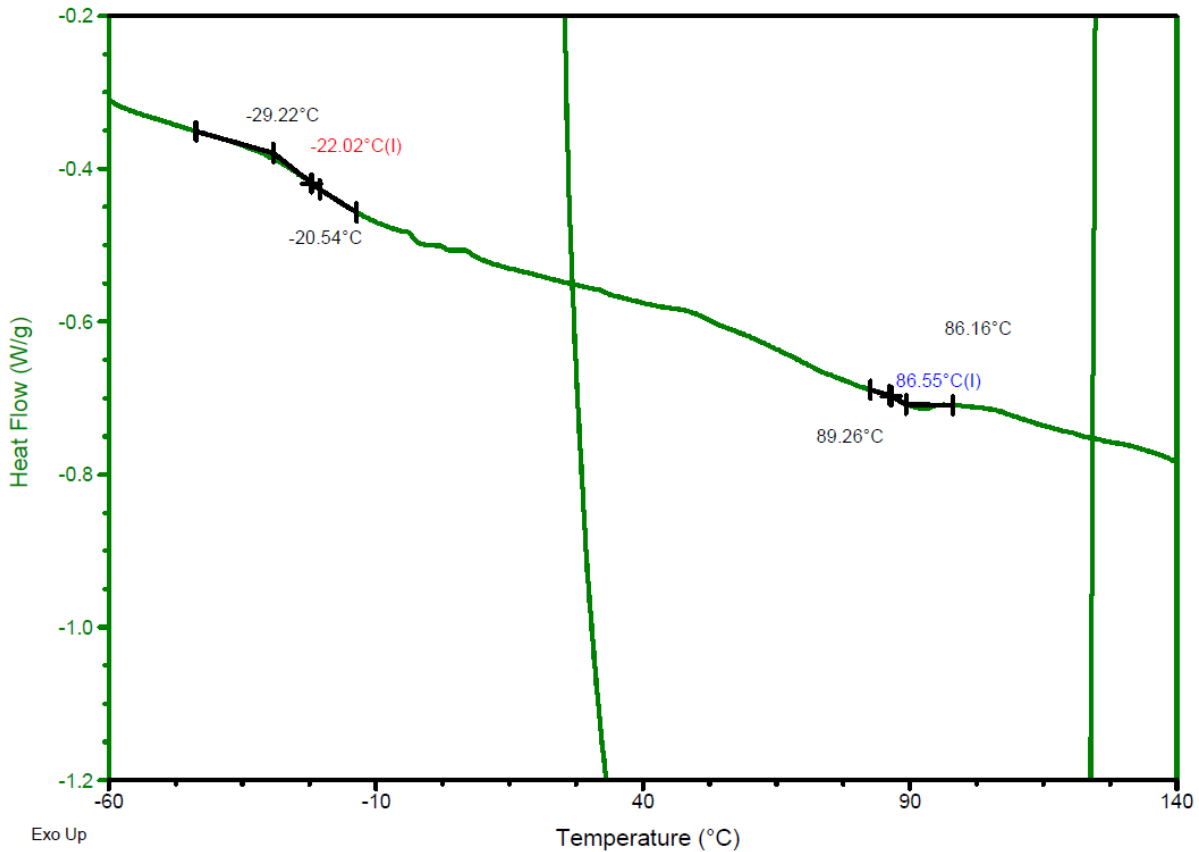


Figure 5. DSC curve of poly(β -propiolactone)-*b*-poly(methyl methacrylate) tri-arm block copolymer.

4. Conclusion

Poly(β -propiolactone)-*b*-poly(methyl methacrylate) tri-arm block copolymer was synthesized successfully via atom transfer radical polymerization using poly(β -propiolactone) with bromide end groups and methyl methacrylate. $^1\text{H-NMR}$, DSC, GPC, and TGA were carried out for the polymer characterization. These characterization techniques revealed that the tri-arm block copolymer was obtained. The weight average molecular weight of poly(β -propiolactone)-*b*-poly(methyl methacrylate) tri-arm block copolymer obtained was $9353 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. By varying the input ratios, the tri-arm block copolymer synthesis with desired mechanical properties can be achieved. This work is a good example of tri-arm block copolymer synthesis using ring-opening polymerization and atom transfer radical polymerization techniques.

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

- Coulember, O., Degee, P., Hedrick, J. L., and Dubois, P. (2006). From controlled ring-opening polymerization to biodegradable aliphatic polyester: Especially poly(β -malic acid) derivatives. *Progress in Polymer Science*, 31, 723-747.
- Çatiker, E., Öztürk, T., Atakay, M., and Salih, B. (2020). Synthesis and characterization of the ABA-type poly(ester-ether-ester) block copolymers. *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, 57, 600-609.
- Öztürk, T., Kılıçlıoğlu, A., Savaş, B., and Hazer, B. (2018). Synthesis and characterization of poly(ϵ -caprolactone-co-ethylene glycol) star-type amphiphilic copolymers by "click" chemistry and ring-opening polymerization. *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, 55, 588-594.
- Öztürk, T., Yavuz, M., Göktaş, M., and Hazer, B. (2016). One-step synthesis of triarm block copolymers by simultaneous atom transfer radical and ring opening polymerization. *Polymer Bulletin*, 73, 1497-1513.
- Öztürk, T., Atalar, M. N., Göktaş, M., and Hazer, B. (2013). One-step synthesis of block-graft copolymers via simultaneous reversible-addition fragmentation chain transfer and ring-opening polymerization using a novel macroinitiator. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 51, 2651-2659.
- Öztürk, T., Göktaş, M., and Hazer, B. (2010). One-step synthesis of triarm block copolymers via simultaneous reversible-addition fragmentation chain transfer and ring-opening polymerization. *Journal of Applied Polymer Science*, 117, 1638-1645.
- Savaş, B., Çatiker, E., Öztürk, T., and Meyvacı, E. (2021). Synthesis and characterization of poly(α -methyl β -alanine)-poly(ϵ -caprolactone) tri arm star polymer by hydrogen transfer polymerization, ring-opening polymerization and "click" chemistry. *Journal of Polymer Research*, 28, 30.
- Janata, M., Masar, B., Toman, L., Vlcek, P., Latalova, P., Brus, J., and Holler, P. (2003). Synthesis of novel types of graft copolymers by a "grafting-from" method using ring-opening polymerization of lactones and lactides. *Reactive & Functional Polymers*, 57, 137-146.
- Göktaş, M., Öztürk, T., Atalar, M. N., Tekeş, A. T., and Hazer, B. (2014). One-step synthesis of triblock copolymers via simultaneous reversible-addition fragmentation chain transfer (RAFT) and ring-opening polymerization using a novel difunctional macro-RAFT agent based on polyethylene glycol. *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, 51, 854-863.
- Kurcok, P., Kowalczyk, M., Hennek, K., and Jedlinski, Z. (1992). Anionic polymerization of β -lactones initiated with alkali-metal alkoxides: reinvestigation of the polymerization mechanism. *Macromolecules*, 25, 2017-2020.
- Arkin, A. H., Hazer, B., Adamus, G., Kowalczyk, M., Jedliński, Z., and Lenz, R. W. (2001). Synthesis of poly(2-methyl-3-hydroxyoctanoate) via anionic polymerization of α -methyl- β -pentyl- β -propiolactone. *Biomacromolecules*, 2, 623-627.
- Arslan, H., Adamus, G., Hazer, B., and Kowalczyk, M. (1999). Electrospray ionisation tandem mass spectrometry of poly [(R,S)-3-hydroxybutanoic acid] telechelics containing primary hydroxy end groups. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 13, 2433-2438.
- Öztürk, T., and Yörümez, C. (2019). Synthesis of block copolymer including polyepichlorohydrin and polyethylene glycol by "click" chemistry: Evaluation of primary parameters of copolymerization. *Polymer Bulletin*, 77, 4773-4788.

- Öztürk, T., and Türkoğlu, H. (2022). Synthesis and characterization of the graft copolymer including poly β -butyrolactone and polyvinyl chloride by ring-opening polymerization and "click" chemistry. *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, 59, 871-878.
- Chausson, M., Fluchère, A. S., Landreau, E., Aguni, Y., Chevalier, Y., Hamaide, T., Abdul-Malak, N., and Bonnet, I. (2008). Block copolymers of the type poly(caprolactone)-b-poly(ethylene oxide) for the preparation and stabilization of nanoemulsions. *International Journal of Pharmaceutics*, 362, 153-162.
- Öztürk, T., and Cavicchi, C. A. (2018). Synthesis and characterization of poly(epichlorohydrin-g- ϵ -caprolactone) graft copolymers by "click" chemistry. *Journal of Polymer Materials*, 35, 209-220.
- Öztürk, T., and Meyvacı, E. (2017). Synthesis and characterization poly(ϵ -caprolactone-b-ethylene glycol-b- ϵ -caprolactone) ABA type block copolymers via "click" chemistry and ring-opening polymerization. *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, 54, 575-581.
- Savaş, B., Meyvacı, E., Öztürk, T., and Ağırtaş, M. S. (2022). Synthesis and characterization of poly(ϵ -caprolactone) tetra-arm star polymer using tetra terminal alkynyl-substituted phthalocyanine by the combination of ring-opening polymerization and "click" chemistry. *Ovidius University Annals of Chemistry*, 33, 17-22.
- Wang, Q., Zhao, W., He, J., Zhang, Y., and Chen, E. Y. -X. (2017). Living Ring-Opening Polymerization of lactones by *N*-heterocyclic olefin/ $\text{Al}(\text{C}_6\text{F}_5)_3$ Lewis pairs: structures of intermediates, kinetics, and mechanism. *Macromolecules*, 50, 1, 123-136.
- Albertsson, A. -C., and Varma, I. K. (2003). Recent developments in ring opening polymerization of lactones for biomedical applications. *Biomacromolecules*, 4, 1466-1486.
- Olsén, P., Odellius, K., and Albertsson, A. -C. (2016). Thermodynamic presynthetic considerations for ring-opening polymerization. *Biomacromolecules*, 17, 699-709.
- Lecomte, P., and Jérôme, C. (2011). Recent developments in ring-opening polymerization of lactones. In: B. Rieger, A. Künkel, G. Coates, R. Reichardt, E. Dinjus, T. Zevaco (Eds.) *Synthetic biodegradable polymers. Advances in polymer science*, vol 245, Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/12_2011_144
- Ruzette, A. V., and Leibler, L. (2005). Block copolymers in tomorrow's plastics. *Nature Materials*, 4, 19-31.
- Zhang, M., Cui, Z., and Brinson L. C. (2018). Mechanical properties of hard-soft block copolymers calculated from coarse-grained molecular dynamics models. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 56, 1552-1566.
- Öztürk, T., Gökteş, M., Savaş, B., Işıklar, M., Atalar, M. N., and Hazer, B. (2014). Synthesis and characterization of poly(vinyl chloride-graft-2-vinylpyridine) graft copolymers using a novel macroinitiator by reversible addition-fragmentation chain transfer polymerization. *e-Polymers*, 14, 27-34.
- Öztürk, T., Savaş, B., Meyvacı, E., Kılıçlıoğlu, A., and Hazer, B. (2020). Synthesis and characterization of the block copolymers using the novel bifunctional initiator by RAFT and FRP technics: Evaluation of the primary polymerization parameters. *Journal of Polymer Research*, 27, 76.
- Öztürk, T., Kaygın, O., Gökteş, M., and Hazer, B. (2016). Synthesis and characterization of graft copolymers based on polyepichlorohydrin via Reversible Addition-Fragmentation Chain Transfer Polymerization. *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, 53, 362-367.
- Meyvacı, E., and Öztürk T. (2022). Modification of poly(styrene-co-acrylonitrile) with tetrazine by Inverse Electron Demand Diels-Alder Reaction. *ChemistrySelect*, 7, e202200668.
- Altıntaş, O., Tunca, U., and Barner-Kowollik, C. (2011). Star and miktoarm star block (co)polymers via self-assembly of ATRP generated polymer segments featuring Hamilton wedge and cyanuric acid binding motifs. *Polymer Chemistry*, 2, 1146-1155.
- Altıntaş, O., and Tunca, U. (2011). Synthesis of terpolymers by click reactions. *Chemistry: An Asian Journal*, 6, 2584-2591.
- Çatıker, E., Meyvacı, E., Atakay, M., Salih, B., and Öztürk, T. (2019). Synthesis and characterization of amphiphilic triblock copolymers including β -alanine/ α -methyl- β -alanine and ethylene glycol by "click" chemistry. *Polymer Bulletin*, 76, 2113-2128.
- Bolton, J., and Rzaev, J. (2012). Tandem RAFT-ATRP Synthesis of polystyrene-poly(methyl methacrylate) bottlebrush block copolymers and their self-assembly into cylindrical nanostructures. *ACS Macro Letters*, 1, 15-18.
- Mitra, K., Hira, S. K., Singh, S., Vishwakarma, N. K., Vishwakarma, S., Gupta, U., Manna, P. P., and Ray, B. (2018). In vitro anticancer drug delivery using amphiphilic poly(N-vinylpyrrolidone)-b-polyketal-b-poly(N-vinylpyrrolidone) block copolymer as micellar nanocarrier. *ChemistrySelect*, 3, 8833-8843.

- Hizal, G., Sakar, D., and Tunca, U. (2005). Synthesis of tri-arm star di-block co-polymer containing poly(tetrahydrofuran-b-methyl methacrylate) arms via combination of cationic ring-opening polymerization and photosensitized free radical polymerization routes. *Designed Monomers and Polymers*, 8, 609-617.
- Yigit, N. C., Hizal, G., and Tunca, U. (2018). A powerful tool for preparing peripherally post-functionalized multiarm star block copolymer. *Polymer Bulletin*, 75, 3523-3538.
- Muftuoglu, A., Mishra, M., and Yagci, Y. (2009). Block and graft copolymers. In M. K. Mishra and Y. Yagci (Eds.), *Handbook of vinyl polymers: radical polymerization, process, and technology* (pp. 307-344). New York: CRC Press Taylor & Francis Group, Ch. 11.
- Dag, A., Aydin, M., Durmaz, H., Hizal, G., and Tunca, U. (2012). Various polycarbonate graft copolymers via Diels-Alder click reaction. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 50, 4476-4483.
- Durmaz, H., Dag, A., Hizal, A., Hizal, G., and Tunca, U. (2008). One-pot synthesis of star-block copolymers using double click reactions. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 46, 7091-7100.
- Ribelli, T. G., Lorandi, F., Fantin, M., and Matyjaszewski, K. (2019). Atom Transfer Radical Polymerization: Billion times more active catalysts and new initiation systems. *Macromolecular Rapid Communications*, 40, e1800616.
- Król, P., and Chmielarz, P. (2014). Recent advances in ATRP methods in relation to the synthesis of copolymer coating materials. *Progress in Organic Coatings*, 77, 913-948.
- Wang, J. S., and Matyjaszewski, K. (1995). Controlled/"living" radical polymerization. atom transfer radical polymerization in the presence of transition-metal complexes. *Journal of the American Chemical Society*, 117, 5614-5615.
- Çatiker, E., Atakay, M., Salih, B., and Güven, O. (2019). Novel aliphatic polyester-based macromonomers. In: *Science and Technology of Polymers and Advanced Materials. Applied Research Methods*,
- Omari V. Mukbaniani, Tamara N. Tatrishvili, Marc J. M. Abadie (Eds.). New York: Apple Academic, Press, 1st Edition, Pages 466, eBook ISBN9780429425301. <https://doi.org/10.1201/9780429425301>
- Jedliński, Z., Kowalczyk, M., and Kurcok, P. (1991). What is the real mechanism of anionic polymerization of β -lactones by potassium alkoxides? A critical approach. *Macromolecules*, 24, 1218-1219.

GeoEye-1 Uydu Görüntüsü Kullanarak Ormanlık Alanların Nesne Tabanlı Sınıflandırma Yöntemi ile Analizi: Kastamonu İli Örneği

Duygu BIYIKLI^{1*}, Aycan Murat MARANGOZ²

Öz

Uzaktan algılama teknolojilerinin gelişmesi, farklı analiz yöntemleri ve yazılımlar sayesinde uydu görüntüleri üzerinden nesnelerin yüksek doğrulukla sınıflandırılmaları mümkündür. Bu çalışmada, Kastamonu Orman Bölge Müdürlüğü, Merkez İşletme Şefliğine ait 12X12 km'lik çalışma alanının, 3 Eylül 2011 tarihinde çekilmiş yüksek çözünürlüklü GeoEye-1 uydu görüntüsü kullanılarak, arazi örtü tipleri ve diğer sınıf türlerine ait sınıflandırma başarıları incelenmiştir. Genel doğruluk değeri %90.59 olurken kappa değeri ise 0.872 olarak bulunmuştur. eCognition yazılımı ile nesne tabanlı sınıflandırma yöntemi kullanılarak elde edilen yüksek doğruluklu sınıflandırılmış görüntü sonrası, 1/25000 ölçekli raster veri olan meşcere haritası NetCAD v5.2 yazılımı ile vektör veri haline getirilerek karşılaştırmalar için altlık olarak hazırlanmıştır. Uygulamanın devamında GeoEye-1 uydu görüntüsü elle vektörleştirilerek, sınıflandırma sonuçları ve meşcere haritasına ait vektör veri ile hem görsel hem de sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda ormancılık faaliyetlerinde kullanılan meşcere haritasının, hem büyük ölçekli hem konumsal çözünürlüğünün düşük olması hem de sadece orman örtü tipleri gibi geniş alanlara sahip sınıf türlerini göstermesinden kaynaklı, nesnelerin hassas sınıflandırılmaları için yeterli olmadığı sonucu elde edilmiştir. Görsel ve sayısal olarak yüksek doğrulukla elde edilen sınıflandırılmış GeoEye-1 uydu görüntüsü ile ormancılık alanında meşcere haritalarının yerine rahatlıkla kullanılabileceği de gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Nesne tabanlı sınıflandırma, eCognition yazılımı, Meşcere haritası, GeoEye-1 uydu görüntüsü, NetCAD v5.2 yazılımı.

Analysis of Forest Areas by Object-Based Classification Method Using GeoEye-1 Satellite Image: A Case Study of Kastamonu Province

Abstract

Thanks to the development of remote sensing technologies, different analysis methods, and software, it is possible to classify objects with high accuracy over satellite images. In this study, classification successes of land cover types and other class types were investigated by using a high resolution GeoEye-1 satellite image taken on September 3, 2011, of the 12X12 km study area belonging to Kastamonu Regional Directorate of Forestry, Central Operations Directorate. While the overall accuracy value was 90.59%, the kappa value was found to be 0.872. After the high-accuracy classified image obtained by using the object-based classification method with eCognition software, the stand map with 1/25000 scale raster data was converted into vector data with NetCAD v5.2 software and prepared as a base for comparisons. In the continuation of the application, the GeoEye-1 satellite image was vectorized manually and compared both visually and numerically with the classification results and the vector data of the stand map. As a result of the study, it was concluded that the stand map used in forestry activities is not sufficient for the precise classification of objects, since it shows both large-scale and low spatial resolution and only shows class types with large areas such as forest cover types. It has also been shown that the classified GeoEye-1 satellite image obtained with high visual and numerical accuracy can be easily used instead of stand maps in the field of forestry.

Keywords: Object-Based classification, eCognition software, Stand type maps, Geoeeye-1 satellite image, NetCAD V5.2 software.

¹Kastamonu Üniversitesi, İhsangazi Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Kastamonu, Türkiye, dbiyikli@kastamonu.edu.tr

²Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye, aycanmarangoz@hotmail.com

¹<https://orcid.org/0000-0002-0220-5101>

²<https://orcid.org/0000-0003-4409-6000>

1. Giriş

Uzaktan Algılama (UA) teknolojileri ve sayısal görüntü işleme tekniklerinin gelişmesiyle birlikte yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri üzerinden arazi örtüsü ile ilgili detay çıkarımı ve analiz yapmak oldukça kolaylaşmıştır. Arazi örtüsü zamansal olarak değişiklik göstermektedir. Hem kentsel hem de kırsal alanlarda görüntü üzerindeki her bir nesnenin değişimi çeşitli tekniklerle birlikte gerçeğe çok yakın sonuçlar verecek şekilde tespit edilebilmektedir (Lillesand ve ark., 2015). Değişim, nesnelerin Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı çeşitli yazılımlar sayesinde sınıflandırılmaları ile analiz edilebilmektedir. Algılayıcı teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte ormancılık, tarım, ulaşım, peyzaj, arsa ve arazi düzenleme gibi birçok nitelikli veri üzerinden anlamlı nesnelere çıkarılabilmektedir. Sınıflandırmanın temel mantığı, benzer spektral yansıma değerine sahip nesnelerin belirlenerek aynı sınıfa dâhil edilmesine dayanmaktadır. Günümüzde çeşitli sınıflandırma yöntemleri mevcut olmakla birlikte, literatürde en sık kullanılan piksel ve nesne tabanlı sınıflandırma yöntemleridir (Çölkesen ve Kavzaoğlu, 2017).

Piksel tabanlı sınıflandırma tekniği, görüntüdeki nesnelere ait sadece spektral değerleri dikkate alarak sınıflandırma yapan bir tekniktir. Sadece spektral değerlerin kullanılması çoğu zaman, benzer ya da yakın spektral değerlere sahip nesnelerin yanlış sınıflandırmasına da neden olmaktadır (Blaschke, 2010). Bu yaklaşıma ek olarak konumsal verilerin de sınıflandırmaya dâhil edilmesinin sınıflandırma doğruluğunu artıracak düşünülerek, nesne tabanlı sınıflandırma yöntemi geliştirilmiştir. Sınıflandırmada amaç görüntü üzerindeki nesnelerin gerçek dünyaya en yakın hâliyle analizinin yapılmasıdır. Bu nedenle piksel tabanlı sınıflandırma yöntemi yeterli olmamakla birlikte, nesne tabanlı sınıflandırma yönteminin kullanılması daha gerçek sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Piksel tabanlı sınıflandırma, arazi üzerindeki her türlü nesneyi piksel bazında değerlendirerek, nesnenin atanacağı sınıfı sadece spektral benzerlikle değerlendiren yöntemdir. Algılayıcı teknolojileri her ne kadar gelişmiş olsa da bu durum yöntemin yüksek doğruluklu sınıflandırma sonucu elde etmesini sağlayamamaktadır (Holland ve ark., 2006).

Nesne tabanlı sınıflandırma tekniği ise, ekolojik ve coğrafi gibi çevre disiplinlerini de analizlere dâhil eden bir yöntemdir (Blaschke ve Strobl 2001). Bu yöntemin en önemli işlem adımı segmentasyondur. Segmentasyon görüntünün anlamlı nesnelere ayrılmasını sağlayan ve sınıflandırma doğruluğunu en çok etkileyen aşamadır. Doğru parametrelerin kullanılarak yapıldığı sınıflandırma her zaman gerçeğe yakın sonuçlar vermektedir. Bu nedenle ölçek, şekil ve bütünlük parametreleri, hem görüntüye hem de sınıflandırılacak nesnelere en uygun şekilde belirlenmelidir (Yan ve ark., 2006). Segmentasyon homojenliği ifade ederken, amaç segmentlerdeki heterojenliği en aza indirmektir. Görüntü üzerinde milyonlarca pikselle sınıflandırma sonucu elde etmek yerine, nesnelere konumsal ve spektral olarak doğru bir şekilde yansıtacak segmentler oluşturmak, çok daha

anlamli nesnelere elde edilmesini sağlamaktadır. Sınıflandırma aşamasında kullanıcının, segmentasyon sonrası homojen bir şekilde seçtiği nesnelere, gerekli sınıflara ataması gerekmektedir (Baatz ve ark., 2004).

UA teknolojilerinin gelişmesi ile her ne kadar yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilse de ormanlık alanların analizi için düşük çözünürlüklü görüntülerin kullanılmasının daha olumlu sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır. Spektral varyansın yüksek olması; sınıflandırma için avantaj sayılırken, ormanlık alanlarda ki sınıfların belirlenmesinde bu durum özellikle ağaç türlerinin ayırımını oldukça zorlaştırmıştır (Shaban ve Dikshit, 2001).

Bu çalışmada, 2011 tarihli GeoEye-1 uydu görüntüsü kullanarak Kastamonu ili Merkez Orman İşletme Şefliğine ait sınırlar içerisinde çalışma alanı belirlenerek, “İbrelî, Yapraklı, Açık alan, Tarım alanı ve Bina” olmak üzere beş farklı sınıf için nesne tabanlı sınıflandırma analizi gerçekleştirilmiştir. Sınıflandırma eCognition yazılımı kullanılarak yapılmış olup, sınıflandırma sonrası sonuçlar veri hâline getirilmiştir. Uygulamada kullanılan GeoEye-1 uydu görüntüsü elle vektörleştirilerek; sınıflandırma sonrası ve 1/25000 ölçekli meşcere haritasının sayısallaştırılması ile elde edilen vektör veri ile karşılaştırılmıştır. GeoEye-1 uydu görüntüsü ve 1/25000 ölçekli meşcere haritası, raster ve vektör veri yapısını bünyesinde bulunduran NetCAD v5.2 yazılımı ile sayısallaştırılmıştır. Hem görsel hem de sayısal olarak yapılan analizler ile verilerin üstünlük ve eksikleri değerlendirilmiştir.

Çalışmanın literatüre sağlayacağı katkı ve özgünlüğü ise, nesne tabanlı sınıflandırma yönteminin farklı arazi örtüleri barındıran ormanlık alanlar için, manuel müdahale olmadan, algoritmalar sayesinde otomatik olarak çıkarımının yüksek doğrulukla yapıldığını göstermek kadar geçmiş tarihli meşcere haritalarının kullanımının da nesne çıkarımındaki etkilerini göstermek olmuştur. Ormanlık alanlarda yapılan çalışmalarda kullanılan tescilli 1/25000 ölçekli meşcere haritalarının güncel ve küçük boyutlu nesne ve alanları yansıtmadığını göstermek çalışmanın önemli ve özgün sonuçlarından birisidir. Uydu görüntüsünün alındığı tarihle, meşcere haritasının tescil tarihlerinin farklı olması arazi örtüsünde meydana gelen değişimi de zamansal olarak ortaya çıkarmıştır. Sınıflandırma başarısının yüksek doğrulukla elde edilmesi sonrası, elle vektörleştirilen uydu görüntüsü ile karşılaştırılması da; aynı veri üzerinde çalışılmasına rağmen spektral yansıma değerlerinin bazı sınıflarda yanlış çıkarıma neden olduğunu göstererek, kullanıcının sınıflandırma öncesi referans ek veriler kullanarak daha çok eğitim ve veri seti seçmesi gerekliliğini de göstermiştir.

2. Materyal ve Metot

Orman ağaçlarının yoğun olarak bulunduğu Kastamonu Orman Bölge Müdürlüğü, Merkez İşletme Şefliği sınırları içerisinde ki 24 320 ha alanda, 12 X 12 km’lik bir çalışma alanı belirlenmiştir. Seçilen alan içerisinde orman örtü tipleri haricinde farklı sınıfların olmasına da dikkat edilmiştir.

Farklı sınıf çeşitliliği, orman örtü tiplerinin kendi içerisindeki sınıflandırma başarısı kadar, diğer sınıflardan da ayırt edilebilme başarısını göstermek için önemlidir.

Çalışmada iki farklı veri kullanılmıştır. Bunlardan ilki yüksek çözünürlüklü GeoEye-1 uydu görüntüsü iken, bir diğeri 1/25000 ölçekli meşcere haritasıdır. GeoEye-1 uydu görüntüsü hem nesne tabanlı sınıflandırma hem de elle vektörleştirilerek analizler için kullanılmıştır. Meşcere haritası ormancılık faaliyetlerinde kullanılan, genel arazi örtüsünü çok küçük detaylar haricinde gösteren 1/25000 ölçekli bir haritadır. Bu iki veri ile analizlerin gerçekleştirilmesinin nedeni, ormancılık alanında kullanılan meşcere haritalarının, yeryüzünden oldukça uzun mesafelerden alınan uydu görüntüleri ve sınıflandırma tekniği ile karşılaştırılarak, birbirlerinin yerine kullanımlarının avantaj ve dezavantajlarının gösterilmesi için olmuştur. GeoEye-1 uydusu Tablo 1’de gösterildiği üzere 0.41 m pankromatik ve 1.65 m multispektral bantlarla yüksek konumsal ve spektral çözünürlüğe sahiptir. Şekil 1’de ise çalışma alanına ait 3 Eylül 2011 tarihinde alınan GeoEye-1 uydu görüntüsü gösterilmektedir. Atıldığı 6 Eylül 2008 tarihinden beri dünyanın en yüksek çözünürlüklü ticari gözlem uyduları arasındadır (URL-1). Görüntü verisi, Sayısal Yüksel Modeli (SYM) üzerinden 32 YKN seçilerek, 8 cm konumsal doğrulukla üretilmiştir.

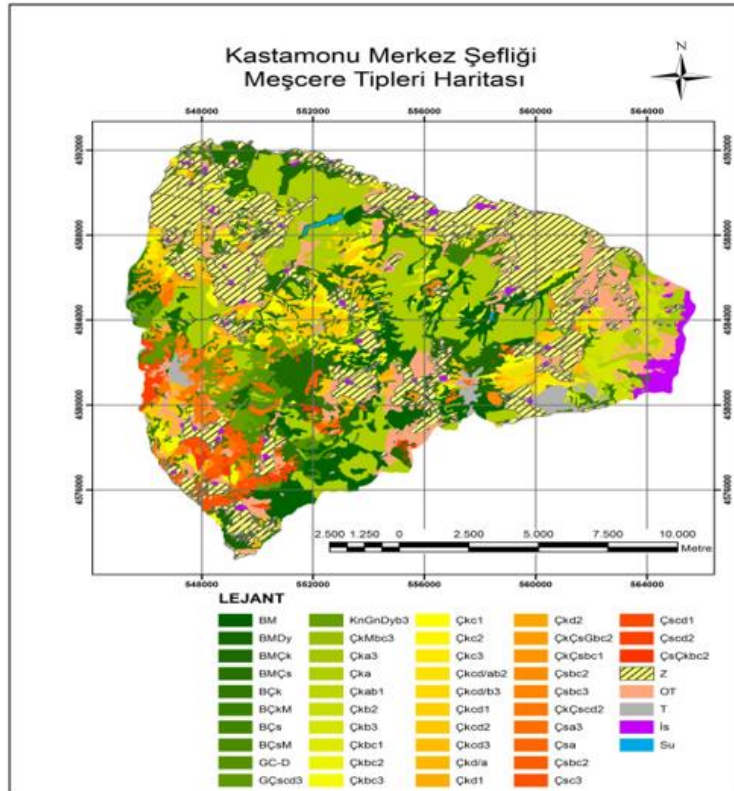
Tablo 1. GeoEye-1 uydu görüntüsünün teknik özellikleri (URL-1).

Yersel Çözünürlük (Pan/MS)	0.41 m/1.65 m
Spektral Çözünürlük (Pan/MS)	450-800 nm (pankromatik)
	450-510 nm (mavi)
	510-580 nm (yeşil)
	655-690 nm (kırmızı)
	780-920 nm (yakın IR)
Çerçeve Genişliği	15.2 km
Off-Nadir Görüntüleme	60 dereceye kadar
Dinamik Aralık	11 bit
Uydu Ömrü-Tahmini	10 yıldan fazla
Yeniden Geçiş Aralığı	3 günden az
Yörüngesel Yüksekliği	681 km
Nodal Crossing	10.30 sabah



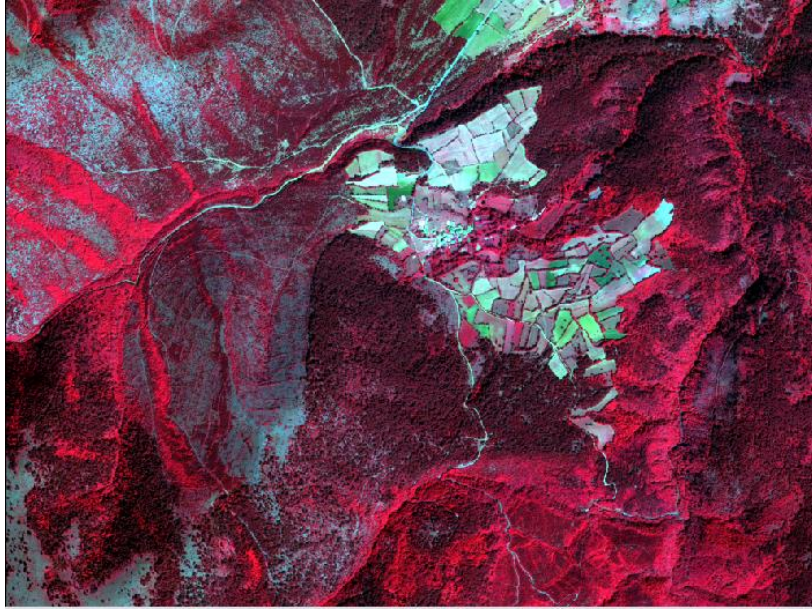
Şekil 1. Çalışma alanının yüksek çözünürlüklü Geoeye-1 uydusuna ait görüntüsü.

Ölçeği gereği fazla detay içermeyen, büyük alanlara sahip arazi ve orman örtülerini gösteren meşcere haritaları, ormancılık uygulamalarının hemen her aşamasında kullanılan önemli bir kaynaktır. Bu çalışmada kullanılan, Kastamonu Merkez Orman İşletme Şefliğine ait 1999 yapım tarihli meşcere haritası Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Kastamonu Merkez Orman İşletme Şefliğine ait meşcere haritası.

Ormancılık çalışmalarında doğal renkli görüntü yerine bant sıralaması değiştirilerek yer örtü tiplerinin birbirlerinden daha belirgin ayrılmasını sağlayan kızılötesi bantın sahip olduğu uydu görüntüleri kullanılmaktadır. GeoEye-1 görüntüsünün, ormancılık çalışmaları için büyük önem taşıyan 700 nm dalga boyundan sonraki kesime ait duyarlı yakın kızılötesi banta sahip olması uygulama için yeterli olmuştur. Yeşil bitkiler yapılarında buldukları klorofil nedeniyle, yakın kızıl ötesi bölgede az miktarda soğurularak büyük yansımaya değerlerine sahip olurlar. Klorofilin azalması yansımaya değerinin de azalacağı anlamına gelmektedir. Bu nedenle özellikle bitki örtüsünü içeren çalışma alanları için görüntünün alındığı iklim ve mevsim oldukça önemlidir. Çalışmada kullanılan yüksek çözünürlüklü GeoEye-1 uydu görüntüsü Eylül ayında alınmış olmasına rağmen, bu tarihte ormanlık alanda bulunan ve çalışmadaki “İbrelili ve Yapraklı” sınıf türlerinin değişime uğramaması, yansımaya değerleri ve ayırt edilebilirlikleri için olumsuz bir durum yaratmamıştır. Şekil 3’te doğal renkli GeoEye-1 uydu görüntüsünün bant sıralamasının değiştirilmesiyle elde edilen yapay renkli görüntü gösterilmektedir.



Şekil 3. Çalışma alanına ait yapay renkli GeoEye-1 uydu görüntüsü.

Çalışmada kullanılan uydu görüntüsü ve meşcere haritası üzerinden uygulamalara başlamak için üç farklı yazılım kullanılmıştır. GeoEye-1 uydu görüntüsünün nesne tabanlı sınıflandırılması ve vektörleştirilmesi için eCognition Developer 9.1, vektörleştirilen verinin sınıf türlerine ayrıştırılması ve CAD ortamında kullanımının hazır hâle getirilmesi için ArcGIS 9.3.1, uydu görüntüsünün elle vektörleştirilmesi, 1/25000 ölçekli meşcere haritasının sayısallaştırılması için de NetCAD v5.2 yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca tüm vektörel sonuçların hem görsel hem de sayısal olarak karşılaştırılmaları içinde yine NetCAD v5.2 yazılımı tercih edilmiştir.

eCognition Developer 9.1 yazılımı, Definiens firması tarafından geliştirilmiş olup günümüzde Trimble firmasına aittir. Sınıflandırma yöntemlerindeki eksiklik ve sınırlamaları minimuma indirerek, nesne tabanlı sınıflandırma yapan diğer yazılımlara göre daha fazla tercih edilmektedir (Baatz ve ark., 2004). Farklı konumsal ve spektral özelliklere sahip algılayıcılara ait görüntü verilerinin birleştirilerek kullanılmasını sağlaması ile de kullanıcılara avantaj sağlamaktadır. ArcGIS 9.3.1, ESRI firması tarafından geliştirilen hem raster hem de vektör veri ile çalışabilen bir yazılımdır. Arayüzü sayesinde kullanıcıya sorgulama ve analiz imkânı sunmasıyla sadece UA çalışmalarında değil, birçok meslek dalındaki çalışmalarda da kullanılan bir yazılım hâline gelmiştir. NetCAD v5.2 yazılımı, NETCAD Yazılım A.Ş tarafından geliştirilen ve kullanıcılara hassas koordinatlı veriyle çalışma imkânı sunan bir yazılımdır. Özellikle haritacılık biliminde kullanılan NetCAD v5.2 yazılımı, projeksiyon farklılıkları ve koordinat dönüşümü ile ilgili sorunları gidermesi sayesinde uzaktan algılama alanında da sıklıkla tercih edilmektedir. Bu çalışmada da uydu görüntüsü ve meşcere haritasının projeksiyon farklılıklarını gidererek ve arayüzünde bulundurduğu dönüşüm parametreleri ile aynı koordinat sistemine getirmeyi sağlayarak, analizler sorunsuz bir şekilde gerçekleştirilebilmiştir.

Aşağıdaki bölümde, uygulamalara geçilmeden önce, nesne tabanlı sınıflandırma yönteminde segmentasyon ve sınıflandırma doğruluğuna ilişkin detaylı bilgi verilmektedir.

2.1. Nesne Tabanlı Sınıflandırma Yöntemi

Nesne tabanlı sınıflandırma yönteminde görüntüdeki tekil pikseller yerine, bu piksellerden oluşturulan anlamlı nesnelere kullanılmaktadır. Sınıfları oluşturan nesnelere şekil, bütünlük, komşuluk ve özellikle ölçek boyutunda, gerçek dünya nesnelere yansıtacak şekilde segmentasyonlarının gerçekleştirilmeleri, sınıflandırma doğruluğu için en önemli etkidir (Shackelford ve Davis 2003; Carleer ve Wolff 2006; Blaschke 2010).

Görüntü üzerinde nesnelere her biri için ölçek parametresi oldukça önemlidir. Büyük bir alan içerisindeki küçük boyutlu nesnelere, büyük ölçek faktörü olarak doğru bir şekilde yansıtılmamaktadır. Bu durumda küçük objeler, kendilerinden farklı sınıflardaki nesnelere birleşerek yanlış sınıflandırma sonuçlarına neden olmaktadır. Sadece piksellerin spektral özelliklerinden başka, konumsal olarak da bilgilerin sınıflandırmaya dâhil edilmeleri doğruluğu oldukça arttıran bir faktördür. Bu anlamda bu konumsal bilginin de segmentasyon aracılığıyla doğru tanımlanması oldukça önemli bir işlem adımıdır (Mathiev ve ark., 2007).

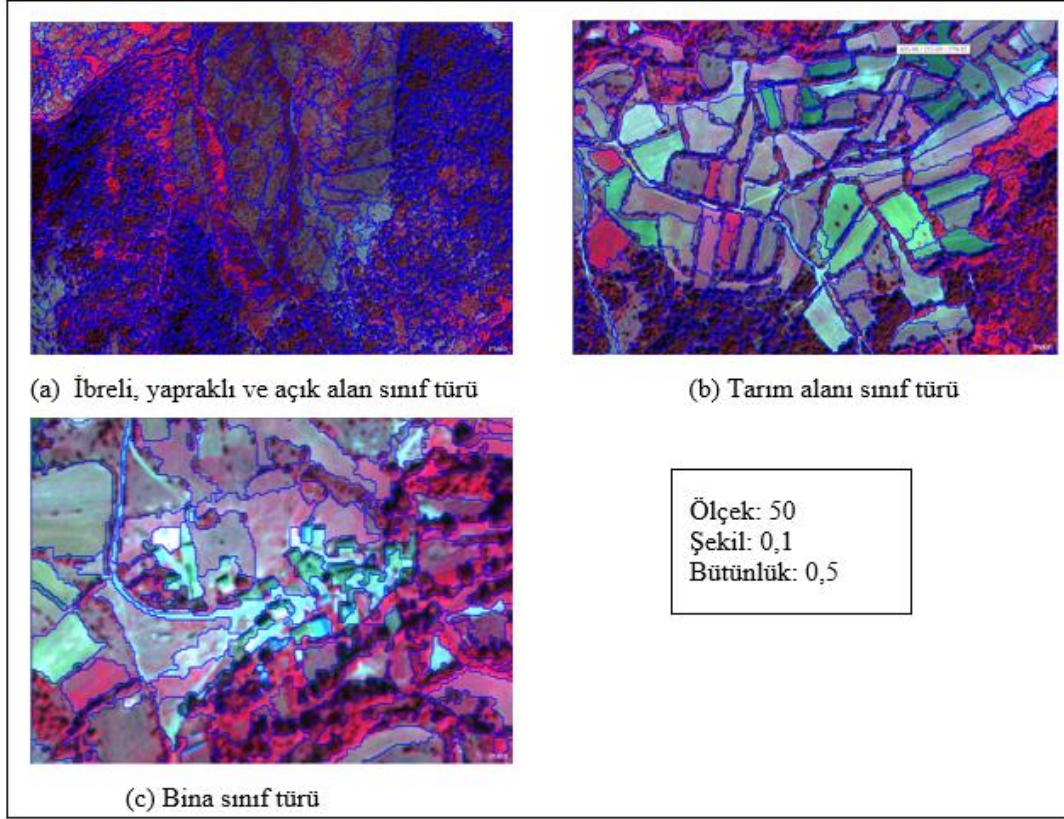
2.1.1. Segmentasyon

Segmentasyon, nesne tabanlı sınıflandırma yönteminin ilk ve en önemli adımıdır. Görüntü segmentasyonunda kullanılan yazılımlar sayesinde nesnelere otomatik olarak çıkartılabilmektedir. Burada önemli olan segmentasyon parametrelerinin görüntü nesnelere uygun değerler verilerek oluşturulmasıdır (Yan ve ark., 2006). eCognition yazılımı kullanıcılara segmentasyon için yukarıdan aşağı (top-down) ve aşağıdan yukarı (bottom-up) olmak üzere iki farklı yaklaşım sunmaktadır (Trimble, 2012). Yukarıdan aşağıya prensibine dayalı algoritmalar objelerin büyük parçalardan daha küçük parçalara bölünmesi esas alır. eCognition yazılımı bu yaklaşım için 4 farklı segmentasyon algoritması sunmaktadır. Bu algoritmalar, Chessboard, Quadtree-Based, Contrast Filter ve Contrast Split'tir. Bir diğer algoritma aşağıdan yukarıya, küçük objelerin birleşerek homojen ve daha büyük objelerin oluşması mantığına dayanmaktadır. Bu yaklaşım da kullanıcılar üç farklı algoritma sunmaktadır. Bunlar, Multi-Resolution, Multi-Threshold ve Spectral Difference Segmentasyon algoritmalarıdır. İçlerinde uygulamalarda en sık kullanılan algoritma Multi-Resolution yani Çoklu Çözünürlük algoritmasıdır (Baatz, 2000). Burada amaç spektral (renk) ve şekilsel heterojenite (yumuşaklık ve yoğunluk) kriterler doğrultusunda, anlamlı ve gerçeğe yakın nesnelere oluşturulmaktadır. Alan birleştirme özelliği ile de küçük piksellerin büyük piksel grupları içinde birleşmesini sağlar (Baatz, 2000; Benz ve ark., 2004). Segmentasyon algoritması ile görüntü üzerinden nesnenin homojen ve doğru çıkarımını yapmak için ölçek, şekil ve bütünlük kriterlerinin amaca uygun tanımlanması gerekmektedir. Bu aşamada seçilen segmentasyon parametreleri sınıflandırma doğruluğu için oldukça önemli bir adımdır.

Sınıflandırma için en önemli parametre ölçektir. Ölçek parametresi direkt görüntü nesnesinin boyutunu etkilemektedir. Parametre değeri ne kadar büyük seçilirse görüntü nesnelere arasında ki detay ayrımı o kadar azalacaktır. Birçok nesne birbirinden ayrılmayacak, bu durum da sınıflandırmayı olumsuz etkileyecektir (Maktav ve Sunar, 1991; Benz ve ark., 2004). Şekil parametresi, segmentasyon sonrası oluşacak nesnelere renk ve şekil kriterleri arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Parametre 0 ile 1 arasında bir değer almaktadır. Aralarında artan ve azalan oranda ters bir ilişki vardır yani şekil kriteri 0.4 iken renk kriteri 0.6 değerini alacaktır. Bütünlük parametresi ise nesnelere daha bütün ve yumuşak olmalarını sağlar. Bu parametre de 0 ile 1 arasında değer alır (eCognition 2011).

Bu çalışmada çoklu çözünürlük (multi resolution) segmentasyon yöntemi kullanılmıştır. Ölçek, şekil ve bütünlük parametrelerinin seçimi için farklı değerler ile denemeler yapılmış ama "Bina ve Açık Alan" sınıflarına ait alanların doğru yansıtılması için ölçek parametresi oldukça küçük seçilmiştir. Denemeler sonrası segmentasyon sonuçlarına bakılmış ve çalışmadaki sınıfları en doğru şekilde yansıtacak değerlerin ölçek parametresi için 50, şekil parametresi için 0.1 ve bütünlük

parametresi için de 0.5 olduğuna karar verilmiştir. Şekil 4'te bu parametre değerleri uygulanarak yapılmış segmentasyon sonucu gösterilmektedir.



Şekil 4. Sınıflara ait segmentasyon sonucu.

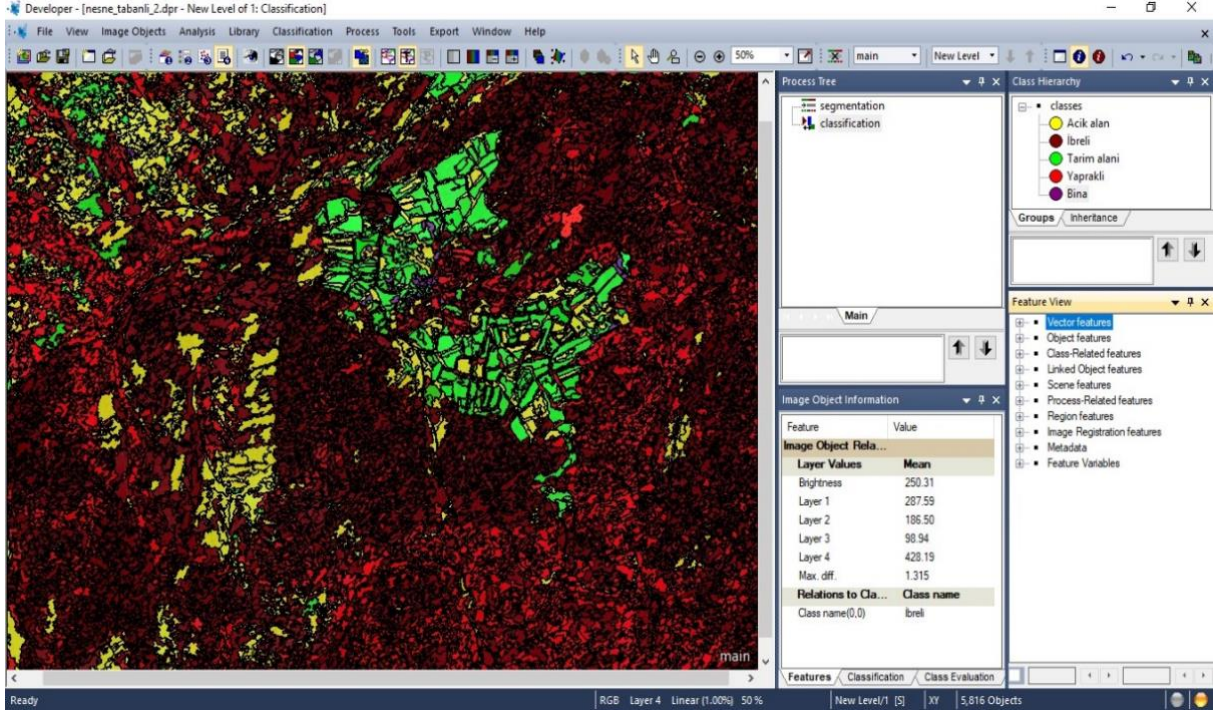
2.1.2. Sınıflandırma Aşaması

Segmentasyon işleminden sonra sınıflandırma için bir yöntem seçilmektedir. Segmentasyon, görüntü üzerinden anlamlı nesnelere oluşmasını sağlar. Kullanıcı artık piksel bazında değil, nesne bazında düşünerek hareket edecektir. Sınıflandırmanın amacı oluşan anlamlı nesnelere, olması gereken sınıflara seçerek atamaktır. Bu işlem sadece spektral değerlere göre değil şekil, doku, içerik ve bunlarla birlikte semantik bilgileri de göz önünde bulundurularak yapılmaktadır.

eCognition yazılımı ile iki farklı şekilde sınıflandırma yapmak mümkündür. İlki en yakın komşuluk (nearest neighbour) sınıflandırma yöntemi ile oluşturulan sınıflara ait segmentasyon sonrası oluşan nesnelere görüntü üzerinden homojen bir dağılımla seçilerek, yazılıma tanıtılması ile yapılmaktadır (Jensen, 1996). İkinci sınıflandırma yöntemi ise, kullanıcının sınıflara ait özellikler ve bunlara tanımlanan eşik değerler ile karar seti dosyaları oluşturmasıyla yapılmasıdır. Segmentasyon için kullanılan parametrelerin değerleri, alansal ve konumsal nitelikler ya da hangi bantın, hangi aralıklarla kullanılacağı gibi özellikler karar seti için belirlenmektedir. Diğer sınıflandırma yönteminden farkı, kullanıcı segmentasyon sonrası oluşan nesnelere üzerinden bir seçim yapmaz, onun

yerine yazılıma tanıtılan kurallar bazında nesnelere otomatik olarak sınıflara aktarılır. Burada yeterli görülmediği durumlarda karar setlerine eklemeler ya da eşik değerlerde değişiklikler yapılabilmektedir.

Bu çalışmada eCognition yazılımının kullanıcılara sunduğu en yakın komşuluk sınıflandırma yöntemi seçilerek sınıflandırma yapılmıştır. Şekil 5'te eCognition yazılımında tanımlanan sınıflar ve kurallar gösterilmektedir.



Şekil 5. eCognition yazılımı ile sınıflar ve kuralların tanımlanması.

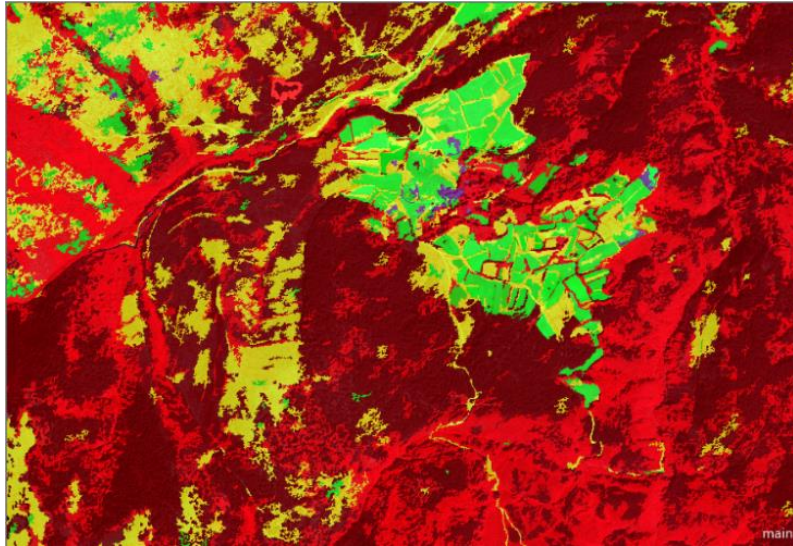
2.1.3. Sınıflandırma Doğruluğu

Sınıflandırma doğruluğu, sınıflandırmanın son işlem adımındır. Bu işlem, arazi çalışması, hava fotoğrafları ya da yüksek çözünürlüklü uydu görüntüleri, büyük ölçekli haritalar gibi farklı verilerle desteklenebilmektedir. Hata matrisi oluşturmak, doğruluk için en yaygın kullanılan yöntemdir. Hata matrislerinin amacı sınıflara atanan nesnelere, gerçek dünya nesnelere yüzdelik olarak birbirlerine yakınlıklarını referans verilerle sağlamaktır. Hata matrisi ile kullanıcı doğruluğu (KD), üretici doğruluğu (ÜD) ve genel doğruluk (GD) yaygın olarak hesaplanan değerlerdir (Yan, 2003). Kullanıcı Doğruluğu (KD)-(User Accuracy-UA), sınıflandırılan pikselin gerçekte o sınıfa ne kadar ait olduğunu gösterir. Üretici Doğruluğu (ÜD)- (Producer Accuracy-PA), piksel veya nesnenin gerçek değerinde sınıflandırma yüzdeliğini gösteren değerdir. Genel Doğruluk (GD)- (Overall Accuracy-OA) ise her bir sınıf için doğru şekilde sınıflandırılmış piksel ya da nesne sayısının, toplam referans piksel sayısına bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Kullanıcı ve üretici doğruluğunun hesaplanması genel bir

doğruluk değerlendirmesi yapılmasını sağlar. Kappa Değeri (k) ise hata matrisinin satır ve sütun elemanlarının toplamı ve ana köşegen üzerindeki elemanlar kullanılarak hesaplanır. 0 ile 1 arasında bir değer alır. Değerin 1'e yakınlığı sınıflandırma başarısı ile doğru orantılıdır (Lillesand ve ark., 2015). Değerlendirme sonrası istenilen durum, kappa değerinin genel doğruluktan küçük olmasıdır. Doğruluk kriteri model değerlendirmelerinde sıklıkla kullanılan bir değer olmakla birlikte "Kesinlik, Hassasiyet ve F1 Skoru"da tercih edilen kriterler arasındadır. Kesinlik, oluşturulan modelin ne kadar doğru olduğunu; Hassasiyet, modelde oluşturulan örneklemelerin ne kadar doğru seçildiğini ya da modelin doğru örneklem bulma yeteneğini; F1 Skoru ise kesinlik ve hassasiyeti birleştiren bir modelin harmonik ortalaması, bir fonksiyonunu göstermektedir (Sunnetci ve ark.,2023). Bu çalışmada GD ve Kappa Değeri kriterli kullanılarak doğruluk analizi gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

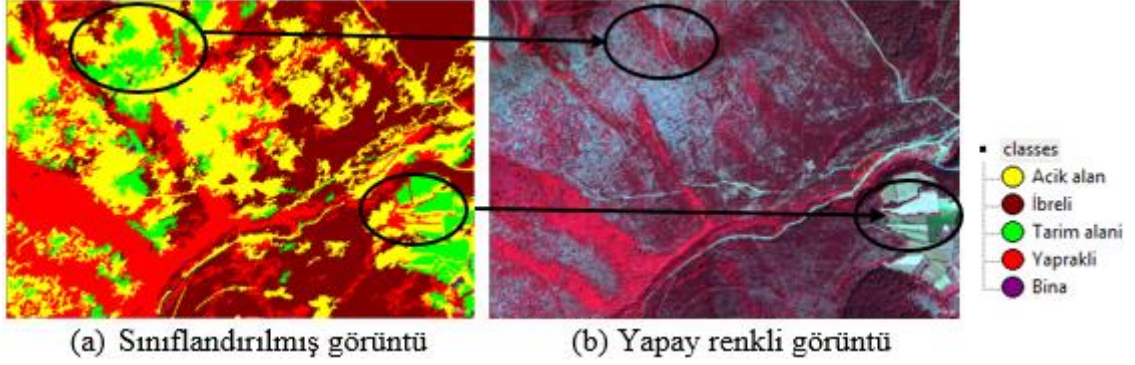
GeoEye-1 uydu görüntüsü üzerinden "İbrelî, Yapraklı, Tarım alanı, Bina ve Açık alan" olmak üzere beş adet sınıf belirlenerek nesne tabanlı sınıflandırma ile analizler gerçekleştirilmiştir. eCognition yazılımı ile yapılan sınıflandırmada en yakın komşuluk (nearest neighbour) yöntemi seçilerek sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 6'da sınıflandırma sonrası elde edilen GeoEye-1 uydu görüntüsü gösterilmektedir.



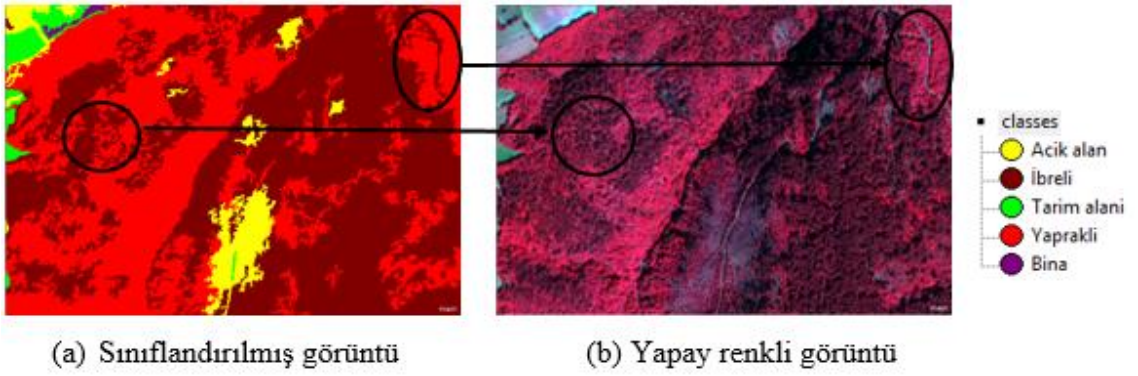
Şekil 6. Sınıflandırılmış GeoEye-1 uydu görüntüsü

Her ne kadar segmentasyon parametrelerinin seçiminde özellikle nesne büyüklükleri yeterli hassasiyette seçilmiş ve sınıflandırma işleminde homojen bir dağılımla nesnelere sınıflara atanmış olsa da, bazı sınıflara ait hatalı sınıflandırma sonuçları görülmektedir. Aşağıdaki Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9,

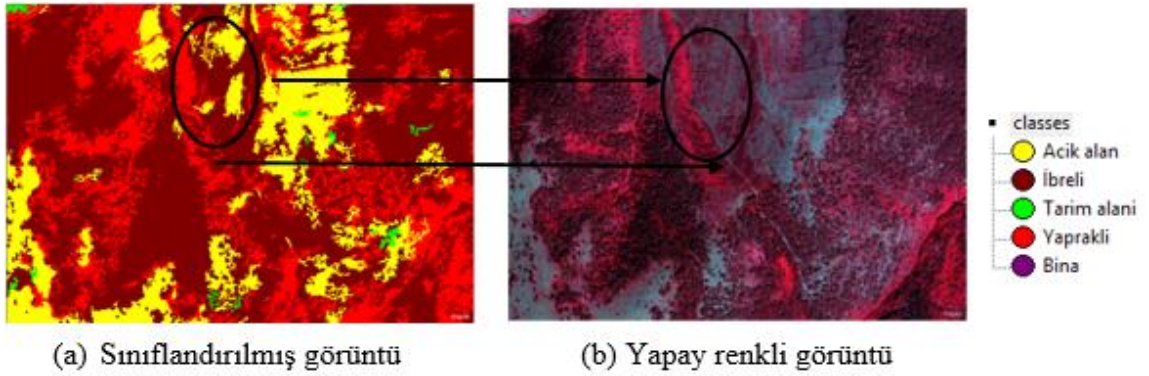
Şekil 10 ve Şekil 11’de sınıflandırılmış görüntü ile sınıflandırma öncesi yapay renkli GeoEye-1 uydu görüntüsü görsel olarak karşılaştırılmıştır.



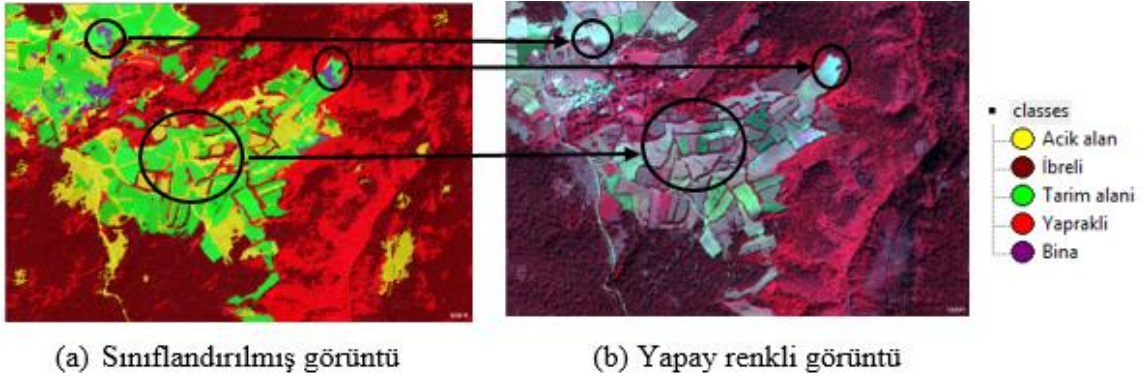
Şekil 7. Nesne tabanlı sınıflandırma sonuçlarının görsel olarak incelenmesi örneği-1.



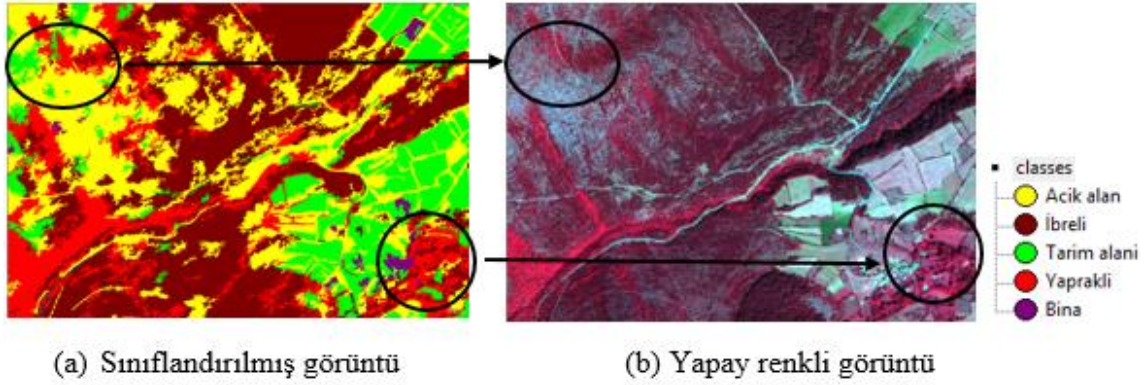
Şekil 8. Nesne tabanlı sınıflandırma sonuçlarının görsel olarak incelenmesi örneği-2.



Şekil 9. Nesne tabanlı sınıflandırma sonuçlarının görsel olarak incelenmesi örneği-3.



Şekil 10. Nesne tabanlı sınıflandırma sonuçlarının görsel olarak incelenmesi örneği-4.



Şekil 11. Nesne tabanlı sınıflandırma sonuçlarının görsel olarak incelenmesi örneği-5.

Şekillere bakıldığında özellikle “Bina, Açık alan ve Tarım alanı” sınıflarında spektral yansıma değerlerinin benzerliğinden kaynaklı yanlış sınıflara atandıkları görülmektedir. “Açık alan” ya da “Bina”ların, “Tarım Alanı” olarak sınıflandırılması çalışmanın genelinde bir sorun olarak karşımıza çıkmıştır. Hatta bazı sınıfların tamamen özelliklerini kaybederek o bölgede başka bir sınıfa atandıkları gözlemlenmiştir. “İbrelî ve Yapraklı” sınıf türlerinin ise görsel olarak gerçeğe yakın bir şekilde sınıflandırıldıkları görülmektedir. Bu da hem yakın kızılötesi bant ile çalışmanın hem de sınıflandırma parametre ve algoritmalarının ormanlık alanlar için başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Bundan sonraki işlem adımı, sınıflandırma doğruluğunun analizinin yapılmasıdır. Sınıflandırma doğruluğunun analizi için eCognition yazılımındaki “Statistic Type Error Matrix based on Samples” yöntemi seçilerek kullanılmıştır. Bu yöntem ile segmentasyon sonrası seçilen örnek alanlar gibi, doğruluk analizinde de sınıflar için homojen dağılımla örnek alanlar seçilmektedir. Tablo 2’de de doğruluk analizi sonucunda elde edilen yüzdelik değerler gösterilmektedir.

Tablo 2. Nesne tabanlı sınıflandırmaları için doğruluk analizi sonuçları.

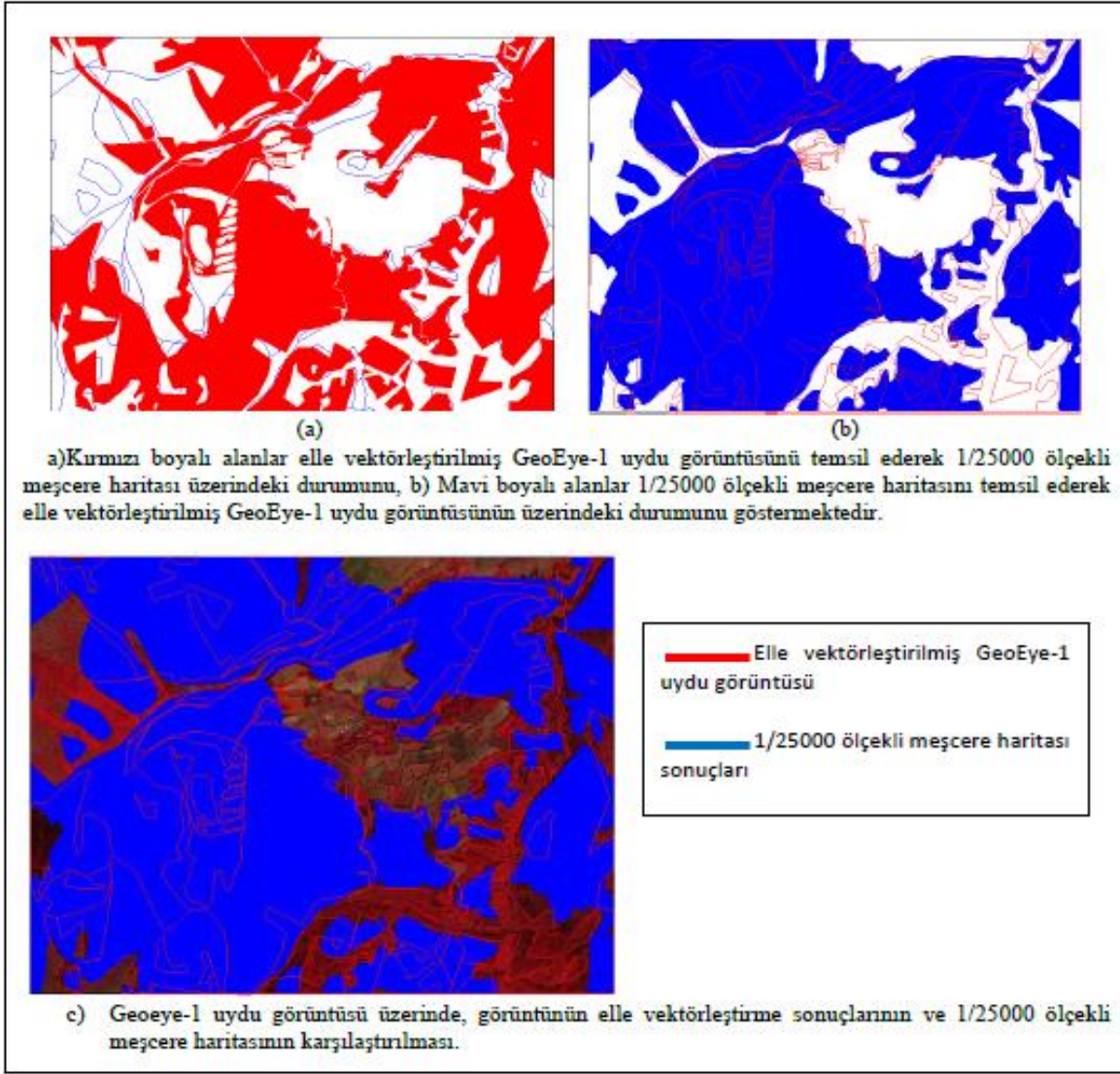
Sınıflar	En Yakın Komşuluk		
	ÜD (%)	KD (%)	Kappa
İbrelili	%93.58	%97.22	0.897
Yapraklı	%97.17	%88.80	0.963
Tarım alanı	%78.57	%91.67	0.748
Bina	%75	%81.81	0.744
Açık alan	%89.89	%81.63	0.873
Genel Doğruluk		%90.59	
Kappa		0.872	

Tablo 2’deki sayısal yüzdeler değerlere bakıldığında genel olarak, spektral yansıma değerlerinin benzerliğinden kaynaklı yanlış sınıflandırılan alanlar olmasına rağmen yine de yüksek doğruluklu sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bu da bir çalışma için başarılı bir sınıflandırma yapıldığının sonucudur.

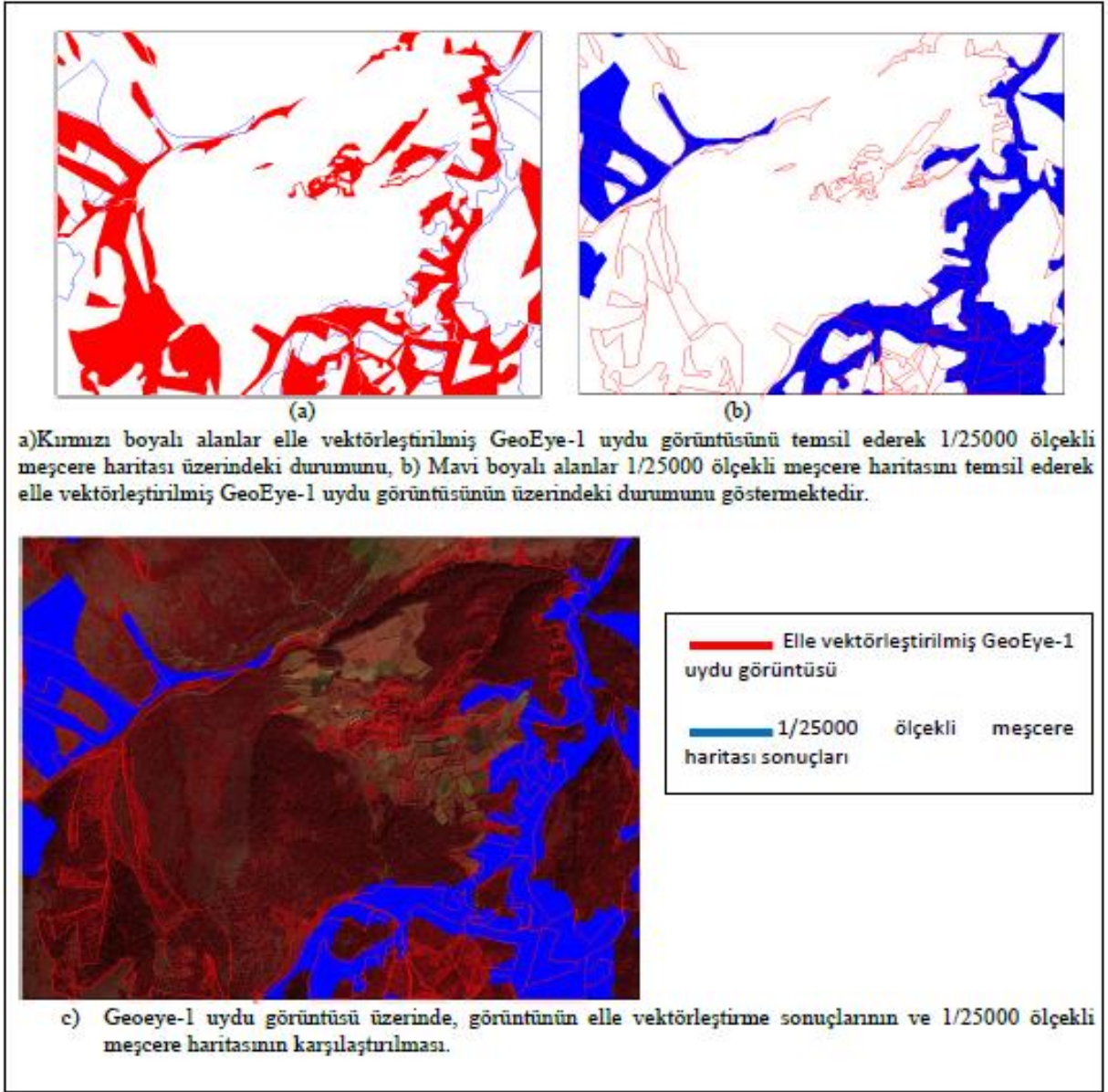
Nesne tabanlı sınıflandırma yöntemi ile başarıyla sınıflandırılan GeoEye-1 uydu görüntüsü, eCognition yazılımının “export” menüsü ile vektörleştirilerek “*.shp” uzantılı bir dosya olarak kaydedilmiştir. Kaydedilen GIS tabanlı dosya, ArcGIS 9.3.1 yazılımında sınıflara ayrılarak, NetCAD v5.2 yazılımında kullanılmak üzere “*.NCZ” uzantılı dosya olarak kaydedilmiştir. CAD sistemi üzerinden çalışılmasının nedeni, pratik ve dinamik bir şekilde vektör veriler ile işlemlerin yapılabildiği içindir. Nesne tabanlı sınıflandırma sonuçlarının vektörleştirilmesinden sonra, GeoEye-1 uydu görüntüsü de hassas bir şekilde elle sayısallaştırılmıştır. Bu işlemin devamında 1/25000 ölçekli meşcere haritası da raster veri üzerinden elle sayısallaştırılarak, vektör veri elde edilmiştir. Çalışmanın devamında elle vektörleştirilmiş GeoEye-1 görüntüsü baz alınarak nesne tabanlı sınıflandırma verisinin doğruluğu ve meşcere haritasının sınıflar üzerindeki detay ve ayırım başarısı analiz edilmek üzere, vektör veriler karşılaştırılmıştır.

3.1. Elle Vektörleştirilmiş GeoEye-1 Uydu Görüntüsü ile 1/25000 Ölçekli Meşcere Haritasının Karşılaştırılması

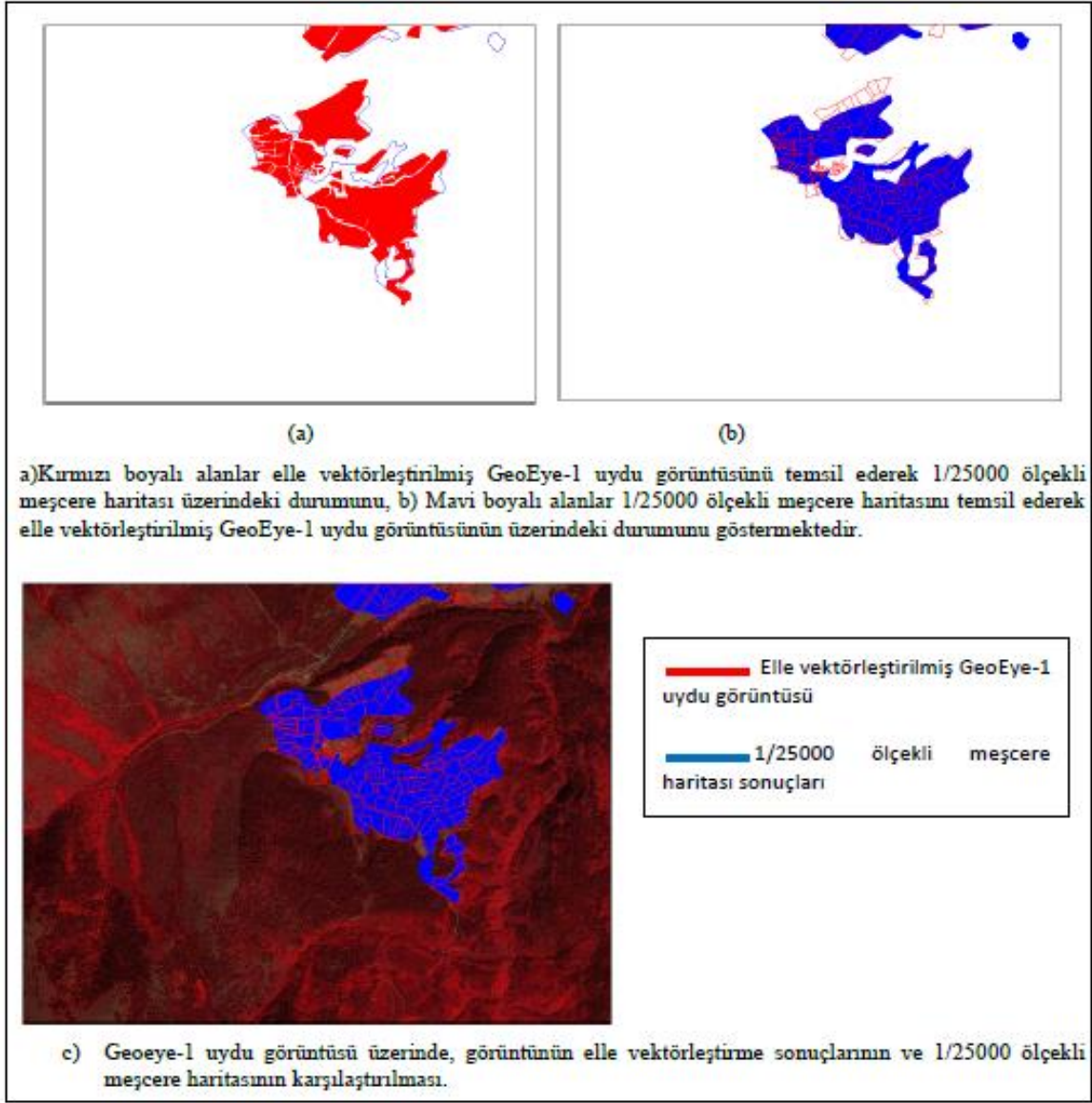
Aşağıdaki Şekil 12, Şekil 13, Şekil 14, Şekil 15 ve Şekil 16’da, elle vektörleştirilmiş GeoEye-1 uydu görüntüsü ve 1/25000 ölçekli meşcere haritası üzerinden tüm sınıflara ait vektör veriler görsel olarak karşılaştırılmıştır.



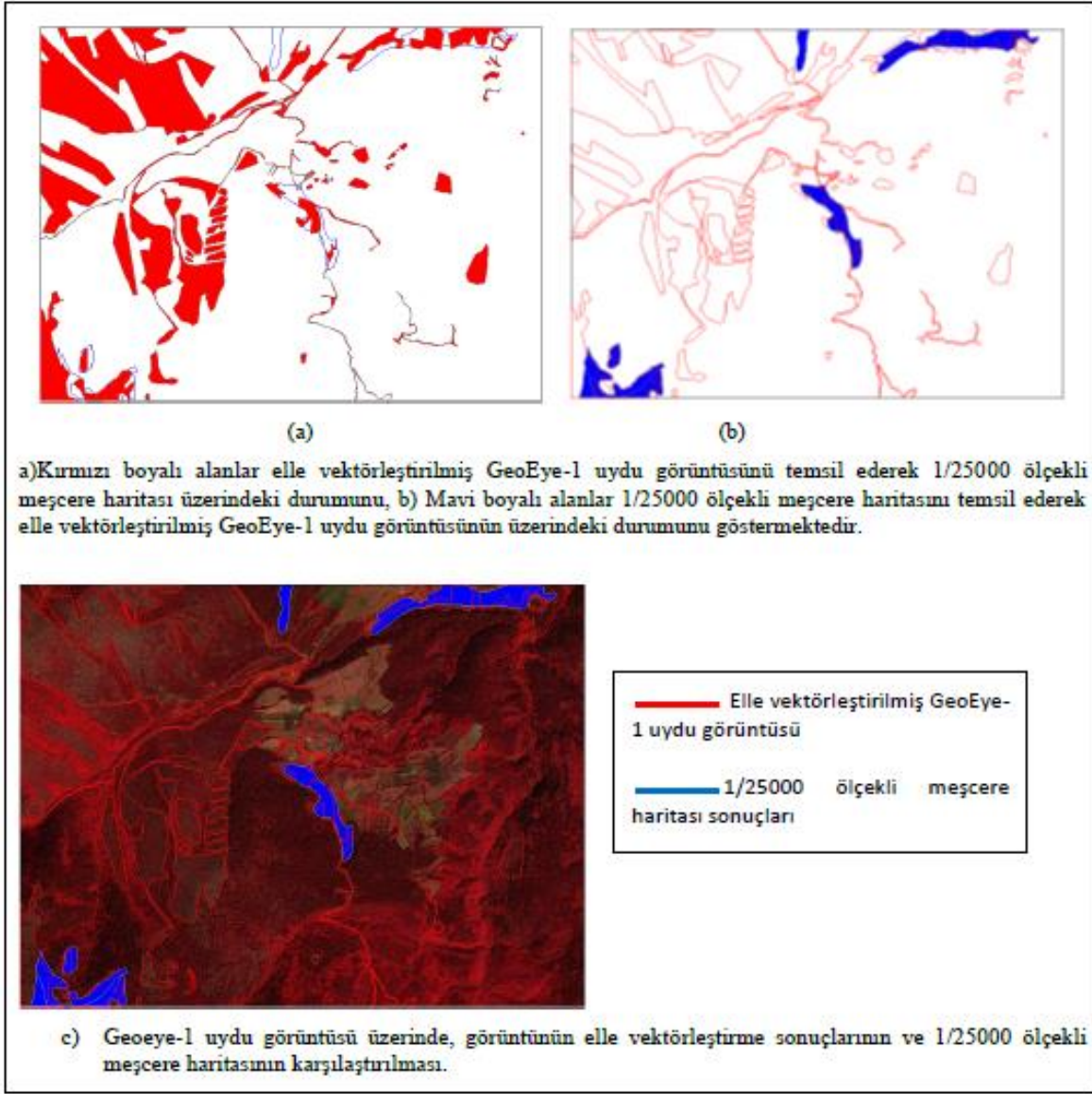
Şekil 12. Elle vektörleştirilmiş GeoEye-1 uydu görüntüsü ve 1/25000 ölçekli meşcere haritası üzerinden “İbrelî” sınıfına ait vektör verilerin karşılaştırılması.



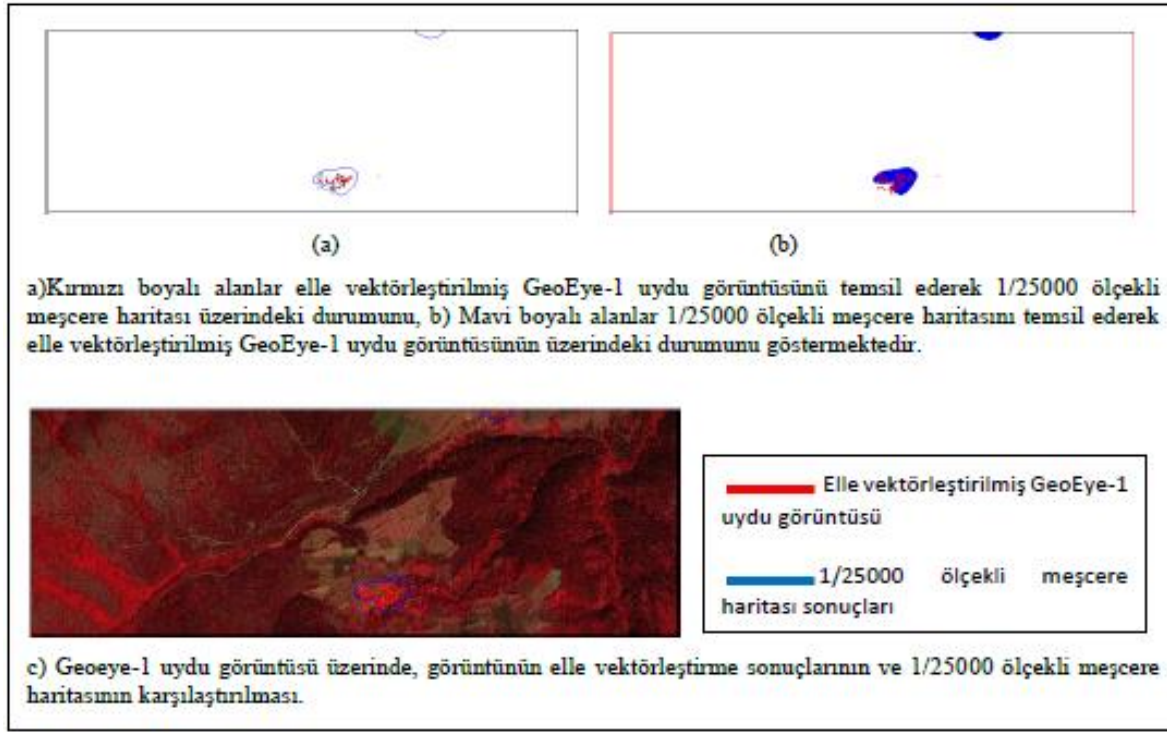
Şekil 13. Elle vektörleştirilmiş GeoEye-1 uydu görüntüsü ve 1/25000 ölçekli meşcere haritası üzerinden “Yapraklı” sınıfına ait vektör verilerin karşılaştırılması.



Şekil 14. Elle vektörleştirilmiş GeoEye-1 uydu görüntüsü ve 1/25000 ölçekli meşcere haritası üzerinden “Tarım alanı” sınıfına ait vektör verilerin karşılaştırılması.



Şekil 15. Elle vektörleştirilmiş GeoEye-1 uydu görüntüsü ve 1/25000 ölçekli meşcere haritası üzerinden “Açık alan” sınıfına ait vektör verilerin karşılaştırılması.



Şekil 16. Elle vektörleştirilmiş GeoEye-1 uydu görüntüsü ve 1/25000 ölçekli meşcere haritası üzerinden “Bina” sınıfına ait vektör verilerin karşılaştırılması.

Analizlerde kullanılan meşcere haritası, çalışma alanı olan Kastamonu Orman Bölge Müdürlüğünden temin edilmiş olup tescilli bir harita olduğu için geometrik doğruluğu, temin edildiği şekilde, sorgulanmadan kullanılmıştır. Yukarıdaki şekillere bakıldığında sınıflar arası kayıklıkların mevcut olduğu görülmektedir. Bunun nedeni meşcere haritası ile uydu görüntüsü arasındaki konumsal doğruluğun farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Meşcere haritasının üretiminde kullanılan kontrol noktalarının sayısı ve hassasiyetleri, büyük ölçekli olmasından kaynaklı belirli bir metrekaresinin altındaki alanların haritada gösterilmemesi, üretildiği yıldan bu zamana kadar arazi örtüsü üzerinde meydana gelen değişim ve yıpranma payının sayısallaştırma üzerindeki olumsuz etkileri düşünüldüğünde aynı doğrulukla sonuç vermemelerine neden olarak gösterilebilir. Tablo 3’te NetCAD v5.2 yazılımı ile her iki vektör veriye ve sınıflara ait hesaplanan alanlar gösterilmektedir.

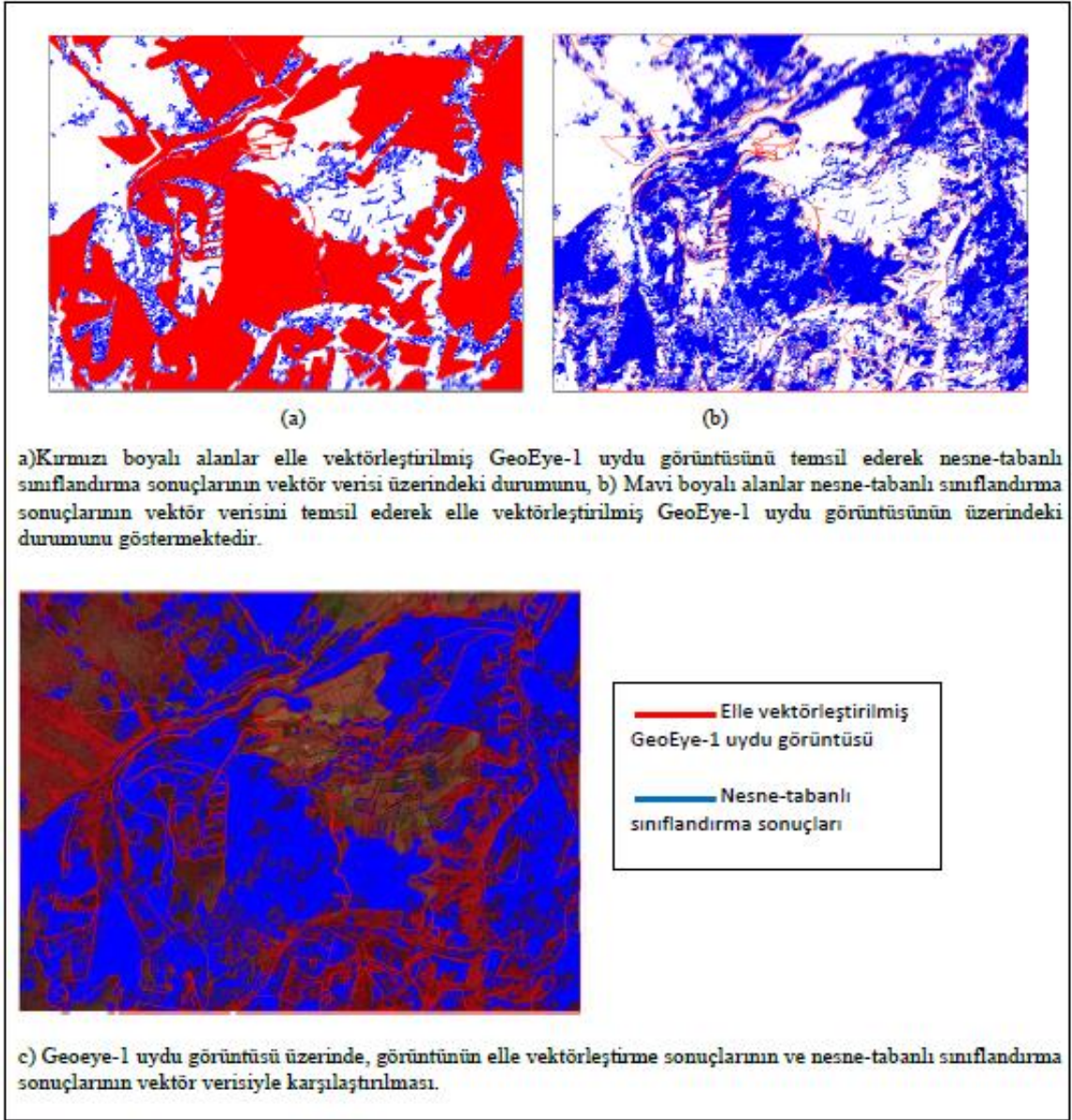
Tablo 3. Elle vektörleştirilmiş GeoEye-1 uydu görüntüsü ve meşcere haritasına ait vektörleştirme sonuçlarının alan cinsinden karşılaştırılması.

Sınıf	Elle Vektörleştirilmiş GeoEye-1 Uydu Görüntüsü (m ² -%)	1/25000 Ölçekli Meşcere Haritası (m ² -%)
İbrelî	5416952.35 (% 100)	6529591.94 (% 120)
Yapraklı	2225442.03 (% 100)	1791739.26 (% 81)
Tarım alanı	805756.80 (% 100)	878141.14 (% 109)
Açık alan	1711143.21 (% 100)	298091.70 (% 17)

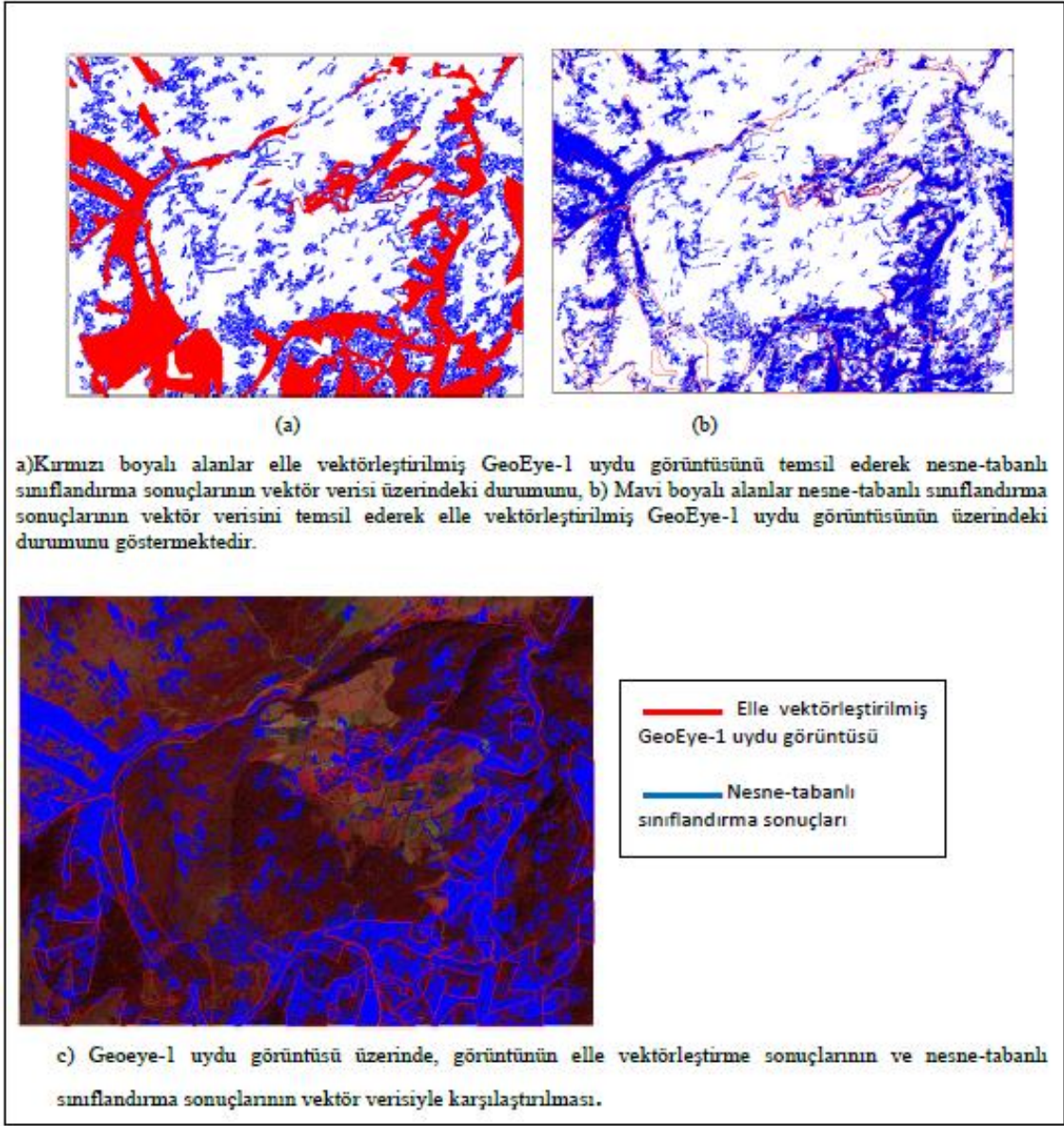
Ormancılık alanında hemen her uygulamada kullanılan meşcere haritalarında 3000 m²'nin altında kalan alanlar gösterilmemektedir. Daha çok büyük ormanlık alanlar ve ağaç türleri için kullanılan bu büyük ölçekli harita, yerleşim alanları için uygun bir altlık kesinlikle değildir. O yüzden bu çalışmada “Bina” sınıfı için bir değerlendirme yapılamamıştır. Meşcere haritasında bina ve yollar birleştirilerek yerleşim alanı olarak gösterilmektedir. Bu durumda sayısal ve görsel analizlerde sınıflara ait yanlış sonuçlar elde edilmesine neden olmaktadır. “İbrelili ve Yapraklı” sınıf türleri karşılaştırıldığında ise meşcere haritasında “İbrelili” sınıfına ait daha fazla alan olduğu görülmektedir. Bu durumun tam tersi olarak da “Yapraklı” sınıfında bir azalma mevcuttur. Meşcere haritasının arazi örtüsü ayrımını hassas yapmaması ya da geometrik doğruluk ve zamansal değişimden kaynaklı da sınıflara ait farklılıklar analiz sonuçlarına yansımıştır. “Açık alan” sınıfa ait alanların görüntü genelinde oldukça fazla bir alana sahip olmasına rağmen, aralarda ve küçük alanlara sahip olduğu için meşcere haritasında da neredeyse gösterilmediği; nesne tabanlı sınıflandırma sonuçlarında ise ayırt edilebilir detaylarla birlikte yüksek doğrulukla sınıflandırıldığı da elde edilen bir başka sonuçtur.

3.2. Elle Vektörleştirilmiş GeoEye-1 Uydu Görüntüsü ile Nesne Tabanlı Sınıflandırma Sonuçlarının Karşılaştırılması

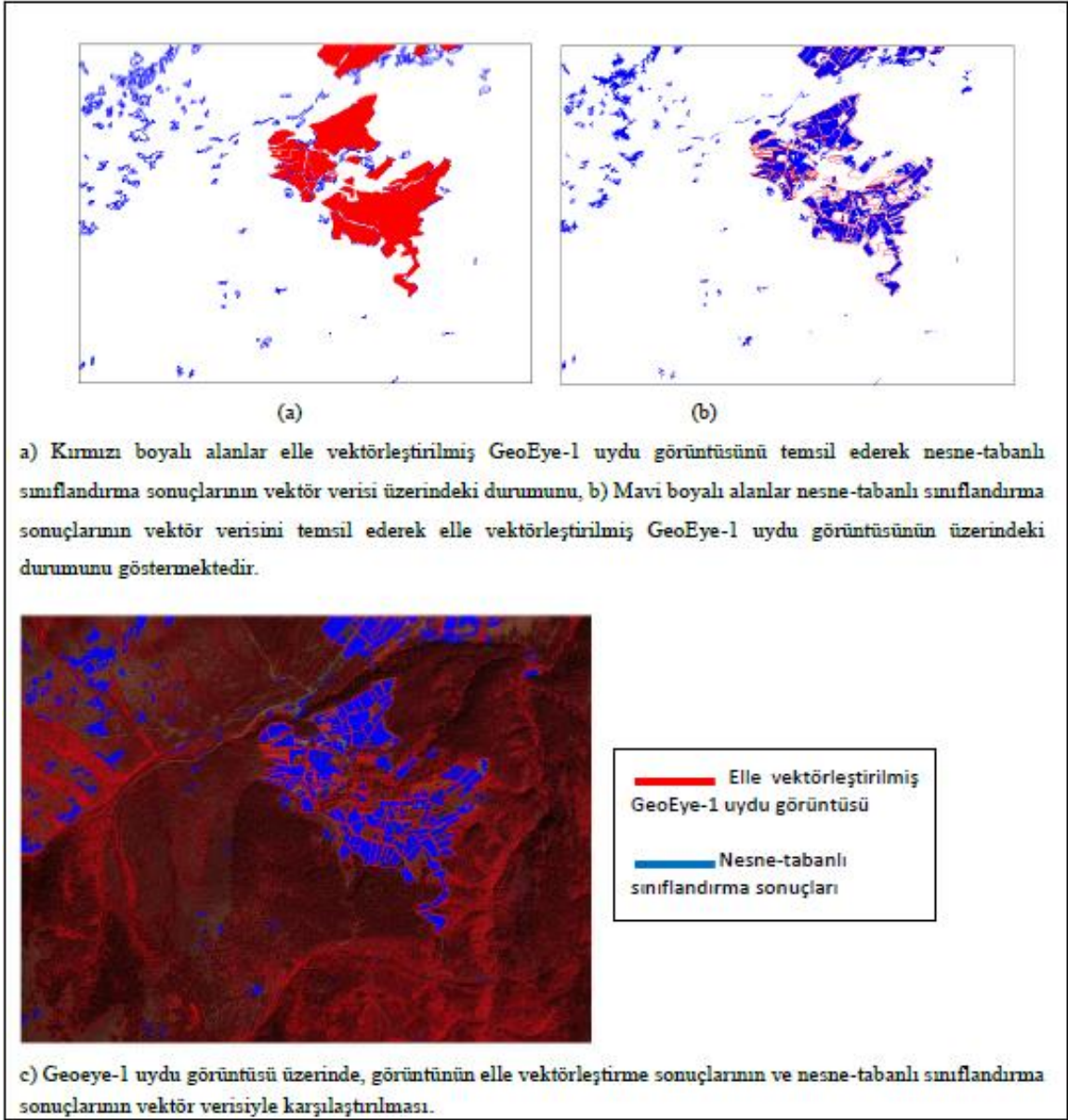
Uygulamanın bu bölümünde elle vektörleştirilmiş GeoEye-1 uydu görüntüsü, nesne tabanlı sınıflandırma sonuçları sonrası elde edilen vektör veri ile hem görsel hem de sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Aşağıdaki Şekil 17, Şekil 18, Şekil 19, Şekil 20 Ve Şekil 21’de elle vektörleştirilmiş GeoEye-1 uydu görüntüsü ve nesne tabanlı sınıflandırma sonuçları üzerinden vektör verilerin karşılaştırılması gösterilmiştir.



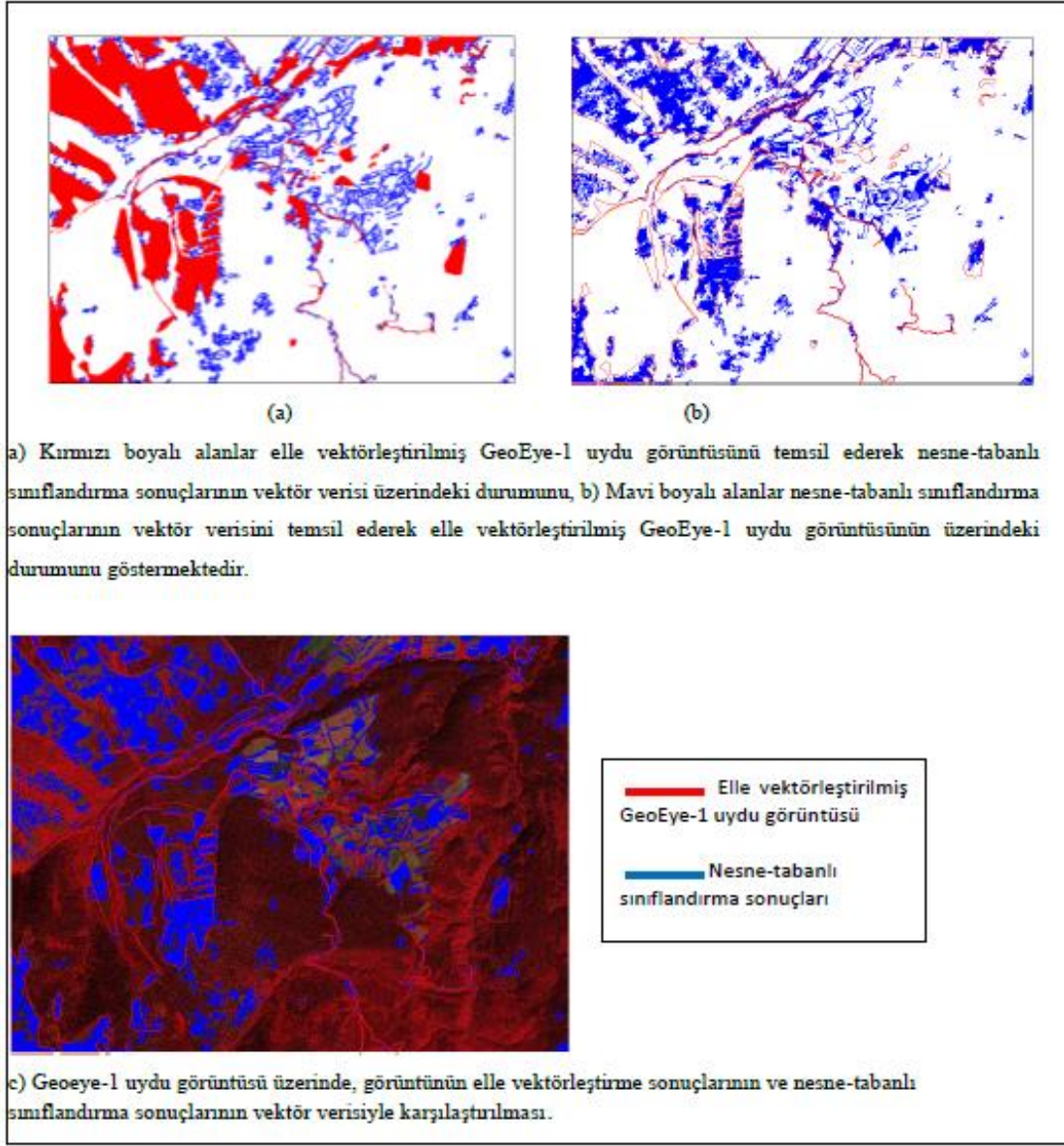
Şekil 17. Elle vektörlendirilmiş GeoEye-1 uydu görüntüsü ve nesne tabanlı sınıflandırma sonuçları üzerinden “İbrelî” sınıfına ait vektör verilerin karşılaştırılması.



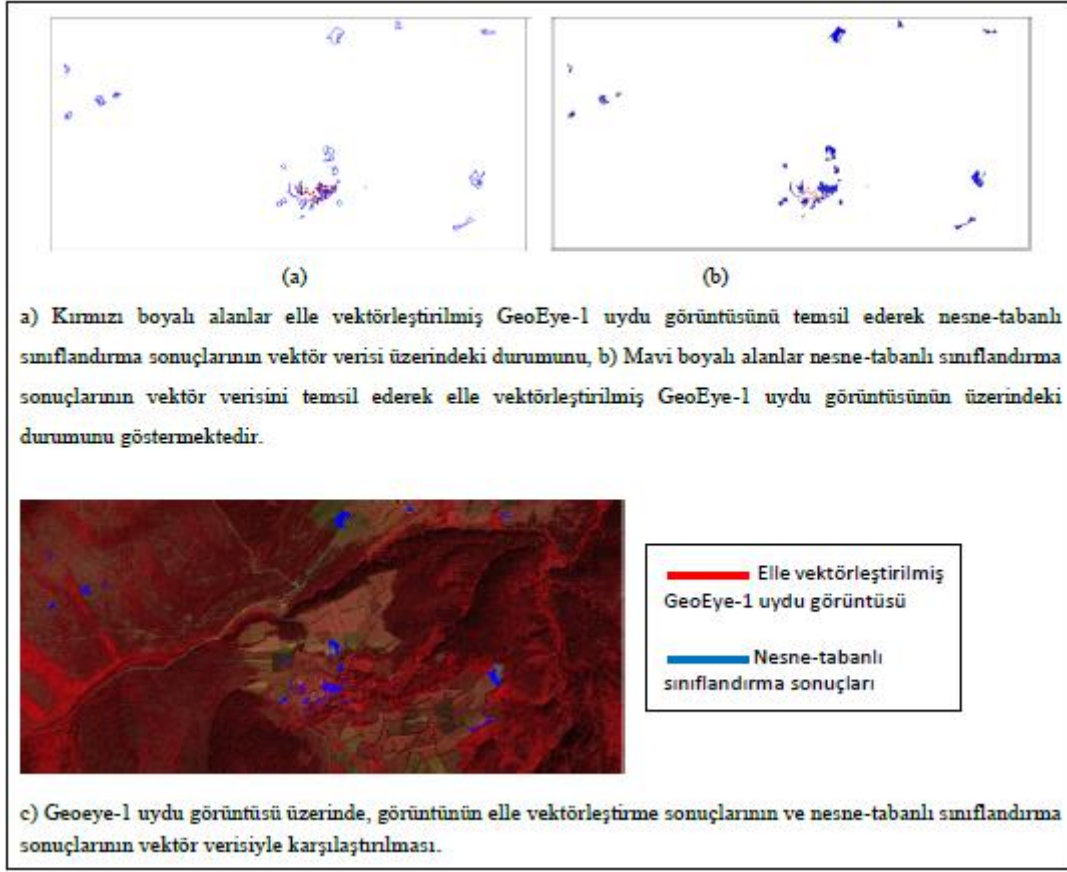
Şekil 18. Elle vektörleştirilmiş GeoEye-1 uydu görüntüsü ve nesne tabanlı sınıflandırma sonuçları üzerinden “Yapraklı” sınıfına ait vektör verilerin karşılaştırılması.



Şekil 19. Elle vektörleştirilmiş GeoEye-1 uydu görüntüsü ve nesne tabanlı sınıflandırma sonuçları üzerinden “Tarım alanı” sınıfına ait vektör verilerin karşılaştırılması.



Şekil 20. Elle vektörleştirilmiş GeoEye-1 uydu görüntüsü ve nesne tabanlı sınıflandırma sonuçları üzerinden “Açık alan” sınıfına ait vektör verilerin karşılaştırılması.



Şekil 21. Elle vektörleştirilmiş GeoEye-1 uydu görüntüsü ve nesne tabanlı sınıflandırma sonuçları üzerinden “Bina” sınıfına ait vektör verilerin karşılaştırılması.

Tablo 4’te NetCAD v5.2 yazılımı ile her iki vektör veriye ve sınıflara ait hesaplanan alanlar gösterilmektedir.

Tablo 4. Elle vektörleştirilmiş GeoEye-1 uydu görüntüsü ve nesne tabanlı sınıflandırmaya ait vektörleştirme sonuçlarının alan cinsinden karşılaştırılması.

Sınıf	Elle Vektörleştirilmiş GeoEye-1 Uydu Görüntüsü (m ² -%)	Nesne Tabanlı Sınıflandırma (m ² -%)
İbrelî	5416952.35 (%100)	4487888.00 (%83)
Yapraklı	2225442.03 (%100)	2682672.00 (%121)
Tarım alanı	805756.80 (%100)	702576.00 (%87)
Açık alan	1711143.21 (%100)	1630268.00 (%95)
Bina	5787.63	29728.00

Sonuçlar incelendiğinde “İbrelî ve Yapraklı” sınıf türlerinin, elle vektörleştirilmiş uydu görüntüsüne göre alansal olarak farklılık gösterdiği sonucu elde edilmiştir. Nesne tabanlı sınıflandırmada ölçek parametresinin oldukça küçük seçilmesi, sınıflandırılan görüntünün yüksek doğrulukla ve orman örtü tiplerinin gerçeğe yakın üretilmesini sağlamıştır. Elle vektörleştirilen veri de ise, piksel bazında detaylı ayırım yapılamamakla birlikte, bazı alanlarda hangi orman örtü tipi

yoğunlukta ise nesnelere o sınıfa atanmıştır. Ağaç tiplerinin birbirlerine karıştıkları alanlar, piksel bazında, insan gözüyle çok detaylı ayırt edilemeyebilmektedir. Alansal farklılığın nedenlerinden biri bu durum olmakla birlikte, spektral yansıma değerlerinin bazı alanlarda gölgenin yarattığı olumsuz durumlar ya da benzer değerlere sahip olmalarından kaynaklı da olabilmektedir. Nesne tabanlı sınıflandırma sonuçlarında görülen bir başka durum ise, “Bina ve Tarım alan”larının birbirlerinin sınıflarına atanmaları olmuştur. Elle vektörleştirme ve sınıflandırma sonuçları için “Bina” sınıfı irdelendiğinde aralarında oldukça fazla bir fark olduğu gözlemlenmektedir. Buna neden olarak bu sınıfa ait nesne tabanlı sınıflandırma sonuçlarının sadece “Bina”ları değil etrafında ve görüntünün tamamında ki benzer spektral yansıma değerlerine sahip “Tarım alanı” ya da “Açık alan” sınıflarını da dâhil etmesi gösterilebilir. Aynı görüntü verisi ile çalışılmasına rağmen, sonuçlar arasında farklılıkların görülmesi, çalışma prensiplerinin analizler üzerinde ki etkisini göstermektedir.

Literatüre bakıldığında nesne tabanlı sınıflandırma için farklı uydu görüntüleri kullanılarak birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Ateşoğlu (2007), SPOT4 ve LANDSAT görüntü verileri ile ormanlık alanlardaki sınıf türlerini kapsayan bir çalışma yürütmüştür. SPOT 4’ün geometrik çözünürlüğü daha yüksek olmasına rağmen, sınıflandırma sonuçlarında LANDSAT uydu görüntüsünün daha başarılı sonuçlar verdiğini elde etmiştir. Buna neden olarak da SPOT 4’ün geometrik çözünürlüğü yüksek olsa dahi radyometrik çözünürlüğünün istenilen ayırım düzeyini karşılayamaması ve ormanlık alanlarda yapılan çalışmalarda spektral varyansın, yüksek çözünürlüklü görüntülerde sınıflar arası karışıklık yaratarak sınıflandırma başarısını düşürdüğü sonucunu elde etmiştir. Yurtseven (2012), ormanlık alanda arazi örtü tiplerinin sınıflandırılması üzerine, WorldView-2 uydusuyla yaptığı çalışmada, konumsal çözünürlüğün yüksek olmasından dolayı ibrelili ağaçların tepe taçlarının sınıflandırmasında yüksek doğruluklu sonuç etmiştir. Ancak çalışma alanı içerisindeki Karaçam ve Sahil Çamı orman örtü tipleri için spektral çözünürlük yeterli olmadığı için istenilen sınıflandırma başarısı elde edilememiştir. Çalışma alanının tamamında ki bütün orman örtü tiplerinin ayırımı için kullanılan uydu görüntüsünün yeterli olmadığı, spektral çözünürlüğün daha yüksek olduğu bir görüntü ile çalışmanın daha iyi olacağı sonucunu elde etmiştir. Avcı ve Sunar (2018), İstanbul’un 3. Havalimanının bulunduğu bölgeyi, çok geniş bir ormanlık alana yapıldığı ve arazi örtüsünde meydana gelen değişimi belirlemek için, çalışma alanı olarak seçmişlerdir. Çalışmada 2015 ve 2017 yılı tarihli, elektromanyetik spektrumun görünür-kızılötesi (VNIR) bölgesinde algılanmış 4 spektral banda ve 10m mekânsal çözünürlüğe sahip Sentinel 2A uydu verisi kullanılmışlardır. Görüntü verisi üzerinden arazi üzerinde belirlenen sınıf türlerinin ayırımı ve değişimlerinin analizi için nesne tabanlı sınıfları yöntemi ile farklı segmentasyon parametreleri ile de uygulamalar yaparak en uygun seçimi belirlemişlerdir. Sınıflandırmış görüntüyü, sınıflandırma öncesi orijinal görüntü ile karşılaştırarak görsel yorumlama ile çalışmalarını tamamlamışlardır. Yiğit ve Uysal (2019), İnsansız Hava Aracı (İHA) yardımıyla oluşturdukları görüntü verisi üzerinden

mevcut yolların tespiti için eCognition yazılımı kullanarak nesne tabanlı sınıflandırma ile detay çıkarımı yapmışlardır. Sınıflandırma sonrası sonuç ürünleri jeodezik yöntemle yapılan arazi çalışması ile elde edilen vektör ürünle karşılaştırmışlar ve %82'lik bir doğruluk elde etmişlerdir. Nesne tabanlı sınıflandırma sonuçlarında yolların spektral yansımalarının özellikle kaldırım taşı ve bina çatıları ile benzerlik göstermesi sonuçları olumsuz etkilemiş olsa bile, elde edilen doğruluk oranının yüksek olması hem yöntemin hem de yazılımın gerçek dünyaya yakın sonuçlar verdiğini göstermiştir. Ersoy ve ark. (2019) kıyı habitatlarının belirlenmesi için Sentinel-2A uydu görüntüsü ile eCognition yazılımı kullanarak nesne tabanlı sınıflandırma yapmışlardır. Sonuç doğruluğunu artırmak için NASA Earthdata websitesinden ücretsiz olarak temin edilen 30m yersel çözünürlüklü ASTER Global DEM sayısal yükseklik modeli verisi İl Özel İdare'den temin ettikleri toprak haritadan faydalanmışlardır. 17 habitat sınıfı belirlenen çalışmada ek veriler sayesinde de istenilen doğrulukla detay çıkarımı sağlanmıştır. Arda (2020)'de Muğla ili, Ula ilçesi kapsamında orman örtü tiplerini de içeren çalışma alanının 1990 yılına ait Landsat 5 TM uydu görüntüsü uydusu ile 2019 yılına ait Landsat 8 (OLI) uydu görüntüsü ile nesne tabanlı sınıflandırma yapmış ve test alana ait mevcut haritalar, hava fotoğrafları ile sonuçları desteklemiştir. eCognition yazılımı kullanılarak yapılan bu çalışmada, sınıflandırma sonuçları karşılaştırıldığında Landsat 8 (OLI) uydu görüntüsünün daha doğru sonuçlar verdiği sonucu elde edilmiştir. Torunlar ve ark. (2021) Sentinel-2A uydu görüntüsü kullanarak çalışma alanına ait altı farklı tarım arazi örtüsü belirlemişler ve sonuç başarısını arttırmak için de eğitim ve test verilerinin dışında NDVI ve DDVI gibi farklı yardımcı indisler de kullanmışlardır. Nesne tabanlı sınıflandırma sonucunda %82 doğruluk başarısı elde etmişler ve yöntemin tarım arazileri ile ilgili yapılan farklı çalışma disiplinlerince de kullanılabilir olduğunu göstermişlerdir. Arıkan ve Yıldız (2023), nüfus artışı dolayısıyla plansız yapılaşmanın artması sonrası, bu alanların tespiti için nesne tabanlı sınıflandırma ile bina detay çıkarımı yapmışlardır. Göktürk-1 uydu görüntüsü kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmalarında, sınıflandırmanın en önemli aşaması olan segmentasyon için hazır veri seti modeli olan U-Net modelini kullanmışlar ve daha az manuel müdahalenin olması sonucunda da gerçeğe yakın, olumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

5.Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada Kastamonu Orman Bölge Müdürlüğü, Merkez İşletme Şefliğine ait 24 320 ha büyüklüğündeki yüksek çözünürlüklü GeoEye-1 uydu görüntüsü üzerinden 12X12 km'lik alan, orman örtü tipleri ve yerleşim alanlarına ait sınıflar seçilerek belirlenmiştir. Görüntünün büyük bir kısmını "İbrelili ve Yapraklı" sınıf türlerini kapsarken, "Açık alan, Tarım alanı ve Bina" sınıf türleri de görüntü üzerinde mevcuttur. Beş farklı sınıfın bulunduğu bir alanın seçilmesinin nedeni, orman örtü tiplerinin başarısı kadar, veriler üzerinde diğer sınıf türlerinin de başarısını gözlemlemek

olmuştur. Sınıflandırma, görüntüler üzerinde birçok amaçla kullanılmaktadır. Zamansal değişimler en sık tercih edilen uygulamalar olsa da, nesnelere hangi veri sayesinde başarıyla ayrımlarının yapıldığı da çalışmalar için oldukça önemli bir sonuçtur. Ormancılık faaliyetlerinde neredeyse her uygulamada kullanılan meşcere haritalarının yerini, yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinin farklı yazılımlar kullanılarak daha başarılı sonuçların elde edilmesinin alıp alamayacağını araştırılması, bu alanda yapılacak çalışmalar için altlık oluşturabilecektir.

Uygulamalar için iki farklı veri ve üç farklı yazılım kullanılmıştır. Yüksek çözünürlüklü GeoEye-1 uydu görüntüsü, hem nesne tabanlı sınıflandırma hem de elle vektörleştirilerek, vektör verilerin karşılaştırılması için kullanılırken; 1/25000 ölçekli meşcere haritası da yine elle vektörleştirilerek sayısallaştırılmıştır. Nesne tabanlı sınıflandırma için eCognition, sınıflandırılmış görüntüden elde edilen vektör verinin, CAD ortamında kullanılmasını sağlamak için ArcGIS ve uydu görüntüsü ve meşcere haritasının sayısallaştırılması için de NetCAD yazılımı kullanılmıştır.

Çalışmaya ilk olarak nesne tabanlı sınıflandırma uygulaması ile başlanmıştır. Sınıflandırma sonucuna göre genel doğruluk %90.59 kappa değeri ise 0.872 olmuştur. Kappa değerinin 1'e yakın ve genel doğruluktan küçük olması, uzaktan algılama çalışmalarında istenilen, başarılı bir durumdur. Orman örtü tiplerinden "İbrelili ve Yapraklı" sınıf türlerinin birbirlerinden homojen ve yüksek doğrulukla ayrılması, hem görsel hem de sayısal sonuçlara yansımıştır. "Tarım alanı, Açık alan ve Bina" sınıf türlerinin %70 doğruluğun üzerinde sonuçlar vermesi ise, birbirlerine benzer spektral yansıma değerlerine sahip olmalarına rağmen olumlu bir durum sonuç olmuştur. Görüntü üzerinde "Bina ve Açık alan" için ölçek parametresinin küçük seçilmesi, diğer sınıflarında daha detaylı segmentlere ayrılarak, doğru sınıflandırmalarını sağlamıştır. Ancak gölgelik alanların sınıf türlerinin yansıma değerlerini etkilediği durumlarda sınıflandırma doğruluğunda azalma olduğu da görülmüştür. GeoEye-1 uydu görüntüsünün kullanılmasının en önemli sebebi yakın kızılötesi banta sahip olmasıdır. Yeşil bitkiler bünyelerinde buldukları klorofil nedeniyle, bu bantta daha az soğurularak oldukça yüksek yansıma değerine sahip olmaktadır. Bu durum avantaj gibi görünse de, GeoEye-1 uydu görüntüsünün yüksek çözünürlüğe sahip olması spektral varyansın artmasını sağlarken, spektral olarak arazi örtü tiplerinin birbirlerinden ayrımını da zorlaştırmaktadır. Bu nedenle ormanlık alanların sınıflandırılmasında yüksek çözünürlüklü uydu görüntüsü kullanmak yerine orta çözünürlüklü bir uydu görüntüsünün kullanılmasının, sınıflandırma sonuçlarını daha olumlu etkileyeceği sonucu elde edilmiştir.

Nesne tabanlı sınıflandırma sonuçlarının elde edilmesi sonrasında, raster veri olan aynı uydu görüntüsü NetCAD ortamında elle vektörleştirilerek sayısallaştırılmıştır. Elde edilen bu vektör veri, analizler için baz alınan veri olarak kullanılmıştır. GeoEye-1 uydu görüntüsünün elle vektörleştirilmesi, hem zaman hem de kullanıcı hatasının olabilmesi açısından dezavantajlı bir durum yaratsa da, görüntüdeki gölge ya da topoğrafyadan kaynaklı sorunlara müdahale edilebilmesi

açısından avantajlı bir durumdur. 1/25000 ölçekli meşcere haritası sayısallaştırılırken, uydu görüntüsü ile alım ve yapım tarihlerinin farklılığından kaynaklı zamansal değişim, analizlere yansımıştır. Bununla birlikte meşcere haritasının büyük ölçekli olması ve yüksek bir doğrulukla üretilmemesi de, yüksek çözünürlüklü uydu görüntüsüyle karşılaştırıldığında kayıklıklara neden olmuştur. Ayrıca meşcere haritalarının büyük ormanlık alanlar için üretilmeleri, ormanlık alanlar içerisinde kalan bina gibi donatılar ve alanlar arası yol ve açıklıkları da bünyesinde barındırmamaktadır. Bu durumda bizim çalışmamızda ki özellikle “Bina ve Açık alan” sınıf türleri olumsuz etkilenmiştir. Bu iki veri için sayısal ve görsel analizlere bakıldığında, uydu görüntülerinin ormancılık çalışmalarında, orman örtü tiplerindeki yüksek başarısı doğrultusunda, meşcere haritalarının yerine kullanılabileceğini görülmüştür.

Elle vektörleştirilen uydu görüntüsünün, aynı görüntü üzerinden nesne tabanlı sınıflandırma sonuçları ile karşılaştırılmasında, zamandan kaynaklanabilecek olumsuz bir durum olmamakla birlikte, hatalı sınıf farklılıkları yine de gözlemlenmiştir. Özellikle “Bina” sınıf türünde bu fark oldukça net bir şekilde görülmektedir. Bunun nedeni ise nesne tabanlı sınıflandırmada her ne kadar ölçek boyutu bu sınıf için uygun olmuş olsa da, spektral yansıma değerlerinin “Tarım alanı ve Açık alan” sınıflarıyla benzerlik gösterdiği bölgelerde yanlış sınıflandırılmış olmasıdır. Tam tersi bir durum olarak da elle vektörleştirilen görüntü üzerinde, insan gözünün en küçük piksel boyutunu ayırt edemeyerek sınıf bazında detaylı bir ayırım yapamaması, buna karşın nesne tabanlı sınıflandırmanın da piksellerin spektral yansımalarını oldukça hassas ele alarak sınıflandırma yapabilmesi, veriler arası alansal farklılıklara neden olmuştur. Özellikle orman örtü tiplerinin sınıflandırma başarıları yaklaşık benzer olduğu için, nesne tabanlı sınıflandırmanın pratik, dinamik ve hızlı bir çalışma prensibine sahip olması, sınıflandırma çalışmaları için avantajlı ve olumlu bir durum oluşturacağı sonucu göstermiştir. Gelecekteki uygulamalarda, arazide jeodezik yöntemle ölçümler yapılarak, sınıflandırma sonucunun gerçek arazi yüzeyini yakın tarihli olarak nasıl yansıttığının; farklı çözünürlüklü uydu görüntülerinin ormanlık alanlar için özellikle spektral yansıma değerlerini nasıl etkilediğinin çeşitli yazılım ve algoritmalar kullanılarak gösterilmesinin hem bu çalışmanın sonuçları hem de literatür için faydalı olacağı düşünülmektedir.

Detay çıkarımı genelinde yapılan sınıflandırma uygulamalarından segmentasyon, referans veri ve eğitim seti seçme ya da doğruluk analizleri gibi işlem adımları günümüzde birçok farklı çalışma disiplinlerince de kullanılmaktadır. Uydu görüntüleri üzerinden arazi örtüsü kullanımı, zamansal değişim, afet yönetimi, fay hatlarını tespit etmek ya da meydana gelen değişimleri analiz etmek kadar; sağlık alanında, Covid-19 Pandemi sürecinde de özellikle göğüs röntgenlerinde meydana gelen değişimleri tespit etmek adına yapılan çalışmalar mevcuttur (Sunnetci ve Alkan, 2023). Sürdürülebilir enerjiye geçiş sürecinde yenilenebilir enerji santrallerinin kurulum sahaları, santralin enerji kapasitesinin ölçülmesi, yüzey pürüzlülüğünün hesaplanması için de sınıflandırma tekniklerinin

kullanıldığı çalışmalar da yine literatürde bulunmaktadır (Naccaroğlu, 2016; Aydın-Kandemir ve Sarptaş, 2022). Kimya, fizik, inşaat, elektrik elektronik gibi birden çok farklı çalışma alanında da ulusal ve uluslararası çeşitli projelerde kullanımının, yüksek doğrulukla elde edilen sonuçlar doğrultusunda sıklıkla kullanılabileceği, uygulama ve araştırma sonrası önerilebilecek nitelikte bir yaklaşımdır.

Teşekkür

Bu çalışma sorumlu yazarın “Yüksek Çözünürlüklü Görüntü Verileri Kullanarak Ormanlık Alanlarda Sınıflandırma Uygulamaları” başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiş olup, çalışmaya katkı sunan çok değerli tez danışmanı Dr. Öğr. Üyesi Aycan Murat MARANGOZ’a teşekkür ederiz. Ayrıca çalışmada kullanılan, radyometrik ve geometrik düzeltilmeleri yapılmış GeoEye-1 uydu görüntüsünün temini için Prof. Dr. Burak ARICAK’a, meşcere haritası için de Kastamonu Orman Bölge Müdürlüğüne teşekkürlerimizi sunarız.

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

- Arda, G. (2020). Landsat Uydu Görüntüleri Kullanılarak Nesne Tabanlı Sınıflandırma Yöntemi ile Alan Kullanım/Arazi Örtüsü Değişiminin Değerlendirilmesi: Muğla-Ula Örneği. *ArtGRID-Journal of Architecture Engineering and Fine Arts*, 2(1), 49-61.
- Arıkan, D., ve Yıldız, F. Göktürk-1 Uydu Görüntülerinden U-Net Modeli Kullanılarak Binaların Segmentasyonu. *Türkiye Uzaktan Algılama Dergisi*, 5(1), 50-58.
- Ateşoğlu, A., Tunay, M., Topan, H., ve Oruç, M. (2007). Uydu Görüntüleri Bilgi İçeriğinin Ormancılık Çalışmaları Açısından Değerlendirilmesi. *Orman Kaynaklarının İşlevleri Kapsamında Darboğazları, Çözüm Önerileri ve Öncelikler*, 17, 19.
- Avcı, Z. D. U., ve Sunar, F. (2018). Nesne Tabanlı Arazi Örtüsü/Arazi Kullanımı Değişim Analizi: İstanbul 3. Havalimanı.

- Aydın-Kandemir, F., ve Sarptaş, H. (2022). Toprak Üstü Biyokütle Potansiyelinin CBS ve Uzaktan Algılama ile Belirlenmesi–Yeni Bir Yaklaşım. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 24(70), 165-178.
- Baatz, M. (2000). Multiresolution segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. *Angewandte geographische informationsverarbeitung*, 12-23.
- Baatz, M., Benz, U., Dehghani, S., Heynen, M., Höltje, A., Hofmann, P., and Willhauck, G. (2004). eCognition professional user guide 4. *Definiens Imaging, Munich*.
- Benz, U. C., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I., and Heynen, M. (2004). Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 58(3-4), 239-258.
- Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 65(1), 2-16.
- Blaschke, T., and Strobl, J. (2001). What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. *Zeitschrift für Geoinformationssysteme*, 12-17.
- Carleer, A. P., and Wolff, E. (2006). Urban land cover multi-level region-based classification of VHR data by selecting relevant features. *International Journal of Remote Sensing*, 27(6), 1035-1051.
- Colkesen, I., and Kavzoglu, T. (2017). The use of logistic model tree (LMT) for pixel-and object-based classifications using high-resolution WorldView-2 imagery. *Geocarto International*, 32(1), 71-86.
- eCognition (2011) Trimble Documentation. *eCognition Developer 8.7 User Guide*, München, Germany, 258pp.
- Ersoy, E., Yılmaz, K. T., Atak, B. K., ve Gülçin, D. (2019). Sentinel-2A uydu görüntüsünde nesne tabanlı sınıflandırma yöntemi kullanılarak kıyı habitatlarının haritalanması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(1), 152-161.
- Holland, D. A., Boyd, D. S., and Marshall, P. (2006). Updating topographic mapping in Great Britain using imagery from high-resolution satellite sensors. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(3), 212-223.
- Jensen, J. R. (1996). *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective* (No. Ed. 2). Prentice-Hall Inc.
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., and Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- Maktav, D., ve Sunar, F. (1991). Uzaktan algılama: Kantitatif yaklaşım. *Swain, Philip H., Davis, Shirley M. 'den çeviri*.
- Mathieu, R., Aryal, J., and Chong, A. K. (2007). Object-based classification of Ikonos imagery for mapping large-scale vegetation communities in urban areas. *Sensors*, 7(11), 2860-2880.
- Neccaroğlu, V. (2016). *Rüzgar enerjisi çalışmalarında yüzey pürüzlülüğünün sayısal görüntü işleme yöntemleri ile analizi ve uygulaması* (Master's thesis, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Shaban, M. A., and Dikshit, O. (2001). Improvement of classification in urban areas by the use of textural features: the case study of Lucknow city, Uttar Pradesh. *International Journal of remote sensing*, 22(4), 565-593.
- Shackelford, A. K., and Davis, C. H. (2003). A combined fuzzy pixel-based and object-based approach for classification of high-resolution multispectral data over urban areas. *IEEE Transactions on GeoScience and Remote sensing*, 41(10), 2354-2363.
- Sunnetci, K. M., and Alkan, A. (2022). Biphasic majority voting-based comparative COVID-19 diagnosis using chest X-Ray images. *Expert Systems with Applications*, 119430.
- Sunnetci, K. M., Kaba, E., Celiker, F. B., and Alkan, A. (2023). Deep Network-Based Comprehensive Parotid Gland Tumor Detection. *Academic Radiology*.
- Torunlar, H., Tuğaç, M. G., ve Duyan, K. (2021). Nesne Tabanlı Sınıflandırma Yönteminde Sentinel-2A Uydu Görüntüleri Kullanılarak Tarımsal Ürün Desenlerinin Belirlenmesi; Konya-Karapınar Örneği. *Türkiye Uzaktan Algılama Dergisi*, 3(2), 36-46.
- Trimble (2012). *eCognition Developer User Guide*, Trimble Germany GmbH, München, 261 pp.
- URL-1: http://www.nik.com.tr/content_sistem_uydu.asp?id=12 Erişim tarihi: 14.03.2023
- Yan, G. (2003, March). Pixel based and object oriented image analysis for coal fire research. Enschede, The Netherlands: ITC.
- Yan, G., Mas, J. F., Maathuis, B. H. P., Xiangmin, Z., and Van Dijk, P. M. (2006). Comparison of pixel-based and object-oriented image classification approaches—a case study in a coal fire area, Wuda, Inner Mongolia, China. *International journal of remote sensing*, 27(18), 4039-4055.

- Yiğit, A. Y., ve Uysal, M. (2019). Nesne Tabanlı Sınıflandırma Yaklaşımı Kullanılarak Yolların Tespiti. *Türkiye Fotogrametri Dergisi*, 1(1), 17-24.
- Yurtseven, H. (2014). Yüksek Çözünürlüklü Uydu Verileri ile Obje Tabanlı Görüntü Analizleri. *Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, Türkiye, İstanbul Üniversitesi*, 147.

Yüksek Sıcaklık Etkisindeki CFRP Donatılarının Dayanım Kayıplarının Matematiksel Yöntemlerle Tespiti

Şeymanur ARSLAN^{1*}, Ferhat AYDIN²

Öz

Liflerle güçlendirilmiş polimer (FRP) donatılar günümüzde çelik donatıya alternatif olarak kullanılmaktadır. Ancak FRP donatılar yüksek sıcaklıklara karşı hassas bir malzemedir. Bu nedenle bu malzemelerin yüksek sıcaklıklardaki çekme dayanımındaki değişimiyle alakalı tahmin modellerinin oluşturulması önem arz etmektedir. Bu çalışmada literatürdeki CFRP donatılarının yüksek sıcaklıklarda meydana gelen çekme dayanımındaki kayıpları araştırılmış ve literatürde üç araştırmacı tarafından sunulan matematiksel modellerle deneysel sonuçlar regresyon ve korelasyon analizleri yapılarak kıyaslanmıştır. Alternatif yeni bir model sunmak amacıyla literatürdeki CFRP (karbon fiber takviyeli polimer) donatılarının yüksek sıcaklıklardaki çekme dayanımındaki değişimlerinin deneysel verileri incelenerek analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda 60°C sıcaklık seviyesinin CFRP donatılarının mekanik ve fiziksel özelliklerinde zarar görmediği bu nedenle bu sıcaklık seviyesinin öncesinde dayanım kaybı olmadığı ve bu sıcaklık sonrasında parabolik bir değişimin olduğu kabulü yapılarak alternatif matematiksel model oluşturulmuştur. Sonuç olarak önerilen yeni modelin deneysel çalışmalarla uyumlu olduğu modelin yapısal uygulamalarda etkili bir tahmin aracı olabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek sıcaklık, CFRP donatı, matematiksel model, çekme dayanımı

Determination of Strength Loss of CFRP Bars Under High Temperature by Mathematical Methods

Abstract

Fiber reinforced polymer (FRP) bars are currently used as an alternative to steel reinforcement. However, FRP bars are sensitive to high temperatures. For this reason, it is important to establish prediction models related to the change in tensile strength of these materials at high temperatures. In this study, the tensile strength losses of CFRP bars at elevated temperatures were investigated and the mathematical models presented by three researchers in the literature were compared with the experimental results through regression and correlation analyses. In order to present a new alternative model, the experimental data of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) bars at high temperatures were analyzed. As a result of the study, an alternative mathematical model was created by assuming that the 60°C temperature level does not damage the mechanical and physical properties of CFRP reinforcements, therefore there is no strength loss before this temperature level and there is a parabolic change after this temperature. As a result, it is thought that the proposed new model is compatible with experimental studies and can be an effective prediction tool in structural applications.

Keywords: Elevated temperature, CFRP bar, Mathematical model, Tensile strength.

¹Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği, Sakarya, Türkiye, seymanurarshan@subu.edu.tr

²Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği, Sakarya, Türkiye, ferhata@subu.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0001-7012-3338>

²<https://orcid.org/0000-0001-9472-8366>

1. Giriş

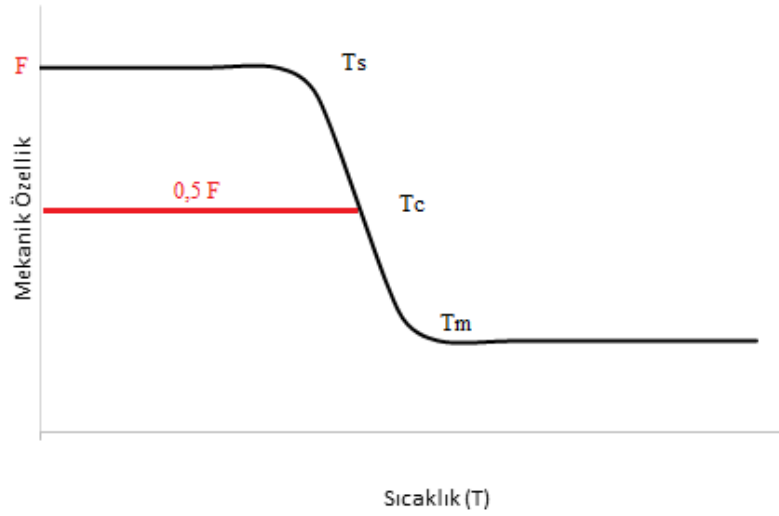
İnşaat mühendisliği alanında kullanılan yeni nesil yapı malzemelerinden biri olan liflerle güçlendirilmiş polimer (FRP) malzemelerin günümüzde kullanımı yaygınlaşarak hem taşıyıcı hem onarım ve güçlendirme malzemesi olarak tüm dünyada tercih edilmektedir. Kumaş, profil ve donatı gibi birçok şekilde üretilen bu malzemeler ihtiyaca göre farklı üretim teknikleri ile kalıplanarak istenen boyutta ve şekilde üretilmektedir. Özellikle hafiflik, yalıtkanlık, kimyasallara karşı dayanıklılık, korozyon performansı ve yüksek çekme dayanımı bu malzemelerin inşaat alanında tercih edilmesini arttırmaktadır (Aydın & Arslan, 2021). Betonarme yapılarda çelik donatıların korozyona uğrayarak taşıyıcı yapı elemanlarına hasar vermesi çelik donatıya alternatif malzeme arayışlarını ortaya çıkarmıştır. Özellikle FRP donatıların korozyona uğramaması, belirtilen diğer mekanik ve kimyasal özelliklerinin iyi olması bu malzemeleri çelik donatıya alternatif olarak sunmaktadır.

FRP donatılar matris malzemesi olarak polyster, vinilester ve epoksi gibi reçinelerden; takviye elemanı olarak cam, karbon, aramid ve bazalt gibi çekme dayanımları yüksek liflerden oluşmaktadır. Karbon lifler diğer liflere oranla daha yüksek mekanik ve fiziksel özellikler göstermektedir (S. J. Yoo et al., 2022). Karbon lifli FRP (CFRP) donatılar diğer lifli malzemelere göre birim fiyatları yüksek olduğundan inşaat alanında kullanımı özellikle cam lifli FRP'lere (GFRP) oranla sınırlıdır.

FRP donatıların çok sayıdaki avantajı olduğu kadar bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Sıcaklığa karşı olan hassasiyetleri bu dezavantajların başında gelmektedir. FRP donatıların mekanik özelliklerinin sıcaklıkla azalması, donatıların imal edildiği reçinenin yumuşamasından kaynaklanan bağ kaybı nedeniyle çelik donatıların yangın direncinden daha az olabilmektedir (ACI, 2015; Bisby & Kodur, 2007). Camsı geçiş sıcaklığına (T_g) yakın bir sıcaklıkta, polimerin mekanik özellikleri azalmaya başlamakta ve polimerin liflere gerilmeleri daha az aktarmasıyla bağ mukavemetinde önemli düşüslere neden olmaktadır. T_g değeri reçinenin tipine bağlı değişmekle birlikte çoğu FRP donatıda kullanılan reçineler için tipik olarak 93-120 °C aralığındadır. Genellikle cam lifler 880 °C ve karbon lifler 1600 °C erime noktasına sahip olduğundan reçineden daha iyi termal özellikler göstermektedirler. Çekme kuvveti ekseninde önemli miktarda yükü karşılamaya devam etmektedirler. Ancak, sıcaklık artışıyla lifler arasındaki bağ azaldığından donatıya gelen kuvvetlerin lifler arasında aktarımında azalma olmakta, böylece FRP kompozitinin dayanımı ve sertliği azalmaktadır (Chowdhury et al., 2011; Katz et al., 1999; Nigro et al., 2012).

Şekil 1'de FRP malzemelerin mekanik özellikleri ve sıcaklık arasındaki ideal ilişki gösterilmiştir. Kritik sıcaklık (T_c), FRP kompozitin mekanik dayanımının %50'sini kaybettiği sıcaklık olarak tanımlanmaktadır. T_s yumuşama sıcaklığına kadar FRP malzemelerde önemli bir mekanik özellik değişimi olmamaktadır. T_m erime sıcaklığından önce mekanik özellikler giderek

azalır (Bazli & Abolfazli, 2020). T_m sıcaklığından sonra lifler sıcaklıktan hasara uğrayana kadar bir miktar dayanım göstermeye devam etmektedir.



Şekil 1. FRP malzemelerin sıcaklık-mekanik özellik ilişkisi [8]

Literatürde yüksek sıcaklıklarla yapılan deneysel çalışmalar incelendiğinde, Kumahara ve diğerleri (Kumahara et al., 1993) tarafından yürütülen deneysel çalışma sonuçları T_g 'den çok daha yüksek olan 250 °C'lik sıcaklıkların, GFRP ve CFRP donatıların çekme dayanımını %20'nin üzerinde azalttığını göstermiştir. Hajiloo ve arkadaşları (Hajiloo et al., 2018) tarafından 3 farklı üreticiden alınan GFRP donatılar hem transient state hem de steady state olarak yüksek sıcaklıklara tabi tutulmuştur. Deneysel sonuçta 400 °C'ye ulaşan GFRP donatıların çekme dayanımlarının %25'ini koruyabildiği ifade edilmiştir. Yu ve Kodur (Yu & Kodur, 2014) tarafından yakın yüzeye monte edilmiş CFRP donatılar ve şeritlerin yüksek sıcaklığa (20-600 °C) maruz kaldığında mekanik özelliklerindeki değişimler araştırılmıştır. Deneysel sonuçta 200 °C'ye kadar CFRP donatıların elastisite modüllerini ve çekme dayanımlarını büyük oranda koruduğu, 300 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise önemli ölçüde azalmalar meydana geldiği tespit edilmiştir. Khaneghahi ve arkadaşları (Khaneghahi et al., 2018) tarafından GFRP ve CFRP donatıların yüzeyine yangın koruyucu şişen boya uygulanmış ve donatılar 80-350 °C ve 400-800 °C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Normalde aynı reçinedeki FRP donatılar yanma aşamasına 500 °C'de geçerken şişen boya ile kaplanan donatılar 800 °C'ye kadar performans gösterebildiği ifade edilmiştir. Rosa ve arkadaşları tarafından silindirik betona gömülmüş kum kaplı GFRP donatılar ile sıyrıma ve çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda artan sıcaklıkla birlikte, özellikle GFRP donatının T_g 'sine yaklaşıldığında ve aşıldığında, GFRP betonunun arayüzünün mukavemeti ve sertliği önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir (Rosa et al., 2019). Rafi ve arkadaşları tarafından dikdörtgen beton kirişlere gömülen FRP donatılara yüksek sıcaklıkların (20-500 °C) etkisinde dört

noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Yüksek sıcaklıklarda, GFRP ve çelik donatılı betonarme kirişlerdeki rijitlik kaybı temelde aynıydı ve donatı modülü veya yük seviyelerinden etkilenmedi. Diğer kirişlerle karşılaştırıldığında, CFRP donatılı kirişlerin daha iyi rijitlik özelliklerine sahip olduğu ifade edilmiştir (Rafi et al., 2011). Başka bir çalışmada 1-3 katlı CFRP levhalarla çember şeklinde sarmalanmış silindirik betonlar 20-400 °C maruz kalmış ve eş merkezli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Tg'yi aşan sıcaklıklarda FRP sargılarının gerilmesindeki ve daha da önemlisi bağ, kuvvet ve rijitliklerin azalmalardan ötürü sargılama yeteneklerinde önemli kayıplar meydana geldiği belirtilmiştir. FRP sarılı silindirlerin nihai yük kapasitesi, artan sıcaklıklarla azalmaya devam ettiği; bununla birlikte, FRP sargısının, Tg'nin oldukça üzerinde olan 400 °C'de bile, hem tek bir katman hem de üçlü bir katman için tüm maruz kalma sıcaklıklarında bir miktar sınırlama sağlamaya devam ettiği de çalışma sonucunda gözlemlenmiştir (Cerniauskas et al., 2020; Sharifianjazi et al., 2022). Nguyen ve arkadaşları tarafından, hasara yol açan maruz kalma sıcaklığını ve süresini belirlemek için hem yüksek sıcaklığa hem de mekanik yüklemeye maruz bırakılan elle üretilmiş CFRP'lerin performansı incelenmiştir. Çalışma yüklemenin arttıkça aynı performans gösterebileceği sıcaklığında azaldığını göstermektedir. Örneğin yük seviyesi 20 °C'deki dayanımının %50'sinden az olduğunda kopma sıcaklığı 636 °C'den 541 °C'ye düşmüştür. Kısacası sonuçlar, CFRP'nin maruz kalabileceği maksimum sıcaklığın artan çekme yükü ile azaldığını göstermiştir (Nguyen et al., 2019). Yoo ve Choo tarafından CFRP donatılı betonarme kolonların yüksek sıcaklıklarındaki davranışını gözlemek amacıyla CFRP donatıların önce 0-150-300-450 °C'lerde çekme dayanımındaki değişimleri test edilmiştir. Çalışma sonucunda çekme dayanımları sırasıyla 1999 MPa, 2253,8 MPa, 1275,1 MPa ve 1100,4 MPa olarak bulunmuştur. 150 °C ve 300°C arasında keskin bir düşüş olduğu görülmektedir (S. W. Yoo & Choo, 2022).

Bu çalışmada literatürde CFRP donatıların yüksek sıcaklıklarda dayanım kayıplarını araştıran deneysel ve matematiksel çalışmalar incelenerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarla daha doğru tahminler sunabilen yeni bir matematiksel model önerilmiştir.

2. Matematiksel Modeller

Literatürde FRP donatıların artan sıcaklıklarla birlikte meydana gelen dayanım kayıpları konusunda yeterince deneysel çalışma bulunmasına rağmen matematiksel modeller üzerine yapılan çalışmaların sayısı sınırlı sayıdadır. Bu bölümde literatürde bulunan FRP malzemelerin artan sıcaklıklardan dolayı meydana gelen dayanım kayıplarını inceleyen matematiksel model çalışmaları verilmiştir.

İlk olarak Saafi, Nadjai ve arkadaşları tarafından (Ashrafi et al., 2017; Nadjai et al., 2005; Saafi, 2002) CFRP malzemelerin çekme dayanımlarında meydana gelen değişimler Denklem 1'de

gösterilmiştir. Denklemden f_t ifadesi T sıcaklığında donatılarda kalan çekme dayanımını ve f_u oda sıcaklığındaki (koşullandırılmamış numunelerdeki) çekme dayanımını ifade etmektedir. Ancak önerilen denklemden görüldüğü gibi tek değişken parametre sıcaklıktır. Malzemede 100 °C'ye kadar herhangi bir değişim olmadığı kabul edilmiş ve dayanımdaki değişimin 0 olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni 100°C'nin ortalama camsı geçiş sıcaklığına denk gelmesinden kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Genelde camsı geçiş sıcaklığına kadar CFRP donatılarda önemli bir dayanım kaybı olmadığı düşünülmektedir. Ayrıca denklemden, 475 °C'den yüksek sıcaklıklarda CFRP donatılarda dayanım kalmadığı kabul edilmiştir.

$$\frac{f_t}{f_u} = \begin{cases} 1, & 0 \leq T < 100 \\ 1,267 - 0,00267T, & 100 \leq T < 475 \\ 0, & 475 \leq T \end{cases} \quad (1)$$

Wang (K. Wang et al., 2011) paslanmaz çelikle yapılan yangın deneyleri sonucunda önerilen bir denklemi (Chen & Young, 2006) modifiye ederek CFRP malzemeler için uyarlamış ve Denklem 2'de vermiştir.

$$\frac{f_t}{f_u} = X - \frac{(T - Y)^a}{Z} \quad (2)$$

Her sıcaklık aralığı için X,Y,Z ve a katsayıları değişmektedir. Wang çalışmayı 3 bölgeye ayırmaktadır. İlk kısım 22-150 °C arasını, ikinci kısım 150-420 °C ve son kısım 420-706 °C arasını temsil etmektedir. Wang'ın deneysel çalışması CFRP levhalarla yapıldığından bu sıcaklık aralıklarını tercih ettiği düşünülmektedir. Farklı sıcaklıklara göre oluşan yeni denklem aşağıda (Denklem 3) verilmiştir.

$$\frac{f_t}{f_u} = \begin{cases} 22 \leq T(^{\circ}\text{C}) < 150, & 1 - \frac{(T-22)^{0,9}}{200} \\ 150 \leq T(^{\circ}\text{C}) < 420, & 0,59 - \frac{(T-150)^{0,7}}{490} \\ 420 \leq T(^{\circ}\text{C}) < 706, & 0,48 - \frac{(T-420)^{1,8}}{76000} \end{cases} \quad (3)$$

Son olarak Mouritz ve Gibson (Mouritz & Arthur, 2007) tarafından Denklem 4 önerilmiştir. Önerilen denklemden P(t) mekanik özelliği, Rⁿ güç kanunu faktörünü ifade etmektedir. Gerilme dayanımının esas olarak polimer reçinenin ayrışmasından sonra elyafların dayanımına bağlı olmasından dolayı çekme dayanımı için n=0 kabul edilmiştir.

$$P(T) = \left(\frac{Pu+Pr}{2} - \frac{Pu-Pr}{2} \tanh(k(T - T'g)) \right) R^n \quad (4)$$

Çalışmada Tg sıcaklığı mekanik dayanımın %50 azaldığı kritik sıcaklık, k gevşeme derecesini veren bir parametredir. Pu ve Pr sırasıyla bu özelliğin serbest (düşük sıcaklık) ve gevşek (yüksek sıcaklık) değerleridir. Denklem basitleştirilerek Denklem 5'teki halini almaktadır (Yu & Kodur, 2014).

$$F(T) = \left(\frac{1+\frac{Pr}{Pu}}{2} - \frac{1-\frac{Pr}{Pu}}{2} \tanh(k(T - T'g)) \right) \quad (5)$$

Görüldüğü gibi bu denklem sadece sıcaklığa bağlı değildir. Birçok parametreyi içerdiğinden her bir donatı için ayrı ayrı hesap edilmektedir.

3. CFRP Donatı Özellikleri

Bu çalışmada literatürde CFRP donatılarda yüksek sıcaklıklarda meydana gelen dayanım kayıplarının deneysel olarak araştıran 5 çalışmacının verileri kullanılarak matematiksel modelle kıyaslanmıştır. Parametre farklılıkları dikkate alınarak farklı özelliklerdeki donatılar tercih edilmiştir. Çıplak halde yüksek sıcaklıklara tabi tutulan numunelerin yanı sıra betonla birlikte yüksek sıcaklıklara tabi tutulan numuneler de tercih edilerek formülasyondaki analizlerin daha kapsayıcı olması istenmiştir. Çalışmalarda epoksi ve vinilester matris malzeme, farklı donatı çapları, farklı yüzey şekillendirmeleri bulunmaktadır. Lif oranları hacimce olarak verildiyse "h" harfiyle belirtilmiştir. Çalışmada kütlece veya hacimce olduğu ifade edilmemişse herhangi ifade konulmamıştır. Donatılar isimlendirilirken lif adı, matris adı ve çap uzunluğu dikkate alınmıştır. Eğer lif, matris ve çapları aynı ise yüzey şekillerinin baş harfi isimlendirmeye eklenmiştir. Beton içerisindeki donatıların sıcaklığa tabi tutulduğunu ifade etmek için başa "B" harfi eklenmiştir.

Yüksek sıcaklık çalışmaları genellikle transient state ve steady state olarak iki şekilde yapılmaktadır. Transient state deneylerinde yüksek sıcaklıklara tabi tutulan numuneler aynı zamanda yük etkisindedir. Steady state deneylerinde ise öncelikle sabit sıcaklık verilir daha sonra yüklemeye tabi tutulmaktadır. Bu çalışmada belirtilen bu ayırım dikkate alınmamıştır.

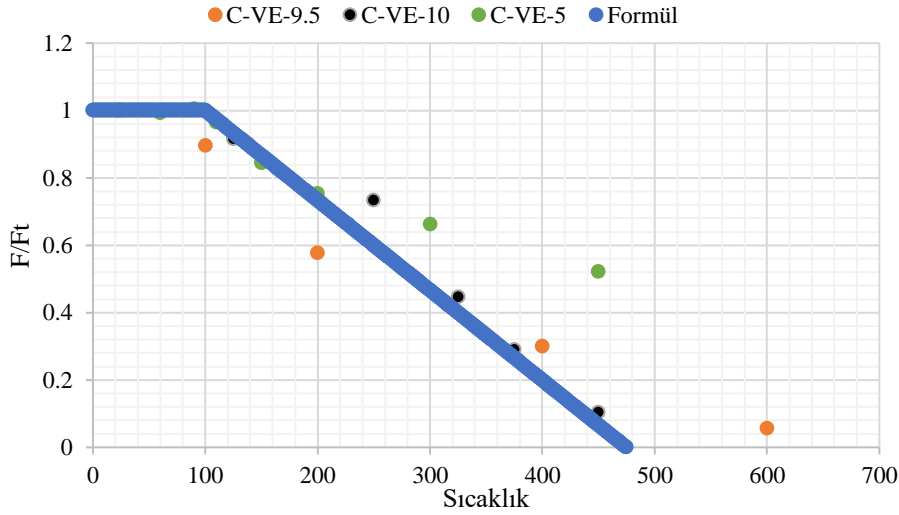
Tablo 1. CFRP donatıların fiziksel ve mekanik özellikleri

Referans	İsimlendirme	Lif	Matris	Çap (mm)	Çekme Dayanımı (O/S) (MPa)	Yüzey	Lif oranı %
(Ashrafi et al., 2017)	C-EP-5-S	Karbon	EP	5	2138	Sarmal sarılı	75(h)
(Ashrafi et al., 2017)	C-EP-5-Y	Karbon	EP	5	1905	Yivli	85(h)
(Ashrafi et al., 2017)	C-VE-5	Karbon	VE	5	1632	Yivli	85(h)
(Y. C. Wang et al., 2007)	C-VE-9,5	Karbon	VE	9,5	1270	Kum kaplama	58
(Rami Hamad et al., 2017)	C-VE-10	Karbon	VE	10	1572	Kum kaplama	70 (h)
(Yu & Kodur, 2014)	C-N-6,4	Karbon	-	6,4	1577	yok	60
(Najafabadi et al., 2019)*	B-C-EP-4	Karbon	EP	4	2015	Sarmal sarılı	75
(Najafabadi et al., 2019)*	B-C-EP-5	Karbon	EP	5	1945	Sarmal sarılı	75

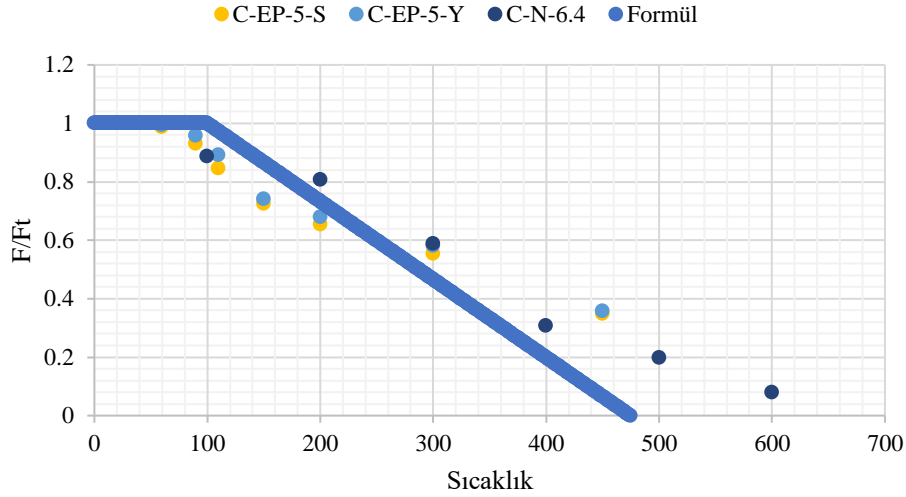
O/S: Oda sıcaklığındaki çekme dayanımı ,h: hacimce VE: Vinilester, EP: Epoksi, * Çevresi betonla kaplı donatılar

4. Model Sonuçları

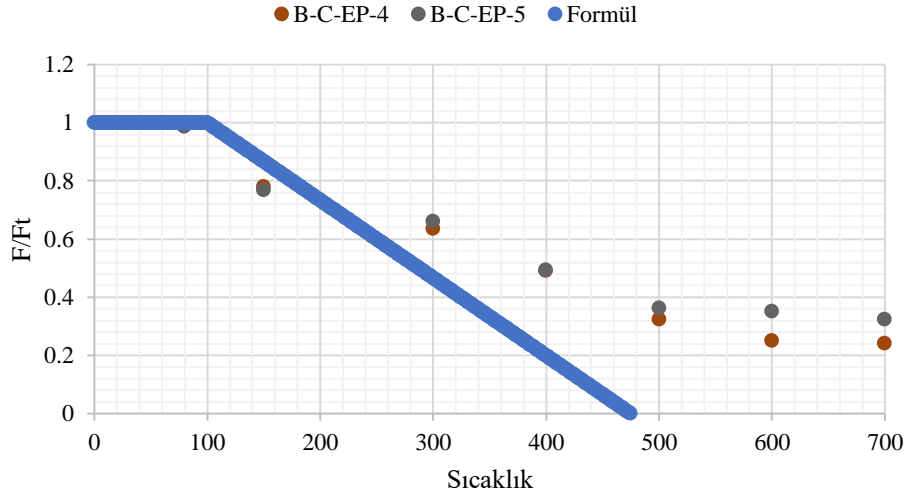
Saafi (Saafi, 2002)) tarafından önerilen Denklem 1'deki ifadeler dikkate alınarak oluşturulan f_t/f_u değerleri deneysel çalışmalarla karşılaştırılarak Şekil 2-4'te verilmiştir.



Şekil 2. Saafi'nin önerdiği denklemin vinilester matrisli ve çapları farklı donatıların deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması



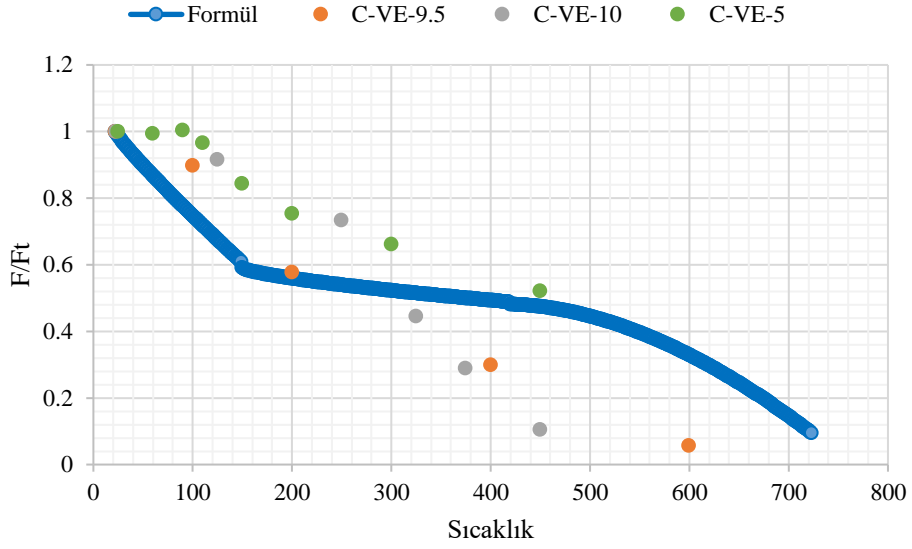
Şekil 3. Saafi'nin önerdiği denklemin epoksi matrisli ve farklı yüzeyli donatıların deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması



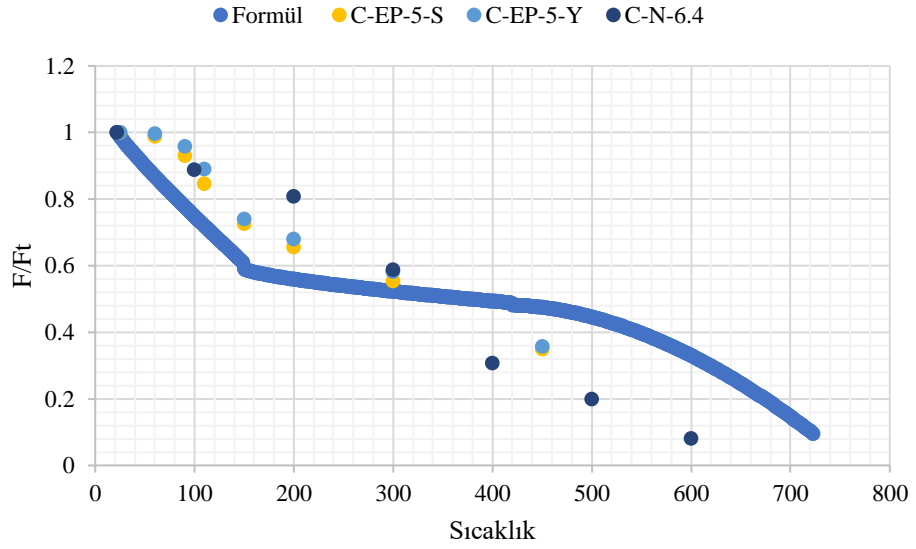
Şekil 4. Saafi'nin önerdiği denklemin epoksi matrisli ve beton içindeki donatıların deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması

100 °C öncesi ve 475°C sonrası sabit olup, ara değerler sıcaklıkla değiştiğinden dolayı denklem tek tip değişim senaryosu sunmaktadır. Bu senaryoya 100°C'ye kadar deneysel çalışmalar uyum göstermekle birlikte 100°C'den sonra denklem lineer olarak azaldığından deneysel çalışmalarla uyumu azalmaktadır. Bu denkleme en yakın değişimi C-VE-10 donatısı göstermektedir. Çalışmada uyumluluğun tespiti için regresyon ve korelasyon analizi yapılmış, regresyon sonuçları (R^2) 0,90-0,98 arasındayken, korelasyon sonuçları 0,95-0,99 aralığında değişmektedir.

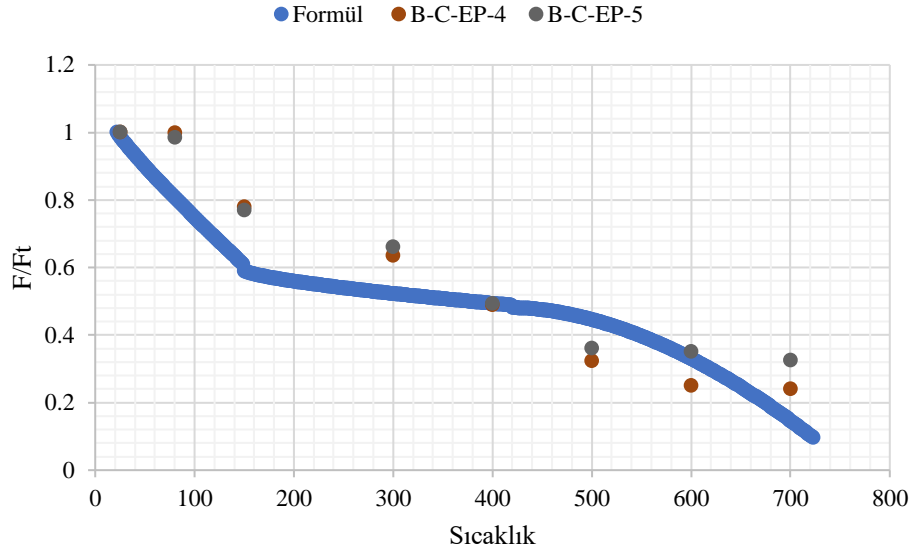
Wang (K. Wang et al., 2011) tarafından (Denklem 3) elde edilen denklemin literatür ile karşılaştırılması Şekil 5-7'de verilmiştir.



Şekil 5. Wang'ın önerdiği denklemin vinilester matrisli ve çapları farklı donatıların deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması



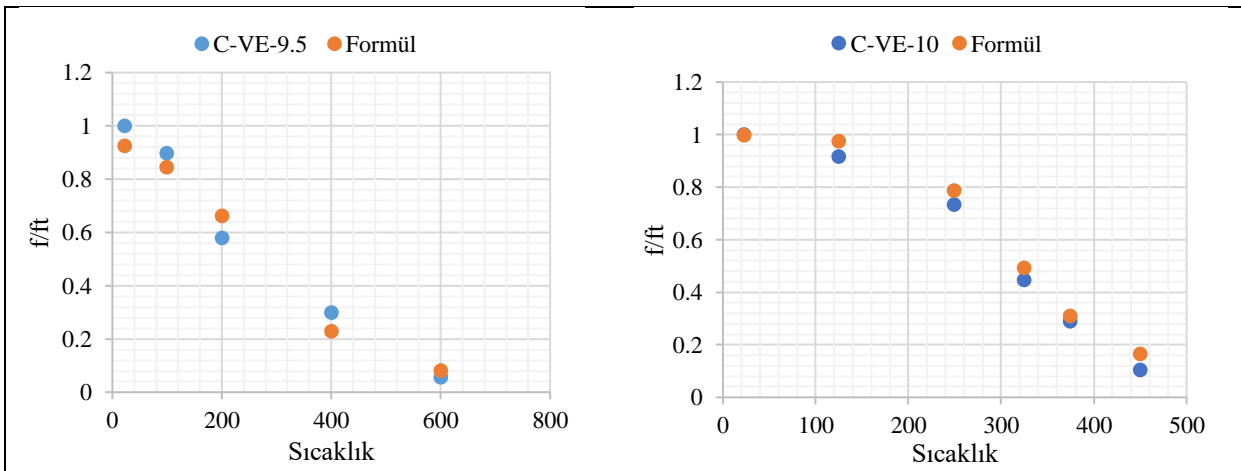
Şekil 6. Wang'ın önerdiği denklemin epoksi matrisli ve farklı yüzeyli donatıların deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması

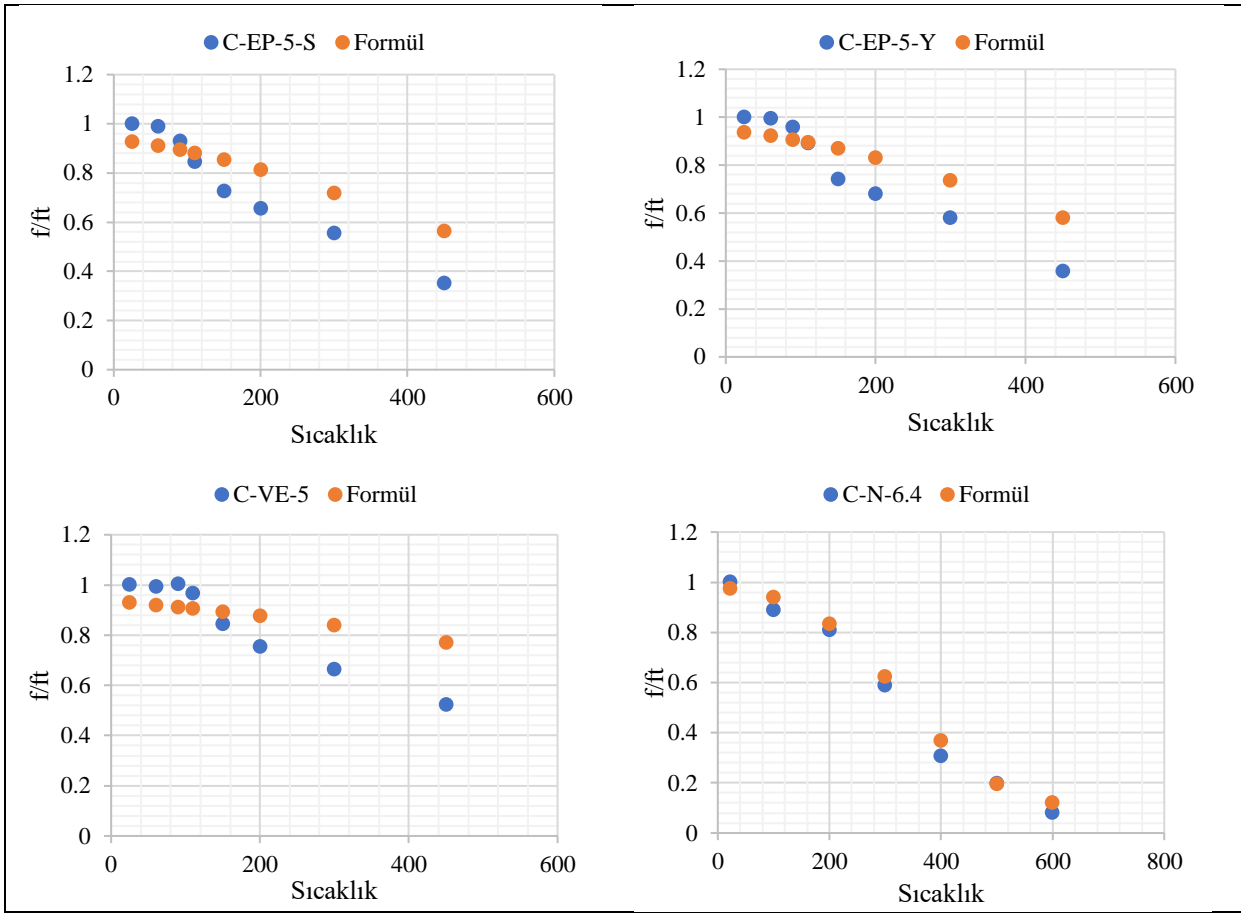


Şekil 7. Wang'ın önerdiği denklemin epoksi matrisli ve beton içindeki donatıların deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması

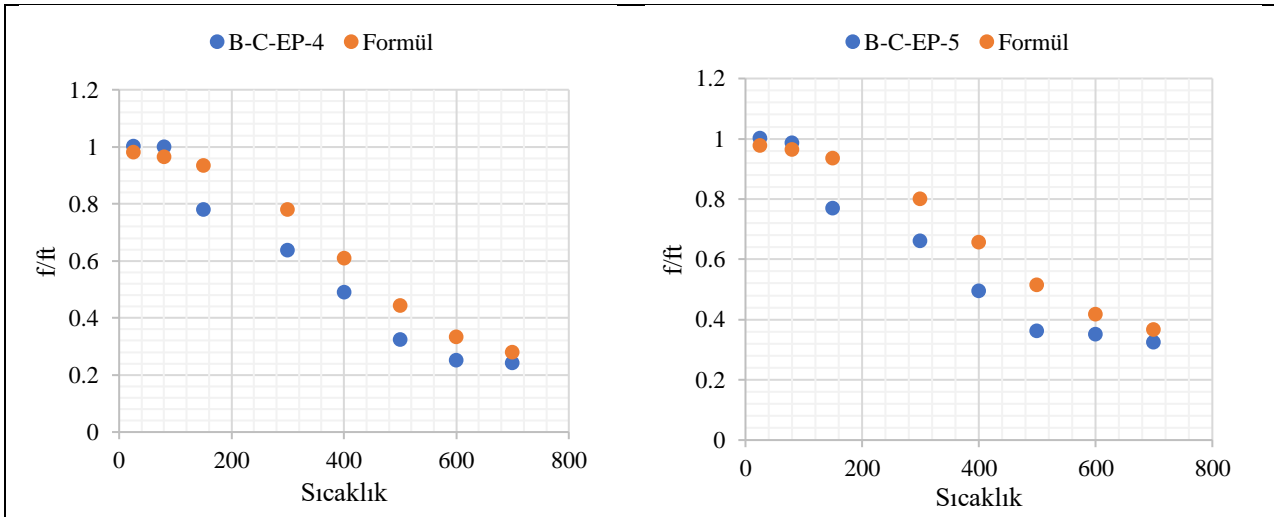
Oluşturulan grafikler sonucunda her bir donatı için regresyon ve korelasyon analizi yapılmıştır. R^2 değerleri 0,63 ve 0,91 arasında değişirken, korelasyon değerleri 0,79 ve 0,95 arasında değişmektedir. Bu çalışmaya en yakın değerleri C-VE-9,5 donatısının verdiği yapılan analiz sonucunda görülmüştür. Saafi'nin çalışması 475°C'den sonraki sıcaklık değişimlerini dikkate almaması yapılan çalışmanın eksikliğini ifade etmektedir. Yapılan deneyler sonuçlarından da görüldüğü gibi 475°C'den sonra da mekanik dayanımlarının bir kısmını korumaktadırlar.

Denklem 5'e göre elde edilen denklemin her bir literatürdeki çalışma için karşılaştırılması Şekil 8-9'da verilmiştir.





Şekil 8. Denklem 5 sonuçları ile CFRP donatıların deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması



Şekil 9. Denklem 5 sonuçları ile betona gömülmüş CFRP donatıların deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması

Şekil 8 ve 9'da görüldüğü gibi değerler birbirine çok büyük oranlarda örtüşmektedir. Bu denklem R^2 değerleri 0,92-1 arasında korelasyon değerleri ise 0,95-1 arasında değişkenlik göstermektedir. C-VE-10 ve C-N-6,5 donatıları çok büyük oranda örtüşmektedir. Ancak bu denklemde k katsayısı regresyon analizi yardımıyla elde edilmekte ve bu nedenle 5 numaralı denklem modeliyle elde edilen sonuçların korelasyon ve regresyon değerlerinin yüksek olması normal kabul

edilmiştir. Wang'ın çalışmasının güvenilirlik sınırının ($R^2=0,95$) kabulü düşünüldüğünde bu oranın çok daha altında kaldığı Saafi'nin çalışmasında ise 475°C 'den sonrasının hesaba katılmamış olması bu matematiksel denklemlerin kullanımlarını sorgulatmaktadır.

5. Yeni Matematiksel Denklem Önerisi

Bu bölümde, literatürdeki CFRP (karbon fiber takviyeli polimer) donatılarının yüksek sıcaklıklardaki çekme dayanımındaki değişimlerle ilgili yeni bir matematiksel model önerisi sunulmuştur. Model, deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin titiz bir analizine dayanmaktadır. Literatürdeki deneysel veriler, korelasyon ve regresyon analizleriyle incelenerek değerlendirilmiştir. Çalışmada, 60 dereceye kadar olan sıcaklık aralığında CFRP donatıların çekme dayanımlarında kayıp olmadığı kabul edilmiştir. Bu durum, literatürdeki deneysel bulgularla uyumludur, zira deneysel veriler de 60 dereceye kadar ihmal edilebilir bir dayanım kaybının olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, 60 dereceden sonraki sıcaklık aralığı için, deneysel çalışmaların sonuçları 2. dereceden polinom şeklinde bir eğim şeklinde bir azalma göstermiştir. Regresyon analizi sonuçlarından elde edilen katsayılar kullanılarak yeni bir formül geliştirilmiştir. Bu önerilen matematiksel model, yüksek sıcaklık altındaki CFRP donatıların çekme dayanımını daha yakın bir şekilde tahmin etme potansiyeline sahiptir ve inşaat mühendisliği alanında önemli uygulamalara katkı sağlayabilecek niteliktedir (denklem 6).

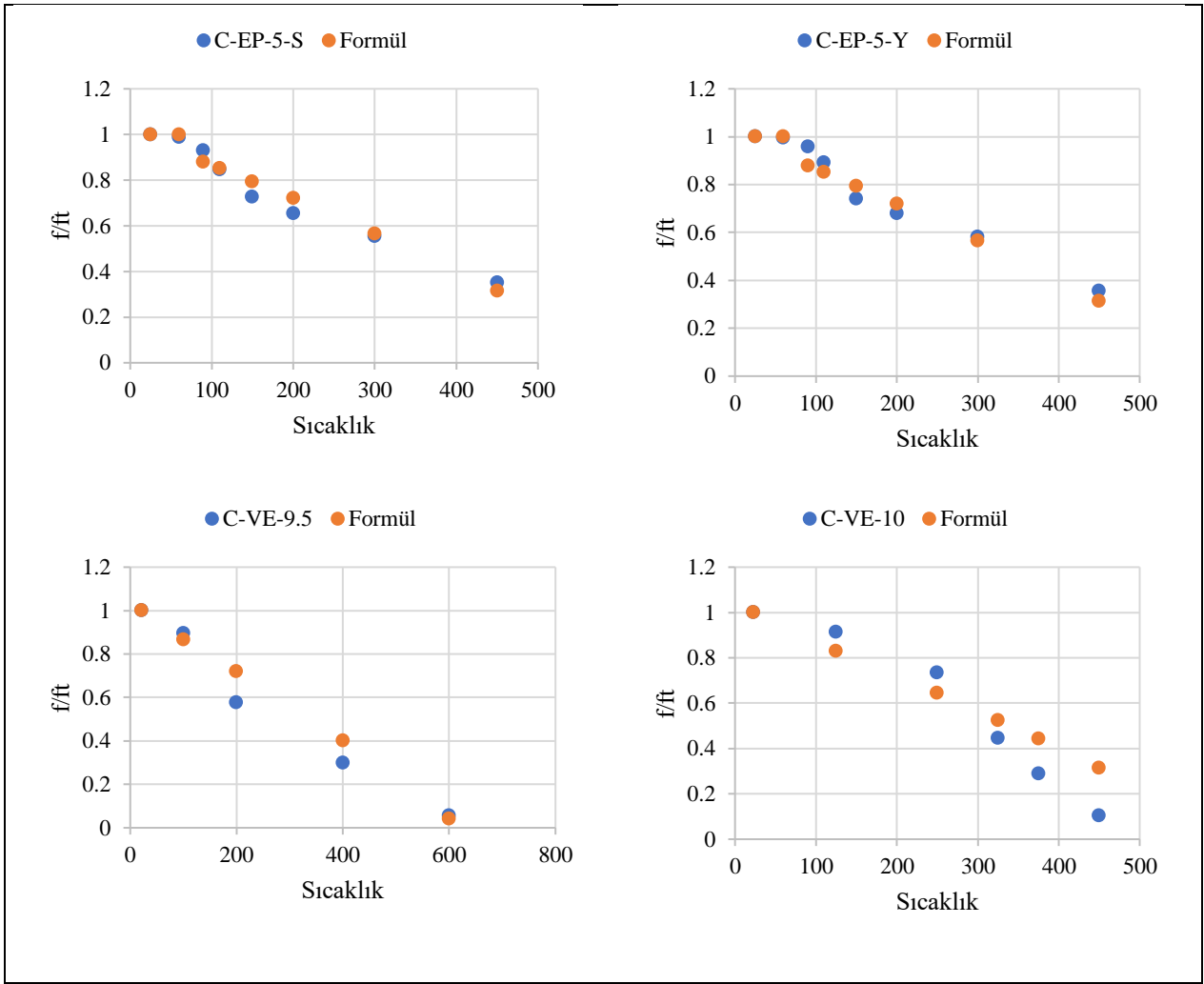
$$T \begin{cases} \leq 60^\circ\text{C} , & 1 \\ > 60^\circ\text{C} , & 1 - \alpha T^2 - \beta T \end{cases} \quad (6)$$

Denklemden α, β sabit katsayıları ve T Celsius cinsinden sıcaklığı ifade etmektedir. α, β sabit katsayılarının değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. α ve β sabit katsayılarının değerleri

	α	β
CFRP	5×10^{-7}	0,0013

Denklem 6 ile hesaplanan değerler ve deneysel çalışmalardan elde edilen değerlerin karşılaştırılmasının grafiksel ifadesi Şekil 10' da verilmiştir.



Şekil 10. Denklem 6 sonuçları ile CFRP donatıların deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılması

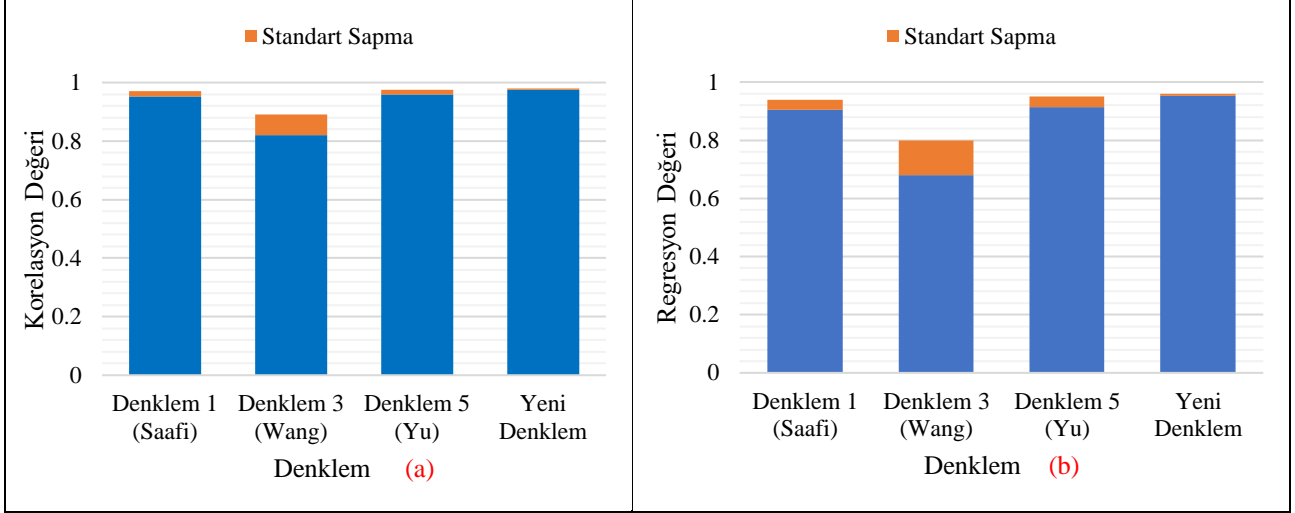
Çalışma sonucunda tüm hesaplamalar için korelasyon değeri 0,97-0,98, R^2 değeri ise C-VE-10 donatısı için 0,95 ,C-VE-9,5 C-EP-5-Y donatıları için 0,96 ve C-EP-5-S donatısı için 0,97 olduğu tespit edilmiştir. Bu değerlerin güvenlik sınırının üstünde kaldığı ve denklemin uygulanabilir olduğu görülmektedir.

Literatürde Ashrafi ve ark., 2017, Y. C. Wang ve ark., 2007, Rami Hamad ve ark., 2017 tarafından yapılan deneysel çalışmalar ile literatürdeki formüllerin ve yeni formülün uygunluğunu regresyon-korelasyon analizleriyle karşılaştırılmalı olarak Tablo 3'te ve Şekil 11'de verilmiştir.

Tablo 3. Regresyon ve korelasyon değerlerinin karşılaştırması

Regresyon (R^2)				
	Denklem 1 (Saafi)	Denklem 3 (Wang)	Denklem 5 (Yu)	Yeni Denklem
C-VE-9.5	0,96	0,91	0,97	0,96
C-VE-10	0,98	0,63	0,99	0,95
C-EP-5-S	0,9	0,85	0,92	0,97
C-EP-5-Y	0,92	0,82	0,92	0,96
Ortalama	0,94	0,8	0,95	0,96
Standart Sapma	0,036	0,121	0,035	0,008
Korelasyon				
C-VE-9.5	0,98	0,95	0,98	0,98

C-VE-10	0,99	0,79	0,99	0,97
C-EP-5-S	0,95	0,92	0,96	0,98
C-EP-5-Y	0,96	0,91	0,96	0,98
Ortalama	0,97	0,89	0,975	0,98
Standart Sapma	0,018	0,070	0,015	0,005



Şekil 11. Korelasyon (a) -regresyon (b) değerleri ve standart sapmaları

Denklemler 1 için elde edilen yüksek regresyon değeri 0,94 ve düşük standart sapma 0,036 ile bu denklemin deneysel verileri iyi açıkladığını göstermektedir. Benzer şekilde, Denklemler 5'te yüksek bir regresyon değeri 0,95 ve düşük standart sapma 0,035 ile dikkat çekerken Denklemler 3, regresyon değeri 0,8 ve standart sapma 0,121 açısından diğer denklemlere göre daha düşük bir doğruluk payına sahiptir. Bu bulgular, mevcut literatürdeki matematiksel modellerin deneysel verilerle karşılaştırılabilir olduğunu göstermektedir. Ancak, bu sonuçlar ışığında yeni bir matematiksel model önerilmiş ve bu model, literatürden alınan aynı deneysel verilerle karşılaştırıldığında daha yüksek bir regresyon değeri 0,96 ve düşük standart sapma 0,008 ile öne çıkmıştır. Bu sonuçlar, yeni denklemin mevcut literatürdeki modellere göre daha iyi bir uyum sağladığını ve gelecekteki çalışmalarda dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Bu bağlamda, araştırmanın bulguları, matematiksel modelleme alanında yeni bir perspektif sunmaktadır.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada literatürde deneysel olarak yapılan çalışma sonuçları ile literatürde bu konuda yapılan matematiksel model çalışmalarında önerilen denklemler kıyaslanarak alternatif bir denklemler önerisi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenerek verilmiştir:

- Sıcaklık arttıkça dayanımda düşüş meydana geldiği ve bu düşüşlerin parabolik olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle yeni denklem önerisinde bu parabolik azalma dikkate alınarak oluşturulmuştur.
- 60°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, çekme dayanımında nispeten az miktarda kayıp meydana gelmekte ve bu düşüşler, genellikle T_g sıcaklıklarına kadar (100-125°C) devam etmektedir. Ancak, bu sıcaklık eşiği geçildikten sonra, düşüş hızının arttığı tespit edilmiştir. Yapılan analizler, literatürde bulunan hızlandırılmış yaşlanma deneylerinin (accelerated aging) 60°C sıcaklığını kullanma tercihlerini de desteklemiştir. 60°C sıcaklık seviyesinin tercih edilmesinin temel nedenleri arasında, FRP donatıların mekanik ve fiziksel özelliklerine zarar vermemesi ve termal yüklemenin de yapılabildiği sınır sıcaklık olmasıdır.
- Bu malzemelerde diğer önemli nokta olan T_c kritik sıcaklığı, donatı dayanımının %50'sini kaybettiği sıcaklık, iki matris türü için de 300-400 °C arasında gerçekleştiği bu sıcaklık aralığının donatı için çok önemli olduğu görülmektedir.
- Literatürde bulunan üç denklem arasından Wang'ın denkleminin yeterlilik açısından tartışılır olduğu, Saafi'nin denkleminde ise 475 °C'den sonrasında dayanımın 0 kabul edilmesi deneysel çalışmalarla uymamaktadır.
- Gelecekteki çalışmalarda, GFRP donatılar için yeni bir denklem geliştirilebilir ve yüksek sıcaklıklarda GFRP donatılar incelenerek CFRP donatılarla kıyaslanabilir.
- Elde edilen sayısal sonuçlar, mevcut literatürdeki matematiksel modellerin deneysel verilere uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır. Denklem 1 ve Denklem 5, yüksek ortalama regresyon değerleri sırasıyla ortalama 0,94 ve 0,95 ve düşük standart sapmalar sırasıyla 0,036 ve 0,035 ile dikkat çekmektedir. Ancak, Denklem 3, ortalama regresyon değeri 0,8 ve standart sapma değeri 0,121 bakımından diğer denklemlere göre daha düşük bir doğruluk payına sahiptir.
- Denklem 1 ve Denklem 5, yüksek ortalama korelasyon değerleri sırasıyla 0,97 ve 0,975 ve düşük standart sapmalar sırasıyla 0,018 ve 0,015 ile dikkat çekmektedir. Ancak, Denklem 3, ortalama korelasyon değeri 0,89 ve standart sapma değeri 0,070 bakımından diğer denklemlere göre daha düşüktür.
- Bu sonuçlar ışığında, yeni bir matematiksel model önerilmiş ve bu model, literatürden alınan aynı deneysel verilerle karşılaştırıldığında daha yüksek bir ortalama regresyon değeri 0,96 ve düşük standart sapma 0,008 ; yüksek ortalama korelasyon değeri 0,98 ve düşük standart sapma 0,005 ile öne çıkmıştır. Bu, yeni denklemin mevcut literatürdeki modellere göre daha iyi bir uyum sağladığını göstermektedir.
- Bu bağlamda, gelecekteki çalışmalarda bu yeni matematiksel modelin daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesi ve kullanılması önerilmektedir. Bu model, matematiksel modelleme alanında önemli bir ilerleme sunmaktadır ve deneysel verileri daha etkili bir şekilde

açıklayabilir. Bu çalışma, matematiksel modelleme alanındaki araştırmacıların daha iyi sonuçlar elde etmelerine yardımcı olabilir.

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

- ACI. (2015). “(American Concrete Institute). *Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. ACI 440.1R-15. Farmington Hills, MI.*”
- Ashrafi, H., Bazli, M., Najafabadi, E. P., & Vatani Oskouei, A. (2017). The effect of mechanical and thermal properties of FRP bars on their tensile performance under elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 157, 1001–1010. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.09.160>
- Aydın, F., & Arslan, Ş. (2021). Investigation of the durability performance of FRP bars in different environmental conditions. *Advances in Concrete Construction*, 12(4), 295–302. <https://doi.org/10.12989/acc.2021.12.4.295>
- Bazli, M., & Abolfazli, M. (2020). Mechanical Properties of Fibre Reinforced Polymers under Elevated Temperatures: An Overview. *Polymers* 2020, Vol. 12, Page 2600, 12(11), 2600. <https://doi.org/10.3390/POLYM12112600>
- Bisby, L. A., & Kodur, V. K. R. (2007). Evaluating the fire endurance of concrete slabs reinforced with FRP bars: Considerations for a holistic approach. *Composites Part B: Engineering*, 38(5–6), 547–558. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2006.07.013>
- Cerniauskas, G., Tetta, Z., Bournas, D. A., & Bisby, L. A. (2020). Concrete confinement with TRM versus FRP jackets at elevated temperatures. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 53(3), 1–14. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01492-x>
- Chen, J., & Young, B. (2006). Stress–strain curves for stainless steel at elevated temperatures. *Engineering Structures*, 28(2), 229–239. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2005.07.005>
- Chowdhury, E. U., Eedson, R., Bisby, L. A., Green, M. F., & Benichou, N. (2011). Mechanical Characterization of Fibre Reinforced Polymers Materials at High Temperature. *Fire Technology*, 47(4), 1063–1080. <https://doi.org/10.1007/S10694-009-0116-6/FIGURES/13>
- Hajiloo, H., Green, M. F., & Gales, J. (2018). Mechanical properties of GFRP reinforcing bars at high temperatures. *Construction and Building Materials*, 162, 142–154. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.12.025>
- Katz, A., Berman, N., & Bank, L. C. (1999). Effect of high temperature on bond strength of FRP bars. *Journal of Composites for Construction*, 3(2), 73–81. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1999\)3:2\(73\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1999)3:2(73))
- Khaneghahi, M. H., Najafabadi, E. P., Shoaie, P., & Oskouei, A. V. (2018). Effect of intumescent paint coating on mechanical properties of FRP bars at elevated temperature. *Polymer Testing*, 71(May), 72–86.

<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.08.020>

- Kumahara, S., Masuda, Y., Tanano, H., & Shimizu, A. (1993). Tensile Strength of Continuous Fiber Bar Under High Temperature. *Special Publication*, 138, 731–742. <https://doi.org/10.14359/3954>
- Mouritz, A. P., & Arthur, G. G. (2007). *Fire properties of polymer composite materials*. Springer Science & Business Media.
- Nadjai, A., Talamona, D., & Ali, F. (2005). Fire performance of concrete beams reinforced with FRP bars. *Proceeding of the Int Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*, 401–410.
- Najafabadi, E. P., Oskouei, A. V., Khaneghahi, M. H., Shoaie, P., & Ozbakkaloglu, T. (2019). The tensile performance of FRP bars embedded in concrete under elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 211, 1138–1152. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.03.239>
- Nguyen, P. L., Hong Vu, X., & Ferrier, E. (2019). Thermo-mechanical performance of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), with and without fire protection material, under combined elevated temperature and mechanical loading conditions. *Composites Part B: Engineering*, 169(April 2018), 164–173. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.03.075>
- Nigro, E., Bilotta, A., Cefarelli, G., Manfredi, G., & Cosenza, E. (2012). Performance under Fire Situations of Concrete Members Reinforced with FRP Rods: Bond Models and Design Nomograms. *Article in Journal of Composites for Construction*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000279](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000279)
- Rafi, M. M., Nadjai, A., Ali, F., & O'Hare, P. (2011). Evaluation of Thermal Resistance of FRP Reinforced Concrete Beams in Fire. *Journal of Structural Fire Engineering*, 2(2), 91–107.
- Rami Hamad, J. A., Megat Johari, M. A., & Haddad, R. H. (2017). Mechanical properties and bond characteristics of different fiber reinforced polymer rebars at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 142, 521–535. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.03.113>
- Rosa, I. C., Firmo, J. P., Correia, J. R., & Barros, J. A. O. (2019). Bond behaviour of sand coated GFRP bars to concrete at elevated temperature – Definition of bond vs. slip relations. *Composites Part B: Engineering*, 160, 329–340. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.10.020>
- Saafi, M. (2002). Effect of fire on FRP reinforced concrete members. *Composite Structures*, 58(1), 11–20. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00045-4](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00045-4)
- Sharifianjazi, F., Zeydi, P., Bazli, M., Esmailkhanian, A., Rahmani, R., Bazli, L., & Khaksar, S. (2022). Fibre-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Members under Elevated Temperatures: A Review on Structural Performance. *Polymers*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/polym14030472>
- Wang, K., Young, B., & Smith, S. T. (2011). Mechanical properties of pultruded carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) plates at elevated temperatures. *Engineering Structures*, 33(7), 2154–2161. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2011.03.006>
- Wang, Y. C., Wong, P. M. H., & Kodur, V. (2007). An experimental study of the mechanical properties of fibre reinforced polymer (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures. *Composite Structures*, 80(1), 131–140. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2006.04.069>
- Yoo, S. J., Kim, Y. H., Yuan, T. F., & Yoon, Y. S. (2022). Evaluation of residual bond behavior of CFRP and steel bars embedded in UHPC after exposure to elevated temperature. *Journal of Building Engineering*, 56, 104768. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104768>
- Yoo, S. W., & Choo, J. F. (2022). Behavior of CFRP-reinforced concrete columns at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 358(October), 129425. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129425>
- Yu, B., & Kodur, V. (2014). Effect of temperature on strength and stiffness properties of near-surface mounted FRP reinforcement. *Composites Part B: Engineering*, 58, 510–517. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2013.10.055>

Investigating the Effects of Different Types of Battery Impacts in Energy Storage Systems on Standalone Hybrid Renewable Energy Systems

Aykut Fatih GÜVEN^{1*}, Şaban TÜRKMEN², Ertuğrul AŞIKLI³, Gamze ÖRNEK⁴

Abstract

Energy plays an important role in the development of a country. Developing countries tend to lean towards the use of domestic renewable energy sources to reduce their dependency on foreign energy. However, when looking at the world as a whole, the share of fossil fuels in energy production is at high levels. Due to the rapid depletion of fossil fuels and their increasing costs, as well as the environmental damage they cause, electricity generation from cheaper and cleaner renewable energy sources is being targeted in the area where work will be done. Hybrid energy systems are used in conjunction with backup Units due to the variable nature of renewable energy sources such as wind and solar. In this study, a hybrid energy system with solar-wind-diesel generator-battery components was designed through HOMERPro software to meet the electricity demand of the closed prison in Burhaniye district of Balıkesir. Simulations were carried out by applying 5 different battery scenarios in the hybrid energy system, and the optimum result was obtained. As a result, the effect of the batteries used on the system was examined, and the vanadium redox battery system with a high renewable energy ratio and the lowest Units energy cost was determined to be the most optimum.

Keywords: Hybrid energy systems, Renewable energy sources, Energy optimization, Techno-economic analysis, Vanadium redox battery.

Farklı Tip Batarya Etkilerinin Şebekeden Bağımsız Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

Öz

Enerji bir ülkenin gelişiminde önemli bir rol oynamaktadır. Gelişmekte olan ülkeler enerjide dışa bağımlılığını azaltmak için yerli yenilenebilir enerji kaynakları kullanımına doğru eğilim göstermektedir. Fakat tüm dünyaya bakıldığında fosil yakıtların enerji üretimindeki payı yüksek seviyelerdedir. Fosil yakıtların hızla tükenmesiyle birlikte maliyetlerinin artması ve çevreye verdikleri zararlardan dolayı çalışma yapılacak bölgede daha ucuz ve temiz olan yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimi hedeflenmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgâr ve güneş) değişken yapısından dolayı hibrit enerji sistemleri yedekleme üniteleriyle birlikte kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Balıkesir'in Burhaniye ilçesinde bulunan kapalı cezaevinin elektrik yük talebini karşılamak amacıyla güneş-rüzgâr-dizel jeneratör-batarya bileşenlerine sahip hibrit enerji sistemi tasarlanmış ve tasarım aşamaları HOMERPro yazılım aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Hibrit enerji sisteminde, 5 farklı batarya senaryoları uygulanarak simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve en optimum sonuç elde edilmiştir. Sonuç olarak kullanılan bataryaların sistem üzerindeki etkisi incelenmiş, yenilenebilir enerji oranı yüksek ve en düşük birim enerji maliyetli vanadyum redoks bataryalı sistem olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Hibrit enerji sistemleri, Yenilenebilir enerji kaynakları, Enerji optimizasyonu, Tekno-ekonomik analiz, Vanadyum redoks batarya.

¹Yalova University, Department of Energy Systems Engineering, Yalova, Turkey, afatih.guven@yalvoa.edu.tr

²Yalova University, Department of Energy Systems Engineering, Yalova, Turkey, sabaanturkmen@gmail.com

³Yalova University, Department of Energy Systems Engineering, Yalova, Turkey, ertugrulasikli@gmail.com

⁴Yalova University, Department of Energy Systems Engineering, Yalova, Turkey, gamzeorneek@gmail.com

¹<https://orcid.org/0000-0002-1071-9700>

²<https://orcid.org/0000-0002-6074-3581>

³<https://orcid.org/0009-0000-0826-8181>

⁴<https://orcid.org/0009-0007-6278-9667>

1. Introduction

Energy is one of the most important factors that determine people's lifestyle and quality of life. It greatly influences the economy and is an essential requirement for the prosperity and comfort of countries. As the world's population increases, so does the need for energy (Güven and Hatipoğlu, 2022). Academic and industrial research on energy consumption, driven by technological advancements, focuses primarily on the efficient use of energy. Energy conservation involves the efficient operation of devices, resulting in less energy consumption to perform their functions. Efficient utilization of energy types and sources, along with reducing energy costs and ensuring uninterrupted access to energy for people, make energy management essential (Güven et al., 2022).

It is known that people have been using fossil fuels for their energy needs for many years. The environmental damage, global warming, and limited energy source of fossil fuels have led to the search for new sources. Developing countries have started to turn to renewable energy sources to reduce their external energy dependency. Renewable energy sources are more usable than fossil fuels because they are environmentally friendly and have unlimited resources (Güven and Samy, 2022). The utilization rate of primary renewable energy sources varies from country to country in the world. As a result of research, solar energy, which has a significant development, provides more significant advantages than other sources (Güven and Mete, 2022). Our country has high advantages in terms of benefiting from solar energy due to its geographical location. It is known that our country's solar energy potential is higher than many European countries (Güven, 2017). However, it is seen that solar energy is not utilized enough. In addition to solar energy, benefiting from wind energy is also among our country's potentials. The fact that solar energy is only available during the day and the energy obtained from wind energy is not continuous limits the use of these systems separately. Hybrid renewable energy systems (HRES) are called systems that use solar energy and wind energy together. HRES is also used to eliminate the disadvantages of energy sources that are insufficient where energy demand exists. Furthermore, research indicates that diesel generators are commonly employed as alternative energy sources, particularly in the event of power failures. Diesel generators are preferred, especially when energy demand is not met by natural energy sources. In particular, in places where solar energy potential is high, it is seen that diesel generators are used as an alternative backup system in HRESs established for the distribution of electrical energy during grid outage moments. In many countries, the integration of energy storage systems (ESSs) with renewable energy systems and the development of renewable energy microgrids increase the percentage of HRES and renewable energy use.

Many studies have shown that batteries have significant effects on energy balancing, power quality, power control, backup power, and increased power supply in hybrid renewable energy

systems. Additionally, the use of batteries helps to reduce the time gap between electricity generation from renewable energy sources and consumption. Research on the effects of batteries in hybrid renewable energy systems also addresses issues such as battery technology selection, capacity management, battery life, battery cost, and battery disposal. While some researchers indicate that vanadium redox batteries are effective in renewable energy systems, others argue that lithium-ion batteries are more cost-effective and have higher energy density. In the past, lead-acid batteries have been used for a long time in electricity applications, but lithium-ion batteries have become increasingly popular in recent years. This is because they have a higher energy density, meaning they can store more energy in less space. Additionally, lithium-ion batteries require low maintenance and have higher safety features. Vanadium redox batteries are a technology commonly used for storing energy from renewable and environmentally friendly sources. These batteries use different ion forms of vanadium in a rechargeable electrolyte solution to increase energy storage capacity. Zinc-bromine batteries, or ZBF, are used in many applications due to their high energy density and low maintenance requirements. These batteries produce energy from a chemical reaction between zinc and bromine in an electrolyte solution. Ni-Cad batteries are long-lasting, lightweight, and reliable. However, they are harmful to the environment because they contain toxic metals such as nickel and cadmium. Sodium-sulfur batteries are used particularly in large-scale energy storage applications. These batteries work at high temperatures and produce energy from a chemical reaction between sodium and sulfur in an electrolyte solution.

In conclusion, the effects of batteries in hybrid renewable energy systems play an important role in many areas such as energy balancing, power quality, power control, backup power, increased power supply, and reducing time gaps. Therefore, batteries should be taken into consideration in the design of hybrid renewable energy systems.

In this study, unlike other studies in the literature, 5 different battery technologies, including lead-acid battery (LA), lithium-ion battery (LI), vanadium redox battery (VR), nickel-iron battery (NI) and zinc-bromine flow battery (ZBF), were used and compared on HRES. Balıkesir province was chosen as the application area, and the load demand was met without interruption from renewable energy sources. HOMERPro software was used in the system modeling and design process. Different scenarios were created during the simulation process to achieve the most optimal results. The effects of HRES were examined in all scenarios used in the study. As a result, the most suitable system was chosen in terms of economy, efficiency, and environment. Thanks to the developed models, the most efficient and cost-effective system design has been proposed for the region where the hybrid system will be implemented. Sensitivity analyses were conducted to obtain the most feasible components and battery options of the system under possible conditions.

In the literature, it has been observed that many researchers have used different hybrid components and different batteries. Table 1 presents an extensive overview of different hybrid system setups that employ a variety of battery technologies.

Table 1. Literature studies on battery effects in hybrid energy systems.

Hybrid components	Findings	Country	References
Solar panel /Battery	This study, the effect of batteries on the system performance and the life cycle costs of batteries were examined. The focus was on lead-acid batteries, and two different types of lead-acid batteries with specific characteristics were tested in the project. It was revealed that more battery life tests and an adequate number of similar tests need to be performed for specific battery types. Additionally, it was shown that longer-lasting lead-acid battery models need to be developed and validated.	Canada	(Bindner et al., 2005)
Solar Panel / Diesel Generator / Battery	This study presents a battery-backed PV-diesel hybrid power system for a village powered by solar panels, a diesel generator, and batteries. Field measurements were taken using four different generators. It was found that with increasing fuel prices, the diesel-only system became less economical compared to the others and was no longer cost-effective. It was recommended to use a demonstration hybrid power system with a 20% solar PV penetration.	Suudi Arabistan	(Rehman and Hadrhrami, 2010)
Solar panel/Diesel generator/Battery	In this study, a small hybrid system in the Zaragoza province of Spain has been analyzed. A new load management strategy has been investigated to utilize renewable energy in the most optimal way. The strategy has improved the use of wind energy by shifting controllable loads to wind power.	Spain	(Lujano-Rojas et al., 2012)
Solar panel/Diesel generator/Battery	In this study, the techno-economic feasibility of a photovoltaic-diesel generator-battery hybrid energy system has been examined. Various scenarios have been studied for photovoltaic penetration ranging from 0% to 100% for an energy system (HES) for electrification. The analysis of power systems has shown that economically, the optimum configuration is a 25% photovoltaic-diesel generator-battery hybrid energy system compared to other systems.	Algeria	(Rezzouk and Mellit, 2014)
Wind turbine/Batteries	This study proposes a hybrid energy storage system, combining superconductive magnetic energy storage with a battery to reduce short-term power cycling and high discharge currents, ultimately improving battery lifespan. A novel battery life model evaluates improvements by considering both the number of charge/discharge cycles and discharge impact ratio. The study advances previous research by demonstrating the potential to improve battery life in wind energy conversion through superconductive energy storage and introducing a new methodology to achieve this	United Kingdom	(Li et al., 2015)
Solar panel/Fuel cell/Battery	In this study, an optimization model has been developed for a PV/fuel cell/battery-based hybrid energy system to cope with increasing energy consumption in the residential sector. It has been observed that this type of hybrid energy system, designed to meet residential electricity and thermal demands	China	(Ren et al., 2016)

	while minimizing annual operating costs and CO ₂ emissions, is effective.		
Battery/Solar panel/Fuel cell	This research paper presents the analysis of a hybrid system consisting of a photovoltaic system, fuel cell, battery, and upstream grid. The system was evaluated with two types of loads, namely electrical and thermal loads, and the study investigated how changing loads affected energy supply strategies. The study used the IGDT approach to derive robustness and opportunity functions that could guide the system operator in selecting the right strategy. The load's uncertainty was modeled to enable the operator to make informed decisions and optimize the system's performance against possible changes in the load. A case study was also simulated to demonstrate the effectiveness of the IGDT approach.	Iran	(Nojavan et al., 2017)
Solar panel/Battery/Fuel cell	The study aimed to assess the cost-efficient management of a hybrid energy system comprising photovoltaic, battery, and fuel cell components, using a demand response program. The system utilizes a battery for storing electrical energy and a thermal energy storage tank for storing thermal energy, resulting in energy savings during off-peak periods and supplying power during peak hours, leading to a reduction in overall costs. To solve the low-cost operation problem, a mixed-integer linear program has been developed.	Iran	(Majidi et al., 2017)
Solar panel/Diesel generator/Battery	This article aims to optimize rural electrification in the remote Sahara region of Algeria, where diesel generators are predominantly used. A sensitivity analysis has been conducted on an autonomous hybrid solar panel, diesel generator, and battery system. The Particle Swarm Optimization (PSO) and ϵ -constraint methods were utilized to minimize the total system cost. An independent hybrid PV-string-battery system was effectively installed as a reliable solution for rural areas. It has been observed that the optimum system design meets 100% of the load demand.	Algeria	(Fodhil et al., 2017)
Solar Panel/Super Capacitor/Battery	This study aimed to improve the service life of lead-acid batteries in independent photovoltaic power systems by reducing the stress on the battery, which increases operating costs due to the short cycling life of the batteries. The effectiveness of various methods to reduce battery stress was investigated and compared through theoretical analysis and numerical simulations conducted using MATLAB Simulink	Malaysia	(Jing et al., 2018)
Wind Turbine/Solar panel/Diesel generator/Battery	In this study, a hybrid energy system consisting of wind, solar, diesel generator, battery, and reverse osmosis was analyzed. The modeling of each component was carried out and explained in detail. Various algorithms were used to solve the energy management of the hybrid energy system. Optimal system design and minimizing the total cost of the system were the main objectives of the study, along with the use of software tools.	China	(Zhang et al., 2020)
Solar panel/Diesel generator/Battery	In this study, a hybrid energy system design was made using solar panels, diesel generator, and batteries for a rural area in Iraq. Three different control strategies, LF, CC, and CD, were proposed in the study. According to the project results obtained using HOMER software, the most suitable system was determined to be a 19.4 kW solar panel, a 21 kW diesel generator, a 220 battery combination, and an 8.05 kW power converter with the CD strategy.	Iraq	(Aziz et al., 2020)

2. Materials and Methods

The hybrid energy system was designed, component selection and sizing, as well as battery technology assessment were done using the HOMER Pro® software. The current system design was based on input load data, technical specifications, and financial characteristics of various components. The aim was to achieve the optimal system response with the least Net Present Cost (NPC) and Cost of Energy (COE) for the location using different battery technologies. The research objective was to obtain an optimal solar/wind/diesel generator/battery system design for a location prone to frequent power outages. To simplify and enhance the planning and utilization of these systems, a three-step methodological framework was assessed, consisting of a comprehensive (1) initial assessment, (2) design optimization study, and (3) results, as illustrated in Figure 1. During the first stage, pre-optimization analysis was carried out to comprehensively study the estimated local demand for load as well as the available renewable energy sources, subject to constraints related to available energy sources and meteorological properties. Following the initial stage, system designers analyzed the optimal mix of applicable energy technologies to maintain a balanced load demand. The HOMER Pro® program was used to appropriately model and analyze the selected energy technologies in the context of five different battery technologies. The aim was to minimize net present cost, energy cost, and pollution while meeting electrical load demand. The third stage involved reviewing the least expensive and most environmentally friendly system with the best reliability level, which was evaluated based on numerous operational, financial, and environmental criteria.

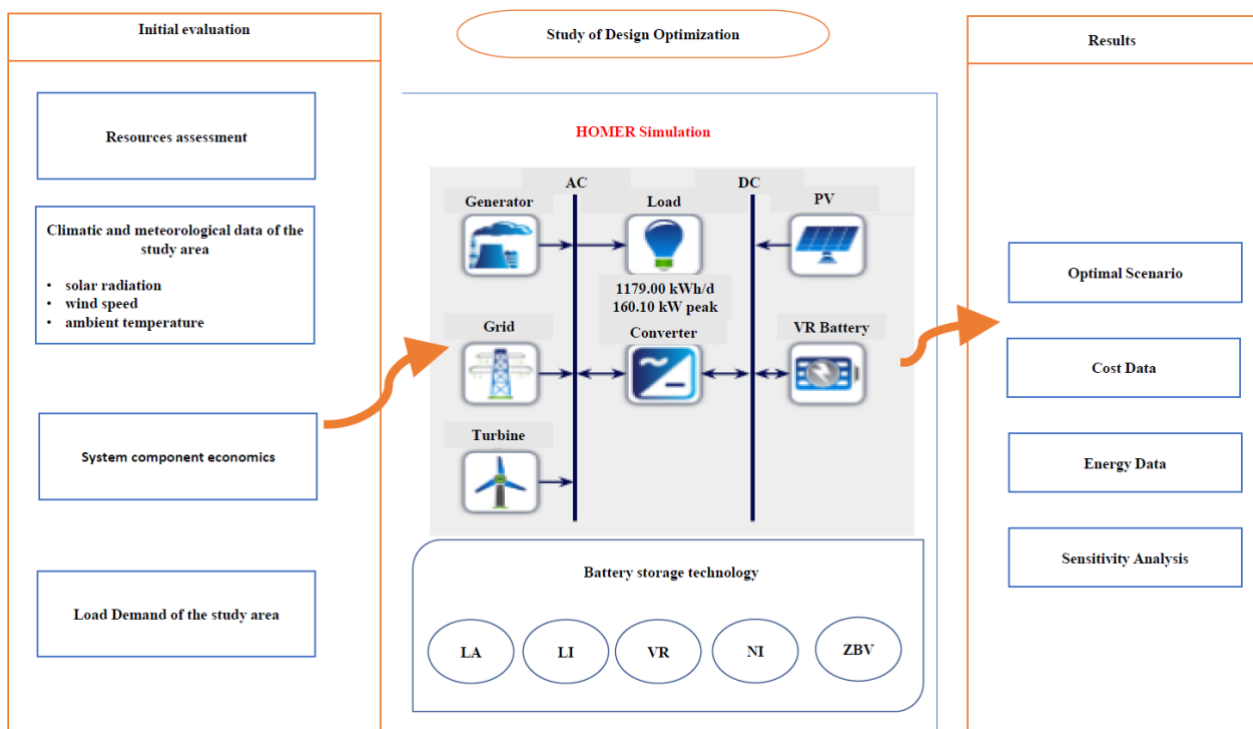


Figure 1. Schematic representation of study techniques (Barakat et al., 2022).

2.1. Introduction to the Study Area

The study area is a prison located in Burhaniye district of Balıkesir. A hybrid energy system consisting of solar and wind energy sources independent from the grid has been evaluated to meet the energy demand of the prison, which accommodates 1200 people. The meteorological data used in the study was provided by the Turkish State Meteorological Service. Hourly solar radiation, wind speed, ambient temperature, and load data from annual records were used to create a profile of the study area. Figure 2 shows the hourly resolved solar radiation profile over one year (8760 hours), Figure 3 shows the monthly profiles of wind speed at a height of 10 m above the ground, and Figure 4 shows the monthly profiles of ambient temperature as a time series graph. As seen in Figure 2, the solar energy potential of the study area is higher in the summer months compared to the winter months. Wind turbines will serve as complementary energy sources when solar energy may be insufficient during the winter months, complementing each other with solar energy. These are the two most preferred energy sources in hybrid systems. The average daily energy consumption in this prison was 1179.0 kWh/day with a random fluctuation of 15.092%. The maximum and minimum average loads per hour throughout the year were 160.1 kW and 49.13 kW, respectively. The annual, daily, and seasonal load demand profiles are also shown in Figure 5. For the purpose of economic analysis, a nominal discount rate of 20% and an inflation rate of 17% were taken into account. The project life of the Hybrid Renewable Energy System (HRES) was chosen as 25 years.

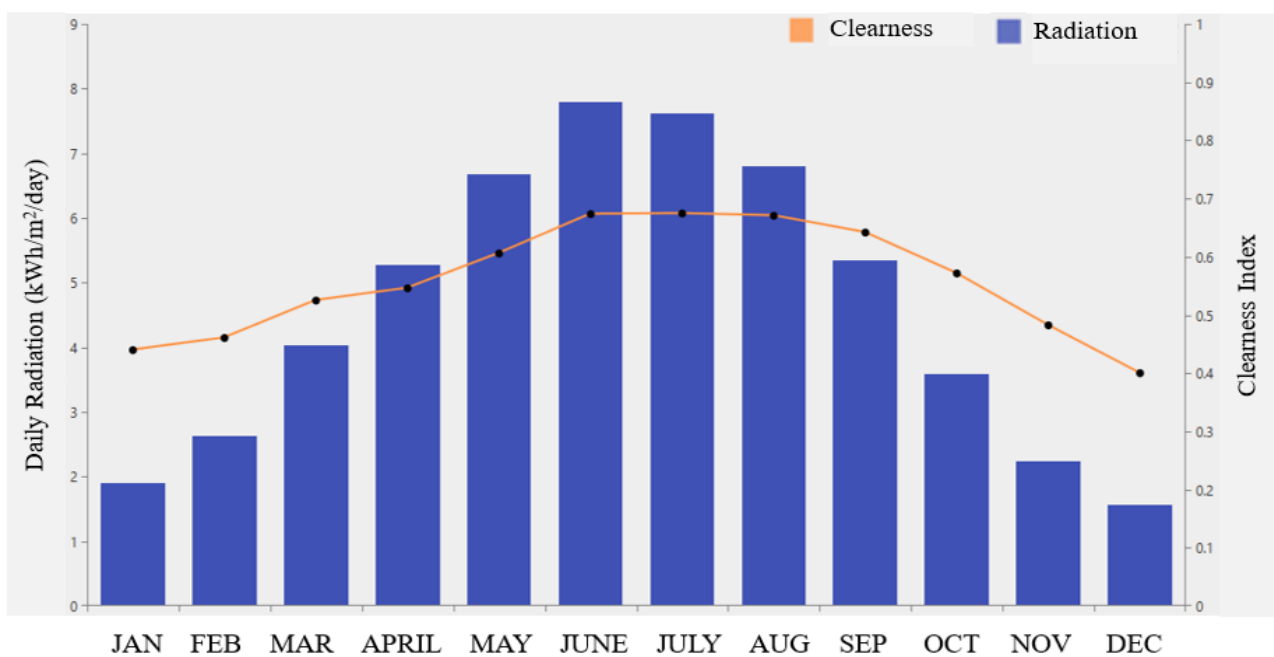


Figure 2. The radiation profile of the study area.

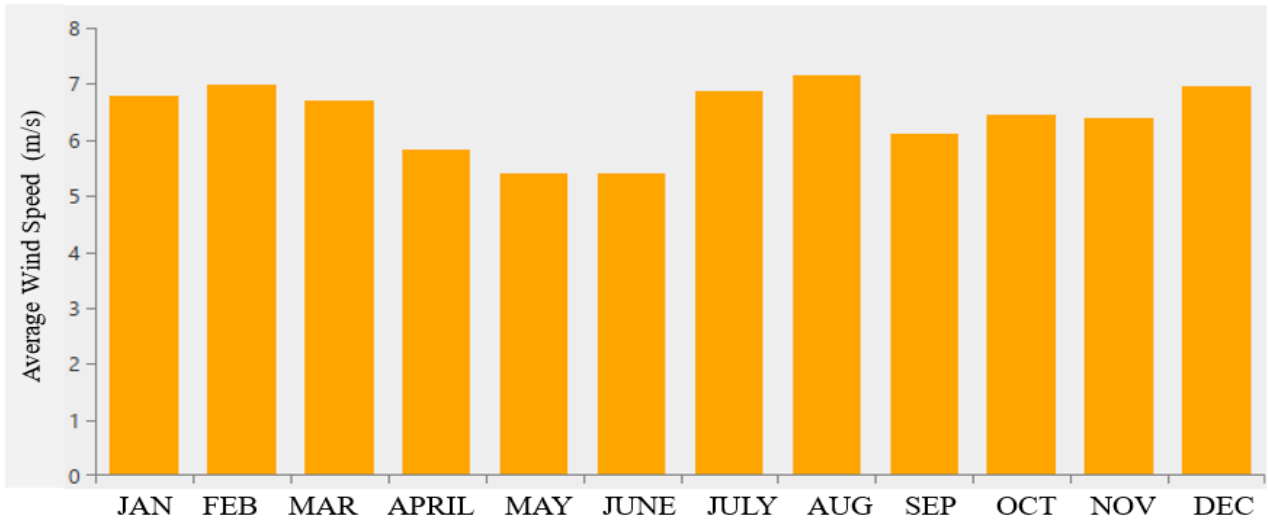


Figure 3. The wind speed of the study area.

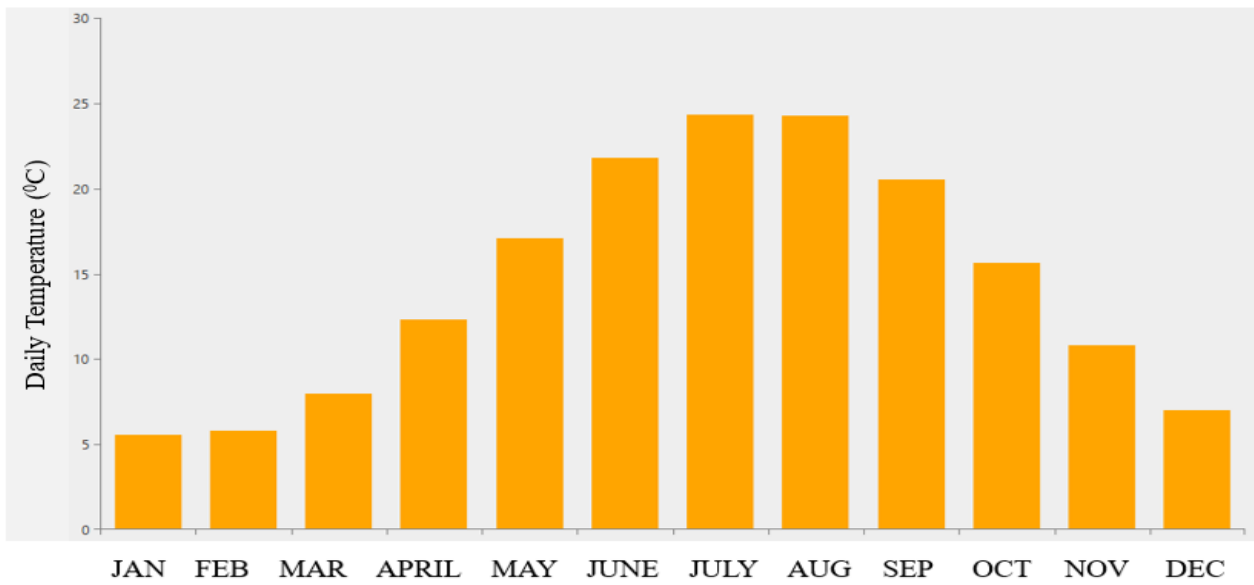


Figure 4. The Ambient temperature of the study area.

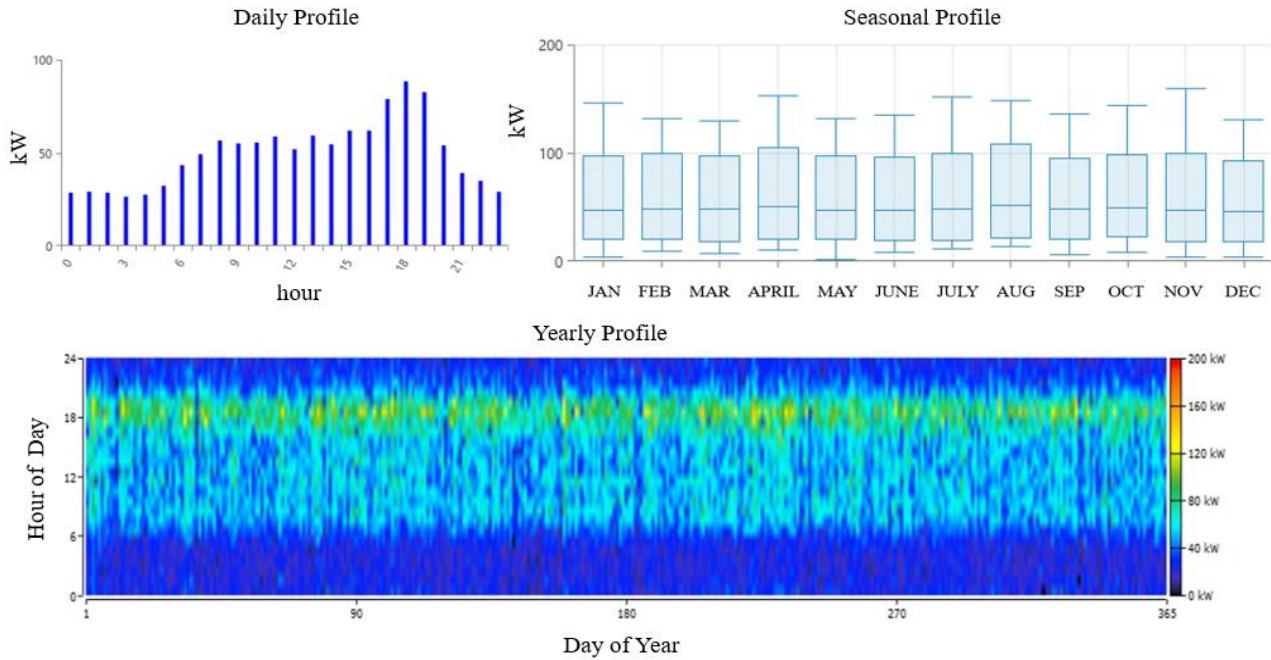


Figure 5. Load profile of study area.

2.2. Component Modeling for Energy Systems Analysis

The HOMERPro simulation program, developed by the National Renewable Energy Laboratory, is the go-to tool for analyzing hybrid power systems. This simulation program incorporates data on resources, technical and economic factors of system components, load data, and other relevant project quantities as inputs. Through HOMER simulation, researchers can evaluate the performance of hybrid power systems under various conditions and identify optimal system designs based on factors such as cost, reliability, and sustainability. The biggest benefit of the HOMER software is designing the long-term operation of a system. Many hybrid energy systems with different combinations that cover renewable energy sources determined by the user can be easily modeled with the HOMER program. Additionally, this program is a program that provides optimal budgeted systems through the design of micro power systems and different combinations of power suppliers. HOMER, the world's most advanced microgrid modeling software, uses the total of operating and installation costs for the combination of lifespan and Units energy costs as the physical behavior of the system. The diagram in Figure 6 depicts a hybrid power system that is not dependent on the grid. The system comprises a photovoltaic (PV) array, wind turbine, bidirectional converter, and battery banks (LA, LI, VR, NI, and ZBV) that collectively supply power to the designated prison work area.

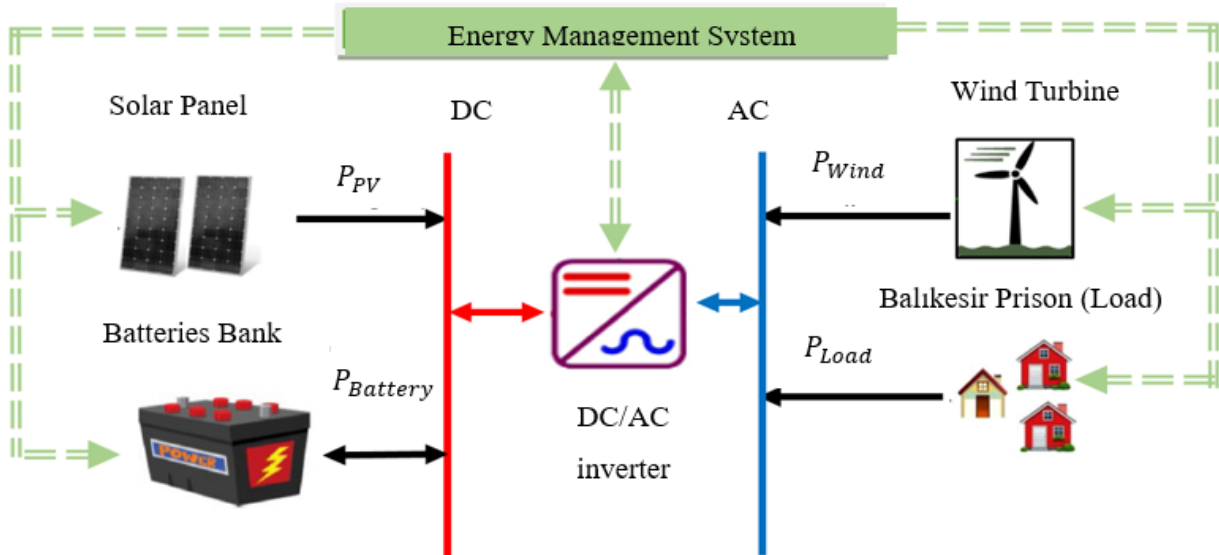


Figure 6. Proposed hybrid energy system architecture.

2.2.1. Modeling Solar Panel

One of the most important components of a hybrid system is solar panels. Solar panels are low-cost systems that do not require moving parts to generate electricity when exposed to sunlight. Due to Turkey's high solar energy potential, solar panels can be considered one of the best renewable energy sources. The electrical energy produced by the PV system can be calculated using equation (1). In the study, the solar panel cost for 1 kW is \$550, the renewal cost is \$550, the annual maintenance cost is \$10, and the panel life is assumed to be 25 years.

$$P_{pv_{out}}(t) = P_{(PV_{rated})} * \frac{G_{(t)}}{G_{t-STC}} * [1 + \alpha_t(T_C(t) - T_{C-STC})] \quad (1)$$

$P_{pv_{out}}(t)$ represents the output power (in W) of the PV module, $G_{(t)}$ represents the solar irradiance value (in W/m^2), $P_{(PV_{rated})}$ represents the nominal power value (in W) under standard test conditions (STC), G_{t-STC} represents the solar radiation value at STC ($G_{t-STC}=1000 W/m^2$), α_t ($-3.7 \times 10^{-3} (1/^\circ C)$) represents the temperature coefficient, and T_{C-STC} represents the cell temperature at STC ($T_{C-STC} = 25^\circ C$), while T_{amb} represents the ambient temperature (in $^\circ C$). The cell temperature $T_C(t)$ is calculated using Equation (2) (Güven and Samy, 2022).

$$T_C(t) = T_{amb}(t) + [0.0256 \times G_t(t)] \quad (2)$$

2.2.2. Modeling Wind Turbine

Wind turbines are renewable energy sources that convert mechanical energy generated by the rotation of blades with wind speed into electrical energy. The location of the wind turbine is crucial for efficiency. In this study, the economic data for the wind turbine to be used is chosen as a cost of \$500 per kW, installation and renewal costs of \$500, an annual maintenance cost of \$10/kW, a turbine height of 17 m, and a turbine life of 20 years. Equation (3) is used to calculate the power output of the wind turbine and is based on information such as wind speed and blade characteristics.. In contrast, Equation (4) incorporates the power law constant and the reference wind speed value at the reference height to determine the wind speed at a fixed altitude.

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & v(t) \leq v_{cut-in} \\ P_r \frac{v(t) - v_{cut-in}}{v_r - v_{cut-in}} & v_{cut-in} < v_r \\ P_r & v_r < v(t) < v_{cut-out} \end{cases} \quad (3)$$

The wind turbine's rated power is denoted by P_r , while $v(t)$ (measured in meters per second) stands for the wind speed at a given time. Furthermore, $v_{cut-out}$ represents the minimum wind speed at which the turbine is turned off for safety reasons, v_r denotes the wind speed at which the turbine operates at its maximum capacity, and v_{cut-in} is the minimum wind speed required for the turbine to start operating (Mokhtara et al., 2021).

$$V_2 = V_1 * \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^\beta \quad (4)$$

The equation (4) defines h (m) as the height of the hub of the wind turbine, h_{ref} (m) as the reference height (h) of the wind turbine, V_1 (m/s) as the wind speed at the hub height of the turbine, V_2 (m/s) as the wind speed at the reference height, and β as the exponent of the power law (Samy et al., 2021).

2.2.3. Modeling Battery

Batteries are electrochemical components that can store electrical energy in chemical form. They enable excess energy generated by renewable energy sources to be stored for later use. The stored energy is in the form of DC voltage that is transferred to the system. As the cost of batteries is high, the number of batteries used in a system has a significant impact. The study involved the testing of five distinct battery technologies, namely VR, LA, NI, LI, and ZBF, to identify the most suitable

option for the hybrid renewable energy system (HRES). Table 2 provides significant information regarding the chosen battery technologies. Simulations were repeated by placing 5 different batteries in the scenario determined in the HOMER program. The HOMER software uses different methods such as Peukert's equation and Coulomb's law for battery modeling. It also takes into account the aging effect of the battery (Güven and Mete, 2021).

Peukert's equation calculates the actual capacity of the battery based on factors such as voltage, capacity, and discharge rate. Coulomb's law calculates the energy losses that occur during the charging and discharging processes of the battery. These two equations provide important information about the battery's performance and aging effect.

The following Equation 5 is used for battery modeling in HOMER software.

$$I(t) = E(t - 1) - E(t) / \left[\left(K * \Delta t * \left(\frac{E(t-1)}{Q_{cap}} \right)^n \right) + 1 \right] \quad (5)$$

Here, $I(t)$ represents the Battery current at time t [A], $E(t-1)$ represents the Battery state of charge at time $t-1$ [Ah], $E(t)$ represents the Battery state of charge at time t [Ah], K represents Peukert's constant, Δt represents the time step [h], Q_{cap} represents the Battery capacity [Ah], and n represents Peukert's exponent.

The Peukert equation is used to calculate the actual energy capacity of a battery, based on factors such as discharge rate and Peukert's constant. Battery capacity can be estimated under different load conditions using the Peukert equation

Table 2. Characteristics of the battery types used in the study.

Parameters	LA	LI	VR	NI	ZBF
Rated voltage(V)	2	51.2	48	1.2	48
Max. charge capacity (Amper hour)	3570	328	417	1000	215
Rated energy capacity (kWh)	715	16.8	20	1.2	10.3
Max. charge current (A)	610	263	105	500	52.1
Max. discharge current (A)	610	328	105	500	104
Round-trip efficiency (%)	86	97	75	85	75
Capital cost (\$)	722	15000	10700	970	8000
Cost of renewal (\$)	665	13800	9300	850	7400
Maintenance and repair cost					
Cost (\$/year)	180	1	1	1	1
Lifespan (year)	15	25	25	20	25

2.2.4. Modeling Diesel Generator

A diesel generator should be selected to meet the load demands and operate at an average level of high load. If a battery bank is installed with a diesel generator for a short period of time, it helps

overcome peak load demands and thus reduces the capacity of a diesel generator. The diesel generator charges the battery through a charging device that converts AA and DA energy. The battery allows fuel consumption to be reduced by allowing the generator to operate close to its rated values. Several generators can work in parallel and meet different load levels. Integration of various renewable sources with diesel generators contributes greatly. A diesel generator adds reliability to a hybrid system. Regular maintenance and repair are always recommended to extend the life of the generator. Diesel generators are used when the battery charge drops below a certain value or when the battery and renewable energy source cannot meet the load demand. Diesel generators can be shut down if there is sufficient power from renewable sources and the battery to meet the load demand (Güven and Yörükeren, 2022).

In this study, a 180kW diesel generator is used and the cost per kW is taken as \$250. The renewable cost is \$250, and the hourly operating and maintenance cost is \$0.030. The operating life of the diesel generator is 15,000 hours. The amount of fuel consumed per hour by the generator is 4.96 liters. Table 3 shows the fuel characteristics and emission values of the diesel generator.

Table 3. Values related to the emission and fuel properties of a diesel generator.

Emission Quantity	Value	Fuel Quantity	Value
CO (g/L Fuel)	16.5	Lower heating value (MJ/kg)	43.2
Unburned HC (g/L Fuel)	0.72	Density (kg/m ³)	820
Particulates (g/L Fuel)	0.1	Carbon content (%)	88
Fuel sulfur to PM (%)	2.2	Sulfur content (%)	0.4
NO _x (g/L Fuel)	15.5	-	-

2.2.4. Inverter Modeling

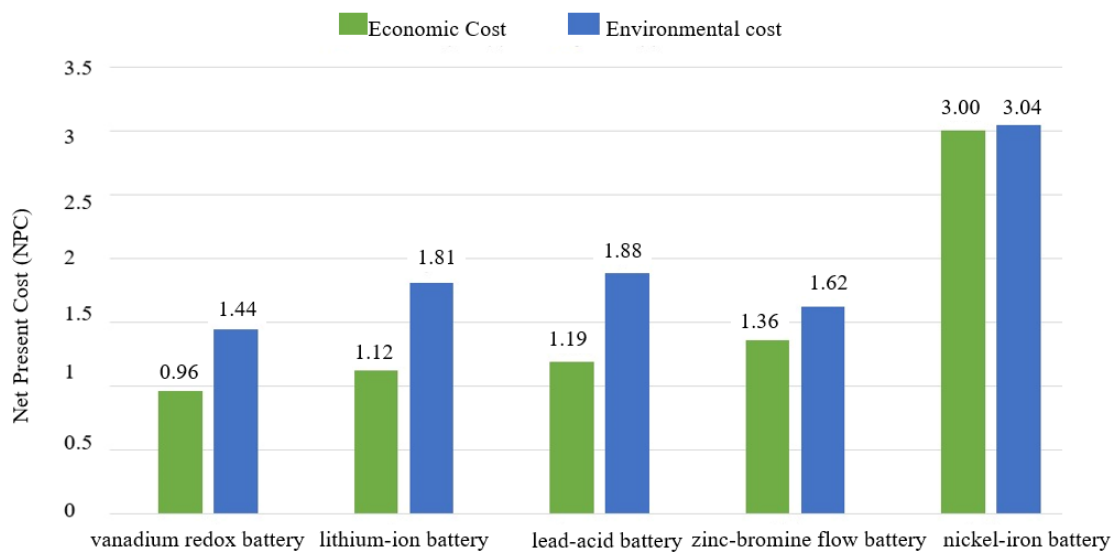
A bidirectional inverter is an essential component in a hybrid system that includes a storage system and a backup diesel generator. It can transfer power in both directions simultaneously. It can function as a rectifier circuit that converts the AA diesel generator voltage to the DA voltage and charges the battery bank. It also acts as an inverter that converts the DA voltage to the AA voltage required by the load, providing a path from the DA battery to the AA load. To meet the demands, an optimal model needs to be developed through simulation and design using HOMER software. The installation and renewal costs of the converter are \$300 with a lifespan of 15 years and an efficiency of 95% (Güven and Poyraz, 2021).

3. Findings and Discussion

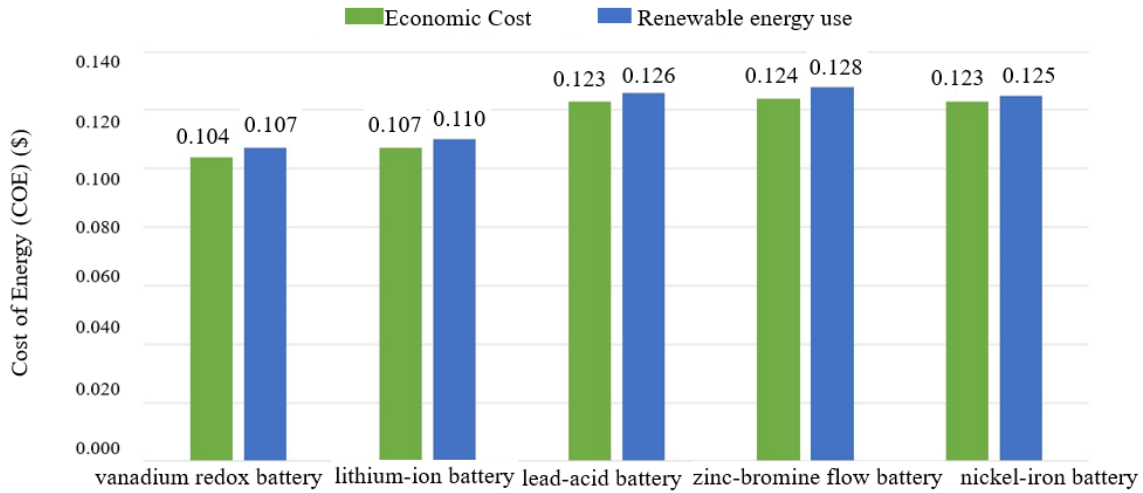
The aim of this research is to determine the most efficient and cost-effective strategy for HRES. The HOMERPro software simulates the off-grid system configuration for a prison in Balikesir. The impact of a long lifespan on the optimal system design has been examined in detail in this article. A hybrid system consisting of wind turbines, generators, solar panels, and battery components has been applied to 5 different battery types: Lithium-ion, Lead-acid, Vanadium redox, Zinc-bromine, and Nickel-iron. Table 4 presents the results of the economic and environmental characteristics of the 5 different battery types used in the off-grid system. Figures 7 (a) and (b) show the cost analysis graphs of the batteries in the off-grid system. A battery cost analysis chart is presented in which the batteries are assessed in terms of their environmental impact, cost, and renewable energy fraction for the hybrid energy system. Here, it is seen that when a vanadium redox battery is used, the Units energy cost of HRES is 0.104 (\$), and the net present cost is 963,648 (\$), which is more optimal than the other 4 different batteries.

Table 3. Results of battery sizing optimization.

Battery	NPC(\$)	COE(\$)	Operating Cost(\$)	Initial Cost(\$)	Renewable Energy Fraction (%)	Solar Panel (kW)	Wind turbine (kW)	Number of batteries	Generator (kW)
Vanadium redox	963648	0.125	15456	70,965	96.6	277	224	33	180
	1.44M	0.182	9945	1.25M	100	420	271	78	-
Lithium-ion	1.12M	0.142	17236	805983	100	254	240	31	180
	1.81M	0.231	12239	1.59M	95.9	754	203	68	-
Lead-acid	1.19M	0.151	41299	434,853	96.4	256	256	118	180
	1.88M	0.239	59871	788369	100	846	501	236	-
Zinc-bromine	1.36M	0.173	14638	1.10M	96.3	255	297	91	180
	1.62M	0.206	15301	1.34M	99.1	787	393	77	180
Nickel-iron	3.00M	0.381	131509	596689	58.7	58.5	1006	10	180
	3.04M	0.386	117158	895729	66.3	508	1074	10	180



(a)

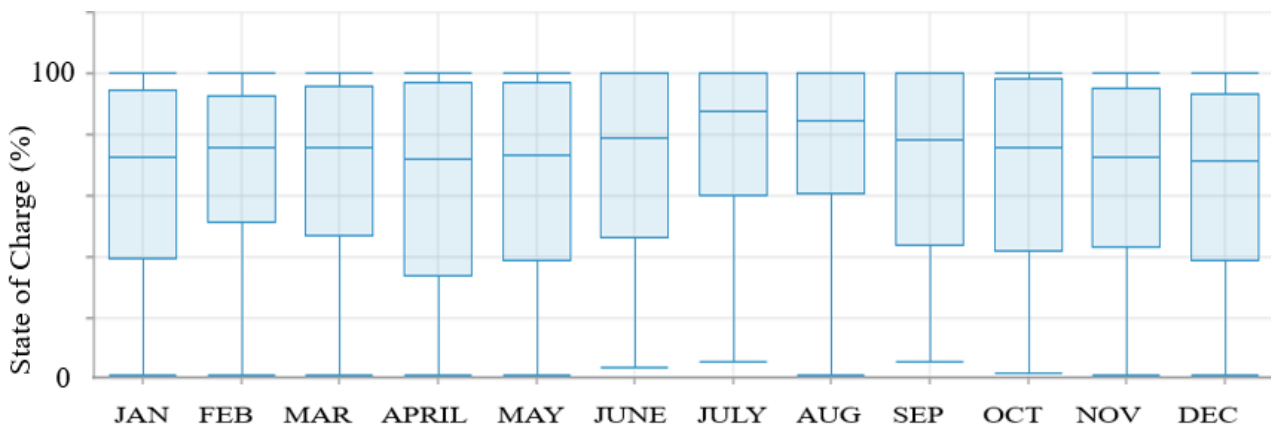


(b)

Figure 7. Cost analysis chart of the batteries (a) NPC (b) COE.

3.1. Effects of Batteries on the Analysis Results

The minimum charge level of the batteries has been set as 20% and a grid-independent system has been designed. Figure 9 shows the charge status by days of the year and by months of the year. As seen in Table 5, the annual energy input to the batteries is expected to be 136,930 kWh, the annual energy output from the batteries is expected to be 102,756 kWh, and the energy loss in the batteries is expected to be 34,241 kWh per year. High-energy storage solutions are required for larger and longer-lasting systems in hybrid energy systems. Vanadium redox batteries, also known as vanadium flow batteries, are essential components of hybrid energy systems due to their advantages such as being fully rechargeable, discharging nearly 100% of the stored energy, and lasting for more than 20 years without degradation.



(a)

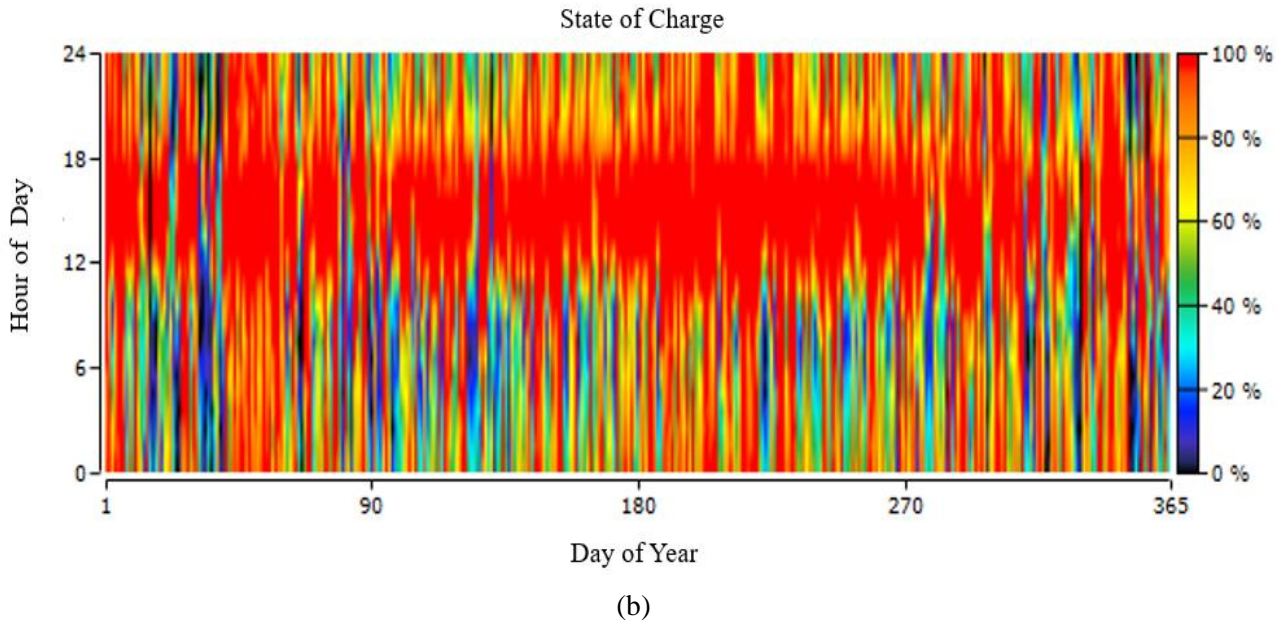


Figure 8. State of charge batteries (a) monthly (b) day of year.

3.2. The Impact of Solar Panels on the System

The power output values of the solar panels used in the system selected in Figure 9 were obtained at different days and times of the year. When the data in Table 4 is examined, it is found that the PV panel capacity in the off-grid system is 277 kW. The system operates for 4,388 hours annually. It is seen that the total electricity production will be 416,928 kWh/year. The Units cost of electricity production from the panels is 0.0266\$/kWh.

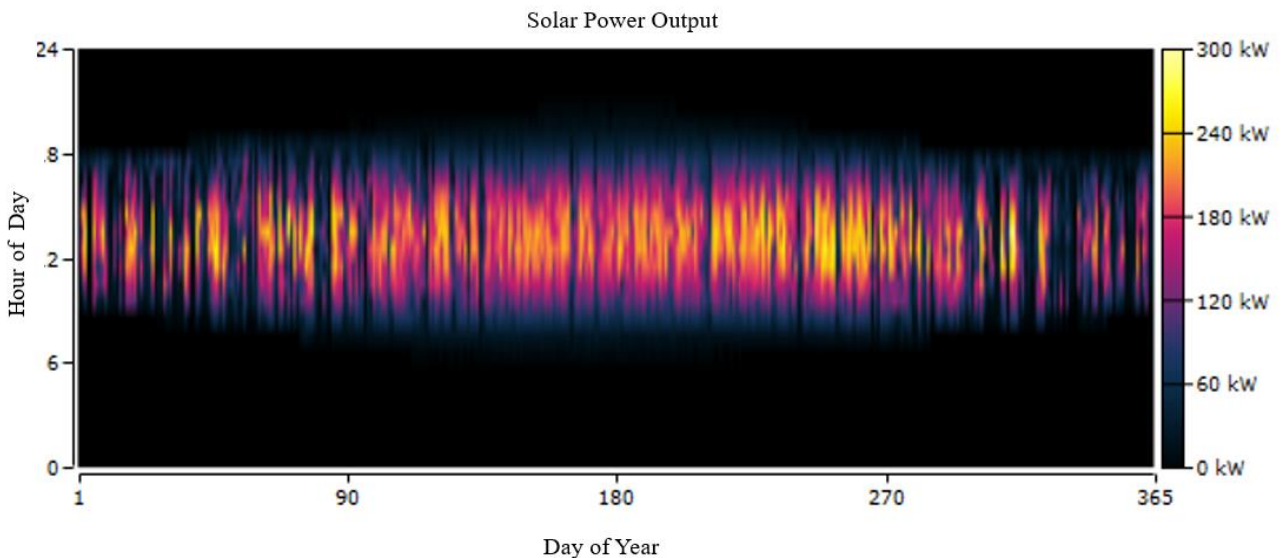


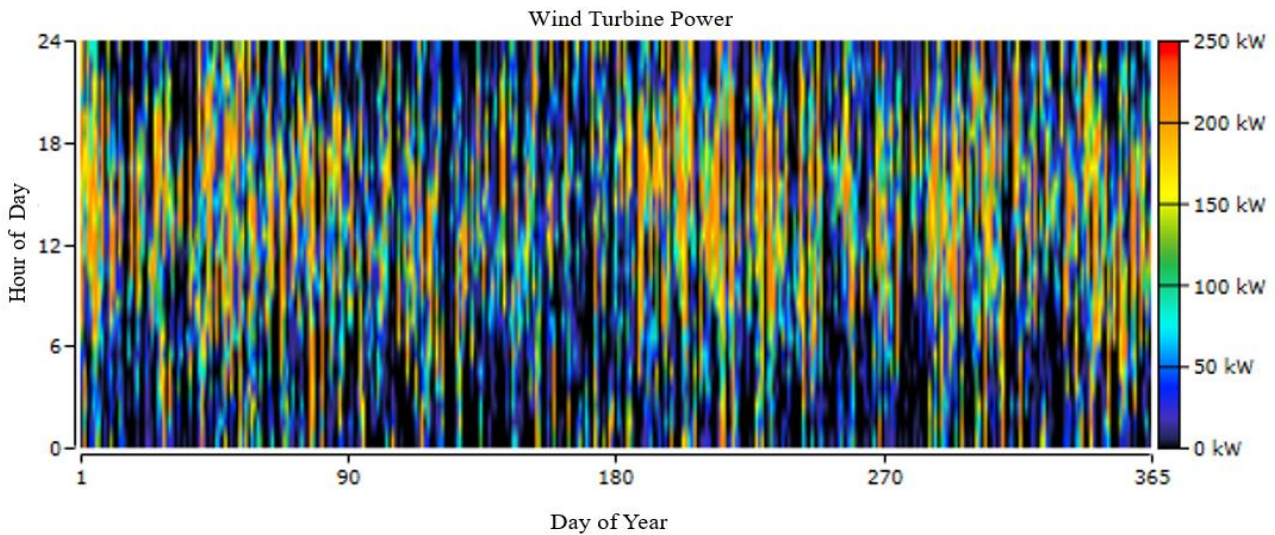
Figure 9. Output power values of solar panels in the system.

Table 4. Technical and economic Quantity of solar panels.

Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Rated capacity	277	kW	Minimum output	0	kW
Mean output	47.6	kW	Maximum output	285	kW
Mean output	1.142	kWh/g	PV penetration	96.9	%
Capacity factor	17.2	%	Hours of operation	4388	hour/year
Total production	416928	kWh/year	Levelized cost	0.0266	\$/kWh

3.3. The Impact of Wind Turbines on the System

The power output graph for the wind turbines used in the system at different days and times of the year is shown in Figure 10. The output power values obtained in the graph vary according to the current wind speed of the region and the production amount required by the system. As seen in Table 5, the wind turbines used in the system operate for 7,523 hours per year and produce a total of 589,133 kWh of electricity annually. The Units cost of electricity produced by the wind turbine is found to be 0.0163\$/kWh.

**Figure 10.** Output power values of wind turbine in the system.**Table 4.** Technical and economic Quantity of wind turbines.

Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Total rated capacity	224	kW	Maximum output	224	kW
Mean output	67.3	kW	Wind Penetration	137	%
Capacity factor	30	%	Hours of operation	7523	hour/year
Total production	589133	kWh/year	Levelized cost	0.0163	\$/kWh
Minimum output	0	kW	-	-	-

3.4. The Impact of Diesel Generator on the System

The chart in Figure 11 displays the power output of the diesel generator used in the system at various times throughout the year. Because of the high cost of fuel and its negative impact on system emissions, the diesel generator contributes very little to the total energy production. According to Table 5, the generator produces a total of 14,674 kWh/year, and the cost of the produced electricity is 0.333\$/kWh. The cost of energy produced by the diesel generator is higher than that of the other system components, resulting in an increase in the Units energy cost. The generator is required to operate in the system when the wind turbines and solar panels cannot produce the required energy, and the battery levels are low. If the generator is not used, the number of batteries needed should be increased. As a result, although it is the last component to meet the system load requirement, the presence of the generator is critical.

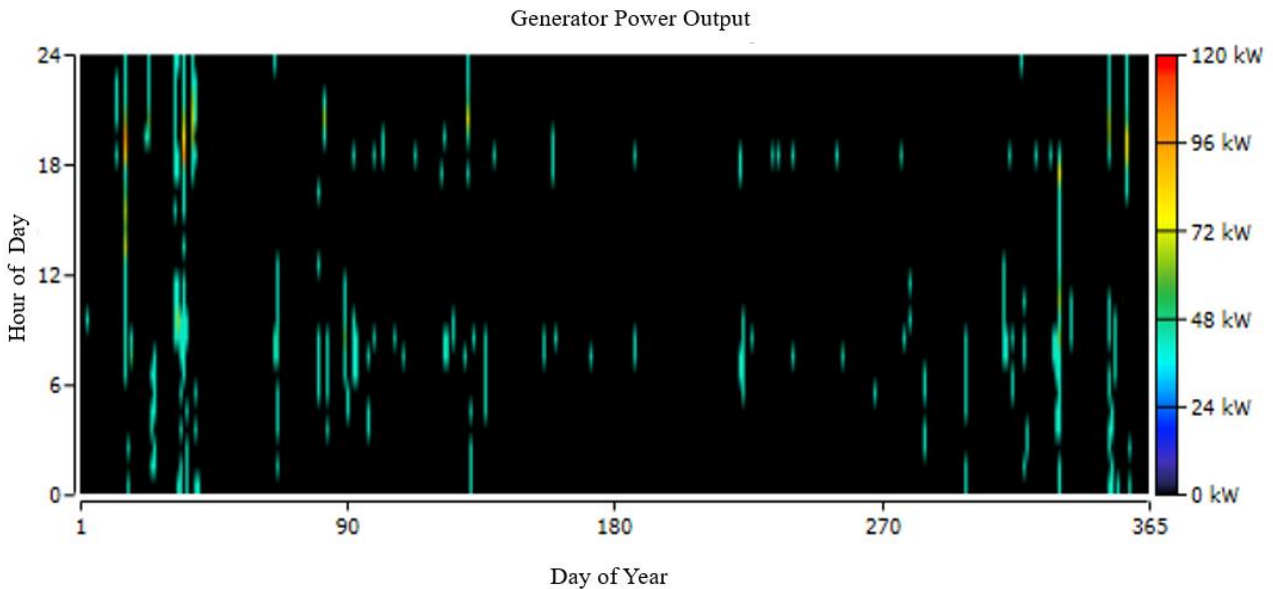


Figure 11. Output power values of generator in the system.

Table 5. Numerical data of the diesel generator.

Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Hours of Operation	310	hours /year	Mean Electrical Output	47.3	kW
Number of Starts	122	starts /year	Minimum Electrical Output	45.0	kW
Operational Life	48.4	year	Maximum Electrical Output	106	kW
Capacity Factor	0.931	%	Fuel Consumption	5001	L
Fixed Generation Cost	15.4	\$/hour	Specific Fuel Consumption	0.341	L/kWh
Marginal Generation Cost	0.333	\$/kWh	Fuel Energy Input	49206	kWh /year
Electrical Production	14674	kWh /year	Mean Electrical Efficiency	29.8	%

For an autonomous system, it can be inferred from Table 6 that carbon dioxide has the highest emission rate of 13090 kg/year. Subsequently, carbon monoxide and nitrogen oxides have the next highest emission rates of 82.5 kg/year and 77.5 kg/year, respectively.

Table 6. Emission values.

Quantity	Value (kg/year)
Carbon Dioxide	13090
Carbon Monoxide	82.5
Unburned Hydrocarbons	3.60
Particulate Matter	0.500
Sulfur Dioxide	32.1
Nitrogen Oxides	77.5

The overall contribution of system components to the total production is highly significant in a hybrid energy system. The results of the analysis are presented in Figure 12, which shows the monthly electricity production data of the system components. It is apparent that the total production is fulfilled by wind turbines, solar panels, and diesel generators, contributing 57.7%, 40.8%, and 1.44%, respectively, with a 96.6% renewable energy fraction. As there are enough renewable energy resources, the diesel generator is believed to be utilized only for meeting the short-term load demand.

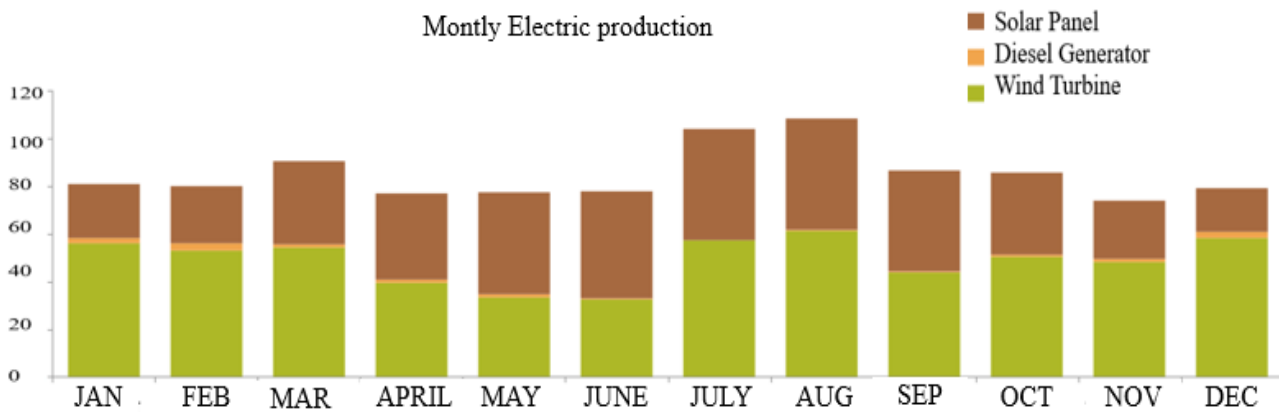


Figure 12. Monthly production graph of hybrid energy system components.

Table 7. Cost optimization results.

Component	Capital(\$)	Replacement Cost (\$)	Maintenance Cost (\$)	Fuel (\$)	Salvage Cost (\$)	Total (\$)
Generator	45,000.00	0.00	30,617.47	128,961.29	11,549.81	193,028.95
Wind Turbine	112,000.00	67,500.2	40,969.61	0.00	44,606.14	172,864.49
Solar Panel	152,381.33	0.00	50,673.73	0.00	0.00	203,055.07
Vanadium Battery	353,100.00	0.00	603.57	0.00	0.00	353,703.57

Converter	38,483.70	26,323.64	0.00	0.00	6,811.94	57,995.40
Total Cost	700,965.03	93,824.66	122,864.38	128,961.29	62,967.89	983,647.47

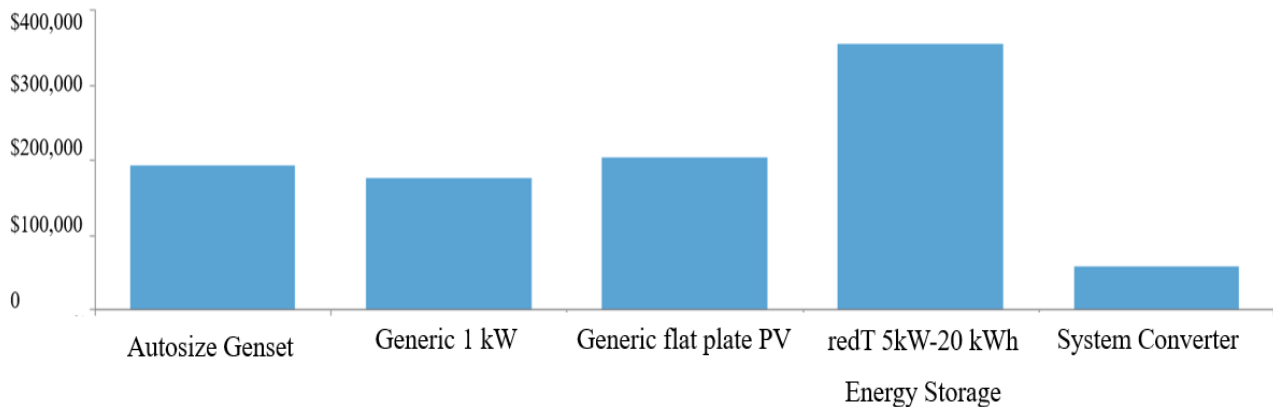


Figure 13. The cost impact profile of the components of the hybrid energy system.

After optimization, a cost analysis graph was generated to show the expenses associated with meeting the load demand in the designated operating area. Table 7 data revealed that the net present cost is \$983,647.50, with an energy Units cost of \$0.125/kWh and an operating cost of \$15,455.57. This information is summarized in Figure 13.

4. Conclusions and Recommendations

In this study, the feasibility of applying a standalone solar/battery system with five different types of batteries to meet the electricity demand of the Burhaniye closed prison located in Balıkesir from a technical and economic perspective was investigated using HOMER Pro software. As seen in this study, detailed analysis is crucial as changes in components also result in economic changes in various system designs depending on the variation of the electricity load. Additionally, the utilization of renewable energy sources needs to be increased to reduce the reliance on fossil fuels to meet the electricity demand. Five different battery simulations were performed in this study, and the most cost-effective solution was obtained when using vanadium redox flow battery. The simulation results showed that the net present cost was \$983,647.50, the Units energy cost was \$0.125/kWh, and the operation cost was \$15,456 when using vanadium redox flow battery. The COE values of the system were obtained as \$0.231/kWh for lithium-ion, \$0.239/kWh for lead-acid, \$0.206/kWh for zinc-bromine, and \$0.381/kWh for nickel-iron batteries.

The use of vanadium redox flow batteries in hybrid energy systems is an important step for the storage of renewable energy sources due to their high energy efficiency, long lifespan, and eco-friendly features compared to other batteries. Therefore, the development and widespread use of

vanadium redox flow batteries will help make renewable energy-based energy systems more effective and sustainable.

This study aimed to lead the way for the hybrid energy systems to be established in areas with the same load profile. Since energy storage is crucial in this field, different storage components other than batteries should also be considered. The methodology employed in this study has the potential to be replicated in other case studies, and the results obtained may be applicable to areas with comparable weather conditions.

Authors' Contributions

Aykut Fatih GÜVEN: Planned the analysis and wrote the article by evaluating the results.

Şaban Türkmen: Collected the data and conducted the analysis.

Ertuğrul Aşıklı: Performed the statistical analysis of the study.

Gamze Örnek: Conducted data collection and graphic design.

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

- Aziz, A. S., Tajuddin, M. F. N., Adzman, M. R., Ramli, M. A. M., and Mekhilef, S. (2019). Energy management and optimization of a PV/diesel/battery hybrid energy system using a combined dispatch strategy. *Sustainability (Switzerland)*, 11(3). doi: 10.3390/su11030683
- Barakat, S., Emam, A., and Samy, M. M. (2022). Investigating grid-connected green power systems' energy storage solutions in the event of frequent blackouts. *Energy Reports*, 8, 5177–5191. doi: 10.1016/j.egy.2022.03.201
- Bindner, H., Cronin, T., Lundsager, P., Manwell, J. F., Abdulwahid, U., and Baring-gould, I. (2005). Lifetime Modelling of Lead Acid Batteries. In *Contract* (Vol. 1515, Issue April). Retrieved from <http://130.226.56.153/rispubl/VEA/veapdf/ris-r-1515.pdf>
- Fodhil, F., Hamidat, A., and Nadjemi, O. (2019). Potential, optimization and sensitivity analysis of photovoltaic-diesel-battery hybrid energy system for rural electrification in Algeria. *Energy*, 169, 613–624. doi: 10.1016/j.energy.2018.12.049
- Güven, A. F. (2017). Bahçelievler Belediye Başkanlık Binasının Enerji İhtiyacının Güneş ve Rüzgar Sistemi ile Karşılınması, Optimizasyonu ve Maliyet Analizi. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(1), 24–36. Retrieved from <http://dergipark.gov.tr/sinopfd/issue/28364/255023>

- Güven, A. F. and Mete, M. K. (2021). Balıkesir'in Erdek İlçesi için Şebeke Bağlantılı Hibrit Enerji Sistemi Fizibilite Çalışması ve Ekonomik Analizi. *Mühendis ve Makina*, 63 (706), 138-158. doi: 10.46399/muhendismakina.1085748
- Güven, A. F., and Hatipoğlu, C. (2022). Şebekeden Bağımsız Güneş/Rüzgâr/Biyogaz/Yakıt Hücresi/Batarya Tabanlı Hibrit Enerji Sisteminin Tekno-Ekonomik Analizi: Muğla Zaferler Köyü Vaka Çalışması. *EMO Bilimsel Dergi*, 12(1), 53-65. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/emobd/issue/69857/1103479>
- Güven, A. F., and Mete, M. (2021). Balıkesir İli Erdek İlçesi İçin Bağımsız Hibrit Enerji Sisteminin Fizibilite Çalışması ve Ekonomik Analizi. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9 (4), 1063-1076. doi: 10.36306/konjes.978002
- Güven, A. F., and Poyraz, E. (2021). Feasibility Study and Techno-Economic Analysis of Stand-Alone Hybrid Energy System for Muğla Province Köyceğiz. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 11(1), 70-85. doi: 10.31466/kfbd.880437
- Güven, A. F., and Samy, M.M. (2022). Performance analysis of autonomous green energy system based on multi and hybrid metaheuristic optimization approaches. *Energy Conversion and Management*, 269(April), 116058. doi: 10.1016/j.enconman.2022.116058
- Güven, A. F., and Yörükeren, N. (2022). Bir Hibrit Enerji Sisteminin Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması- Genetik Algoritma ve Gri Kurt Optimizasyon Algoritma Tekniği ile Enerji Yönetimi ve Optimizasyonu: Yalova Üniversitesi için bir vaka çalışması. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(2), 853-879. doi: 10.31466/kfbd.1169643
- Güven, A. F., Yörükeren, N., and Samy, M. M. (2022). Design optimization of a stand-alone green energy system of university campus based on Jaya-Harmony Search and Ant Colony Optimization algorithms approaches. *Energy*, 253. doi: 10.1016/j.energy.2022.124089
- Jing, W., Lai, C. H., Wong, W. S. H., and Wong, M. L. D. (2018). A comprehensive study of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for standalone PV power system in rural electrification. *Applied Energy*, 224(April), 340-356. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.106
- Li, J., Gee, A. M., Zhang, M., and Yuan, W. (2015). Analysis of battery lifetime extension in a SMES-battery hybrid energy storage system using a novel battery lifetime model. *Energy*, 86, 175-185. doi: 10.1016/j.energy.2015.03.132
- Lujano-Rojas, J. M., Monteiro, C., Duflo-López, R., and Bernal-Agustín, J. L. (2012). Optimum load management strategy for wind/diesel/battery hybrid power systems. *Renewable Energy*, 44, 288-295. doi: 10.1016/j.renene.2012.01.097
- Majidi, M., Nojavan, S., and Zare, K. (2017). Optimal stochastic short-term thermal and electrical operation of fuel cell/photovoltaic/battery/grid hybrid energy system in the presence of demand response program. *Energy Conversion and Management*, 144, 132-142. doi: 10.1016/j.enconman.2017.04.051
- Mokhtara, C., Negrou, B., Settou, N., Settou, B., and Samy, M. M. (2021). Design optimization of off-grid Hybrid Renewable Energy Systems considering the effects of building energy performance and climate change: Case study of Algeria. *Energy*, 219, 119605. doi: 10.1016/j.energy.2020.119605
- Nojavan, S., Majidi, M., and Zare, K. (2017). Performance improvement of a battery/PV/fuel cell/grid hybrid energy system considering load uncertainty modeling using IGDT. *Energy Conversion and Management*, 147, 29-39. doi: 10.1016/j.enconman.2017.05.039
- Rehman, S., and Al-Hadhrani, L. M. (2010). Study of a solar PV-diesel-battery hybrid power system for a remotely located population near Rafha, Saudi Arabia. *Energy*, 35(12), 4986-4995. doi: 10.1016/j.energy.2010.08.025
- Ren, H., Wu, Q., Gao, W., and Zhou, W. (2016). Optimal operation of a grid-connected hybrid PV/fuel cell/battery energy system for residential applications. *Energy*, 113, 702-712. doi: 10.1016/j.energy.2016.07.091
- Rezzouk, H., and Mellit, A. (2015). Feasibility study and sensitivity analysis of a stand-alone photovoltaic-diesel-battery hybrid energy system in the north of Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1134-1150. doi: 10.1016/j.rser.2014.11.103
- Zhang, G., Hu, W., Cao, D., Liu, W., Huang, R., Huang, Q., Chen, Z., and Blaabjerg, F. (2021). Data-driven optimal energy management for a wind-solar-diesel-battery-reverse osmosis hybrid energy system using a deep reinforcement learning approach. *Energy Conversion and Management*, 227, 1-16. [113608]. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113608>

Konut Bölgelerinde Elektrikli Taşıt Şarj İstasyonlarının Elektrik Şebekesine Entegrasyonunun Analizi

Recep Buğra MERT^{1*}, Nurettin UMURKAN²

Öz

Ekonomik ve çevresel etkenler elektrikli taşıt sayısını küresel boyutta önemli bir seviyeye ulaştırmıştır. Bu durum, dağıtım şebekelerinin tasarım ve yönetimi üzerine etkilerinin incelenmesi gerekliliğini zorunlu kılmaktadır. Elektrikli taşıtların dağıtım şebekelerine etkisi üzerine birçok çalışma yapılmasına rağmen, Türkiye dağıtım şebekesine uygulanan çalışmalar çok fazla yapılmamıştır. Çevre dostu olan elektrikli taşıtların gerekli altyapı hazır olmadan yaygınlaşmasıyla birlikte taşıtların şarj işlemlerinde problemlerin ortaya çıkması beklenmektedir. Toplu konut projelerinde kurulu ve talep güçleri arasında ciddi fark bulunmaktadır. Bu farktan dolayı konut bölgeleri içerisinde elektrikli taşıt şarj istasyonu kurulması planlama açısından daha uygun olacaktır. Bu çalışma, konut bölgelerinde elektrikli taşıtların Türkiye alçak gerilim dağıtım şebekelerine entegrasyonu analizi üzerine yoğunlaşmaktadır. Gerçek kullanıcı verileri ile ortaya çıkan durumlara göre elektrikli taşıt şarj istasyonları kullanım karakteristiği entegre edilmiş dağıtım şebekesi modellenip incelenmiştir ve geniş çaplı elektrikli taşıt şarj istasyonu kullanım modeli geliştirilmiştir. Ek olarak, transformatör yüklenmeleri, hat yüklenmeleri ve şebeke kayıplarına dayalı sonuçların elde edilmesi ve sunulması üzerine bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem, dağıtım şirketlerinin gerekli yatırımları ve zamanlarını belirlemede yardımcı olacaktır. Dağıtım şirketlerinin planlama mekanizmasını geliştirip dağıtım şirketlerinin daha gerçekçi ve doğru yatırım planlarını düzenleme kuruluna ibraz edebilecektir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Taşıt, Dağıtım Şebekesi, Şarj İstasyonu, Akıllı Şebekeler.

Analysis of The Electrical Vehicles Charging Stations into Electrical Distribution Network in Residential Areas

Abstract

The number of electrical vehicles has reached a substantial value all over the globe due to economic and environmental factors. The increasing penetration of EVs to the distribution grids urges the requirement to investigate the impacts of EVs on the planning and operation of distribution networks. Despite the fact that there are numerous studies discussing the impacts of EVs on distribution grids, a particular study concerning the Turkish distribution networks does not enough. It is expected that some problems will occur in the charging process of vehicles with eco-friendly electric vehicles becoming widespread without the necessary infrastructure ready. Differences between installed power and demand power in residential projects. This study focus on the impacts of EVs of low voltage distribution networks in residential areas in Turkey. In this study, Integrated distribution network with real user data and the usage characteristics of the revealed situations electric vehicle charging stations was modelled and examined. A large-scale use of an EVs charging stations has been developed. A methodology is developed to obtain and present network results based on transformer overloads, cable overloads and grid losses. This methodology will help the decision maker determine the investments on the distribution networks and associated time frame. That will develop the planning mechanism of distribution companies and they will submit more realistic and accurate investment plans to the regulatory agencies.

Keywords: Electric Vehicle, Distribution System, Charging Station, Smart Grids.

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Tesisleri Ana Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye, rbugramert@gmail.com

²Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, umurkan@yildiz.edu.tr

¹<https://orcid.org/0009-0006-2570-1921>

²<https://orcid.org/0000-0002-4001-4066>

1. Giriş

Günümüzde çevre ve hava kirliliğinin artması geri çevrilemez derecede önemli etkiler oluşturmaya başlamıştır. Bu etkileri azaltmak için fosil yakıt kullanımının azaltılması ve hatta terk edilmesi için çeşitli çevrelerden son derece ciddi uyarılar yapılmaktadır. Hava kirliliğinin artmasıyla sera gazlarının normalden yüksek derecede salınımı sonucu küresel ısınma ve iklim değişikliği problemleri oluşmaktadır.

Dünyadaki elektrik enerjisi talebinin %83'ü son istatistiklerde fosil yakıtlardan karşılandığı görülmektedir (BP Statiscal,2022). Tarihte ilk defa sanayi devrimiyle birlikte fosil yakıtların kullanımı artma başlamıştır. Fosil yakıtların kullanımının artması veya azalmasını havada bulunan CO2 değerinin ölçülmesi ile belirlenmektedir. 2013 yılında 400 ppm olarak ölçülen karbon emisyonu oranı sanayi devriminden öncesinde ölçülen zaman diliminde 280 ppm olarak ölçülmüştür. Bu ölçümler göz önüne alındığında yaklaşık 263 yıllık bir dönemde %43 civarlarında bir karbon emisyonu artışı gözlemlenmiştir (Kibert, 2016).

Avrupa Birliği Komisyonu Yeşil Mutabakat protokolü karbon emisyonu ve karbon emisyonunun neden olacağı sonuçları minimum düzeye indirmek amacıyla 2019 yılında hazırlanmıştır. Bu protokolda etkilerin azaltılmasını sağlayacak regülasyonlar ve yönetmelikler onaya sunulmuştur. Hedef olarak 2030 yılına kadar karbon emisyonu değerinin %55 oranında indirilmesi belirlenmiştir (European Green Deal,2019). Bu protokol içeriğinde bulunan regülasyon ve yönetmeliklerde bulunan karbon salınımı sınırlamaları nedeniyle birçok sektör önemli oranda etkilenecektir.

Elektrikli taşıtlar, fosil yakıtlı taşıtların yerini almasıyla ulaşım sektörü karbon salınımı sınırlaması nedeniyle etkilenecek sektörler listesinin başında yer almaktadır. Elektrikli taşıtların bu nedenle sayısının artması ile ulaşım sektörünün yanında güç sistemi altyapısının geliştirilmesi gerektiğinden dolayı enerji sektörünü de etkileyecektir. Rapor incelendiğinde fosil yakıtlı araçların neden olduğu karbon emisyonu değerinin 2035 yılına kadar sıfıra ulaştırılması planlanmaktadır (European Comission, 2019). Bu hedef kapsamında başarı sağlamak adına hem dünyada hem de ülkemizde elektrikli taşıt modellerinin piyasaya sürülmesi ve doğacak olan enerji talebinin karşılanması adına altyapı yatırımlarının yapılması gerekmektedir. Elektrikli taşıtlara geçişin sürdürülebilir bir modelde yapılması için şarj istasyonlarının kurulumları, yerleşim analizleri, güç sistemlerine olan etkileri ve optimize edilmiş şarj modelleri detaylı olarak incelenmelidir.

Avrupa'daki elektrikli taşıt sayılarına göz atarsak, elektrikli taşıt satış oranları yaklaşık %70 artarak 2021 yılında 2.3 milyon seviyelerine ulaşmış bulunmaktadır. Elektrikli taşıtların yarısı şarj edilebilen hibrit araç modellerinden oluşmaktadır. 2019 yılındaki elektrikli taşıt satış oranı 2021 yılına göre %25 daha fazla gerçekleşmiştir. 2020 yılındaki elektrikli taşıt satış sayısı, 2021 yılındaki

sayılara göre iki kattan daha fazla sayıdadır. 2019 ve 2020 yıllarındaki elektrikli taşıt satış sayısının fazla olması yeni karbon emisyon standartlarından kaynaklanmaktadır (International Energy Agency, 2022). Ülkemizdeki elektrikli taşıt sayısı artış göstermekte olup sağlanan teşvik ve yatırımlar ile elektrikli taşıt pazar payı gün geçtikçe artmaktadır. Türkiye’de 2021 yılında satılan elektrikli taşıt sayısı 2020 yılında satılan elektrikli taşıt sayısından %237 fazla olup 2022 yılına kadar toplamda 5004 elektrikli taşıt satılmıştır (Enerji Atlası, 2022). Talep artışı belirgin olmasa da yerel elektrikli taşıt üretim kapasitesi zaten var olan sanayi temelini etkileyecektir (Arnold ve Provan, 2019).

Ülkemizde Türkiye’nin Otomobili Gelişim Grubu’nun üretimini sağladığı elektrikli taşıtların 2023 yılı içerisinde satışına başlanacağı ve artan nüfus göz önünde alındığında elektrikli taşıtların sayısının gün geçtikçe artacağı aşikardır. Elektrikli taşıtların bataryalarını şarj amacıyla sayısının artması gereken şarj istasyonlarının neden olacağı enerji talebi nedeniyle elektrik dağıtım şirketlerinin altyapıları etkilenecektir. Günümüzde toplu yaşam alanlarının yoğunlaşması, diğer yandan kentleşmenin ve nüfusun artmasıyla birlikte büyük kapasiteli otoparklar yaygınlaşacaktır. Bahsedilen alanlardaki elektrikli taşıtların girişimi, elektrik şebekesinden talep edilen birim alan başına düşen enerji miktarını yükselterek dağıtım sisteminin olumsuz etkilenmesine sebebiyet verecektir.

2. Literatür Taraması

Konut bölgelerinde elektrikli taşıt şarj istasyonlarının elektrik dağıtım şebekesine etkisinin analizi ile ilgili literatür incelendiğinde, elektrikli taşıtların fosil yakıt kullanması ve çevresel etkilerinden dolayı gelişimi hız kazanmıştır. Ancak elektrikli taşıt şarjı esnek bir kaynak olarak belirsizliklerle doludur ve geniş ölçekli bir dağıtım üretim sistemi gibi şebekeye entegre edilebilir. Bu durum, dağıtım sisteminin güvenilir çalışmasını zorlaştırdığından, doğrusal olmayan kısımların doğrusallaştırılması gerektiği iki dereceden koni esnekliği tekniği kullanılarak güvenilirlik seviyesinin artırılması benimsenmiştir (Xue vd., 2022). Farklı bir çalışmada elektrikli taşıtların şarj edilmesinde elektrik dağıtım şebekesi güvenilirliği, gerilim düşümü, güç kaybı gibi etkilerinin oluşturduğu ek maliyetler temel alınarak elektrikli taşıtların şarj edilirken optimal konumda olması gerektiği önerilmiş ve evrimsel hesaplama metodu benimsenerek optimizasyonu sağlanmaya çalışılmıştır (Ahmaad vd., 2022). Elektrikli taşıtların günlük yük eğrisi üzerinde mevsimsel etkilerini hesaba katan bir çalışmada, düşünülenin aksine, elektrikli taşıtların şebekeye entegrasyonunda yaz aylarında kış aylarına göre daha fazla zorluk çıkardığı ve şarj anında daha fazla zorluk yarattığı sunulmuştur (Nafi vd., 2022). Elektrikli taşıtların sayısının fazla olduğu lokasyonlarda aynı zamanda fazla sayıda elektrikli taşıtların şarj edilmesi ile şarj istasyonlarının ve dağıtım transformatörlerinin yüklenme oranlarının hızlı bir biçimde artması yanmaya veya açma neden olup, gerilim düşümlerinin artması ve harmoniklerin ortaya çıkmasına neden olması kaçınılmazdır (Ucer vd., 2018). Elektrikli

taşıtlar şarjlarıyla birlikte oluşacak yük talebinde elektrik güç sisteminin dengesi etkilenecektir. Bu nedenle, elektrik şebeke hattının bütünsel olarak çalıştığı göz ardı edilmemelidir (Das vd., 2020).

Elektrik şebeke sisteminin esnek çalışabilir hale gelmesi ve yük aktarımlarının yapılması, şarj istasyonlarının elektrik şebeke sistemine etkisini azaltmak için önerilmiştir (Liu vd., 2021). Elektrikli taşıtların sayılarının artması ve rekabet edebilmeleri için dağıtım şebekesine entegrasyonundaki sorunları çözmeleri gerekmektedir (Araujo vd., 2021).

Dağıtım sistem operatörü, koordinasyonsuz elektrikli taşıt şarjının potansiyel etkilerinden korunmak ve sistem varlıklarını korumak için analizler yapmalıdır. Özellikle, sistemin talep karşılama kapasitesi ve gerilim düşümü gibi hesaplamalar, elektrikli sistem varlıklarının belirlenen kriterleri aşmadan çalışabilmesi için önemlidir. Sorunsuz bir sistem işletimi, analizlerin ve soruna yönelik stratejilerin geliştirilmesiyle sağlanabilir. Ayrıca, literatürdeki bazı çalışmalar, şarj istasyonları üzerinden yapılan optimizasyon çalışmalarının, dağıtım sisteminin daha güvenli, istikrarlı ve ekonomik çalışmasında önemli bir rol oynadığını göstermektedir (Wang vd., 2019).

Bu alanda yapılan birçok çalışmaya baktığımızda elektrikli taşıtların şarj ve deşarj durumlarını düzenleyen hem planlama hem de işletme perspektiflerin incelendiğini görülmektedir. Yapılan bir çalışmada esnek yük olarak belirtilen elektrikli taşıtların elektrik güç sistemi yönetiminde elektrikli taşıt şarj istasyonu üzerinden enerjinin ayarlanarak elektrikli taşıtın şarj olabilmesi önerilmiştir (Diaz vd., 2018). Bir çalışmada elektrikli taşıt şarj istasyonlarının elektrik dağıtım sisteminde yer alan dağıtım transformatörlerinin ömrüne olan etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, dağıtım transformatörünün ömrü ve elektrikli taşıt şarj istasyonundan çekilen akımın toplam harmonik distorsiyonu ikinci dereceden bir hesaplama ile formülize edilmiştir. Toplam harmonik distorsiyon değerinin azaltılması için farklı bir analiz çalışmasında, LCL filtresi kullanılması analiz edilmiştir ve %30 oranında harmonik seviyesinde azalma gözlemlenmiştir (Güven ve Akbaşak, 2021). Başka bir çalışmada, geleneksel dağıtım transformatörleri yerine yalıtımı yüksek seviyede olan dağıtım transformatörlerinin kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Elektrikli taşıtlar şarj esnasında dağıtım transformatörlerinin doluluk oranını arttırmaktadır. Dağıtım transformatörünün aşırı yüklenmesi sonucu termal sıcaklıkların artmasının ömrünü kötü yönde etkilemesi bu seçim için neden olarak gösterilmiştir (Qian vd.,2021).

• Yapılan bu çalışmada ise dağıtım sistem operatöründen alınan gerçek veriler ile toplu konut bölgesinde kurulması planlanan şarj istasyonlarının güç sistemine etkileri irdelenmiştir.

• İnceleme yapılan toplu konut bölgesinde şarj istasyonu altyapısı kurulabilecek belli noktaların şebeke varlıkları üzerinde neden olabileceği değişimler tablo ve grafiklerle detaylandırılmıştır.

• Elektrikli taşıt şarj istasyonu üreticisinden alınan teknik veri tablosuna göre veriler işlenerek belirlenen durumlar ışığında analizler gerçekleştirilmiş, geleceğe yönelik tavsiyeler sistem operatörü perspektifinden sunulmuştur (Vestel Proje Ortağım, 2023).

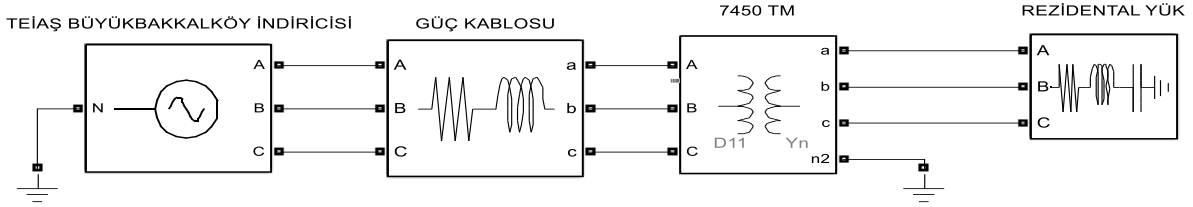
• Ortaya çıkan durumlar ve Türkiye'nin 2025 ve 2030 yılları elektrikli taşıt sayısı tahminleri dikkate alınarak ekonomik analizler yapılmıştır.

Çalışmada kullanılan elektrik dağıtım sisteminin simülasyonu Matlab&Simulink ortamında gerçekleştirilen test ve analizlerin sonuçları ise 3. Bölümde anlatılmıştır. Elde edilen kapsamlı sonuçlar 4. Bölümde detaylı bir şekilde irdelenmiş ve sunulmuştur.

3. Materyal ve Yöntem

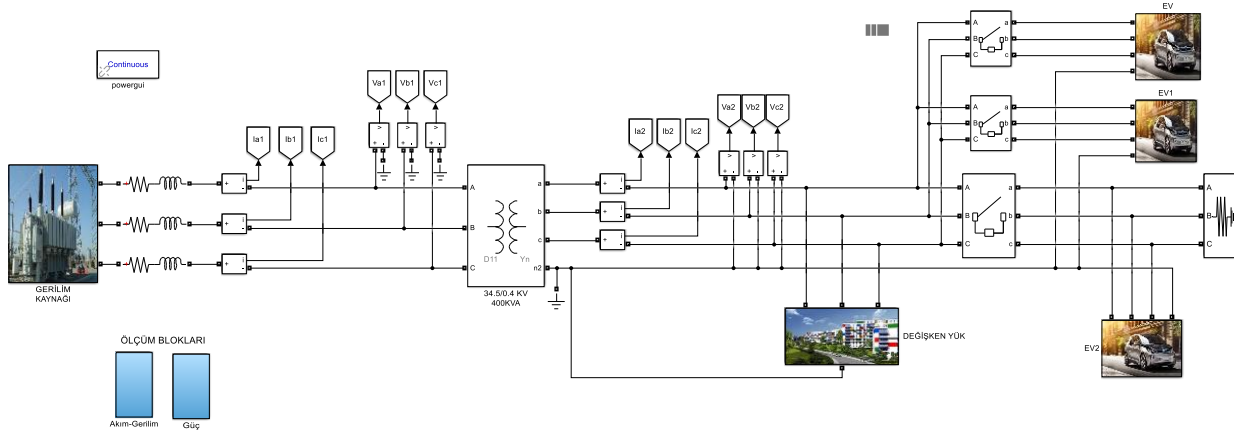
Bu çalışmada incelenen elektrik dağıtım sistemi, toplu konut projelerinin yoğunlukta olduğu çoğunlukla dengeli yüklerin olduğu ring şebeke yapısına sahiptir. Ring şebeke yapısının elektrik dağıtım sistemine sağladığı kolaylıklar arasında arızaların giderilme süresi ve arızadan etkilenen abone sayısının azalması yer almaktadır. Arıza noktasının belirlenmesi sonrasında, arızalı şebeke envanteri ayrılır ve abonelerin başka bir noktadan beslenmesi, manevra talimatlarına uygun olarak gerçekleştirilmektedir. Enerji Piyasaları Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından belirlenen yönetmeliklere ve uygulama esaslarına göre, dağıtım sistem operatörlerinin tedarik sürekliliği performans göstergeleri bulunmaktadır. Bu performans göstergelerinden biri, ortalama kesinti süresi (SAIDI), diğeri ise ortalama kesinti sıklığı (SAIFI) olarak tanımlanmaktadır (EPDK Kalite Faktörü, 2021).

Bu çalışmada simülasyonu oluşturulan elektrik dağıtım sisteminin ilgili bölgesine ait 34.5 kV gerilim seviyesine ait tek hat modeli Şekil 1'deki gibidir. Elektrik dağıtım şebekesindeki enerji tabirleri temiz enerji ve kirli enerjidir. Temiz enerji TEİAŞ indiricisinden çıkan fiderdir. Buna primer fider de denir. Kirli enerji ise TEİAŞ indiricisinden dağıtım merkezine geldikten sonra bu dağıtım merkezi etrafında yapılan ringler arasındaki fiderlerdir. Enerji, dağıtım merkezinden ring hat üzerindeki trafo merkezlerine elektrik enerjisini iletmek için kullandığı her ring fiderinden sonra kirlenir. Burada kirlenme terimi, enerjinin geçtiği transformatör merkezleri üzerindeki yüklerin enerjinin kalitesini düşürdüğü için kalitesi düşmüş enerji tanımındadır. Temiz enerji de gerilim düşümü ve nispeten harmonik seviyeleri oldukça düşüktür. Alınacak ölçümlerin daha doğru olması amacıyla TEİAŞ indiricisinden gelen fiderin uğradığı ilk dağıtım merkezi olan toplu konut bölgesi seçilmiştir.



Şekil 1. Seçilen Çalışma Bölgesinin Simulink Programında Elektrik Dağıtım Şebekesi Basit Simülasyonu (Basic Simulation of the Electrical Distribution Network in the Simulink Software)

Simulink programı üzerinden oluşturulan detaylı simülasyon devresi Şekil 2'deki gibidir. Burada güç transformatörü, kullanılan güç kablosu, dağıtım transformatörü, değişken yük (konut bölgesinin çektiği güç), 3 adet elektrikli taşıt şarj istasyonu ve ölçüm blokları oluşturulmuştur.



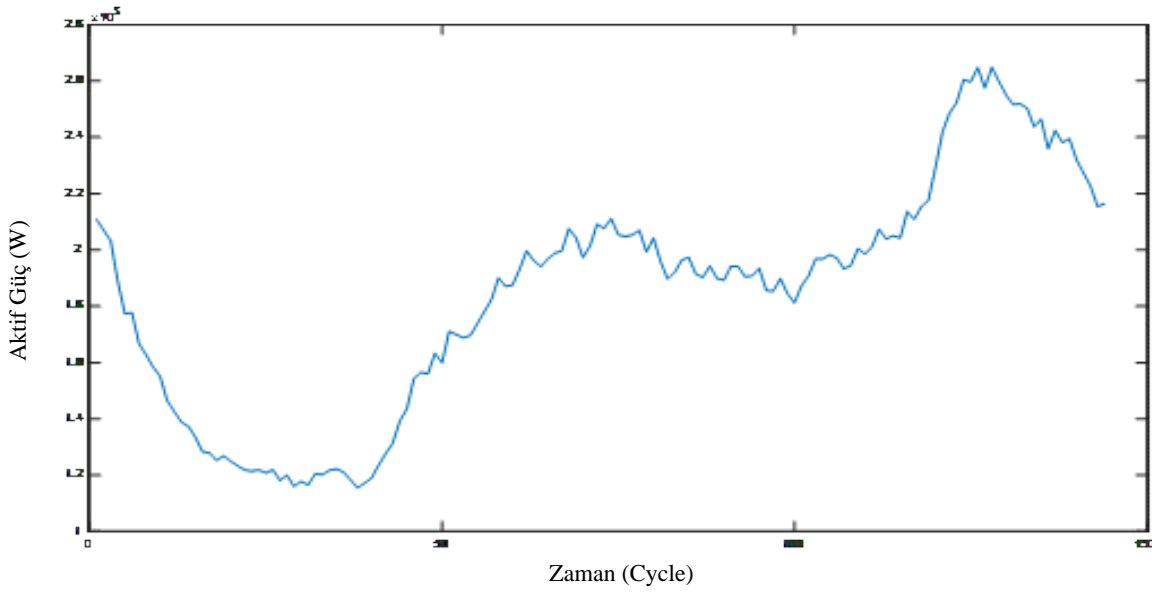
Şekil 2. Seçilen Çalışma Bölgesinin Simulink Programında Elektrik Dağıtım Şebekesi Detaylı Simülasyonu (Detailed Simulation of the Electrical Distribution Network in the Simulink Software)

Oluşturulan simülasyondan bahsetmek gerekirse burada TEİAŞ Büyükbakkalköy indiricisinden gelen Tepe (H11) fideri 7450 ve o ringde bulunan diğer trafoları beslemektedir. 7450 Dağıtım Merkezi (DM) fiderin ilk uğradığı merkezdir. Buradan diğer transformatör merkezlerine gitmektedir. Dağıtım transformatörünün gücü 1600 kVA olup alınan ölçümler sonucu trafonun sadece %5 doluluk oranı olduğu saptanmıştır. Bunun üzerine sistemin davranışını daha iyi incelemek, elektrikli taşıt eklendiğinde sistemde oluşan farkların daha doğru incelenmesi ve gerçeğe yakın elektrikli taşıt sayısını sağlamak amacıyla simülasyonda 400 kVA alınmıştır. Transformatör Dyn11 bağlantı gruplu hermetik tipte dağıtım trafosudur. Yükte kaybı 14310 W, boştaki kaybı 2033 W, %uk değeri 2.76 olup 6 kademeli (mevcut durumda 4. kademede bulunmaktadır), ONAN soğutma sınıfı, primer akımı 27.9 A ve sekonder akımı 2309.4 A özellikleri bulunmaktadır. (İlk kademe 28500V ve son kademe 36000V) Yüksek gerilimde genelde 3x240 Cu veya 3x400 Al kablo kullanılır. Kullanılan 7450 DM'ye gelen kablolar 3x400 Al kablo olduğu için 3x400 Al kablonun km başına empedans değerleri alınmıştır. Evsel yük değerleri ise trafonun AG tarafında bağlanan güç kalite cihazı (GKC)

ve dağıtım merkezine gidilerek alınan akım, gerilim vb. ölçüm sonuçları ile oluşturulan bir yük modellemesidir.

İncelemesi yapılan bölgenin; elektriksel değerleri, İstanbul Anadolu Yakası bölgesinin elektrik dağıtımından sorumlu olan ilgili dağıtım şirketine ait SCADA merkezi ve güç kalite cihazı aracılığıyla ölçülmüştür (G. Erten, kişisel iletişim 05 Ocak 2023). SCADA merkezinden ve güç kalite cihazından alınan veriler 10'ar dakikalık periyotlarda alınan ölçüm sonuçlarını içerisinde barındırmaktadır.

Seçilen bölgedeki dağıtım merkezinden beslenen sitenin güç kalite cihazından ve dağıtım merkezinden alınan yük kayıtlarına göre profili Şekil 3'teki gibidir.



Şekil 3. Seçilen Çalışma Bölgesinin Simulink Programında Yük Profiline Simülasyonu (Simulation of Load Profile in The Simulink Software)

Burada 7450DM'nin dağıtım trafosunun AG tarafındaki çıkışından alınan bir günde aktarılan toplam gücü göstermektedir. Maksimum talebin olduğu saatler 20.00-21.00 arası ve minimum talebin olduğu aralık ise 03.00-04.00 olduğu görülmektedir. Sabah 7.00'dan sonra enerji talebinin arttığı ve akşam saatlerinde maksimum olduğu görülmektedir. Maksimum noktadan alınan ölçümde yaklaşık olarak 260 kW enerji çekildiği ve minimumda ise yaklaşık 120 kW olduğu sonucu çıkmaktadır.

Bu bilimsel çalışmada, toplu konut bölgelerinin içerisinde yer alan elektrikli taşıt şarj istasyonlarının etkilerinin analizi yapılmıştır. Kullanılmış verilerin ve gerçekleşen analizlerin tümü gerçek veriler ışığında yapılmıştır. Kullanılan elektrikli taşıt şarj istasyonunun teknik karakteristiği Tablo 1'de verilmiştir (Vestel Proje Ortağım, 2023).

Tablo 1. Elektrikli Taşıt Şarj İstasyonu Elektriksel Karakteristiği (Electrical Characteristics of the Electrical Vehicle Charging Station)

MODEL	EVCO2-11
Güç	11 kW
Gerilim	400V AC, 3 Faz
Akım	1x16A
Soket Tipi	TIP2EU
Boyut	647X180X184
Ağırlık	11.2 Kg
İK Sınıfı	İK10

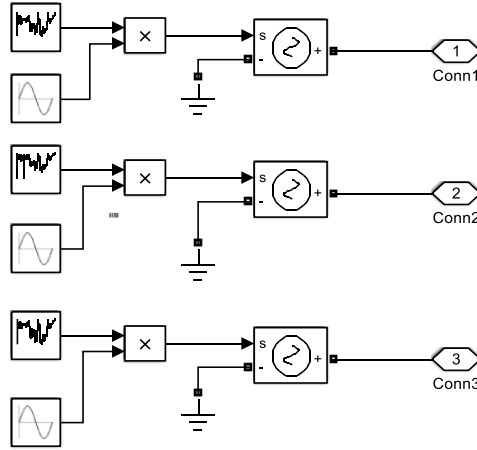
Bu çalışmada simülasyon devresinde oluşturulan elektrikli taşıt şarj istasyon blokları kullanılarak belirlenen şarj edilme durumlarının analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu durumlar, Türkiye’de kullanılan elektrik tariflerine göre oluşturulmuştur. Türkiye elektrik sisteminde mesken tüketici grubunda toplamda 2 adet abonelik türü bulunmaktadır. Abonelik türü olarak karışımımıza tek zamanlı ve çift zamanlı tür olarak belirtilmektedir. Çift zamanlı içinde 3 adet tarife bulunmaktadır.

Bu tarifeler gündüz, puant ve gece tarifesidir (EPDK Elektrik Faturalarına Esas Tarife Tabloları,1 Ocak 2023). Elektrikli taşıtların tarifelere göre homojen yüklenme dağılımları, gündüz ve puant tarifelerinde yüklenme dağılımları, düzenli olarak işe giden insanların kullanım alışkanlıklarına göre dağılımlar ve sadece gündüz tarifesinde yüklenme dağılımı olarak 4 ana grupta sınıflandırılmıştır. Bu durumlar Tablo 2’deki gibidir.

Tablo 2. Elektrikli Taşıt Şarj İstasyonu Şarj Durumları (Situations of the EV Charging Stations)

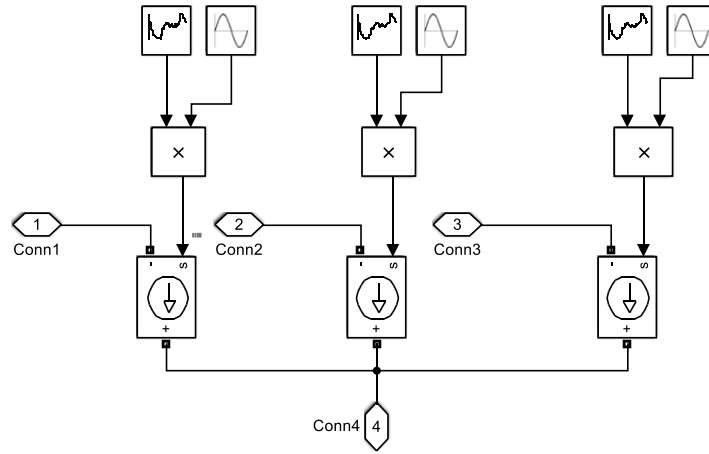
DURUM SIRASI	ŞARJ OLAN TAŞIT SAYISI	ŞARJ YÜZDELERİ	ŞARJ SAATİ
1	5	16.67%	02:00-06:00
1	5	33.33%	05:00-08:00
1	5	0%	19:00-00:00
2	7	0%	08:00-13:00
2	5	0%	12:00-17:00
2	3	33.33%	11:00-14:00
3	10	0%	00:00-05:00
3	7	0%	12:00-17:00
3	6	16.67%	19:00-23:00
4	5	50%	06:00-08:00
4	7	0%	13:00-18:00
4	4	16.67%	20:00-00:00

Gerilim kaynağı olarak TEİAŞ trafosu modellenmiştir. Anadolu Yakasındaki TEİAŞ’taki indirici merkezlerin giriş gerilimleri 154 kV veya 380 kV olarak değişmektedir, çıkış gerilimleri ise 10 kV veya 34.5 kV gerilim seviyeleri olarak değişmektedir. Bu çalışmada kullanılan TEİAŞ’ta bulunan güç transformatörü 154/34.5 kV gerilim seviyesinde indirici özellikte güç trafosudur. Şekil 2’de gösterilen sistemdeki gerilimi modellemek için kullanılan gerilim kaynağının alt bloğu Şekil 4’te gösterilmiştir.



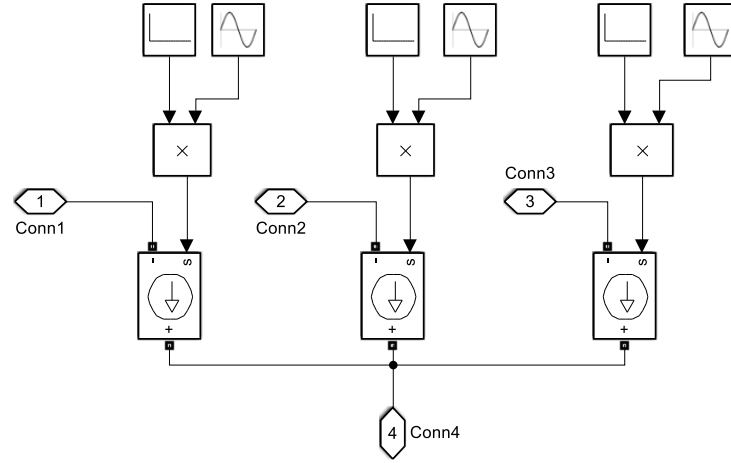
Şekil 4. Gerilim Alt Bloğu Simulink Programındaki Simülasyonu (Simulation of the Voltage Subblock in the Simulink Software)

Evsel bölgelerde enerji kullanımı saatlik hatta dakikalık olarak değişmektedir. Şekil 1’de görülen sistemde bulunan değişken yük 10 dakikalık periyotlar halinde 7450 DM’den GKC sayesinde ölçülmüştür. Bu ölçümler sonucunda alınan veriler aşağıdaki Şekil 5’te görüldüğü üzere alt bloğunun içerisine işlenerek değişken yük oluşturulmuştur.



Şekil 5. Değişken Yük Alt Bloğu Simulink Programındaki Simülasyonu (Simulation of the Variable Load Subblock in The Simulink Software)

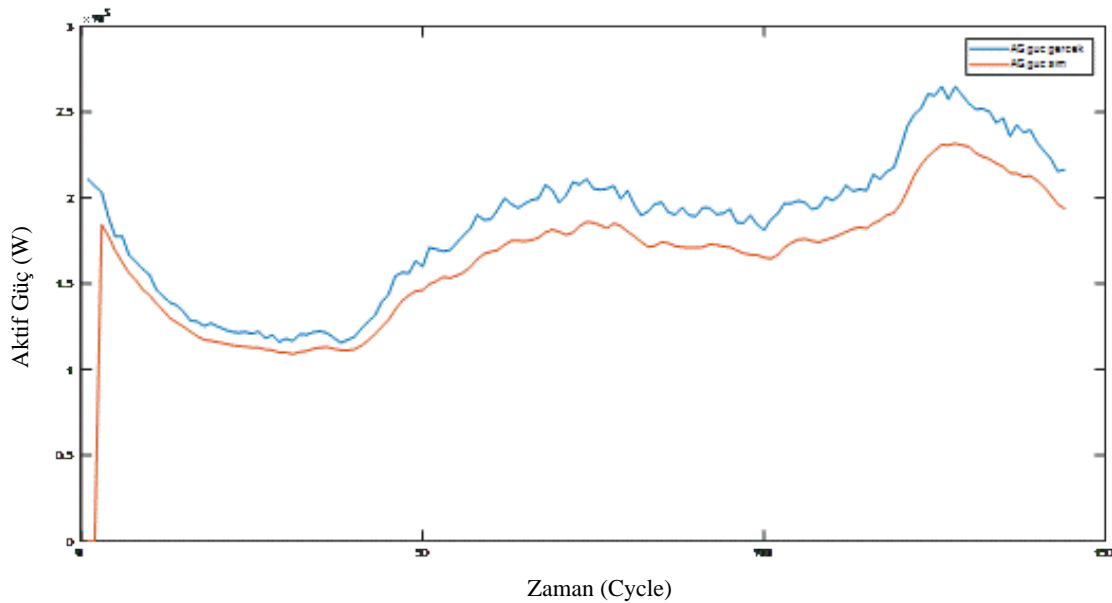
Elektrikli taşıtları şarj ederken elektrikli taşıt şarj istasyonlarından çekilen akımlar hesaplanıp Şekil 6’da elektrikli taşıt alt bloğunun içerisine işlenerek elektrikli taşıt bloğu oluşturulmuştur.



Şekil 6. Elektrikli Taşıt Alt Bloğu Simulink Programındaki Simülasyonu (Simulation of the Electrical Vehicle Subblock in The Simulink Software)

4. Deneysel Sonuçlar

Simülasyon sonucunda elde edilen aktif güç değerleri ile gerçekte ölçülen aktif güç değerleri arasında %9 oranında bir hata payı mevcuttur. Bu hata payının oluşmasının nedenleri simülasyonda kullanılan elemanların ideal olması, reaktif güçlerin simülasyonda hesaba katılmamasından ve kullanılan kabloların gerçekte birçok yerden ek yapılması, kablonun yaşı vb. nedenlerden dolayı fark oluşmuştur. Elektrikli taşıt şarj istasyonlarının dahil edilmediği zaman sistemdeki değişken yükün çektiği ve gerçekte 7450 DM'nin transformatöründen çekilen aktif gücün grafiği aşağıda Şekil 7'te görülmektedir. Bu grafikte herhangi bir elektrikli taşıt bağlantısı söz konusu değildir. Sadece simülasyon verisi ile sistemden çekilen gerçek verilerin kıyaslanması ele alınmaktadır.

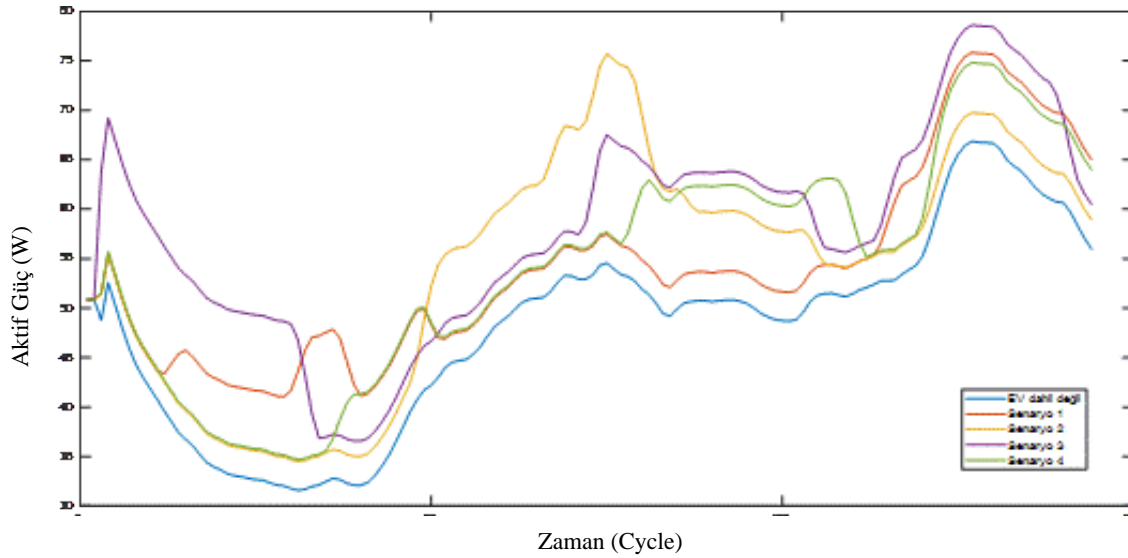


Şekil 7. Elektrikli Taşıt Dahil Edilmeden Önce ve Sonra AG Barası Aktif Güç Analizi (Active Power Analysis of the LV Bus Before And After EVs Connection)

Elektrik dağıtım sisteminde kullanılan transformatörlerde maksimum doluluk oranı %70 olarak belirlenmektedir. %70'in üzerine çıktığı zaman transformatörün gücünü arttırılmaktadır. Eğer transformatör gücü 1600 kVA ise sisteme yeni bir transformatör bağlantısı yapılmaktadır. Yapılan analiz sonucunda konut bölgesi genelinde elektrikli taşıt kullanılmadığında transformatörün ortalama doluluk oranının %48 olduğu gözlemlenmiştir. Kısmen gece vakitlerinde %70 bandına yaklaştığı görülse de genel olarak %48 bandındadır. Durum 1'de eşit sayıda elektrikli taşıt elektrik sistemi tarifelerine göre sisteme bağlanmıştır. 02.00-08.00 arasında bağlanılan elektrikli taşıtlar şebeke tarafında sorun teşkil etmemektedir. Saat 05.00 ile 06.00 arasında iki şarj istasyonunda bağlı olan araçların çakışması söz konusudur. En düşük enerji tüketimleri bu saatler olduğundan şebeke zorlanmayacaktır. Görüldüğü üzere o saatler arasında transformatörün yüklenme oranı %50 bandında seyretmektedir. Fakat 19.00-00.00 arasında bağlanacak araçlar en yüksek tüketim bandında bağlanacağından doluluk oranının %70 bandını aşarak %77 bandına çıkarttığını gösterir. Durum 2'de farklı sayıda elektrikli taşıt gündüz tarifesinde sisteme bağlanmıştır. 08.00-13.00 arasında bağlanılan 7 adet elektrikli aracın transformatörün doluluk oranını arttırıp %70 bandına çıkardığı gözükmemektedir. 12.00-17.00 arasında bağlanan 5 araç o saatlerdeki enerji tüketim ile birleşerek doluluk oranını %65 bandında tuttuğunu lakin 11.00 ve 14.00 saat diliminde bağlanan 3 araç ile bir önceki saat diliminde çakışma durumunun yaşandığı saatlerde doluluk oranının %75 in üzerine çıkardığı bariz olarak görülmektedir. Durum 3'de farklı sayıda elektrikli taşıt gündüz ve puant tarifelerinde sisteme bağlanmıştır. 12.00-17.00 arasında bağlanan 7 araç ile insanların enerji kullanım yoğunluğunun yüksek olduğu öğlen zamanlarında transformatörün doluluk oranını %70 sınırlarına çıktığı gözlenmektedir. 19.00-23.00 zaman dilimi arasında bağlanan 6 araç transformatörün doluluk oranının %80 bandına doğru yaklaştırdığı görülmektedir. 00.00-05.00 arasında bağlanan 10 araç gece inen transformatör doluluk oranını ciddi bir oranda artarak %70 civarında seyrettiği gözleniyor. Durum 4'te farklı sayıda elektrikli taşıt öğlen en yoğun saatlerinde ve akşamları kısa süre sisteme bağlanmıştır. 06.00-08.00 arasında bağlanan 5 araç ile transformatörün doluluk oranını %45 sınırlarına çıktığı gözlenmektedir. 13.00-18.00 zaman dilimi arasında bağlanan 7 araç transformatörün doluluk oranını %65 bandına doğru yaklaştırdığı görülmektedir. 20.00-00.00 arasında bağlanan 4 araç gece inen transformatör doluluk oranının artarak %75 bantlarında seyrettiği gözlenmiştir. Doluluk oranı hesaplama yöntemi aşağıdaki gibidir.

$$\text{Trafo Doluluk Oranı [\%]} = \frac{\text{Kullanılan Aktif Güç [W]}}{\text{Trafonun Gücü [VA] * \cos(\alpha)}} \times 100 \quad (1)$$

Belirlenen durumlara göre transformatörün yüklenme oranlarının grafiğini Şekil 8'de bulunmaktadır.



Şekil 8. Transformatör Gücü Doluluk Oranının Durumlar Bazında Karşılaştırması (Comparison Of Loading Ratio Of The Transformer Power According To The Situations)

Şekil 8’de bulunan grafikte elektriğin üretim aşamasından son kullanıcıya iletiildiği süreçte kayıplar incelendiğinden en zayıf noktanın elektrik dağıtım şebekesi olduğu görülmektedir. Elektrik dağıtım şebekesindeki kayıplar kaçak enerji kullanımı, kablaj esnasında yapılan hatalar ve transformatörlerin düşük verimde çalışması olarak sıralanabilir. Simülasyon çalışmasında elektrikli taşıtlar bağlı değilken ve farklı durumların etkileri nedeniyle oluşan hat kayıpları üç fazda da incelenmiştir. Üç fazda da oluşan hat kayıpları Tablo 3’de görülmektedir.

Tablo 3. Durumlara Göre Hat Kayıpları (Line Losses According to the Situations)

	GERÇEK SİSTEM KAYBI (W)	DURUM 1 (W)	DURUM 2 (W)	DURUM 3 (W)	DURUM 4 (W)
A FAZI	5.302	6.986	5.825	6.11	6.783
B FAZI	4.842	6.443	5.331	5.596	6.249
C FAZI	5.205	6.871	5.721	6.017	6.67

Elektriksel açıdan incelendiğinde yukarıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçları ekonomik olarak değerlendirmek de mühendislik açısından önemlidir. Ülkemizde EPDK tarafından elektrik birim fiyatları belirlenmektedir. Birim fiyatlar orta gerilim, alçak gerilim, iletim sistemi kullanıcısı vb. kategorilere ayrılmıştır. Her bir kategori de kendi içerisinde alt kategorilere ayrılmıştır (EPDK

Elektrik Faturalarına Esas Tarife Tabloları,1 Ocak 2023). Bizim ele aldığımız bölge alçak gerilimden beslenen tek terimli ve mesken (8 kWh/gün ve altı) kategorisinde bulunmaktadır. Tek terimli ve çok terimli olarak enerji maliyetleri karşılaştırılmış olup araç toplam ve araç başına maliyetler hesaplanmış olup Tablo 4'te özetlenmiştir.

Belirlenen şarj edilme durumlarına bağlı olarak elektrikli taşıtların şarj maliyetleri tablosuna bakıldığında taşıt başına maliyet satırına bakmak gerekmektedir. Bunun nedeni elektrikli taşıt şarj istasyonlarının enerjisi ortak alandan karşılanmasının gerektiğinden ve şarj anında farklı sayıda araç bulunmasıdır. Ekonomi açısından incelendiğinde en ekonomik sonuç birinci durumun olarak göze çarpmaktadır. Bu durumda 02:00 – 06:00 saatleri arasında 5 adet, 05:00 – 08:00 saatleri arasında 5 adet ve 19:00 – 00:00 saatleri arasında 5 olacak şekilde 15 adet taşıtın şarj edilmesi gerçekleşmiştir. Bu durumun ekonomik analizini özetlersek maliyetlerin %10'unun T1 zaman diliminde, %40'ının T2 zaman diliminde ve %50'sinin T3 zaman diliminde oluştuğu görülmektedir. En ekonomik olmayan durum ise ikinci durum olduğu göze çarpmıştır. Bu durumda 08:00 – 13:00 saatleri arasında 7 adet, 12:00 – 17:00 saatleri arasında 5 adet ve 11:00 – 14:00 saatleri arasında 3 olacak şekilde 15 adet taşıtın şarj edilmesi incelenmiştir. Bu durumun ekonomik analizini özetlemek gerekirse maliyetlerin %100'ünün T1 zaman diliminde oluştuğu görülmektedir. Tek terimli abonelik kullanmanın çok terimli abonelik kullanılmasına göre enerji maliyetinin birinci duruma göre %23, ikinci duruma göre %34, üçüncü duruma göre %30 ve dördüncü duruma göre %38 oranında düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Şarj Durumlarına Göre Tüketilen Enerji Maliyetlerinin Karşılaştırılması (Comparison of the Cost of Consumed Energy According to Charging Situations)

	Birim Fiyat (kWh/krş)	Gerçek Durum Fiyat (TL)	Durum 1 Fiyat (TL)	Durum 2 Fiyat (TL)	Durum 3 Fiyat (TL)	Durum 4 Fiyat (TL)
T ₁	236,1424	7,4810	128,7921	1622,5911	811,2908	938,7794
T ₂	345,0771	6,9568	508,0915	0,0000	846,7847	519,3686
T ₃	149,0277	0,8584	613,5813	0,0000	731,4280	121,8987
Toplam	-	15,2961	1250,4649	1622,5911	2389,5035	1580,0467
Araç Başına Maliyet	-	-	83,3643	108,1727	103,8915	98,7529
Tek Terim	156,6703	9,0242	961,1770	1076,5192	1691,6476	986,7910
Araç Başına Maliyet	-	-	64,0785	71,7679	73,5499	61,6744

5. Sonuçlar ve Öneriler

Teknolojinin gelişmesiyle ve çevreye olan hassasiyetin artmasıyla insanlar artık konvansiyonel

araçlar yerine elektrikli taşıtları tercih etmeye başlamıştır. Elektrikli taşıtların sayısının artmasıyla birlikte elektrikli taşıtların şarj talebi hızla yükselmektedir. Bu şarj talebini karşılamak için elektrikli taşıt şarj dolmuş istasyonlarının sayısı giderek fazlalaşacaktır. Şehir içerisinde şarj istasyonları elektrik dağıtım seviyesinde bağlanacaktır. Mevcut durumda enerji ihtiyacının fazla olduğu kentsel bölgelerde elektrikli taşıt şarj istasyonlarının şebekeye entegrasyonu ile bu talep daha da artacaktır. Bu artan talep doğrultusunda şebekeye elektrikli taşıt bağlantısı yapıldığı zaman transformator yüklenme oranının %70'in üzerlerine çıktığı gözlenmiştir. Bu durumda hâlihazırda var olan 400 kVA gücündeki transformatorün gücü artırılarak 630 kVA seçilmelidir. Fakat şebeke yatırımları 15 yıllık yapıldığı için bu 15 yıl içerisinde elektrikli taşıtların daha fazla artacağı ve bölge genelinde kentleşmenin artacağı dikkate alındığında 1600 kVA gücünde transformator konulmalıdır. Bu çalışmada sisteme dahil edilen elektrikli taşıtların şarj sırasındaki maliyetleri, tek ve çok terimli aboneliklere göre maliyetler analiz edilmiş olup tek terimli aboneliklerde şarj maliyetinin çok terimli aboneliğe göre bu simülasyonda en az %23 tasarruf sağladığı ve elektrikli taşıtların batarya grubunun bu simülasyona göre en fazla 74 TL'ye şarj edildiği gözükmektedir. Türkiye'nin elektrikli taşıt gelişim planı çerçevesinde 2025 ve 2030 yıllarında oluşacak ihtiyaçlar incelendiğinde 2025 yılında 270 bin elektrikli taşıt ve 2030 yılında 1 milyon 600 bin elektrikli taşıt olması öngörülmüştür (T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2022). Bu ihtiyaçları karşılamak için bu simülasyonda kullanılan elektrikli taşıt şarj istasyonu teknik karakteristiği dikkate alındığında 2025 yılına kadar 25 bin 568 elektrikli taşıt şarj istasyonu ve 2030 yılına kadar 151 bin 515 elektrikli taşıt şarj istasyonu kurulması gerekmektedir. Sadece elektrikli taşıt şarj arzının sağlanması için oluşacak enerji ihtiyaçları hesaplandığında 2025 yılında 13500 MWh ve 2030 yılında 80000 MWh enerji talebi oluşmaktadır. Bu simülasyon çalışmasında yapılan elektriksel analizler, maliyet analizleri ve Türkiye gelişim planına ait öngörülerin doğruluğu ihtiyaçlar göz önüne alındığında elektrik dağıtım sisteminin acil olarak altyapı hazırlıklarının başlanması gerektiğini göz önüne koymuştur.

Bu çalışmada, kışların soğuk ve yoğun kar yağışıyla geçtiği Bitlis ilinin yeni yerleşim alanında kurulan Bitlis Eren Üniversitesi kampüsündeki eğitim binalarının, ısı kaybı, ısıtma amaçlı yakıt maliyetleri ve oluşan CO2 emisyonları incelenerek enerji verimliliği bakımından değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Yazarların Katkısı

Bu çalışma, Prof. Dr. Nurettin UMURKAN danışmanlığında Recep Buğra MERT tarafından hazırlanan yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı












Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Ahmaad F., Iqbal A., Ashraf I., Marzband M., Khan I., 2022. Placement of Electric Vehicle Fast Charging Stations using Grey Wolf Optimization in Electrical Distribution Network. 2022 IEEE International Conference on PowerElectronics, Smart Grid, and Renewable Energy.
- Araujo A., Araujo D., Vasconcelos A., Rosas P., Medeiros L., Conceicao J., 2021. A Proposal for Technical and Economic Sizing of Energy Storage System and PV for EV Charger Stations with Reduced Impacts on the Distribution Network. CIRED 2021 Conference.
- Arnold, M., Provan, S., 2019. German industrial output fall exacerbates fears of recession. Financial Times.
- BP Statistical Review of World Energy, 2022.
- Das, H. S., Rahman, M. M., Li, S., & Tan, C. W. (2020). Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid Integration: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, Article 109618. <https://doi:10.1016/j.rser.2019.109618>
- Diaz, C., Ruiz, F., & Patino, D., 2018. Smart Charge of an Electric Vehicles Station: A Model Predictive Control Approach. In: Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), 54-59
- Enerji Atlası, 2022. Türkiye'deki Elektrikli Otomobil Sayıları (<https://www.enerjiatlası.com/haber/turkiye-deki-elektrikli-otomobil-sayisi>)
- EPDK, Kalite Faktörü Uygulaması, 2021. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/4-283/kalite-faktoru-uygulamasina-iliskin-usul-ve-esas>
- European Commission, 2019. Communication from the commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal [Online].
- European Green Deal, 2019. https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf.
- EPDK, Kalite Faktörü Uygulaması, 2021. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/4-283/kalite-faktoru-uygulamasina-iliskin-usul-ve-esas>
- Güven A.F, Akbaşak S.B., 2021. Elektrikli Araçlarda DA hızlı Şarj Ünitelerinin Şebeke Altyapısına Etkilerinin İncelenmesi. International Energy Agency, 2022. Electric cars fend off supply challenges to more than double global sales, Leonardo Paoli,
- Clean Energy Technologies analyst Timur Gül, Head of the Energy Technology Policy Division Commentary. Koç Medya, 2021. <https://www.koc.com.tr/medya-merkezi/haberler/2021/turkiyenin-en-buyuk-yatirimi-yineford-otosandan>.
- Liu Yanping, Li Xin, Liang Yi, Shunqi Zeng, 2021. Assessment of Impacts on Integration of Disorderly EV Charging Load to Flexible Distribution Network. 2021 11th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering.
- Lucas Alexandre, Fausto Bonavitacola, Evangelos Kotsakis, Gianluca Fulli, 2015. Grid harmonic impact of multiple electric vehicle fast charging, *Electric Power Systems Research*, Volume 127, 2015, Pages 13-21.
- Nafi Mahmud I., Tabassum S., Hassan Rafid Q., Abid F., 2022. Effect of Electric Vehicle Fast Charging Station on Residential Distribution Network in Bangladesh. IEEE 2021 2021 5th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT) Military Institute of Science and Technology (MIST), Dhaka-1216, Bangladesh
- Rahimpour E., Azizian D., 2006. Analysis of temperature distribution in castresin dry-type transformers, *Electr Eng* (2007), pp.301-309, April 2006.
- Sanal Savunma TOGG, 2022. <https://www.sanalsavunma.com/togg-2022-yili-sonunda-seri-uretim/>

- Saner C.B., Çakır Y., İşbitiren G., Dağıtım Şebekelerinde Kayıp/Kaçakların Azaltılması için Uygulanabilecek Metodoloji
- Sen Qian, Xiaojing Zhang, Chuan Chen, Hongkang Wang, Jinghong Guo, Yang Xu., 2021. Ageing Evaluation of the Distribution Transformer under Varying Load due to Electric Vehicle Charging.
- Ucer, E., Kisacikoglu, M. C., & Cafer Gurbuz, A. (2018). Learning EV Integration Impact on a Low Voltage Distribution Grid. In: Proceedings of the 2018 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 1-5. doi:10.1109/PESGM.2018.8586208
- Wang Lu, Wan Youhong, Weitao Cao, Chunxia Fan, 2019. Chinese Automation Congress (CAC). Optimizing Strategy of Spatial Orderly Charging for EVs Based on Complex Network Theory.
- Xu Y., Chen Z., Peng F. and Beshir M., 2014. Harmonic analysis of electric vehicle loadings on distribution system. 2014 IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering, 2014, pp. 145-150.
- Xue Ping, Xiang Yue, Shafie-khah Miadreza, Zhou Run, 2022. Robust Joint Planning of Electric Vehicle Charging Infrastructures and Distribution Networks. IEEE Conference Paper.
- T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Türkiye İçin Elektrikli Araç Şarj Altyapısı, 2022. <https://sarjdestek.sanayi.gov.tr/turkiye-icin-elektrikli-arac-sarj-altyapisi>
- Vestel Proje Ortağım, Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Teknik Karakteristik, 2023. http://www.vestelprojeortagim.com.tr/docs/default-source/default-document-library/elektrikli-arac-sarj-istasyonu-evc02-serisi---ürünlerimiz.pdf?sfvrsn=c512be05_0
- EPDK, Elektrik Faturalarına Esas Tarife Tabloları, 1 Ocak 2023. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari>

Ergan Dağı'nın Farklı Yükseltilerinde Yaygın Olarak Yetişen Bitkilerde Ağır Metal (Ba, Cd, Co, Cr, Pb) Birikiminin Belirlenmesi

Etem OSMA^{1*}, Muhammet Onur KIYMAZ², Tuğçe VAROL³, Halil İbrahim TÜRKOĞLU⁴, Faruk YILDIZ⁵, Ali KANDEMİR⁶, Mert ELVERİCİ⁷, Engin KILIÇ⁸, Aysel AKVERDİ⁹, Kader KUŞ¹⁰, Abdullah HASBENLİ¹¹

Öz

Bu çalışma, Erzincan il sınırları içerisinde yer alan Ergan Dağı'nın farklı yüksekliklerinde yetişen yaygın 30 bitki türü ile yapılmıştır. Çalışma kapsamında 1500 m, 2000 m, 2500 m ve 3000 m olmak üzere farklı yüksekliklerden toplanan bitkilerde ve yetiştikleri topraklarda metal (Cd, Cr, Pb, Co, Ba) konsantrasyonları tespit edilmiştir. Toplanan bitkilerin çiçek, yaprak ve kök ile yetiştikleri topraklar laboratuvarında ön işlemlerden geçirilmiştir. Hazır hale getirilen örneklerde metal konsantrasyonları ICP-MS'te analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bitki ve toprağa ait metal verileri istatistiksel olarak değerlendirilerek, her bir metal için rakımlar arasındaki farklılıklar belirlenmiştir. Çalışmada Cd ve Pb konsantrasyonunun 2500 m yetişen bitkilerde ve topraklarda yüksek olduğu belirlenmiştir. İlave olarak, *Turanecio hypochionaeus* ve *Crepis armena* türlerinin bünyesinde kadmiyum metalini toprağa göre daha fazla biriktirdiği ve bazı türlerin biyomonitor özelliğe sahip olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ağır metal, Ergan Dağı, ICP-MS, Yükseklik

Determination of Heavy Metals (Ba, Cd, Co, Cr, Pb) Accumulation in Commonly Grown Plant Species at Different Altitudes of Mount Ergan

Abstract

This study was carried out with 30 plant species common at different altitudes of Ergan Mountain, located in Erzincan. In the research, metal (Cd, Cr, Pb, Co, Ba) concentrations were determined in plants collected from different altitudes, 1500 m, 2000 m, 2500 m, and 3000 m, and in the soils, they grow. The flowers, leaves, and roots of the plants and the soils were pre-treated in the laboratory. Metal concentrations in the prepared samples were analyzed in ICP-MS. The obtained plant and soil metal data were evaluated statistically and the differences between the altitudes were determined for each metal. It was determined that the Cd and Pb concentrations were high in plants and soils at 2500 m. In addition, it has been understood that *Turanecio hypochionaeus* and *Crepis armena* species accumulate more cadmium metal in their bodies than in the soil, and some species have biomonitoring properties.

Keywords: Heavy metal, Ergan Mount, ICP-MS, Altitude

^{1,3,4,6,7,9,10}Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Erzincan, Türkiye, eosma@erzincan.edu.tr, tugcevarol7291998@hotmail.com, halil.turkoglu@erzincan.edu.tr, akandemir@erzincan.edu.tr, mert.elveriel@gmail.com, ayselak4444@gmail.com, kaderkus.116@gmail.com

²Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği, Kayseri, Türkiye, m.onurkiymaz@hotmail.com

⁵Erzincan Milli Eğitim Müdürlüğü, Erzincan, Türkiye, farukyildizw@gmail.com

⁸Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi, Erzincan, Türkiye, ekilic@erzincan.edu.tr

¹¹Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Biyoloji Bölümü, Ankara, Erzincan, hasbenli@gazi.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0002-5250-8194>

²<https://orcid.org/0000-0002-7974-6651>

³<https://orcid.org/0000-0001-7027-462X>

⁴<https://orcid.org/0000-0002-1400-2993>

⁵<https://orcid.org/0000-0003-1937-6748>

⁶<https://orcid.org/0000-0003-1902-9631>

⁷<https://orcid.org/0000-0003-3233-9968>

⁸<https://orcid.org/0000-0002-6838-5977>

⁹<https://orcid.org/0000-0003-2535-393X>

¹⁰<https://orcid.org/0000-0001-8428-5610>

¹¹<https://orcid.org/0000-0002-2919-7594>

1. Giriş

Metaller, yeryüzünde suda çözünen iyonlar formunda, gaz yapısında, toprak ve kayalarda mineraller veya tuzlar şeklinde doğal olarak bulunmaktadır. Metaller, yer kabuğunda doğal olabileceği gibi antropojenik etkiler vasıtasıyla çevreye rahat bir şekilde yayılabilme potansiyelinde sahiptirler (Patterson, 1971). Günümüzde tanımlanmış 92 tane element farklı ekosistemlerde yerini almaktadır (Elveren ve Osma, 2022). Bu elementler arasında ağır metal olarak bilinen atomik yoğunluğu 5 g/cm^3 'ten fazla olan ve düşük konsantrasyonlarda bile toksik etki gösterebilen elementler bulunmaktadır (Nriagu ve Pacyna, 1988; Okçu ve ark, 2009; Bautista ve ark, 2022). Ağır metaller içerisinde canlılar için gerekli Fe, Zn, Mn, Cu, Ni, Mo, Co vb. metaller yanında Cr, Cd, Hg ve Pb metaller gibi oldukça zararlı olanlar da vardır (Marschner, 2016; Bautista ve ark, 2022). Ağır metaller, rahatlıkla parçalanamadıkları ve yok edilmediklerinden dolayı ekosistemlerde kalıcı kirliliğe neden olabilmektedir. Çok düşük konsantrasyonlarda gıda, hava ve su yoluyla canlıların vücut metabolizmasına girerek belirli bir süre sonrasında biyolojik olarak birikebilme potansiyeline sahiptirler (Aradhi ve ark, 2009; Laishram ve Kshetrimayum, 2019; Isinkaralar, 2022a). Toprak, su ve atmosferde farklı konsantrasyonlarda bulunabilen ağır metaller belirli limitin üzerine çıktığında çevre kirliliğine neden olabilmektedir. Ağır metallerin ekosistemde yüksek konsantrasyonlarda birikime sebep olması, canlılar için ciddi şekilde tehlikeye yol açmaktadır (Munzuroğlu ve Zengin, 2004; Karadeniz ve ark, 2019; Isinkaralar, 2022b). Geçmişten bugüne kadar ağır metallerin insan ve çevre üzerindeki etkilerinin izlenmesine yönelik birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalar, daha çok potansiyel toksik etkileri olabilecek Cd, Co, Cr, Ni ve Pb gibi metaller üzerinde yoğunlaşmıştır (Sevik ve ark, 2020; Karacocuk ve ark, 2021). Bu metallerden başka birçok ürünün elde edilmesinde kullanılan Baryum (Ba) metali de bulunmaktadır. Ba, tehlikeli metaller arasında olup bileşikleri toksik özelliğe sahiptir (Aktaş, 2019; Çetin ve Jawed, 2022).

Toprağın fiziksel ve kimyasal yapısının bitki gelişimi ve yayılışı üzerinde etkisi oldukça önemlidir. Topraktaki ağır metallerin doğal içeriği jeokimyasal ve jeofizik süreçlerine bağlıdır. Toprağın oluşumunu sağlayan faktörler ve zaman metallerin konsantrasyonu üzerinde oldukça etkilidir (Alloway, 1990; Salonen ve Korkka, 2007).

Büyük ekosistemler içerisinde yer alan dağlar, küresel değişimlere ve ağır metal kirliliğine karşı diğer ekosistemlerden daha duyarlıdır (Li ve ark, 2010). Antropojenik aerosollere bağlı olarak toksik metaller uzun menzilli atmosferik taşıma sonucunda, yüksek dağlarda yetişen bitkilerde birikebilme özelliğine sahiptirler (Bing ve diğerleri, 2018, Bing ve diğerleri, 2016; Blackwell ve Driscoll, 2015). Ağır metallerin atmosferden toprağa ve bitki örtüsüne taşınması, toz düşmesi, dökme yağış ve gaz veya aerosol adsorpsiyon işlemleri ile gerçekleşmektedir. Antropojenik olarak toksik metallerin uzakta bulunan dağ ekosistemlerine kontamine olması genellikle vadilerden ve yerleşim alanlarından

daha düşüktür, ancak farklı doğal jeofiziksel ve jeokimyasal süreçler nedeniyle, pedojenik ve litojenik metallerin miktarı da yavaş yavaş artmaktadır ve birbirleriyle etkileşime girebilmektedir (Beijer ve Jernelöv, 1986; Devkota ve Schmidt, 2000). Yüksek miktarda Hg, Cd, Pb ve Cr birikimi, bitkilerin büyümelerini ve gelişmelerini engelleyebilmektedir (Wang ve diğerleri, 2017; Zeng ve ark, 2023).

Erzincan, maden yatakları bakımından zengin olup çok sayıda ağır metal içeren sahalara sahiptir. Bu doğrultuda Ergen Dağı'nın farklı rakımlarından toplanan 30 farklı bitki türüne ait kısımlarda ve yetiştikleri topraklarda element analizleri yapılarak dağın ağır metal içeriği tespit edilmeye çalışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

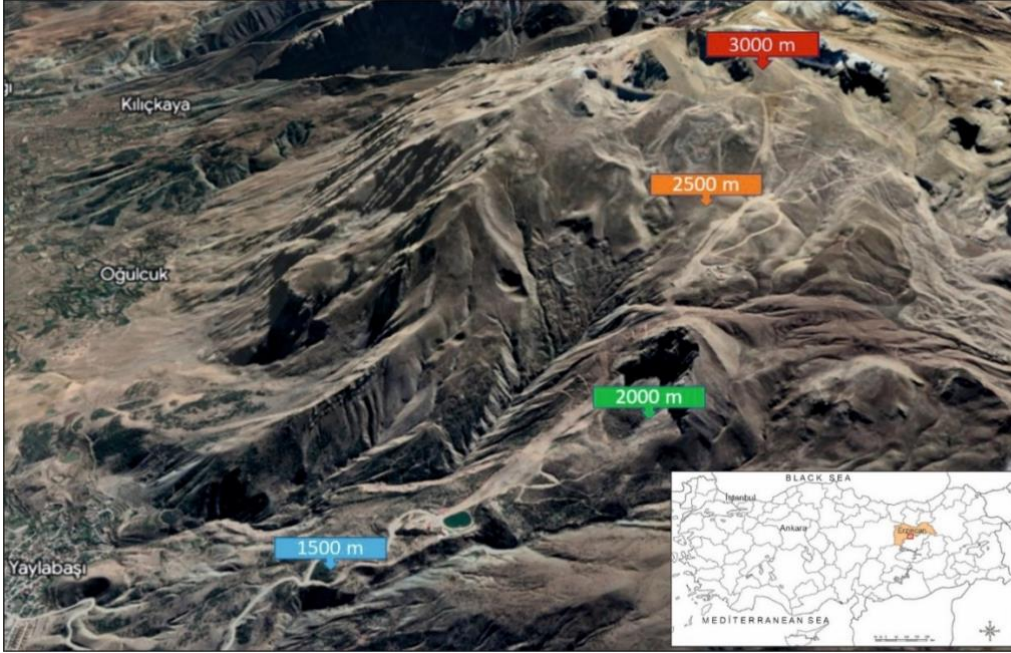
2.1. Çalışma Alanı

Bu çalışma, Erzincan ili sınırları içerisinde yer alan 3256 m yüksekliğe sahip Ergen dağında yapılmıştır. Erzincan ilinin coğrafik yapısına bakıldığında genellikle dağlar ve platoların yoğun olduğu görülmektedir. Dağlar il sınırlarının yaklaşık % 60'ını oluşturmaktadır (Özhatay, 2006; Korkmaz ve Alpaslan, 2014). Ergen Dağı, pelajik kireçtaşı, masif kireçtaşı, resifal katmanlı kireçtaşı, metamorfik kayalar, ofiyolitler, kırıntılı kayalar, ofiyolitli karışık, volkanitler ve volkano tortul dizi ve evaporitlerden oluşan yapısal özelliğe sahiptir (Boz ve Yılmaz, 20020).

Bu çalışmada, 2021-2022 yıllarında Ergen dağının 1500 m (*Alcea calvertii* (Boiss) Boiss., *Glaucium leiocarpum* Boiss., *Astragalus ornithopodioides* Lam., *Genista aucheri* Boiss., *Linum mucronatum* Bertol, *Anchusa leptophylla* Roem. & Schult, *Euphorbia virgata* Waldst. & Kit.), 2000 m (*Tanacetum mucroniferum* Hub. Mor. Et Grierson, *Hypericum scabrum* L. *Inula oculus-christi* L., *Barbarea auriculata* Hausskn. ex Bornm, *Onobrychis cornuta* (L.) Desv., *Globularia trichosantha* Fisch. & C.A.Mey, *Genista aucheri* Boiss., *Euphorbia virgata* Waldst. & Kit.), 2500 m (*Scutellaria orientalis* L., *Lallemantia canescens* (L) Fisch. & Mey., *Coronilla orientalis* Miller, *Dianthus orientalis* Adams., *Crepis armena* DC., *Campanula tridentata* Schreber., *Euphorbia petrophila* C.A. Meyer, *Anthemis cretica* L., *Papaver fugax* Poiret, *Aster alpinus* L.) ve 3000 m (*Pedicularis comosa* L., *Astragalus nezaketiae* A.Duran & Aytaç, *Scorzonera sericea* DC., *Campanula tridentata* Schreber, *Anthemis cretica* L., *Papaver fugax* Poiret, *Hedysarum erythroleucum* Boiss., *Turanecio hypochionaeus* (Boiss.) Hamzaoglu) yükseklikte yetişen 30 bitki türü ile yetiştikleri topraklardan alanı temsil edecek şekilde örnekler toplanmıştır. Toplanan bitki örnekleri laboratuvar ortamında çiçek (petaller), yaprak, kök şeklinde ayrılmıştır. Bu bitki türleri farklı yükseltelerin yaygın türleridir (Şekil 1).

2.2. Ağır metal Analizi

Öncelikle bitki örnekleri, 24 saat boyunca etüvde 80 °C’de kurutulmuştur. Kurutulmuş numuneler, havanda ezilerek toz haline getirilmiştir. Toz haline getirilen bitki kısımları 1.5 mm’lik elek ile elenmiştir. Her numuneden sonra havan, etil alkol ile yıkanmış ve bu şekilde kontaminasyona karşı korunmuştur (Osma and Kandemir, 2016; Yavuzer and Osma, 2018).



Şekil 1. Çalışma alanı (Google Earth)

Toprak örnekleri, her yükseklikten toprak yüzeyinde bulunan döküntü tabakası temizlendikten sonra en az 10 cm’lik tabandan çapa kullanılarak 500 g olacak şekilde poşetlere alınmıştır. Örnekler laboratuvarında hava kurusu ile kurularak 1.5 mm’lik elek ile elenmiştir.

Laboratuvar ortamında analizleri yapılmak için hazırlanan bitki ve toprak numuneleri 0,5 g olacak şekilde tartılmıştır ve mikrodalga kaplarına yerleştirilmiştir. Bitki numunelerine %65’lik 6 mL HNO₃ ile %30’luk 2 mL H₂O₂ eklenirken, toprak numunelerine ise %65’lik 3 mL HNO₃, %37’lik 9 mL HCl eklenmiştir. Sonrasında örnekler, manyetik karıştırıcı ile 10 dakika süresince homojenize edilmiştir. Kaplar, mikrodalgaya koyularak 2000 °C’de ve 45 bar basınçta 15 dakika boyunca asitli ortamda çözündürülmüştür. Yakılan numuneler balon jöjeye alınarak 50 mL’ye tamamlanmıştır. 50 mL olan numunelerden teflon filtre ile 10 mL çekilmiştir. Son olarak, metal miktarını belirlenmesi için örnekler falkon tüplere yerleştirilmiştir ve ICP-MS’de metal konsantrasyonu analiz edilmiştir (Osma and Kandemir, 2016; Yavuzer and Osma, 2018).

2.3. İstatistiksel Analizler

Yapılan çalışmada elde edilen veriler istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. $p \leq 0.05$ değeri istatistik hesaplamalarında ve karşılaştırılmalarında anlamlı olarak kabul edilmiştir. SPSS 22 Paket İstatistik Programı ile veriler, %95'lik güven aralığında ANOVA testi ve çoklu karşılaştırmalarda örnekler arasındaki farklılıklar S-N-K ile tespit edilmiştir.

Elde edilen verilerin istatistiksel değerlendirmeleri sonucunda çalışılan bitkilerin metalleri biriktirme kabiliyetleri de tespit edilmiştir. Hiperakümülator bitkileri belirleyebilmek için BCF hesaplanmaktadır. Bitkilerde metal alınımı, Biriktirme Faktörüne (Bioconcentration factor, BCF) bağlıdır. Biriktirme faktörü bitkideki ağır metal konsantrasyonunun, topraktaki ağır metal konsantrasyonuna oranlanması sonucunda tespit edilmektedir (Ladislav ve ark, 2012). Biyoakümülyasyon faktörü (BCF) = Hasat edilen bitkideki ağır metal konsantrasyonu/Toprak ağır metal konsantrasyonu.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, farklı rakımlarda bitkiler ve topraklarda Ba, Cd, Co, Cr, Pb metallerinin konsantrasyonunu tespit edilerek yüksekliğin metal dağılımı üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Ba konsantrasyonu için, yüksekliğe bağlı olarak bitki kısımlarında farklı veriler elde edilmiştir. Baryumun en fazla değeri çiçekte ($190,3 \pm 97,6$ $\mu\text{g/g}$ kuru ağırlık) *Dianthus orientalis*'te kökte ($307,5 \pm 33,2$ $\mu\text{g/g}$ kuru ağırlık) ve yaprakta ($114,2 \pm 8,1$ $\mu\text{g/g}$ kuru ağırlık) 3000 m de yetişen *Campanula tridentata* bitkisinde tespit edilmiştir. Toprak örnekleri incelendiğinde, Ba konsantrasyonu en fazla 2000 m yükseklikte olduğu görülmüştür. Ba verileri incelendiğinde her bir yükseklikte bitki kısımları ile topraklar arasında anlamlı farklılıkların olduğu gözlenmiştir Tablo 1. Cd konsantrasyonu yaprakta ($5,76 \pm 0,1$ $\mu\text{g/g}$ kuru ağırlık) kökte ($5,39 \pm 0,4$ $\mu\text{g/g}$ kuru ağırlık) 3000 m yetişen *Turanecio hypochionaeus* bitkisinde görülmüştür. Yapılan istatistiksel değerlendirmelerde farklı yüksekliklerde yetişen bitkiler arasında Cd miktarı bakımından güçlü yönde anlamlı farklılıkların olduğu belirlenmiştir Tablo 2. Co konsantrasyonunun, genel olarak yükseklik arttıkça bitki ve toprak kısımlarında azaldığı görülmüştür. En fazla Cobalt konsantrasyonu, çiçekte ($19,4 \pm 0,3$ $\mu\text{g/g}$ kuru ağırlık) *Globularia trichosantha*, kökte ($16,9 \pm 1,8$ $\mu\text{g/g}$ kuru ağırlık) *Astragalus ornithopodioides* bitki türlerinde belirlenmiştir. Her bir yükseklikte yetişen bitkilerde yapılan istatistiksel değerlendirmelerde Co metali bakımından anlamlı farklılıkların olduğu görülmüştür Tablo 3. Cr konsantrasyonu, bitkilerin çiçek ve yapraklarına göre genelde kök kısmında daha yüksek konsantrasyonlarda olduğu gözlenmiştir. Krom, bitki kısımları içerisinde çiçekte ($155,1 \pm 6,4$ $\mu\text{g/g}$ kuru ağırlık) *Globularia trichosantha*, en yüksek değere sahiptir. Toprakta Cr, ($326,4 \pm 23,7$ $\mu\text{g/g}$ kuru

ağırlık) en fazla 1500 m yükseklikte olduğu tespit edilmiştir. Cr metalinin dağın alçak kısımlarında daha fazla olduğu belirlenmiştir. Farklı yükseklerde yetişen bitkilerde elde edilen veriler istatistik değerlendirmeler yapılmış olup her bir yükseklikte Cr metali bakımından anlamlı farklılıklar olduğu gözlenmiştir Tablo 4. Pb konsantrasyonunun, 2500 m yükseklikte daha fazla yoğunlaştığı belirlenmiştir. *Crepis armena* bitki türünün çiçek ($48,6 \pm 2,2$ µg/g kuru ağırlık) ve yapraklarında ($97,0 \pm 7,1$ µg/g kuru ağırlık) kurşun miktarının diğer bitki türlerine göre çok yüksek olduğu görülmüştür. Veriler incelendiğinde bitkilerin kısımları arasında anlamlı farklılıkların olduğu tespit edilmiştir Tablo 5.

Yapılan çalışmada elde edilen veriler değerlendirildiğinde Cr konsantrasyonu, 1500 m ve 2000 m yükseklikte toprakta (5-100 µg/g kuru ağırlık) fazla olup çalışılan bazı bitki türlerinin (5-30 µg/g kuru ağırlık) farklı kısımlarında olması gereken sınır değerlerinin (Ross, 1994; Kabata-Pendias ve Pendias, 2000) üzerinde olduğu görülmüştür. Kobalt metalinin, genel olarak bitkilerin farklı kısımlarında (0,1-0,6 µg/g kuru ağırlık) yüksek olduğu tespit edilmiştir. Özellikle *Globularia trichosantha* bitkisine ait çiçeklerde kobalt konsantrasyonu olması gereken sınır değerlerinden oldukça yüksektir. Pb konsantrasyonu (5-10 µg/g kuru ağırlık) özellikle 2500 m yetişen bazı bitkilerde çok fazla olup farklı yükseklikten toplanan topraklarda (2-300 µg/g kuru ağırlık) normal sınır değerleri içerisinde. Genel olarak, Cd miktarı bitkilerde (0,01-2,4 µg/g kuru ağırlık) ve topraklarda (0,01-2 µg/g kuru ağırlık) olması gereken değerler arasındadır (Ross, 1994; Kabata-Pendias ve Pendias, 2000). Ba konsantrasyonu ise özellikle bitki köklerinde normal sınırlar (4-50 µg/g kuru ağırlık) üzerinde olup toprakta (15-3,500 µg/g kuru ağırlık) normal değerlere sahiptir.

Çalışma sırasında (BCF) değeri her bir metal için ayrı ayrı hesaplanmıştır. BCF değerleri bitkilerde metal birikimini belirlemek için kullanılmaktadır. $BCF > 1$ olması bitkinin metal akümülatörü olabileceğini ifade etmektedir (Fellet ve ark, 2014). Buna göre çalışılan bitkilerin biyokonsantrasyon faktörleri incelendiğinde Ba metalinin 1500 m de yetişen *Alcea calvertii* yaprakta ($BCF=1,38$) ve kökte ($BCF=1,30$) ile *Dianthus orientalis* çiçeklerinde ($BCF=1,42$) biriktirdiği belirlenmiştir. Cd elementinin en yüksek BCF değeri 3000 m'de yetişen *Turanecio hypochionaeus* yapraklarında ($BCF=4,43$) ve köklerinde ($BCF=4,14$), *Crepis armena* yapraklarında ($BCF=2,95$) ve köklerinde ($BCF=3,29$) yüksek olduğu görülmüştür Tablo 6.

Literatür incelendiğinde ağır metaller ile ilgili yapılan çalışmaların daha çok çevre kirliliğinin olduğu bölgelerde yoğunlaştığı ve doğal çevrede ağır metal birikimine yönelik yapılan araştırmaların sayısının oldukça az olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada elde edilen veriler daha önce yapılan bazı çalışmalarda elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır.

Bitki kısımlarında metal konsantrasyonlarının farklı olması bitki türüne ve yükseltiye bağlı olarak değişkenlik göstermiştir.

Yaptıkları çalışmada, 900 ile 2260 m rakımlarda dağılım gösteren farklı yosun türlerinde metal miktarını tespit etmişlerdir. Çalışmalarında elde ettikleri veriler, bu çalışmada elde edilen veriler ile kıyaslandığında Cr ve Co düşük, Cd ve Pb paralel olduğu görülmüştür (Zechmeister, 1995).

Qinghai Spruce Dağı 2.850 m ve Qilian Dağı'nda 3.050 m yüksekliğe sahip ardıc ormanlarında *Polygonum viviparum* ve yosunlarda metal konsantrasyonlarını analiz etmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre Pb ve Cd verileri bu çalışmada elde edilen verilerden çok yüksektir (Zang ve ark, 2022). Van ili sınırları içerisinde yayılış gösteren tıbbi bitkilerin farklı kısımlarında ağır metal konsantrasyonunu belirlemiştir. Elde etmiş olduğu metal verileri, bu çalışmada elde edilen verilerden oldukça düşüktür (Okut, 2019). Western High Atlas Dağı (Fas) 1000 m ile 1750 m arasında yetişen servi ağaçlarında element analizi yapmışlardır. Bitkinin yapraklarında elde ettikleri metal verileri yapılan bu çalışmada elde edilen verilerden oldukça düşüktür (Arjouni ve ark, 2015). Amanos dağlarında farklı lokalitelerden çok sayıda toplanan bitki türlerinde Cr, Cu, Pb metal miktarlarını belirlemiştir. Cr ve Pb değerleri bu çalışmada elde edilen verilerden genelde düşüktür Amanoslar'da (Hatay) yayılış gösteren bazı bitkilerde ağır metal konsantrasyonunu analiz etmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre Cr, Cd, Pb değerleri yapılan bu çalışmada elde edilen değerlerden çok düşüktür (Ergün ve ark, 2012). 3 bitki türüne ait örnekler tam çiçeklenme sırasında Fruška Gora dağının farklı bölgelerinden toplanmıştır. Topladıkları bitkilerde Pb, Co ve Cd değerleri bu çalışmada elde edilen verilerden düşüktür (Ergün ve ark, 2010). Kumalar Dağı'nın rakımları 800-1200 m ve 1200-1900 m olan iki farklı bölgeden 25 bitki türü toplanmıştır. Bitkilerde yapılan element analizleri içinde Ba metali ile ilgili veriler, Ergani Dağı'nın farklı rakımlarından elde edilen Ba verileri ile örtüşmektedir (Şahin ve ark, 2019).

Tablo 1. Farklı rakımlarda yetişen bitki ve topraklarda Ba konsantrasyonu ($\mu\text{g/g}$ kuru ağırlık, * $p<0.05$; ** $p<0.01$; *** $p<0.001$ anlamlılık).

Yükseklik	Bitki türü	Çiçek		Yaprak		Kök		Toprak	
1500 m	<i>Alcea calvertii</i> (Boiss) Boiss.	22,8	± 0,5 ^d	102,2	± 0,5 ^d	96,0	± 3,4 ^c	73,6	± 7,8 ^a
	<i>Glaucium leiocarpum</i> Boiss.	3,9	± 0,3 ^b	19,6	± 1,0 ^c	17,1	± 1,1 ^a		
	<i>Astragalus ornithopodioides</i> Lam.	2,5	± 0,2 ^a	5,6	± 0,5 ^a	14,0	± 0,9 ^a		
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	3,7	± 0,3 ^b	11,6	± 0,4 ^b	18,0	± 0,5 ^a		
	<i>Linum mucronatum</i> Bertol	6,6	± 0,7 ^c	12,4	± 0,9 ^b	14,7	± 0,3 ^a		
	<i>Anchusa leptophylla</i> Roem. & Schult	1,7	± 0,1 ^a	6,6	± 1,0 ^a	20,3	± 2,3 ^{ab}		
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	1,9	± 0,2 ^a	11,6	± 0,4 ^b	24,0	± 1,4 ^b		
2000 m	<i>Tanacetum mucroniferum</i> Hub. Mor. Et Grierson	4,1	± 0,1 ^a	6,3	± 0,5 ^b	33,5	± 1,6 ^b	158,4	± 6,6 ^c
	<i>Hypericum scabrum</i> L.	3,5	± 0,1 ^a	3,0	± 0,1 ^a	13,2	± 1,5 ^a		
	<i>Inula oculus-christi</i> L.	2,0	± 0,1 ^a	11,5	± 0,3 ^c	32,3	± 1,8 ^b		
	<i>Barbarea auriculata</i> Hausskn. ex Bornm	4,2	± 0,6 ^a	33,0	± 2,0 ^d	75,4	± 8,0 ^c		
	<i>Onobrychis cornuta</i> (L.) Desv.	7,3	± 0,5 ^b	6,9	± 0,2 ^b	33,2	± 4,4 ^b		
	<i>Globularia trichosantha</i> Fisch. & C.A.Mey	83,7	± 2,0 ^c	35,6	± 1,5 ^d	33,7	± 3,4 ^b		
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	2,2	± 0,2 ^a	8,6	± 0,8 ^{bc}	20,7	± 2,2 ^{ab}		
<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	1,4	± 0,2 ^a	11,6	± 0,5 ^c	34,1	± 1,1 ^b			
2500 m	<i>Scutellaria orientalis</i> L.	34,0	± 2,4 ^a	38,9	± 4,8 ^b	51,0	± 2,9 ^c	133,2	± 5,7 ^b
	<i>Lallemantia canescens</i> (L) Fisch. & Mey.	20,2	± 0,3 ^a	42,5	± 0,3 ^b	110,8	± 2,3 ^e		
	<i>Coronilla orientalis</i> Miller	2,6	± 0,0 ^a	12,2	± 0,8 ^a	23,8	± 3,0 ^a		
	<i>Dianthus orientalis</i> Adams.	190,3	± 97,6 ^b	34,8	± 0,4 ^b	39,9	± 1,1 ^b		
	<i>Crepis armena</i> DC	38,9	± 1,5 ^a	88,8	± 4,5 ^d	49,8	± 1,8 ^c		
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	22,0	± 1,3 ^a	30,6	± 1,0 ^b	63,7	± 0,7 ^d		
	<i>Euphorbia petrophila</i> C.A. Meyer	50,0	± 2,0 ^a	67,6	± 9,2 ^c	133,0	± 2,5 ^f		
	<i>Anthemis cretica</i> L.	12,4	± 0,2 ^a	8,7	± 0,2 ^a	27,5	± 1,3 ^a		
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	7,1	± 1,0 ^a	10,0	± 0,1 ^a	26,1	± 2,6 ^a		
<i>Aster alpinus</i> L.	8,4	± 1,7 ^a	9,9	± 0,8 ^a	33,9	± 3,0 ^b			
3000 m	<i>Pedicularis comosa</i> L.	14,2	± 0,6 ^b	56,5	± 1,3 ^e	39,1	± 0,7 ^a	137,3	± 5,2 ^b
	<i>Astragalus nezaketiae</i> A.Duran & Aytaç	7,7	± 0,5 ^{ab}	21,9	± 0,1 ^{bc}	65,8	± 0,9 ^a		
	<i>Scorzonera sericea</i> DC.	4,6	± 0,2 ^{ab}	29,2	± 2,1 ^{cde}	65,0	± 0,7 ^a		
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	57,4	± 4,2 ^c	114,2	± 8,1 ^f	307,5	± 33,2 ^b		
	<i>Anthemis cretica</i> L.	6,9	± 0,1 ^{ab}	14,2	± 0,4 ^{ab}	21,0	± 1,3 ^a		
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	5,9	± 0,9 ^{ab}	39,3	± 1,5 ^e	59,0	± 0,5 ^a		
	<i>Hedysarum erythroleucum</i> Boiss.	10,7	± 4,4 ^{ab}	5,4	± 0,1 ^a	25,2	± 0,8 ^a		
<i>Turanecio hypochionaeus</i> (Boiss.) Hamzaoğlu	3,5	± 0,1 ^a	34,7	± 0,2 ^{de}	66,2	± 4,1 ^a			

Tablo 2. Farklı rakımlarda yetişen bitki ve topraklarda Cd konsantrasyonu ($\mu\text{g/g}$ kuru ağırlık, * $p<0.05$; ** $p<0.01$; *** $p<0.001$ anlamlılık).

Yükseklik	Bitki türü	Çiçek		Yaprak			Kök		Toprak	
1500 m	<i>Alcea calvertii</i> (Boiss) Boiss.	0,03	±	0,00 ^{ab}	0,05	±	0,01 ^a	0,08	±	0,00 ^a
	<i>Glaucium leiocarpum</i> Boiss.	0,05	±	0,00 ^b	0,76	±	0,37 ^b	0,46	±	0,01 ^b
	<i>Astragalus ornithopodioides</i> Lam.	0,02	±	0,00 ^{ab}	0,02	±	0,00 ^a	0,07	±	0,00 ^a
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	0,02	±	0,00 ^{ab}	0,02	±	0,00 ^a	0,05	±	0,00 ^a
	<i>Linum mucronatum</i> Bertol	0,08	±	0,02 ^c	0,19	±	0,04 ^a	0,18	±	0,00 ^a
	<i>Anchusa leptophylla</i> Roem. & Schult	0,14	±	0,01 ^d	0,44	±	0,05 ^{ab}	0,68	±	0,08 ^c
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	0,01	±	0,00 ^a	0,02	±	0,00 ^a	0,06	±	0,00 ^a
2000 m	<i>Tanacetum mucroniferum</i> Hub. Mor. Et Grierson	0,08	±	0,00 ^c	0,34	±	0,01 ^g	0,33	±	0,01 ^a
	<i>Hypericum scabrum</i> L.	0,20	±	0,00 ^d	0,11	±	0,00 ^d	0,25	±	0,01 ^a
	<i>Inula oculus-christi</i> L.	0,05	±	0,00 ^{abc}	0,30	±	0,00 ^f	0,34	±	0,01 ^a
	<i>Barbarea auriculata</i> Hausskn. ex Bornm	0,25	±	0,03 ^e	0,52	±	0,01 ^h	0,69	±	0,04 ^b
	<i>Onobrychis cornuta</i> (L.) Desv.	0,06	±	0,00 ^{bc}	0,04	±	0,00 ^b	0,19	±	0,01 ^a
	<i>Globularia trichosantha</i> Fisch. & C.A.Mey	0,37	±	0,01 ^f	0,16	±	0,01 ^e	0,24	±	0,02 ^a
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	0,02	±	0,00 ^{ab}	0,02	±	0,00 ^a	0,27	±	0,12 ^a
<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	0,01	±	0,00 ^a	0,08	±	0,00 ^c	0,20	±	0,01 ^a	
2500 m	<i>Scutellaria orientalis</i> L.	0,38	±	0,03 ^a	0,28	±	0,04 ^b	0,79	±	0,07 ^b
	<i>Lallemantia canescens</i> (L) Fisch. & Mey.	0,26	±	0,01 ^a	0,44	±	0,00 ^b	1,64	±	0,05 ^c
	<i>Coronilla orientalis</i> Miller	0,01	±	0,00 ^a	0,04	±	0,00 ^a	0,17	±	0,01 ^a
	<i>Dianthus orientalis</i> Adams.	3,53	±	1,81 ^b	0,36	±	0,01 ^b	0,24	±	0,00 ^a
	<i>Crepis armena</i> DC	1,04	±	0,04 ^a	4,72	±	0,06	5,27	±	0,14 ^e
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	0,62	±	0,04 ^a	0,44	±	0,00 ^b	1,47	±	0,03 ^c
	<i>Euphorbia petrophila</i> C.A. Meyer	1,04	±	0,04 ^a	0,91	±	0,09 ^c	1,52	±	0,02 ^c
	<i>Anthemis cretica</i> L.	0,81	±	0,02 ^a	1,64	±	0,02 ^d	2,84	±	0,09 ^d
	<i>Papaver fugax</i> Poirret	0,13	±	0,02 ^a	0,14	±	0,00 ^a	0,91	±	0,15 ^b
<i>Aster alpinus</i> L.	0,39	±	0,04 ^a	1,91	±	0,07 ^e	2,99	±	0,17 ^d	
3000 m	<i>Pedicularis comosa</i> L.	0,16	±	0,01 ^{ab}	0,34	±	0,02 ^{cd}	0,51	±	0,02 ^{ab}
	<i>Astragalus nezaketiae</i> A.Duran & Aytaç	0,06	±	0,00 ^a	0,03	±	0,00 ^a	0,23	±	0,00 ^a
	<i>Scorzonera sericea</i> DC.	0,05	±	0,00 ^a	0,25	±	0,01 ^{bc}	0,68	±	0,01 ^{ab}
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	0,06	±	0,00 ^a	0,43	±	0,11 ^d	1,02	±	0,23 ^b
	<i>Anthemis cretica</i> L.	0,27	±	0,01 ^b	0,91	±	0,01 ^e	1,69	±	0,05 ^c
	<i>Papaver fugax</i> Poirret	0,21	±	0,02 ^b	0,10	±	0,01 ^{ab}	2,60	±	0,05 ^d
	<i>Hedysarum erythroleucum</i> Boiss.	0,22	±	0,10 ^b	0,07	±	0,00 ^{ab}	0,41	±	0,01 ^a
<i>Turanecio hypochionaeus</i> (Boiss.) Hamzaoğlu	0,99	±	0,04 ^c	5,76	±	0,11 ^f	5,39	±	0,41 ^e	

Tablo 3. Farklı rakımlarda yetişen bitki ve topraklarda Co konsantrasyonu ($\mu\text{g/g}$ kuru ağırlık, * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$ anlamlılık).

Yükseklik	Bitki türü	Çiçek			Yaprak			Kök		Toprak	
1500 m	<i>Alcea calvertii</i> (Boiss) Boiss.	1,2	±	0,0 ^a	1,3	±	0,1 ^{ab}	10,2	±	1,1 ^c	52,1 ± 3,9 ^c
	<i>Glaucium leiocarpum</i> Boiss.	1,3	±	0,1 ^a	0,7	±	0,1 ^a	2,4	±	0,4 ^a	
	<i>Astragalus ornithopodioides</i> Lam.	1,8	±	0,2 ^a	3,3	±	0,5 ^c	16,9	±	1,8 ^d	
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	1,0	±	0,1 ^a	1,8	±	0,3 ^b	2,3	±	0,1 ^a	
	<i>Linum mucronatum</i> Bertol	11,5	±	0,6 ^c	2,7	±	0,2 ^c	3,5	±	0,1 ^a	
	<i>Anchusa leptophylla</i> Roem. & Schult	0,8	±	0,0 ^a	1,5	±	0,2 ^{ab}	6,3	±	0,6 ^b	
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	5,1	±	0,9 ^b	6,2	±	0,2 ^d	2,5	±	0,3 ^a	
2000 m	<i>Tanacetum mucroniferum</i> Hub. Mor. Et Grierson	0,5	±	0,0 ^a	0,6	±	0,1 ^a	5,0	±	0,3 ^{bc}	29,4 ± 1,6 ^b
	<i>Hypericum scabrum</i> L.	1,0	±	0,1 ^{ab}	0,5	±	0,0 ^a	1,8	±	0,2 ^a	
	<i>Inula oculus-christi</i> L.	0,7	±	0,0 ^a	2,1	±	0,0 ^b	6,9	±	0,5 ^c	
	<i>Barbarea auriculata</i> Hausskn. ex Bornm	0,6	±	0,1 ^a	3,6	±	0,3 ^c	10,3	±	1,4 ^d	
	<i>Onobrychis cornuta</i> (L.) Desv.	1,5	±	0,1 ^{bc}	0,6	±	0,0 ^a	7,5	±	1,2 ^c	
	<i>Globularia trichosantha</i> Fisch. & C.A.Mey	19,4	±	0,3 ^d	6,9	±	0,4 ^d	7,3	±	0,8 ^c	
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	0,8	±	0,2 ^a	0,6	±	0,1 ^a	1,4	±	0,3 ^a	
<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	1,7	±	0,2 ^c	3,3	±	0,1 ^c	3,9	±	0,2 ^b		
2500 m	<i>Scutellaria orientalis</i> L.	3,8	±	0,4 ^b	1,8	±	0,3 ^c	3,3	±	0,4 ^{cd}	16,3 ± 0,6 ^a
	<i>Lallemantia canescens</i> (L) Fisch. & Mey.	0,6	±	0,1 ^a	0,4	±	0,0 ^{ab}	1,2	±	0,1 ^a	
	<i>Coronilla orientalis</i> Miller	0,3	±	0,0 ^a	0,6	±	0,0 ^{ab}	3,6	±	0,6 ^{cd}	
	<i>Dianthus orientalis</i> Adams.	0,3	±	0,0 ^a	0,2	±	0,0 ^a	1,6	±	0,1 ^a	
	<i>Crepis armena</i> DC	5,4	±	0,2 ^b	9,6	±	0,7 ^d	4,1	±	0,2 ^d	
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	1,0	±	0,1 ^a	0,5	±	0,0 ^{ab}	2,8	±	0,6 ^{bc}	
	<i>Euphorbia petrophila</i> C.A. Meyer	4,0	±	0,3 ^b	0,5	±	0,0 ^{ab}	0,9	±	0,0 ^a	
	<i>Anthemis cretica</i> L.	1,4	±	0,0 ^a	0,8	±	0,0 ^{ab}	2,8	±	0,2 ^{bc}	
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	1,9	±	0,1 ^a	1,4	±	0,1 ^{bc}	1,9	±	0,1 ^{ab}	
<i>Aster alpinus</i> L.	1,5	±	0,3 ^a	1,3	±	0,1 ^{bc}	4,2	±	0,4 ^d		
3000 m	<i>Pedicularis comosa</i> L.	0,8	±	0,1 ^c	1,6	±	0,3 ^c	1,2	±	0,1 ^{ab}	10,1 ± 0,3 ^a
	<i>Astragalus nezaketiae</i> A.Duran & Aytaç	0,4	±	0,0 ^{ab}	0,1	±	0,0 ^a	1,5	±	0,0 ^b	
	<i>Scorzonera sericea</i> DC.	0,2	±	0,0 ^a	0,9	±	0,1 ^b	0,9	±	0,2 ^{ab}	
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	0,8	±	0,1 ^c	0,2	±	0,0 ^a	5,0	±	0,2 ^d	
	<i>Anthemis cretica</i> L.	0,9	±	0,0 ^c	1,5	±	0,0 ^c	2,5	±	0,2 ^c	
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	0,5	±	0,0 ^{abc}	1,0	±	0,0 ^b	0,7	±	0,0 ^a	
	<i>Hedysarum erythroleucum</i> Boiss.	0,2	±	0,0 ^a	0,3	±	0,0 ^a	2,2	±	0,3 ^c	
<i>Turanecio hypochionaeus</i> (Boiss.) Hamzaoğlu	0,3	±	0,0 ^a	0,9	±	0,0 ^b	2,3	±	0,3 ^c		

Tablo 4. Farklı rakımlarda yetişen bitki ve topraklarda Cr konsantrasyonu ($\mu\text{g/g}$ kuru ağırlık, * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$ anlamlılık).

Yükseklik	Bitki türü	Çiçek			Yaprak			Kök			Toprak		
1500 m	<i>Alcea calvertii</i> (Boiss) Boiss.	4,3	±	0,1 ^a	5,3	±	0,3 ^{ab}	46,4	±	5,6 ^c	326,4	±	23,7 ^d
	<i>Glaucium leiocarpum</i> Boiss.	10,4	±	1,6 ^b	3,6	±	0,7 ^a	11,3	±	1,8 ^a			
	<i>Astragalus ornithopodioides</i> Lam.	13,4	±	1,7 ^b	20,9	±	3,8 ^d	99,6	±	13,0 ^d			
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	4,7	±	0,6 ^a	12,7	±	2,1 ^c	12,6	±	0,7 ^a			
	<i>Linum mucronatum</i> Bertol	56,9	±	3,2 ^c	10,3	±	1,0 ^{bc}	13,7	±	0,5 ^a			
	<i>Anchusa leptophylla</i> Roem. & Schult	4,7	±	0,2 ^a	6,1	±	0,3 ^{ab}	31,8	±	3,2 ^b			
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	3,3	±	1,1 ^a	3,4	±	0,3 ^a	12,0	±	1,2 ^a			
2000 m	<i>Tanacetum mucroniferum</i> Hub. Mor. Et Grierson	3,4	±	0,2 ^a	3,8	±	0,5 ^a	40,2	±	2,2 ^c	230,3	±	12,2 ^c
	<i>Hypericum scabrum</i> L.	4,3	±	0,0 ^a	2,2	±	0,1 ^a	12,6	±	1,7 ^{ab}			
	<i>Inula oculus-christi</i> L.	3,0	±	0,3 ^a	12,8	±	1,1 ^b	43,6	±	3,4 ^c			
	<i>Barbarea auriculata</i> Hausskn. ex Bornm	3,7	±	0,5 ^a	21,7	±	1,9 ^c	63,5	±	9,4 ^d			
	<i>Onobrychis cornuta</i> (L.) Desv.	11,0	±	0,9 ^a	3,8	±	0,1 ^a	53,5	±	8,9 ^{cd}			
	<i>Globularia trichosantha</i> Fisch. & C.A.Mey	155,1	±	6,4 ^b	47,0	±	2,5 ^d	50,2	±	5,4 ^{cd}			
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	3,3	±	0,2 ^a	3,8	±	0,7 ^a	7,7	±	1,1 ^a			
<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	2,5	±	0,2 ^a	6,4	±	0,5 ^a	24,7	±	1,6 ^b				
2500 m	<i>Scutellaria orientalis</i> L.	21,9	±	1,9 ^b	11,6	±	2,2 ^c	20,8	±	2,0 ^{de}	96,6	±	5,3 ^b
	<i>Lallemantia canescens</i> (L) Fisch. & Mey.	3,8	±	0,2 ^a	3,4	±	0,3 ^{ab}	7,6	±	0,7 ^{ab}			
	<i>Coronilla orientalis</i> Miller	1,5	±	0,0 ^a	4,7	±	0,6 ^{abc}	23,3	±	3,6 ^{de}			
	<i>Dianthus orientalis</i> Adams.	1,8	±	0,8 ^a	1,1	±	0,0 ^a	11,7	±	0,7 ^{abc}			
	<i>Crepis armena</i> DC	33,7	±	1,3 ^c	64,6	±	4,9 ^d	23,7	±	1,3 ^{de}			
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	6,5	±	0,9 ^a	3,4	±	0,1 ^{ab}	14,8	±	2,5 ^{bcd}			
	<i>Euphorbia petrophila</i> C.A. Meyer	20,8	±	1,2 ^b	3,9	±	0,3 ^{ab}	3,9	±	0,1 ^a			
	<i>Anthemis cretica</i> L.	9,4	±	0,2 ^a	4,8	±	0,2 ^{abc}	16,8	±	3,2 ^{cd}			
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	9,8	±	0,5 ^a	9,3	±	0,8 ^{bc}	29,6	±	4,0 ^e			
<i>Aster alpinus</i> L.	8,9	±	1,5 ^a	6,6	±	0,8 ^{abc}	24,5	±	2,2 ^{de}				
3000 m	<i>Pedicularis comosa</i> L.	4,6	±	0,3 ^c	9,8	±	2,0 ^c	6,3	±	0,8 ^a	54,6	±	2,1 ^a
	<i>Astragalus nezaketiae</i> A.Duran & Aytac	2,9	±	0,2 ^{abc}	1,2	±	0,1 ^a	11,5	±	0,3 ^b			
	<i>Scorzonera sericea</i> DC.	1,6	±	0,0 ^{ab}	5,8	±	0,7 ^b	5,7	±	1,0 ^a			
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	5,0	±	0,7 ^c	13,4	±	0,4 ^d	30,0	±	0,6 ^d			
	<i>Anthemis cretica</i> L.	7,1	±	0,2 ^d	12,1	±	0,2 ^d	17,0	±	1,5 ^c			
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	3,1	±	0,2 ^{abc}	6,5	±	0,2 ^b	4,1	±	0,1 ^a			
	<i>Hedysarum erythroleucum</i> Boiss.	1,0	±	0,0 ^a	1,4	±	0,1 ^a	12,8	±	2,0 ^b			
<i>Turanecio hypochionaeus</i> (Boiss.) Hamzaoğlu	3,7	±	1,0 ^{bc}	8,1	±	1,0 ^{bc}	12,0	±	1,4 ^b				

Tablo 5. Farklı rakımlarda yetişen bitki ve topraklarda Pb konsantrasyonu ($\mu\text{g/g}$ kuru ağırlık, * $p<0.05$; ** $p<0.01$; *** $p<0.001$ anlamlılık).

Yükseklik	Bitki türü	Çiçek			Yaprak			Kök			Toprak		
1500 m	<i>Alcea calvertii</i> (Boiss) Boiss.	0,2	±	0,0 ^a	0,3	±	0,0 ^a	0,8	±	0,1 ^a	14,7	±	0,8 ^a
	<i>Glaucium leiocarpum</i> Boiss.	0,3	±	0,0 ^a	0,8	±	0,4 ^a	0,8	±	0,1 ^a			
	<i>Astragalus ornithopodioides</i> Lam.	0,4	±	0,0 ^a	0,9	±	0,1 ^a	2,4	±	0,2 ^a			
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	4,1	±	0,7 ^{ab}	1,1	±	0,1 ^a	1,3	±	0,1 ^a			
	<i>Linum mucronatum</i> Bertol	6,2	±	0,8 ^{ab}	2,7	±	0,7 ^b	1,0	±	0,0 ^a			
	<i>Anchusa leptophylla</i> Roem. & Schult	8,3	±	3,1 ^b	1,4	±	0,1 ^a	6,6	±	2,6 ^b			
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	4,4	±	1,2 ^{ab}	1,1	±	0,1 ^a	2,8	±	0,6 ^a			
2000 m	<i>Tanacetum mucroniferum</i> Hub. Mor. Et Grierson	0,5	±	0,0 ^a	0,4	±	0,0 ^a	3,1	±	0,2 ^a	27,9	±	0,7 ^a
	<i>Hypericum scabrum</i> L.	0,7	±	0,1 ^a	0,3	±	0,0 ^a	1,2	±	0,1 ^a			
	<i>Inula oculus-christi</i> L.	0,2	±	0,0 ^a	0,8	±	0,0 ^a	3,2	±	0,2 ^a			
	<i>Barbarea auriculata</i> Hausskn. ex Bornm	0,4	±	0,1 ^a	2,8	±	0,3 ^a	8,4	±	1,0 ^b			
	<i>Onobrychis cornuta</i> (L.) Desv.	0,8	±	0,1 ^a	0,3	±	0,0 ^a	3,2	±	0,5 ^a			
	<i>Globularia trichosantha</i> Fisch. & C.A.Mey	8,9	±	0,2 ^a	3,5	±	0,2 ^a	5,8	±	0,9 ^{ab}			
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	20,3	±	8,0 ^b	2,9	±	0,3 ^a	5,5	±	2,4 ^{ab}			
<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	5,2	±	0,4 ^a	8,6	±	2,3 ^b	2,3	±	0,1 ^a				
2500 m	<i>Scutellaria orientalis</i> L.	20,9	±	2,1 ^a	8,7	±	2,4 ^a	20,4	±	1,9 ^c	204,2	±	19,6 ^c
	<i>Lallemantia canescens</i> (L) Fisch. & Mey.	4,3	±	0,5 ^a	1,6	±	0,1 ^a	5,1	±	0,5 ^a			
	<i>Coronilla orientalis</i> Miller	0,2	±	0,0 ^a	0,4	±	0,0 ^a	2,0	±	0,3 ^a			
	<i>Dianthus orientalis</i> Adams.	44,2	±	22,7 ^b	0,3	±	0,0 ^a	1,6	±	0,1 ^a			
	<i>Crepis armena</i> DC	48,6	±	2,2 ^b	97,0	±	7,1 ^b	40,3	±	2,1 ^d			
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	47,2	±	3,0 ^b	6,6	±	0,4 ^a	69,9	±	2,3 ^c			
	<i>Euphorbia petrophila</i> C.A. Meyer	3,9	±	0,8 ^a	2,1	±	0,1 ^a	2,0	±	0,1 ^a			
	<i>Anthemis cretica</i> L.	15,5	±	0,7 ^a	8,6	±	0,2 ^a	24,8	±	1,8 ^c			
	<i>Papaver fugax</i> Poirret	12,2	±	0,9 ^a	4,3	±	0,1 ^a	13,4	±	3,0 ^b			
<i>Aster alpinus</i> L.	13,3	±	2,9 ^a	10,0	±	1,5 ^a	35,8	±	3,6 ^d				
3000 m	<i>Pedicularis comosa</i> L.	8,3	±	0,7 ^a	14,3	±	1,9 ^d	17,2	±	2,0 ^c	81,6	±	11,9 ^b
	<i>Astragalus nezaketiae</i> A.Duran & Aytaç	2,4	±	0,3 ^a	0,8	±	0,0 ^a	11,6	±	0,2 ^b			
	<i>Scorzonera sericea</i> DC.	0,6	±	0,0 ^a	4,0	±	0,6 ^{bc}	6,3	±	0,1 ^a			
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	3,2	±	0,3 ^a	2,6	±	0,2 ^{ab}	2,8	±	0,2 ^a			
	<i>Anthemis cretica</i> L.	4,1	±	0,2 ^a	4,1	±	0,6 ^{bc}	5,8	±	0,5 ^a			
	<i>Papaver fugax</i> Poirret	14,6	±	4,5 ^b	1,2	±	0,1 ^a	3,5	±	0,2 ^a			
	<i>Hedysarum erythroleucum</i> Boiss.	4,7	±	1,1 ^a	1,2	±	0,0 ^a	2,7	±	0,1 ^a			
<i>Turanecio hypochionaeus</i> (Boiss.) Hamzaoğlu	0,8	±	0,1 ^a	5,1	±	0,2 ^c	21,3	±	2,4 ^d				

Tablo 6. Farklı rakımlarda yetişen bitkilerin BCF (Bioconcentration factor) değerleri.

Yükseklik	Bitki türü	Ba	Cd	Co	Cr	Pb
1500 m	<i>Alcea calvertii</i> (Boiss) Boiss.	1,30	0,27	0,20	0,14	0,05
	<i>Glaucium leiocarpum</i> Boiss.	0,23	1,53	0,05	0,03	0,05
	<i>Astragalus ornithopodioides</i> Lam.	0,19	0,23	0,32	0,31	0,16
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	0,24	0,17	0,04	0,04	0,09
	<i>Linum mucronatum</i> Bertol	0,20	0,60	0,07	0,04	0,07
	<i>Anchusa leptophylla</i> Roem. & Schult	0,28	2,27	0,12	0,10	0,45
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	0,33	0,20	0,05	0,04	0,19
2000 m	<i>Tanacetum mucroniferum</i> Hub. Mor. Et Grierson	0,21	0,62	0,17	0,17	0,11
	<i>Hypericum scabrum</i> L.	0,08	0,47	0,06	0,05	0,04
	<i>Inula oculus-christi</i> L.	0,20	0,64	0,23	0,19	0,11
	<i>Barbarea auriculata</i> Hausskn. ex Bornm	0,48	1,30	0,35	0,28	0,30
	<i>Onobrychis cornuta</i> (L.) Desv.	0,21	0,36	0,26	0,23	0,11
	<i>Globularia trichosantha</i> Fisch. & C.A.Mey	0,21	0,45	0,25	0,22	0,21
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	0,13	0,51	0,05	0,03	0,20
<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	0,22	0,38	0,13	0,11	0,08	
2500 m	<i>Scutellaria orientalis</i> L.	0,38	0,49	0,20	0,22	0,10
	<i>Lallemantia canescens</i> (L) Fisch. & Mey.	0,83	1,03	0,07	0,08	0,02
	<i>Coronilla orientalis</i> Miller	0,18	0,11	0,22	0,24	0,01
	<i>Dianthus orientalis</i> Adams.	0,30	0,15	0,10	0,12	0,01
	<i>Crepis armena</i> DC	0,37	3,29	0,25	0,25	0,20
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	0,48	0,92	0,17	0,15	0,34
	<i>Euphorbia petrophila</i> C.A. Meyer	1,00	0,95	0,06	0,04	0,01
	<i>Anthemis cretica</i> L.	0,21	1,78	0,17	0,17	0,12
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	0,20	0,57	0,12	0,31	0,07
<i>Aster alpinus</i> L.	0,25	1,87	0,26	0,25	0,18	
3000 m	<i>Pedicularis comosa</i> L.	0,28	0,39	0,12	0,12	0,21
	<i>Astragalus nezaketiae</i> A.Duran & Aytaç	0,48	0,18	0,15	0,21	0,14
	<i>Scorzonera sericea</i> DC.	0,47	0,52	0,09	0,10	0,08
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	2,24	0,78	0,50	0,55	0,03
	<i>Anthemis cretica</i> L.	0,15	1,30	0,25	0,31	0,07
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	0,43	2,00	0,07	0,08	0,04
	<i>Hedysarum erythroleucum</i> Boiss.	0,18	0,32	0,22	0,23	0,03
	<i>Turanecio hypochionaeus</i> (Boiss.) Hamzaoğlu	0,48	4,15	0,23	0,22	0,26

4. Sonuçlar ve neriler

Sonuç olarak, bu çalışma ile 4 ayrı yükseklikte yetişen bitkilerde ağır metal birikiminin birbirinden farklı olduğu tespit edilmiştir. Cr ve Co metallерinin rakım arttıca topraktaki miktarının azaldığı, Cd ile Pb metallерinin ise arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte 2500 m yükseklikte yetişen bitkilerde Ba, Cd ve Pb metallерinin konsantrasyonunun 1500 m, 2000 m, 3000 m yükseklikte yetişen bitkilere göre daha yüksek olduğu grlmştir. Özellikle Cd ve Pb metallерinin st kısımlarda yüksek olmasının anakayası kireçtaşı olan bölgelerde çinko kurşun yataklarının olmasından kaynaklanabilmektedir (DPT, 2001; Temur, 1992; Yalçın ve ark, 2004). *Turanecio hypochionaeus* ve *Crepis armena* bitki türlerinin Cd metalini yapraklarında ve köklerinde toprağa göre oldukça fazla biriktirdiği grlmştir. Doğada yetişen bitkilerin sağlık güvenliği açısından incelenmesi, bitkilerde ağır metallерin varlığının ve konsantrasyonunun belirlenmesi ile mümkün olup bu tür çalışmaların belirli periyotlarla yapılması önemlidir. Bununla birlikte bu tür çalışmalar ile biyomonitor ve hiperakmlator bitkilerin tespit edilmesi literatüre önemli ölçüde katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu alışma (TÜBİTAK 1001 Proje No: 120Z388) kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya katkıda bulunmuştur.

ıkar atışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar atışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Aktaş, S., (2019). Determination of some elements in silver industry ore and waste by ICP-OES. *Kütahya Dumlupınar University Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Chemistry Master's Thesis*, 82 p.
- Alloway, B. J., (2007). Heavy metals in soils blackie academic & professional: london, UK. Salonen, V; Korkka-Niemi Kinfluence of parent sediments on the concentration of heavy metals in urban and suburban soils in turku. *Finland. Applied Geochemistry*, 22, 906–918.
- Aradhi, K., Krishna, A. K., Satyanarayanan, M., Pradip, K., and Govil, P. K., (2009). Assessment of heavy metal pollution in water using multivariate statistical techniques in an industrial area: a case study from Patancheru, Medak District, Andhra Pradesh India. *Journal of Hazardous Material*, 167, 336–373.
- Arjouni, M. Y., Bennouna, M. A., El Alaoui El Fels, A., and Romane, M. A., (2015). Assessment of mineral elements and heavy metals in leaves of indigenous cypress of High Atlas Mountains. *Natural Product Research*, 29(8), 764-767.
- Beijer, K., and Jernelöv, A., (1986). General aspects of and specific data on ecological effects of metals. In: *Friberg, L., Nordberg, G.F., Vouk, V. (Eds.), Handbook on the Toxicology of Metals*, 253–268.
- Bing, H., Wu, Y., Zhou, J., Li, R., Luo, J., and Yu, D., (2016). Vegetation and cold trapping modulating elevation-dependent distribution of tracemetals in soils of a High Mountain in eastern tibetan plateau. *Scientific Reports*, 6, 24081 <https://doi.org/10.1038/srep24081>
- Bing, H., Zhou, J., Wu, Y., Luo, X., Xiang, Z., Sun, H., Wang, J., and Zhu, H., (2018). Barrier effects of remote high mountain on atmospheric metal transport in the eastern Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 628–629, 687–696. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.035>
- Blackwell, B. D., and Driscoll, C. T., (2015). Deposition of mercury in forests along a montane elevation gradient. *Environmental Science & Technology*, 49, 5363–5370. <https://doi.org/10.1021/es505928w>
- Boz, D., ve Yılmaz, A., (2020). An Approach to the Planning and Environmental Geology of Erzincan Plain and its Surroundings. *Journal of Geological Engineering*, 44, 225-254.
- Cetin, M., and Jawed, A. A., (2022). Variation of Ba concentrations in some plants grown in Pakistan depending on traffic density. *Biomass Conversion and Biorefnery*.
- Devkota, B., and Schmidt, G. H., (2000). Accumulation of heavy metals in food plants and grasshoppers from the Taigetos Mountains, Greece. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 78, 85–91.
- DPT. VIII. (2001). Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu, Metal Madenler Alt Komisyonu, Kurşun-Çinko-Kadmiyum Çalışma Grubu Raporu, Yn no. DPT: 2628, ÖİK:639.
- Elveren, M., ve Osma, E., (2021). Farklı özellikteki tencerelerde pişirilen sebzelerde element birikiminin araştırılması. *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 732-738.
- Ergün, N., Yolcu, H., ve Özçubukçu, S., (2012). Amanos Dağlarındaki Bazı Tıbbi Bitki Türlerinde Ağır Metal Birikimi. *Biyoloji Bilimleri Araştırma Dergisi*, 5(1), 21-23.
- Ergün, N., Yolcu, H., Karanlık, S., ve Dikkaya, E., (2010). Amanoslar'da (Hatay) Yetişen Bazı Bitki Türlerinde Ağır Metal Birikimi ve Mineral İçerik Üzerine Bir Çalışma. *Biyoloji Bilimleri Araştırma Dergisi*, 3 (2), 121-127.
- Isinkaralar, K., (2022a). The large-scale period of atmospheric trace metal deposition to urban landscape trees as a biomonitor. *Biomass Conversion and Biorefnery*, <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02796-4>
- Isinkaralar, K., (2022b). Temporal Variability of Trace Metal Evidence in *Cupressus arizonica*, *Platanus orientalis*, and *Robinia pseudoacacia* as Pollution-Resistant Species at an Industrial Site. *Water Air Soil Pollution*, 233, 250.
- Karacocuk, T., Sevik, H., Isinkaralar, K., Turkyilmaz, A., ve Cetin, M., (2021). The change of Cr and Mn concentrations in selected plants in Samsun city center depending on traffic density. *Landscape and Ecological Engineering*, 18(1), 75-83 <https://doi.org/10.1007/s11355-021-00483-6>
- Korkmaz, M., ve Alpaslan, Z., (2014). Ergen Dağı (Erzincan--Türkiye)'nin etnobotanik özellikleri. *Bağbahçe Bilim Dergisi*, 1(3), 1-31.
- Ladislav, S., El Mufleh, A., Gérente, C., Chazarenc, F., Andrès, Y., and Béchet, B., (2012). Potential of aquatic macrophytes as bioindicators of heavy metal pollution in urban stormwater runoff. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(2), 877-888.
- Laishram P., and Kshetrimayum K. S., (2019). Evaluation of hydrochemical data using multivariate statistical methods to elucidate heavy metal contamination in shallow aquifers of the Manipur valley in Indo-Myanmar Range. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 337.

- Li, Z., He, Y., Yang, X., Theakstone, W.H., Jia, W., Pu, T., Liu, Q., He, X., Song, B., Zhang, N., Wang, S., and Du, J., (2010). Changes of the hailuogou glacier, mt. Gongga, China, against the background of climate change during the holocene. *Quaternary International*, 218, 166–175. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.09.005>
- Malencic, Dj., Kevrešan, Z., and Popovic M., (2005). Heavy Metals Content in Some Medicinal and Aromatic Wild Growing Plants From the Frushka Gora Mountain. *Annals of Faculty Engineering Hunedoara*, 3(1): 37–40.
- Manteca-Bautista, D., Andrés, V., Pérez-Latorre, H. F., and Noelia, H. T., (2022). Metal accumulation by *Alyssum serpyllifolium* subsp. *malacitanum* Rivas Goday (Brassicaceae) across different petrographic entities in South-Iberian ultramafic massifs: plant-soil relationships and prospects for phytomining. *International Journal of Phytoremediation*, 24(12), 1301-1309. doi:10.1080/15226514.2021.2025206
- Marschner, H., (2016). Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd ed. San Diego (US): Academic Press.
- Munzuroğlu, F. K., ve Zengin, Ö., (2004). Effects of lead (Pb++) and copper (Cu++) on the growth of root, shoot and leaf of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seedlings. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 17, 1-10.
- Nriagu, J. O., and Pacyna, J., (1988). Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soil by trace metals. *Nature*, 333, 134–139.
- Okcu, M., Tozlu, E., Kumlay, A. M., ve Pehlivan, M., (2009). Ağır Metallerin Bitkiler Üzerine Etkileri. *Alinteri*, 17(B): 14-26.
- Okut, N., (2019). Van İlinden Seçilmiş Bazı Tıbbi Bitkilerin Ağır Metal İçerikleri. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(1), 533-544.
- Osma, E., ve Kandemir, A., (2016). Analysing the effect of elements upon some endemic Plants spreading over different habitats. *Feb-Fresenius Environmental Bulletin*, 25(7), 2454-2460.
- Özhatay, N., (2006). Türkiye'nin BTC Boru Hattı Boyunca Önemli Bitki Alanları s. 125-127, BTC şirketi, İstanbul. Pils, G. Flowers of Turkey; a Photo Guide. Friedrich VDV, Linz.
- Patterson, J. B. E., (1971). Metal Toxicities arising from industry. pages. 193-207, In trace elements in soils and crops. MAFF Technical Bull. No. 21 Her Majesty's Stationery Office, London. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2005/05/20050531-6.htm>
- Sahin, I., Akcicek, E., Guner, O., Dogan, Y., and Ugulu, I., (2016). An investigation on determining heavy metal accumulation in plants growing at Kumalar Mountain in Turkey. *EurAsian Journal of BioSciences*, 10, 22-29.
- Sevik, H., Cetin M., Ozel, H. B., Ozel, S., and Cetin I. Z., (2020). Changes in heavy metal accumulation in some edible landscape plants depending on traffic density. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(78). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-8041>
- Temur, S., (1992). Bolkardağı yöresi (Ulukışla/Niğde) çinko kurşun yataklarının jeokimyasal incelemesi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 35, 101-114.
- Wang, X., Luo, J., Yin, R., Yuan, W., Lin, C. J., Sommar, J., Feng, X., Wang, H., and Lin, C., (2017). Using mercury isotopes to understand mercury accumulation in the montane forest floor of the eastern tibetan plateau. *Environmental Science & Technology*, 51, 801–809. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03806>
- Yalçın, M. G., ve Altuncu, S., (2004). İspirtepe (Niğde) Civarı Karbonatlı Çinko-Kurşun Yataklarının Jeolojik Ve Mineralojik Özellikleri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1), 57-65.
- Yavuzer, H., ve Osma, E., (2018). Evaluation of *Salix fragilis* L. (Gevrek Söğüt) as a biomonitor in heavy metal pollution. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology C- Life Sciences and Biotechnology*, 7(2),122-129.
- Zang, F., Chang, Y., Zhao, X., Wang, H., Zhao, C., Nan, Z., Wang, S., and Wu, Y., (2022). Influence of atmospheric trace elements wet deposition on soils and vegetation of Qilian Mountain forests China. *Ecological Indicators*, 141, 109151.
- Zechmeister, H. G., (1995). Correlation Between Altitude and Heavy Metal Deposition in the Alps. *Environmental Pollution*, 89, 73-80.
- Zeng, S., Li, X., Yang, L., and Wang, D., (2023). Understanding heavy metal distribution in timberline vegetations: A case from the Gongga Mountain, eastern Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 874, 162523.

(E)-2,4-di-tert bütül-6-((4-florofenilimino)metil)fenol ve (E)-2,4-di-tert-bütül-6-((3-iyodo-4-metilfenilimino)metil)fenol Bileşikleri için Moleküler Docking ve ADME Çalışmaları

Enis GÜZEL^{1*}, Mustafa MACİT², Metin YAVUZ³

Öz

Başlıkta belirtilen ((E)-2,4-di-tert bütül-6-((4-florofenilimino)metil)fenol (I) ve (E)-2,4-di-tert-bütül-6-((3-iyodo-4-metilfenilimino)metil)fenol (II) Schiff bazlı bileşiklerin hedef protein yapısı olan Kannabinoid Reseptörü 1 (CNR 1) protein yapısı ile Moleküler Docking çalışması yapılmıştır. Ligand yapıları ile hedef protein yapısı birleştirildikten sonra oluşan kovalent bağlar ve kovalent olmayan iyonik bağlar, hidrojen bağları, Van der Waals bağlarının protein yapısının 3-boyutlu (3B) katlanması üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Bunlara ek olarak, ilaç adayı bu iki bileşiğin fizikokimyasal özellikleri, lipofilitesi, farmokinetik özellikleri, sıvı çözünürlükleri, tıbbi kimya ve ilaç benzerliği araştırmaları kuramsal olarak yapılmıştır. Yapılan kuramsal hesaplamalar sonucunda bileşik (I) ve bileşik (II)'nin CNR 1 protein yapısı ile H etkileşimi incelendiğinde aromatik benzen halkasına iyot atomu bağlı olan bileşik (I) protein yapısı alıcı (donör) verici (akseptör) etkileşiminin, benzen halkasına flor bağlı olan bileşik (II)'ye göre daha fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bileşik (I) ve bileşik (II)'nin hedef protein yapısı ile moleküller arası kutuplu yük durumları incelendiğinde, dışarıdan eklenecek yeni moleküle karşı nötr ve kararlı olduğu düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Bağımlılık, ADME, Schiff Bazı, Moleküler Docking

Molecular Docking and ADME Studies for (E)-2,4-di-tert butyl-6-((4-fluorophenylimino)methyl) phenol ve (E)-2,4-di-tert-butyl-6-((3-iodo-4-methylphenylimino)methyl) phenol Compounds

Abstract

Molecular Docking study was performed with Cannabinoid Receptor 1 (CNR1) protein structure, which is the target protein structure of the ((E)-2,4-di-tert butyl-6-((4-fluorophenyl imino)methyl)phenol (I) and (E)-2,4-di-tert-butyl-6-((3-iodo-4-methylphenylimino)methyl)phenol (II) Schiff-based compounds mentioned in the title. The effects of covalent and non-covalent ionic bonds, hydrogen bonds, and Van der Waals bonds on the 3-dimensional (3D) folding of the protein structure are discussed after the ligand structures and the target protein structure are combined. Also, the hydrophobic effects of compound-protein interaction are discussed. In addition, physicochemical properties, lipophilicity, pharmacokinetic properties, liquid solubility, medicinal chemistry and drug similarity studies of these two drug candidate compounds were theoretically investigated. As a result of the theoretical calculations, when the compound (I) and compound (II) of CNR 1 protein structure with the H interaction was examined, it was concluded that the donor-acceptor interaction of the protein structure of compound (I), which has an iodine atom attached to the aromatic benzene ring, was higher than that of compound (II), which has fluorine attached to the benzene ring. When the target protein structure of compound (I) and compound (II) with the intermolecular polar charge states are examined, it is thought to be neutral and stable against the new molecule to be added from outside.

Keywords: Addiction, ADME, Schiff Base, Molecular Docking

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Samsun, Türkiye, enisguzel2@gmail.com

²Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Samsun, Türkiye, mmacit@omu.edu.tr

³Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Samsun, Türkiye, myavuz@omu.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0001-8068-2934>

²<https://orcid.org/0000-0001-6593-4291>

³<https://orcid.org/0000-0002-1262-9135>

1. Giriş

(E)-2,4-di-tert bütül-6-((4-florofenilimino)metil)fenol (I) ve (E)-2,4-di-tert-bütül-6-((3-iyodo-4-metilfenilimino)metil)fenol (II) bileşikleri laboratuvar ortamında sentezlenerek X-ışını kırınım yöntemi kullanılarak başlık bileşiğinin yapısal özellikleri olan geometrik parametreler, hidrojen bağları ve kristali meydana getiren etkileşimler Ebru Ergüzeloğlu'nun yüksek lisans tezinde incelenmiştir (Ergüzeloğlu E, 2019). Schiff bazları, yaygın kullanılan organik bileşiklerin önemli bir sınıfını oluşturur ve analitik, biyolojik ve inorganik kimya dahil olmak üzere birçok alanda çok çeşitli uygulamalara sahiptirler (Emirik ve ark., 2015; Çetinkaya ve ark., 2023). Schiff bazları, anti-inflamatuar (Sathe ve ark., 2011), analjezik (Kajal ve ark., 2013), antimikrobiyal (Venkatesh, 2016), antikonvülsan (Seth ve ark., 2018), antitüberküler (Aboul-Fadl ve ark., 2003), antikanser (Abd-Elzaher ve ark., 2016), antioksidan (Li ve ark., 2006), antelmintik (Bijo ve ark., 2010) gibi geniş bir biyolojik aktivite yelpazesi göstermesi nedeniyle tıp ve ilaç kimyası alanlarında hep ön planda rol almıştır. Organizmada azometin grubuna ait azot atomu, enzimlerin aktif merkezleriyle bir hidrojen bağı oluşumuna dahil olabilir ve böylece normal hücre süreçlerine müdahale edebilir (Vashi ve ark., 2004). Schiff bazları biyolojik aktivitelerinin yanı sıra, katalizör, organik sentezde ara ürün, boya, pigment, polimer stabilizatörü (Dhar ve ark., 1982) ve korozyon önleyici (Elemike, ve ark., 2017) olarak da kullanılır.

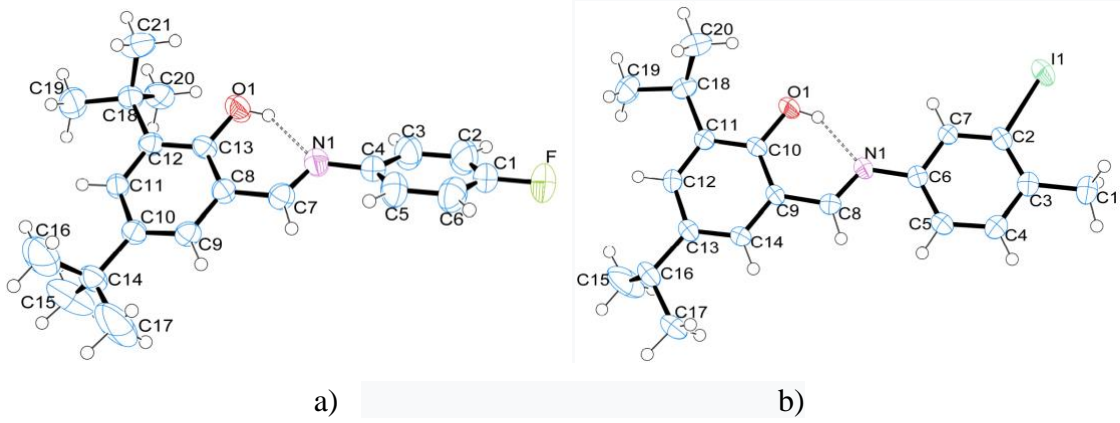
Genel formülleri $R_2C=NR$ şeklinde olan Schiff bazları iminler, indazoller, azometinler, ketiminler ya da anilinler gibi isimlendirmeler ile isimlendirilmektedir. Schiff bazları ağırlıklı olarak üretildikleri başlangıç maddesinin sonuna imin, adlimin ya da ketimin ekleri olarak isimlendirilirler (Dominiak ve ark., 2003). Schiff bazları 3 farklı formda meydana gelebilirler (Tarı ve Açar, 2017). Bu yapılar enol-imin form, keto-amin form ve zwitteriyonik form olarak isimlendirilmektedir. Enol-imin formundaki Schiff bazlı bileşiklerde H atomunun O atomuna bağlı olduğu gözlenmektedir (Kalecik ve ark., 2022; Güzel ve ark., 2021). Keto-amin formundaki Schiff bazlarında H atomu N atomuna bağlı olduğu gözlenmektedir (Temel ve ark., 2017). Zwitteriyonik formdaki Schiff bazlı bileşiklerde H atomu O ve N atomları arasında ortaklaşa kullanıldığı durumda gözlenmektedir (Süleymanoğlu ve ark., 2017; Şahin ve ark., 2015). Bu araştırma makalesinde çalışılan Schiff bazlı bileşikler enol-imin formunda şekillenmişlerdir (Ergüzeloğlu, 2019).

Kannabinoid Reseptör 1 (CNR 1) geni çoğu canlı türünde bulunan bir genidir. CNR 1 (Varadi ve ark., 2022) geni Kannabinoid Reseptör tip 1 (CB₁) kodlayan gen olarak bilinmektedir (Jumper ve ark., 2021). İnsanlarda bulunan CB₁ reseptörü insan vücudunda bulunan bütün sinir (periferi ve merkezi sinir sistemi) sistemi içerisinde yer almaktadır. Genel olarak CB₁ reseptörleri, ağrı, anksiyete, depresyon, travma sonrası stres bozukluğu, postmenopozal osteoporoz, kanser ve nörodejeneratif mücadele inhibisyonu, obezite, diyabet, iç hastalıkları, kardiyometabolik komplikasyonlar, alkol ve

ilaç tedavisi ve terapötik amaçlı kullanılabilirler. Tıbbi olarak kannabinoidler, kemoterapi, spastisite veya nöropatik ağrı sonucu oluşan mide bulantısı tedavisinde kullanılır. Sık görülen yan etkileri baş dönmesi, sedasyon, akıl karışıklığı, kimlik çözülmesi ve kendini iyi hissetme halidir (Allan, 2018).

2. Materyal ve Metot

2.1. (E)-2,4-di-tert bütül-6-((4-florofenilimino)metil)fenol ve (E)-2,4-di-tert-bütül-6-((3-iyodo-4-metilfenilimino)metil)fenol bileşiklerinin ORTEP görünümleri



Şekil 1. a) (E)-2,4-di-tert bütül-6-((4-florofenilimino)metil)fenol ve **b)** (E)-2,4-di-tert-bütül-6-((3-iyodo-4-metilfenilimino)metil)fenol bileşiklerinin %50 olasılıklı ORTEP görünümleri

Şekil 1’de başlıkta bulunan bileşiklerin %50 olasılıklı ORTEP şekilleri verilmiştir. Başlıktaki bileşiklere ait kristal verileri, iyileştirme parametreleri, sentez bilgileri, FT-IR spektrum verileri, UV-Vis spektrum verileri, ¹H-NMR ve ¹³C-NMR spektrum verileri Ebru Ergüzeloğlu’nun yüksek lisans tezinde yayınlanmıştır (Ergüzeloğlu, 2019).

2.2. Moleküler Docking ve ADME Çalışmaları

Moleküler Docking çalışmasında, (E)-2,4-di-tert bütül-6-((4-florofenilimino)metil)fenol (I) ve (E)-2,4-di-tert-bütül-6-((3-iyodo-4-metilfenilimino)metil)fenol (II) bileşikleri için çevrimiçi protein hedef belirleme (Daina ve ark., 2019) uygulamasından yararlanılarak homo sapiens canlılar için hedef protein tahminleri elde edilmiştir. Daha sonra çevrim içi uygulamadan alınan hedef protein listesinde verilen ve bileşikler ile en yüksek etkileşimi verecek olan protein yapısı seçildi. Seçilen bu protein yapısı Protein Data Bank üzerinden indirildi.

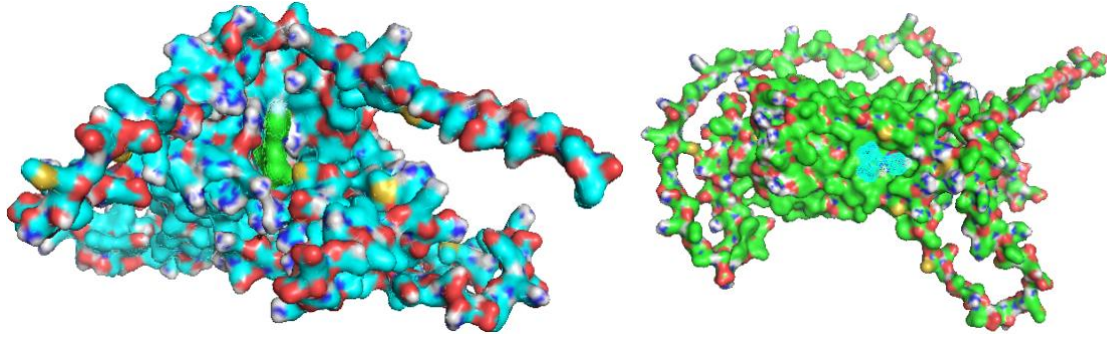
İndirilen protein yapısı AutoDockTools-1.5.7 (Morris ve ark., 2009) uygulamasında açılarak protein yapısında bulunan su molekülleri silindi, polar hidrojenler eklendi ve Kollman yükleri

eklendi. Yapı arıtımı sonucunda elde edilen bileşik yapılarının CIF dosyaları PyMOL (DeLano, 2002) programında açılarak dosya formatı AutoDockTools-1.5.7 programına uygun olacak şekilde ayarlandı. Daha sonra bileşik yapısı ve protein yapısı AutoDockTools-1.5.7 programında çakıştırılarak kuramsal olarak birleşme enerjileri hesaplandı. Protein yapısı içerisinde yer alan amino asitler ile bileşik yapısı arasındaki etkileşimleri göstermek Discovery Studio 2021 Client programından yararlanıldı. Fizikokimyasal özellikleri, lipofilitesi, farmokinetik özellikleri, sıvı çözünürlükleri, tıbbi kimya ve ilaç benzerliği özellikleri araştırmak için çevrimiçi ADME (Daina ve ark., 2017) uygulamasından yararlanıldı.

3. Bulgular ve Tartışma

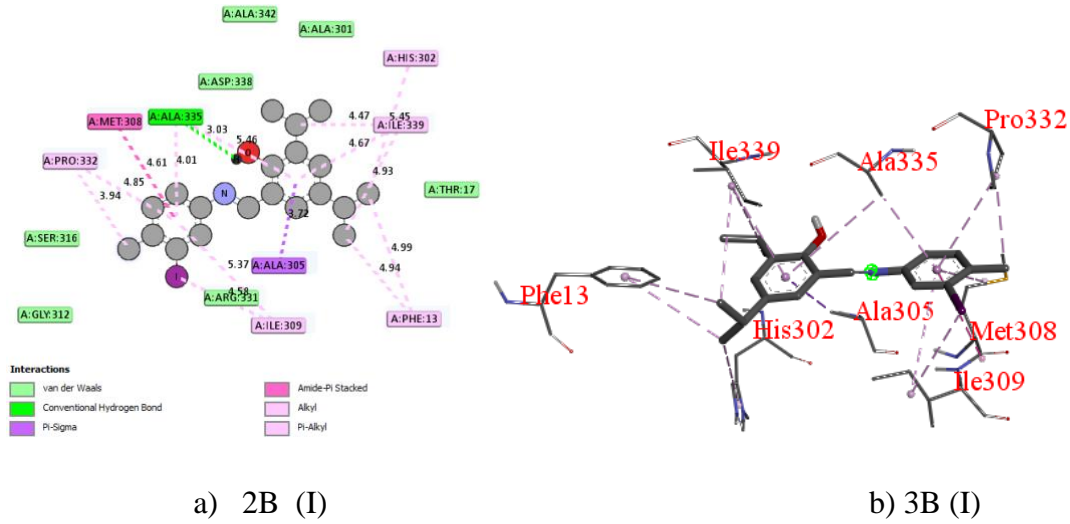
3.1. Moleküler Docking ve İlaç Tasarım Çalışmaları

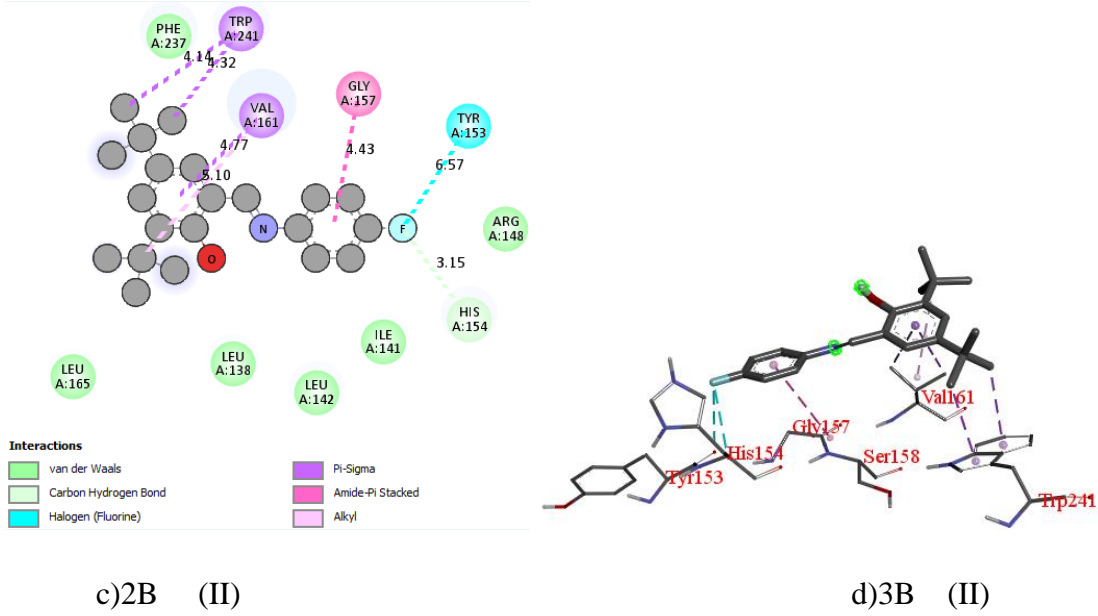
Moleküler Docking çalışmasında, (E)-2,4-di-tert bütül-6-((4-florofenilimino)metil)fenol (I) ve (E)-2,4-di-tert-bütül-6-((3-iyodo-4-metilfenilimino)metil)fenol (II) (Ergüzeloğlu, 2019) bileşik yapıları ile CNR 1 (AF-P21554-F1) (Varadi ve ark, 2022; Jumper ve ark, 2021) etkileşimi araştırıldı. CNR 1 reseptörü, üç hücre dışı ve üç hücre içi halka, bir hücre dışı N-terminal kuyruğu ve bir hücre içi C-terminal kuyruğu ile bağlanan yedi transmembran alanına sahip olan tüm G-protein-bağlı reseptörlerin yapı özelliğini paylaşır (Shao ve ark., 2016; Hua ve ark., 2016). CNR 1 reseptörü, öğrenme, bellek, algısal etkinlikler ve nöronların uyarılmasını zorlaştırmak için presinaptik olarak ifade edilmektedir. Aslında glutamat ve GABA salınımını engellemek için bir nöromodülatör görevi görür (Elphick ve ark., 2001). Reseptör agonistlerinin tekrar tekrar uygulanması, reseptörün içselleştirilmesine ve reseptör protein sinyallenmesinde bir azalmaya neden olabilir (Pertwee ve ark., 2006). CNR 1 protein yapısı beyinde oldukça yoğun bir şekilde bulunmaktadır ve hafıza üzerinde etkisi vardır (Elphick ve ark., 2001). Ayrıca, bu protein yapısı kemirgenlerde hareket, beyincik ve neokorteks üzerinde motor hareketlerin düzenlenmesinde etkisi bulunmaktadır (Pertwee ve ark., 2006). Bunlara ek olarak, CNR 1 protein yapısı hipofiz bezinde, tiroid bezinde, yağ hücreleri, kas hücreleri, karaciğer hücrelerinde, sindirim sisteminde, akciğerlerde ve böbrekte yer alan insan vücudunda oldukça etkili bir protein yapısıdır (Pagotto ve ark., 2006; Porcella ve ark., 2000; Hoon ve ark., 2014). CNR 1 proteini için yapılan yapı belirlenmesine dair deneysel çalışmalar, AlphaFold Protein Yapı Veritabanında AF-P21554-F1 kodu ile UniProt P21554 kimliği ile verilmektedir (Varadi ve ark., 2022; Jumper ve ark., 2021). Bileşik yapıları, X-ışını difraktometresinde incelenmiştir. Bileşik yapıları (I) ve (II) enol-imin formunda olduğu belirlenmiştir (Ergüzeloğlu, 2019). Bileşiklerin CNR 1protein yapısı ile etkileşmesi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. a) Bileşik (I) ve CNR 1 proteininin etkileşim görüntüsü, **b)** Bileşik (II) ve CNR 1 proteininin etkileşim görüntüsü.

Şekil 2’de aynı serinin devamı olan (I) ve (II) olarak isimlendirilen bileşiklerin aynı protein yapısı ile etkileşime girmesine rağmen protein yapısının aktif yüzey bölgelerini değiştirdiği görülmektedir (Bingöl Alpaslan ve ark., 2021). Çalışmalar sonucunda bileşik (I) ile CNR 1 protein arasındaki bağlanma enerjisi -7,4 kcal/mol, alt bağ rmsd 1,547 ve üst bağ rmsd 3,489 olarak hesaplanmıştır. Bileşik (II) ile CNR 1 protein arasındaki bağlanma enerjisi -6,3 kcal/mol, alt bağ rmsd 15,569 ve üst bağ rmsd 18,175 olarak hesaplanmıştır. Şekil 3’de 2-boyutlu olarak gösterilen bileşik (I) ve bileşik (II)’nin hedef protein yapısında bulunan aminoasitler ile yaptığı bağ etkileşimleri gösterilmektedir.





Şekil 3. CNR 1 protein yapısının a) (I) bileşiği ile 2 boyutlu (2B), b) (I) bileşiği ile 3 boyutlu (3B), c) (II) bileşiği ile 2B, d) (II) bileşiği ile 3B bağ etkileşim görüntüsü

Moleküler yerleştirme çalışması sonrasında CNR 1 proteini ile bileşik (I) arasında atomik olmayan hidrojen bağları, Pi-Sigma bağları, Pi İstiflenmiş bağlar, Alkil ve Pi-Alkil bağları oluşmuştur. CNR 1 proteini ile bileşik (II) arasında Van der Waals bağları, Pi-Sigma bağları, karbon-hidrojen bağları, Pi İstiflenmiş bağlar, Alkil bağları ve halojen (Flor) bağlar meydana gelmiştir. CNR 1 proteininde bazı amino asitler ile bileşik (I) ve bileşik (II) arasındaki bağlar Şekil 3'de gösterilmiştir. Bileşiklerdeki atomların amino asitlerle bağlanma noktaları ve bağ uzunlukları Tablo 1'de verilmiştir.

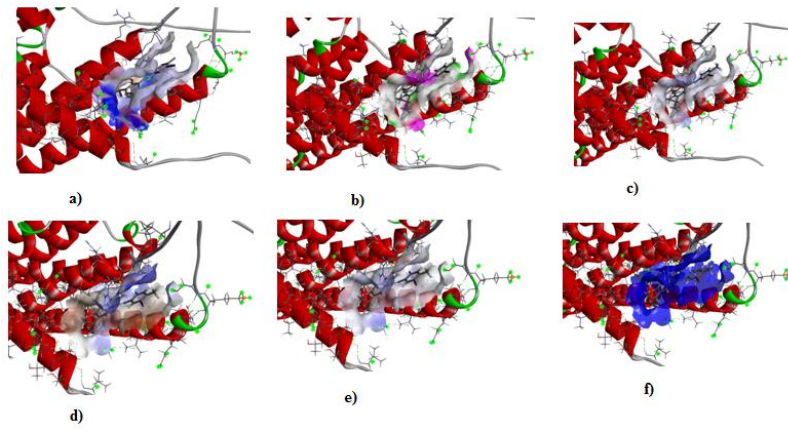
Tablo 1. Bileşik (I) ve bileşik (II)'nin CNR 1 protein yapısı ile yapmış olduğu bağlar türleri ve uzunlukları

(I)			
Etkileşimler			
Aminoasit	Atom	Bağ uzunluğu (Å)	Bağ Türü
PRO A332	F	3,94	Alkil
PRO A332	Benzen merkezi	4,85	Pi-Alkil
ILE A 309	I	4,58	Alkil
ILE A 309	Benzen merkezi	5,38	Pi-Alkil
ILE A 308	Benzen merkezi	4,61	İstiflenmiş Pi
ALA A 335	H	3,03	Atomik olmayan H
ALA A 335	Benzen merkezi	4,01	Pi-Alkil
ALA A 335	Benzen merkezi	5,46	Pi-Alkil
ILE A 339	C	4,47	Alkil
ILE A 339	Benzen merkezi	4,67	Pi-Alkil
ILE A 339	C	4,93	Alkil
HIS A 332	C	5,45	Alkil
PHE A 13	C	4,94	Alkil
PHE A 13	C	4,99	Alkil
ALA A 305	Benzen merkezi	3,72	Pi-Sigma

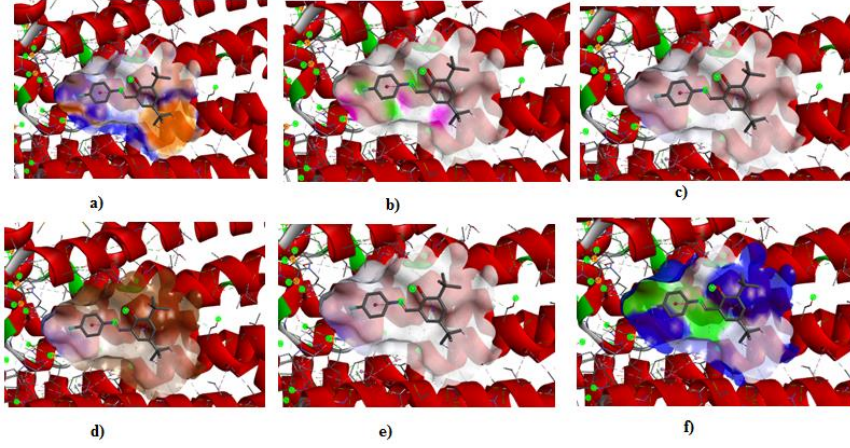
(II)

Etkileşimler			
Aminoasit	Atom	Bağ uzunluğu (Å)	Bağ Türü
TYR A 153	F	3,49	Halojen (Flor)
HIS A 154	F	3,54	C-H
GLY A 157	Benzen merkezi	4,43	İstiflenmiş Pi
VAL A 161	Benzen merkezi	4,77	Pi-Sigma
VAL A 161	C	5,10	Alkil
TRP A 241	C	4,32	Pi-Sigma
TRP A 241	C	4,14	Pi-Sigma
PHE A 237	-	-	Van der Waals
LEU A 165	-	-	Van der Waals
LEU A 138	-	-	Van der Waals
LEU A 142	-	-	Van der Waals
ILE A 141	-	-	Van der Waals
ARG A 148	-	-	Van der Waals

İncelenen bileşik yapılarının CNR 1 protein yapısı ile yapmış olduğu alkil bağları bileşik (I) için Prolin A 332, İzolösün A 309, İzolösün A 339, Histidin A 332 Fenilalanin A 13 amino asitleri arasında gerçekleşmiş olup bileşik (II) için Valin A 161 aminoasidi arasında meydana gelmiştir. Yapılan bağlara ait hidrojen bağ uzunlukları Tablo 1’de verilmiştir. Bileşik (I) için Prolin A 332, İzolösün A 309, Alanin A 335 ve İzolösün A 339 amino asidi üzerinde Pi-Alkil bağı tespit edilmiştir. Bileşik (II)’de Pi-Alkil bağı tespit edilmemiştir. Bileşik (I) ve (II) için istiflenmiş Pi bağı sırasıyla İzolösün A 308 ile Glisin A 157 amino asidi üzerinde tespit edilmiştir. Pi-sigma bağı bileşik (I) için Alanin 305 amino asidi üzerinde tespit edilirken bileşik (II) için Valin A 161 ve Triptofan A 241 amino asitleri üzerinde tespit edilmiştir. Alanin A 335 amino asidi üzerinde atomik olmayan hidrojen bağı bileşik (I) için tespit edilmişken bileşik (II) de bu bağı tespit edilmemiştir. Ek olarak, bileşik (II) üzerinde Tirozin A 153 amino asidi için Halojen (Flor) bağı ve Histidin A 154 aminoasidi üzerinde C-H bağı tespit edilmiştir. Yapılan bu bağlara dair bağ uzunlukları Tablo 1’de verilmiştir.



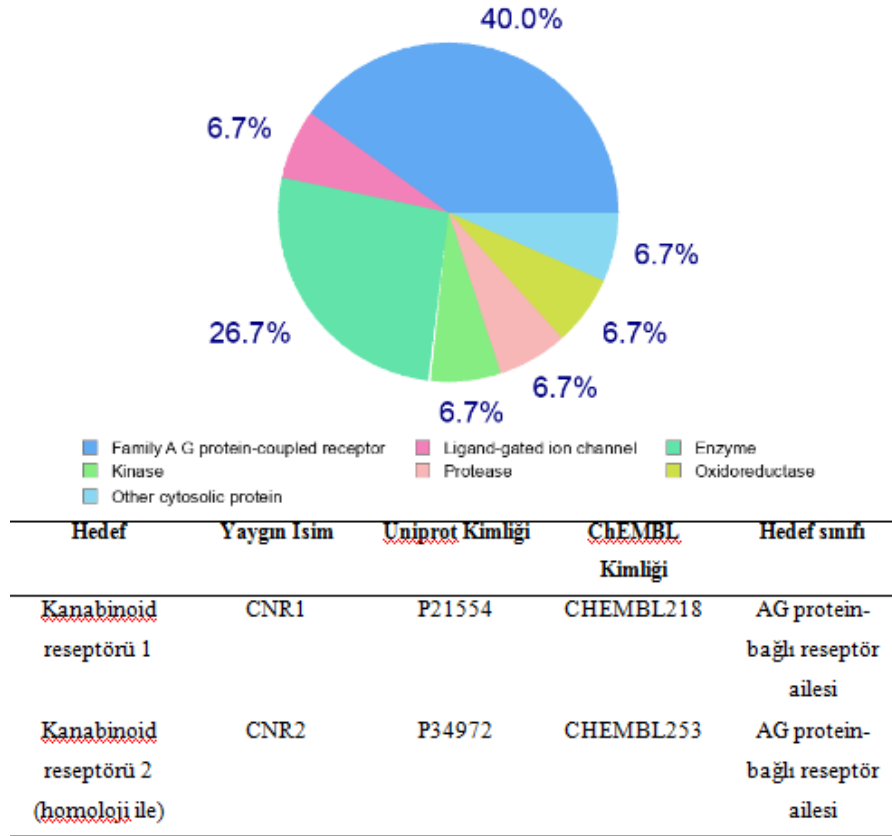
(A)



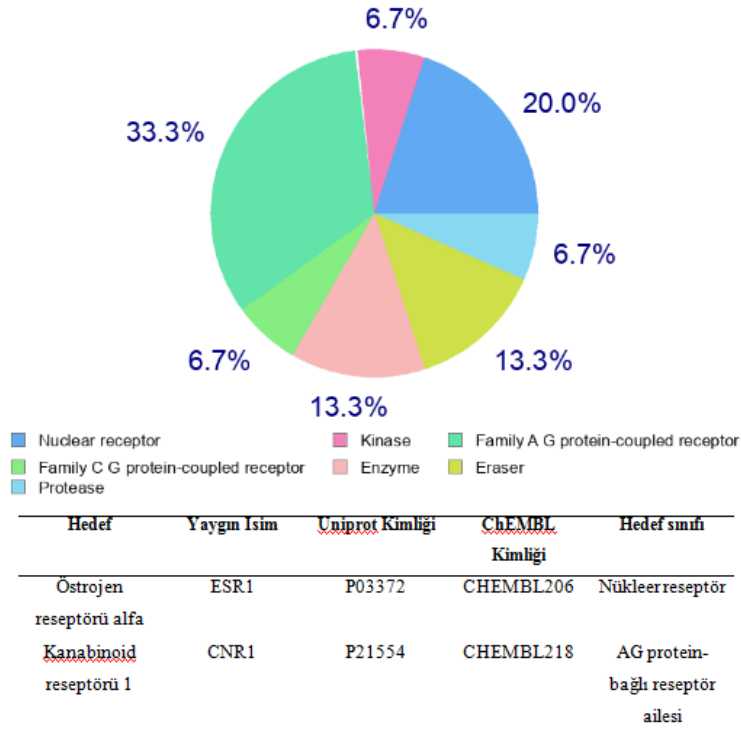
(B)

Şekil 4. (A); Bileşik (I) için a)Aromatik, b) Hidrojen, c) Moleküller arası kutuplu yük, d) Hidrofobik, e) Asidik- Bazik etki ve f) Bileşik ve protein etkileşiminden kaynaklanan çözücü erişilebilir yüzey gösterimi. **(B);** Bileşik (II) için a)Aromatik, b) Hidrojen, c) Hidrofobik, d) Moleküller arası kutuplu yük, e) Asidik- Bazik etki ve f) Bileşik ve protein etkileşiminden kaynaklanan çözücü erişilebilir yüzey gösterimi.

CNR 1 ile bileşik (II) arasındaki aromatik etkileşim incelendiğinde mavi bölgeler protein yapısı ile bileşik (II) arasındaki kenar bölgeleri açık kahverengi ise yüzey bölgesini temsil etmektedir. Ancak, (I) bileşiğe ait aromatik etkileşime bakıldığında bileşik (I) ile yüzey etkileşiminin olmadığı görülmektedir. Hidrojen bağı temsilinde elektron kabul eden bölgeler pembe, elektron veren bölgeler yeşil ve kararlı atomlar ise beyaz renkle gösterilmiştir. Bileşik (I) ve bileşik (II)'nin etkileşim durumları Şekil 3'de verilmiştir. CNR 1 protein yapısı ile bileşik (I) ve bileşik (II) arasında moleküler arası kutuplu yük gösterimleri incelendiğinde kutuplu yük olmadığı beyaz renkle temsil edilmiştir. Hidrofobik etki incelendiğinde kahverengi bölgeler hidrofobinin yüksek, mavi bölgeler ise hidrofobinin düşük olduğunu göstermektedir. Bu durumda bileşik (I) için Hidrofobik etkinin düşük, bileşik (II) için ise hidrofobik etkinin yüksek olduğu Şekil 4'de görülmektedir. Asidik bazik etki incelendiğinde, mavi bölgeler bazik bölgeleri kırmızı bölgeler asidik bölgeleri ve beyaz bölgeler ise nötr bölgeleri temsil etmektedir. Bu durumda bileşik (I)'de kısmen bazik özellikler görülmesine rağmen bileşik (II)'de nötr özellik yaygın olarak görülmektedir (Şekil 4). Çözücü erişilebilir yüzey durumunda mavi bölgeler yüksek etkileşimi yeşil bölgeler ise düşük etkileşimi temsil etmektedir. Bu durumda Şekil 4 incelendiğinde bileşik (I)'in tamamen mavi renkte bir gösterime sahip iken bileşik (II)'de bu etkinin çok yüksek ve çok düşük olduğu bölgelere birlikte sahiptir.



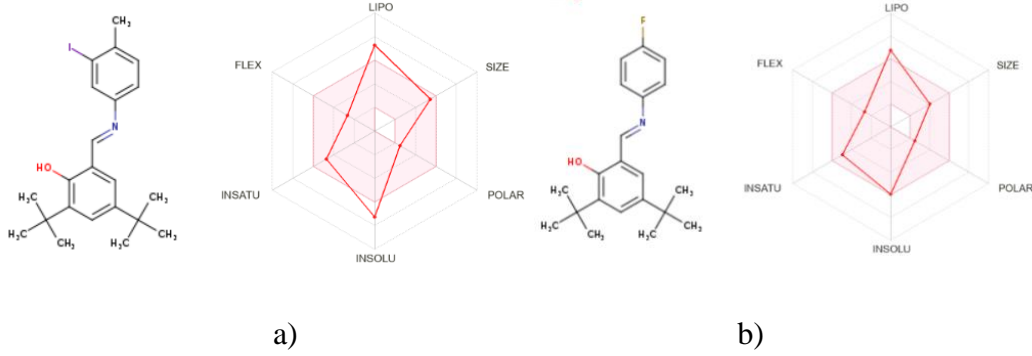
a)



b)

Şekil 5. a) Bileşik (I) için hedef protein tahminleri, b) Bileşik (II) için hedef protein tahminleri.

Bileşik yapıları için hedef protein yapısının belirlenmesi için elde edilen grafik Şekil 5’de verilmiştir. Grafik verileri kullanılarak bileşik yapılarının etkileşim durumu yüksek olan CNR 1 protein yapısı hedef yapı olarak seçilmiştir (Daina ve ark., 2017).



Şekil 6. Oral biyoyararlanım için a) bileşik (I) yapısının fizikokimyasal alan gösterimi, b) bileşik (II) yapısının fizikokimyasal alan gösterimi

Şekil 6’da oral biyoyararlanım için uygun aralık lipofilite (LIPO) için $-0.7 < XLOGP3 < 5.0$, boyut (SIZE) için $150 \text{ g/mol} < MV < 500 \text{ g/mol}$, polarite (POLAR) için $20 \text{ \AA}^2 < TPSA < 130 \text{ \AA}^2$, çözünürlük (INSOLU) için $-6 < \log S(ESOL) < 0$, doyumluk (INSATU) için $0.25 < \text{Fraction Csp3} < 1$, esneklik (FLEX) için $0 < \text{dönebilen bağların sayısı} < 9$ olmalıdır. Bu aralıkta etkileşim gösteren bileşikler ilaç tasarımı için uygundur (Daina ve ark., 2017).

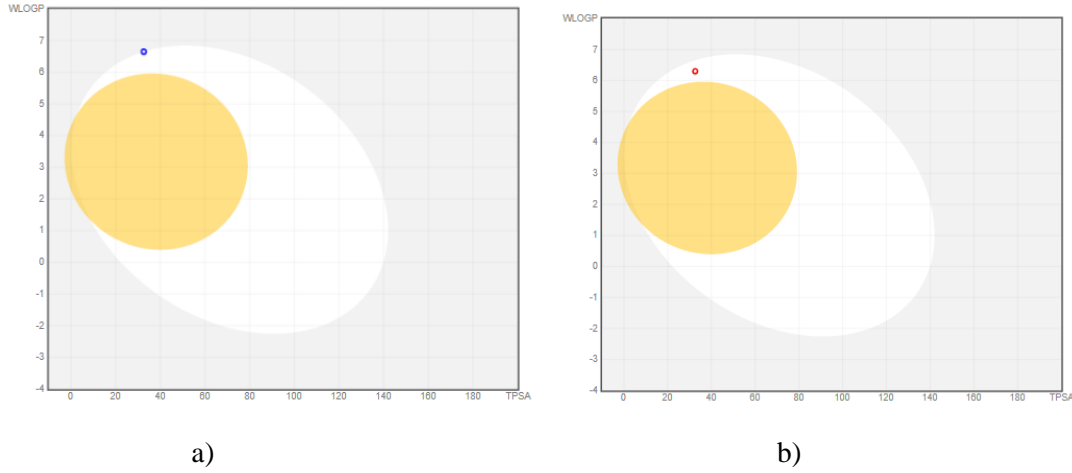
Lipinski’nin yapmış olduğu çalışmalar sonucunda belirlediği beş kuralına göre bir molekülün ilaç adayı olması için moleküler ağırlık (MW) $\leq 500 \text{ g/mol}$, lipofilite katsayısı $\text{LogP} \leq 5$, hidrojen bağı vericisi ≤ 5 , hidrojen bağı alıcısı ≤ 10 , molar kırılma değerleri 4-130 arasında olması gerektiğini söylemektedir (Lipinski ve ark., 2001). $MLOGP > 4.15$ değerinin elde edilmesi ilaç benzerliği hususunda bir ihlalin olmasına neden olmuştur.

Tablo 2. Bileşik (I) ve bileşik (II) için fizikokimyasal özellik, lipofiliklik, sıvı çözünürlüğü, farmokinetik, ilaç benzerlik ve tıbbi kimya verileri.

Fizikokimyasal Özellikler	Bileşik (I)		Bileşik (II)		
	Bileşik (I)	Bileşik (II)	Bileşik (I)	Bileşik (II)	
Formül	C ₂₂ H ₂₈ INO	C ₂₁ H ₂₆ FNO	Giriş $P_{o/w}$ (iLOGP)	4,63	4,05
Moleküler Ağırlık	449,37	327,44	Giriş $P_{o/w}$ (XLOGP3)	7,22	6,31
	g/mol	g/mol	Giriş $P_{o/w}$ (WLOGP)	6,65	6,30
Ağır Atom Sayısı	25	24	Giriş $P_{o/w}$ (MLOGP)	5,45	4,92
Aromatik Ağır atom sayısı	12	12			

Csp3 Kesri	0,41	0,38	Giriş		
Dönebilen bağ sayısı	4	4	$P_{o/w}$ (SILICOS-IT)	7,53	6,45
Hidrojen bağı alıcı sayısı	2	3	Beş tahminin ortalaması	6,30	5,61
Hidrojen bağ verici sayısı	1	1	Sıvı çözünürlüğü		
Molar kırılma	118,38	100,66	Giriş S (ESOL)	-7,27	-5,95
Topolojik Polar Yüzey alanı(TPSA)	32,59 Å ²	32,59 Å ²	Çözünürlük	2,44e-05mg/ml;5,42e-08mol/l	3,66e-04mg/ml;1,12e-06mol/l
Farmokinetik			Sınıf	Az çözünür	Orta derece çözünür
GI emilimi	Yüksek	Yüksek	Giriş S (Ali)	-7,73	-6,78
BBB geçirgen	Hayır	Hayır	Çözünürlük	8,41e-06mg/ml;1,87e-08mol/l	5,39e-05mg/ml;1.65e-07mol/l
P-gp substrat	Evet	Hayır	Sınıf	Az çözünür	Az çözünür
CYP1A2 inhibitörü	Hayır	Hayır	Giriş S (SİLİKOS-IT)	-8,07	-7,11
CYP2C19 inhibitörü	Evet	Evet	Çözünürlük	3,86e-06mg/ml;8,59e-09mol/l	2,56e-05mg/ml;7,82e-08mol/l
CYP2C9 inhibitörü	Hayır	Hayır	Sınıf	Az çözünür	Az çözünür
CYP2D6 inhibitörü	Hayır	Evet	İlaç Benzerliği		
CYP3A4 inhibitörü	Hayır	Hayır	Lipinski	Evet; 1 ihlal	Evet; 1 ihlal
Günlük K_p (cilt geçirgenliği)	-3,91 cm/sn	-3,82 cm/sn	Ghose	MLOGP>4,15	MLOGP>4,15
Tıbbi Kimya			Veber	Hayır; 1 ihlal	Hayır; 1 ihlal
Pan tahlili girişim yapıları(PAINS)	Uyarı yok	Uyarı yok	Egan	WLOGP>5,6	WLOGP>5,6
Yapısal Uyarı (Brenk)	2 uyarı; İmin ve İyota bağlı	1 uyarı; İmine bağlı	Muegge	Hayır; 1 ihlal	Hayır; 1 ihlal
Lead-likeness	Hayır; 2 ihlal	Hayır; 1 ihlal	Biyoyararlanım Puanı	XLOGP3>5	XLOGP3>5
Sentetik erişilebilirlik puanı	MW>350, XLOGP3>3,5	XLOGP3>3,5		0,55	0,55

Yapılan çalışmalar sonucunda bileşik (I) ve bileşik (II) için elde edilen fizikokimyasal özellikler, lipofililik değerler, farmokinetik özellikler, sıvı çözünürlük verileri, tıbbi kimya ve ilaç benzerlik verileri Tablo 2’de detaylı şekilde verilmiştir. Bileşik (I)’in ilaç yapılması durumunda cilt geçirgenliği $-3,91$ cm/s bileşik (II)’nin cilt geçirgenliği $-3,82$ cm/s olarak hesaplanmıştır. İlk defa sentezlenen ve bir seri devamı olan bu iki bileşik bir birine yakın özellikler göstermektedir.



Şekil 7. a) Bileşik (I) için haşlanmış yumurta gösterimi, **b)** Bileşik (II) için haşlanmış yumurta gösterimi

Şekil 7’de gösterilen haşlanmış yumurta şekillerindeki sarı bölge, kan-beyin bariyerinden pasif olarak nüfus ettiği tahmin edilen molekülleri temsil etmektedir. Beyaz bölge, mide-bağırsak sistemi tarafından pasif olarak emilen molekülleri temsil etmektedir. Mavi nokta, P-glikoproteini tarafından merkezi sinir sisteminden dışarı aktığı tahmin edilen molekülleri temsil etmektedir. Kırmızı nokta merkezi sinir sistemi tarafından dışarı akmayacağı düşünülen molekülleri temsil etmektedir. Bileşik (I) için elde edilen haşlanmış yumurtaya bakıldığında mide-bağırsak sistemi tarafından pasif olarak emilen P-glikoproteini tarafından merkezi sinir sisteminden dışarı akacağı anlaşılmaktadır. Bileşik (II) ise mide-bağırsak sistemi tarafından pasif olarak emilen P-glikoproteini tarafından merkezi sinir sisteminden dışarı atılmayacağı anlaşılmaktadır.

Sonuç ve Yorum

(E)-2,4-di-tert bütül-6-((4-florofenilimino)metil)fenol (I) ve (E)-2,4-di-tert-bütül-6-((3-iyodo-4-metilfenilimino)metil)fenol (II) bileşiklerinin etkileşime gireceği hedef protein yapısı incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda bileşik (I) kannabinoid reseptörü 1 (CNR 1) protein yapısı ile yüksek etkileşim ihtimali göstermiştir. Bileşik (II) Östrojen reseptör alfa ile en yüksek etkileşimi göstermesine rağmen incelenen iki yapının karşılaştırılmasının daha iyi yapılması için alt sırada olan

CNR 1 protein yapısı tercih edilmiştir. Yapılan Moleküler Docking çalışması sonucunda bileşik (I) için klasik hidrojen bağ etkileşimi ve hidrofobik etkileşimler belirlenmiştir. Bileşik (II) için ise klasik olmayan hidrojen bağ etkileşimi, hidrofobik etkileşim ve kristal yapıda bulunan flor atomundan dolayı halojen etkileşim belirlenmiştir. Bileşiklerin hedef protein yapısı ile aromatik etkileşimi incelendiğinde bileşik (I)'in hedef protein yapısı ile bir kenar etkileşimi belirlenmiştir. Bu durum bileşik (II) için hem kenar hem de yüzey etkileşimi olarak belirlenmiştir. Bileşiklerin protein yapısı ile H etkileşimi incelendiğinde aromatik benzen halkasına iyot atomu bağlı olan bileşik (I) protein yapısı alıcı (donör) verici (akseptör) etkileşiminin, benzen halkasına flor bağlı olan bileşik (II)'ye göre daha fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bileşik (I) ve bileşik (II)'nin hedef protein yapısı ile moleküller arası kutuplu yük durumları incelendiğinde, dışarıdan eklenecek yeni moleküle karşı nötr ve kararlı olduğu düşünülmektedir. Bileşiklerin hidrofobik (suyu sevmeyen yada suda çözünmeyen) özellikleri incelendiğinde, hidrofobik etkinin bileşik (II)'de bileşik (I)'e göre daha fazla olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bileşiklerin asit-baz kararlılığı incelendiğinde iki bileşikte nötr durumda kaldığı belirlenmiştir. Bileşiklerin çözücü erişilebilirlik şekilleri incelendiğinde bileşik (II)'nin bileşik (I)'e göre daha yüksek bir değere sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Bileşiklerin hedef protein yapısı ile etkileşiminden sonra etkileşime girilen amino asit atomları ve bileşik atomları arasında bağ uzunlukları ve türleri ilgili kısımda verilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda bileşik (II)'nin bileşik (I)'e göre daha çözünür olduğu sonucunda varılmıştır. Yapılan bu çalışmadan yaralanılarak bileşik yapılarının merkezi sinir sistemi hastalıkları, nörodejeneratif hastalıklar şizofreni, travma sonrası stres bozukluğu, anksiyete, depresyon, ilaç ve alkol bağımlılığı, termal ağrı, kimyasal ağrı, mekanik ağrı, obezite ve metabolik hastalıklar, sinir sistemi sorunları, karaciğer hastalıkları, menapoz sonrası kemik yıkımını azaltma, kanser, iştahsızlık gibi sorunlara çözüm bulma noktasında araştırmalar yapılabilir. Ek olarak, antibakteriyel, antifungal, antiviral, tümör, HIV virüsü, organa özgü kanserojenik tahmin araştırmaları yapılabilir.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Abd-Elzaher, M. M., Labib, A. A., Mousa, H. A., Moustafa, S. A., Ali, M. M., and El-Rashedy, A. A. (2016). Synthesis, anticancer activity and molecular docking study of Schiff base complexes containing thiazole moiety. *Beni-suef university journal of basic and applied sciences*, 5(1), 85-96.
- Aboul-Fadl, T., Mohammed, F. A. H., and Hassan, E. A. S. (2003). Synthesis, antitubercular activity and pharmacokinetic studies of some Schiff bases derived from 1-alkylisatin and isonicotinic acid hydrazide (INH). *Archives of pharmacal research*, 26, 778-784.
- Allan, G. M., Finley, C. R., Ton, J., Perry, D., Ramji, J., Crawford, K., ... and Kolber, M. R. (2018). Systematic review of systematic reviews for medical cannabinoids: Pain, nausea and vomiting, spasticity, and harms. *Canadian Family Physician*, 64(2), e78-e94.
- Bijo, M., Vakketh, S. S., and Kumar, S. S. (2010). Synthesis, molecular properties and anthelmintic activity of some Schiff bases of 1, 3, 4 thiadiazole derivatives. *Der pharma chemica*, 2(5), 337-343.
- Bingöl Alpaslan, Y., Sert, Y., Sohtun, W. P., Velusamy, M., and Gökce, H. (2021). Structural, spectral, electronic, and molecular docking investigations on N, N-dimethyl-2-[(1E)-((methylsulfanyl) methanethioyl) amino] imino) methyl] aniline. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 68(6), 971-988.
- Çetinkaya, E. A., Koç, A., Koç, H. K., Karabıyık, H., Karabıyık, H., Üstün, E., and Özdemir, İ. (2023). Synthesis, Characterization and Antimicrobial Properties of Silver Complexes Derived from 5, 6-Dimethylbenzimidazol-2-ylidene. *Polyhedron*, 116383.
- Daina, A., Michielin, O., and Zoete, V. (2017). SwissADME: a free web tool to evaluate pharmacokinetics, drug-likeness and medicinal chemistry friendliness of small molecules. *Scientific reports*, 7(1), 42717.
- Daina, A., Michielin, O., and Zoete, V. (2019). SwissTargetPrediction: updated data and new features for efficient prediction of protein targets of small molecules. *Nucleic acids research*, 47(W1), W357-W364.
- DeLano, W. L. (2002). Pymol: An open-source molecular graphics tool. CCP4 Newsl. *Protein Crystallogr*, 40(1), 82-92.
- Dhar, D. N., and Taploo, C. L. (1982). Schiff-bases and their applications. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 41(8), 501-506.
- Dominiak, P. M., Grech, E., Barr, G., Teat, S., Mallinson, P., and Woźniak, K. (2003). Neutral and ionic hydrogen bonding in Schiff bases. *Chemistry—A European Journal*, 9(4), 963-970
- Elemike, E. E., Onwudiwe, D. C., Nwankwo, H. U., and Hosten, E. C. (2017). Synthesis, crystal structure, electrochemical and anti-corrosion studies of Schiff base derived from o-toluidine and o-chlorobenzaldehyde. *Journal of Molecular Structure*, 1136, 253-262.
- Elphick, M. R., and Egertova, M. (2001). The neurobiology and evolution of cannabinoid signalling. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 356(1407), 381-408.
- Emirik, M., Karaoğlu, K., Serbest, K., Çoruh, U., and Lopez, E. M. V. (2015). Two novel unsymmetrical ferrocene based azines and their complexing abilities towards Cu (II): Spectroscopy, crystal structure, electrochemistry and DFT calculations. *Polyhedron*, 88, 182-189.
- Ergüzeloğlu, E. (2019). *C21H26FNO, C32H46N2O2 ve C22H28INO bileşiklerinin X-ışınları ve bazı spektroskopik yöntemlerle özelliklerinin incelenmesi* Yüksek Lisans Tezi Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun .
- Güzel, E., Demircioğlu, Z., Çiçek, C., Açar, E., and Yavuz, M. (2021). Experimental (XRD, FTIR, UV-Vis, NMR) and theoretical investigations (chemical activity descriptors, NBO, DNA/ECT) of (E)-2-((2-hydroxy-5-methoxybenzylidene) amino)-4-nitrophenol. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 724(1), 58-76.
- Hoon, M., Okawa, H., Della Santina, L., and Wong, R. O. (2014). Functional architecture of the retina: development and disease. *Progress in retinal and eye research*, 42, 44-84.

- Hua, T., Vemuri, K., Pu, M., Qu, L., Han, G. W., Wu, Y., ... and Liu, Z. J. (2016). Crystal structure of the human cannabinoid receptor CB1. *Cell*, 167(3), 750-762.
- Jumper, J., Evans, R., Pritzel, A., Green, T., Figurnov, M., Ronneberger, O., ... and Hassabis, D. (2021). Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. *Nature*, 596(7873), 583-589.
- Kajal, A., Bala, S., Kamboj, S., Sharma, N., and Saini, V. (2013). Schiff bases: a versatile pharmacophore. *Journal of Catalysis*.
- Kalecik, S., Güzel, E., Doğan, O. E., Açar, E., ve Yavuz, M. (2022). (E)-4-bromo-5-floro-2-(((4-(fenilamino) fenil) imino) metil) fenol Bileşiğinin Kimyasal Aktivite ve Spektroskopik Çalışmaları. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(2), 821-840.
- Li, Y., Guo, C., Yang, J., Wei, J., Xu, J., and Cheng, S. (2006). Evaluation of antioxidant properties of pomegranate peel extract in comparison with pomegranate pulp extract. *Food chemistry*, 96(2), 254-260.
- Lipinski, C. A., Lombardo, F., Dominy, B. W., Feeney, P. J. (2001). Experimental and Computational Approaches to Estimate Solubility and Permeability in Drug Discovery and Development Settings. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 1; 46 (1-3): 3-26.
- Morris, G. M., Huey, R., Lindstrom, W., Sanner, M. F., Belew, R. K., Goodsell, D. S. and Olson, A. J. (2009). Autodock4 and AutoDockTools4: automated docking with selective receptor flexibility. *J. Computational Chemistry*, 16: 2785-91.
- Pagotto, U., Marsicano, G., Cota, D., Lutz, B., and Pasquali, R. (2006). The emerging role of the endocannabinoid system in endocrine regulation and energy balance. *Endocrine reviews*, 27(1), 73-100.
- Pertwee, R. G. (2006). The pharmacology of cannabinoid receptors and their ligands: an overview. *International journal of obesity*, 30(1), S13-S18.
- Porcella, A., Maxia, C., Gessa, G. L., and Pani, L. (2000). The human eye expresses high levels of CB1 cannabinoid receptor mRNA and protein. *European Journal of Neuroscience*, 12(3), 1123-1127.
- Şahin, Z. S., Şenöz, H., Tezcan, H., and Büyükgüngör, O. (2015). Synthesis, spectral analysis, structural elucidation and quantum chemical studies of (E)-methyl-4-[(2-phenylhydrazono) methyl] benzoate. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 143, 91-100.
- Sathe, B. S., Jayachandran, E., Jagtap, V. A., and Sreenivasa, G. M. (2011). Anthelmintic activity of newly synthesized moieties of fluoro benzothiazole Schiff's bases. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 2(1), 510-515.
- Seth, A., Sharma, P. A., Tripathi, A., Choubey, P. K., Srivastava, P., Tripathi, P. N., and Shrivastava, S. K. (2018). Design, synthesis, evaluation and molecular modeling studies of some novel N-substituted piperidine-3-carboxylic acid derivatives as potential anticonvulsants. *Medicinal Chemistry Research*, 27, 1206-1225.
- Shao, Z., Yin, J., Chapman, K., Grzemska, M., Clark, L., Wang, J., and Rosenbaum, D. M. (2016). High-resolution crystal structure of the human CB1 cannabinoid receptor. *Nature*, 540(7634), 602-606.
- Süleymanoğlu, N., Ustabaş, R., Direkel, Ş., Alpaslan, Y. B., and Ünver, Y. (2017). 1, 2, 4-triazole derivative with Schiff base; thiol-thione tautomerism, DFT study and antileishmanial activity. *Journal of Molecular Structure*, 1150, 82-87.
- Tarı, G. Ö., and Açar, E. (2017). Synthesis, crystal structure, spectroscopic characterization and theoretical calculations of (Z)-N-(naphthalen-2-yl)-1-(5-nitrothiophen-2-yl) methanimine. *Journal of Molecular Structure*, 1147, 56-68.
- Temel, E., Alaşalvar, C., Eserci, H., and Açar, E. (2017). Experimental (X-ray, IR and UV-vis.) and DFT studies on cocrystallization of two tautomers of a novel Schiff base compound. *Journal of Molecular Structure*, 1128, 5-12.
- Varadi, M., Anyango, S., Deshpande, M., Nair, S., Natassia, C., Yordanova, G., ... and Velankar, S. (2022). AlphaFold Protein Structure Database: massively expanding the structural coverage of protein-sequence space with high-accuracy models. *Nucleic acids research*, 50(D1), D439-D444.
- Vashi, K., and Naik, H. B. (2004). Synthesis of novel Schiff base and azetidinone derivatives and their antibacterial activity. *E-Journal of Chemistry*, 1(5), 272-275.
- Venkatesh, P., and Tiwari, V. S. (2016). Design and synthesis of Quinazolinone, Benzothiazole derivatives bearing guanidinopropanoic acid moiety and their Schiff bases as cytotoxic and antimicrobial agents. *Arabian Journal of Chemistry*, 9, S914-S925.

Karbon Emisyonuna Dayalı Araç Muayene İstasyonu Yer Seçimi: Zonguldak Örneği

Serkan ÖREN^{1*}, Sefa KOCABAŞ²

Öz

Dünyada çevre sorunlarının artmasındaki en önemli nedenlerinden birisi olan hızlı nüfus artışı beraberinde fosil kökenli yakıtların fazla miktarda kullanılmasına ve hava kirliliği başta olmak üzere bir çok çevre sorununa neden olmaktadır. Fosil yakıtların insanlar tarafından bu kadar fazla kullanılması atmosferde ısıyı tutma kapasitesi yüksek olan sera gazlarının birikmesine dolayısıyla küresel ısınma ve iklim değişikliğine neden olmaktadır. Fosil yakıtların en çok kullanıldığı alanların başında ulaşım, ısınma ve enerji sektörleri gelmektedir. Bu çalışmada Zonguldak ili Kilimli ilçesinde araç muayene istasyonuna ilave olarak yapılabilecek ikinci bir istasyonun Çaycuma, Gökçebey veya Devrek ilçesinde planlanması durumunda mevcut karbon salınımını ne oranla azaltabileceği araştırılmıştır. İngiltere Gıda ve Köy İşleri Departmanı (DEFRA) kriterlerine göre yapılan hesaplamalarda, mevcut istasyona bu ilçelerden gidilmesi durumunda 2738 ton eCO₂.yıl⁻¹ değeri hesaplanmış olup yeni istasyonun Devrek'te olması durumunda ve Çaycuma, Devrek ve Gökçebey deki araçların bu istasyona gideceği varsayıldığında 907,3 ton eCO₂.yıl⁻¹, Çaycuma'da olması durumunda 743,5 ton eCO₂.yıl⁻¹ ve Gökçebey'de olması durumunda ise 875 ton eCO₂.yıl⁻¹ seviyelerine düşmesi ön görülmektedir. Ulaşılan sonuçlardan yola çıkarak Zonguldak İli Çaycuma ilçesinde yeni bir muayene istasyonunun yaklaşık 2000 ton eCO₂.yıl⁻¹ karbon salınım miktarı azaltacağı hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: İklim değişikliği, Küresel ısınma, Sera gazı, Tüvtürk, Hava kirliliği

Vehicle Inspection Station Site Selection Based on Carbon Emission: The Example of Zonguldak

Abstract

Rapid population growth, which is one of the most important reasons for the increase in environmental problems in the world, causes the excessive use of fossil fuels and many environmental problems, especially air pollution. The excessive use of fossil fuels by humans causes the accumulation of greenhouse gases with a high capacity to retain heat in the atmosphere, thus causing global warming and climate change. Transportation, heating and energy sectors are the leading areas where fossil fuels are used the most. In this study, it was investigated to what extent the existing carbon emission could be reduced if a second station that could be built in addition to the vehicle inspection station in Zonguldak province's Kilimli district is planned in Çaycuma, Gökçebey or Devrek districts. In the calculations performed according to the criteria of the British Department of Food and Rural Affairs (DEFRA), 2738 tons of eCO₂.year⁻¹ value was calculated if the current station is visited from these districts, and if the new station is in Devrek and it is assumed that the vehicles in Çaycuma, Devrek and Gökçebey will go to this station, 907,3 eCO₂.year⁻¹. It is predicted that it will decrease to tons eCO₂.year⁻¹, if it is in Çaycuma, 743,5 tons eCO₂.year⁻¹, and if it is in Gökçebey, it is 875 tons eCO₂.year⁻¹. Based on the results, it has been calculated that a new inspection station in the Çaycuma district of Zonguldak will reduce the amount of carbon emissions of approximately 2000 tons of eCO₂.year⁻¹.

Keywords: Climate Change, Global warming, Greenhouse Gas, Tuvturk, Air pollution.

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Devrek Meslek Yüksekokulu, Çevre Teknolojisi Bölümü Türkiye, serkan.oren@hotmail.com

²Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü Zonguldak, Türkiye, sefa@beun.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0001-7699-517X>

²<https://orcid.org/0000-0002-8003-8310>

1. Giriş

Avrupa’da 18. yüzyıllardaki sanayinin gelişimi ve bunun akabinde dünyada insan aktivitelerinin artması sonucu atmosfere oldukça fazla miktarda kirletici emisyonlar salınmaya başlamıştır. Uluslararası İklim Değişikliği Konferansı (IPCC) 6. değerlendirme raporunda da belirtildiği üzere 1850-1989 yılları arasındaki atmosfere salınan emisyonların neredeyse yarısı 1990-2019 yılları gibi kısa bir sürede gerçekleşmiştir (IPCC, 2022). Raporda ayrıca 2019 yılında küresel sera gazı emisyonunun neredeyse %79’u sanayi, enerji, ulaşım sektörlerinin birlikte, %22’si ise tarım ve ormancılık gibi kullanımlardan kaynaklı olduğu belirtilmiştir (IPCC, 2022).

Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığının Türkiye’nin 7. Ulusal Bildirimi raporunda Ulaştırma sektörü, 2016 yılında Türkiye’deki toplam enerji tüketiminin %25,6’sını (26,8 MTep) oluşturmaktadır. Bu tüketimin %92,9’u karayolu taşımacılığı ve %5,3’ünden hava taşımacılığıdır. Ulaştırma sektöründeki 2016 yılı sera gazı emisyonlarında en büyük pay %92,4 ile kara yolu taşımacılığından kaynaklanmıştır (ÇŞİDB, 2018).

Geçtiğimiz 30-35 yıldan buyana motorlu kara taşıtlarının sayısında artış gözlenmektedir. 1990 yılında motorlu kara taşıtı 3,8 milyon iken, bu rakam 2023 yılında yaklaşık 26,7 milyona civarına ulaşmıştır. 1990’lı yıllarda 1000 kişiye 66 motorlu kara taşıt düşerken 2023 yılında bu sayı 320’ye yükselmiştir. (TÜİK, 2023).

Türkiye Cumhuriyeti İklim Değişikliği Eylem Planında (2011-2023) ulaştırma sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonlarının kontrol edilmesi amaçlanmış ve hedefler belirtilmiştir. Motorlu kara taşıtları ile ilgili olan hedefler;

- 2023 yılı itibariyle karayollarının yük taşımacılığı payının %60’ın altına, yolcu taşımacılığı payının %72’ye düşürülmesi,
- 2023 yılına kadar “Ulaştırma Ana Planı”nın hazırlanıp uygulanması,
- Kent içi ulaşımında, bireysel araç kullanımından kaynaklı emisyon artış hızının sınırlandırılması,
- Kentlerde sürdürülebilir ulaşım planlama yaklaşımlarının uygulanması için 2023 yılı sonuna kadar kentsel ulaşım ile ilgili gerekli mevzuat, kurumsal yapı ve rehber belgelerinin oluşturulması,
- 2023 yılına kadar alternatif yakıt ve temiz araç kullanımını arttırmaya yönelik yasal düzenlemelerin yapılması ve kapasitenin geliştirilmesi,
- 2023 yılına kadar kentsel ulaşımında alternatif yakıt ve temiz araç kullanımını özendirici yerel tedbirlerin alınması,
- 2023 yılına kadar ulaşımında enerji tüketiminin sınırlandırılması,

Hedefleri eylem planında yerini almıştır (ÇŞİDB, 2012).

2015 yılında Paris'te düzenlenen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi 21. Taraflar konferansında Paris Anlaşması kabul edilmiştir. Bu anlaşma çerçevesinde küresel ölçekte bütün ülkeler sera gazı emisyonlarını azaltmak için taahhütte bulunmayı kabul etmişlerdir. Türkiye Cumhuriyeti 7 Ekim 2021 tarihinde Cumhurbaşkanı kararı ile anlaşmayı onaylamış ve ulusal beyanla birlikte 11 Ekim 2021 tarihinde anlaşma onay belgesi BM sekretaryasına tevdi edilmiştir. 2022 yılı Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansında (COP 27) Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından, 2030 yılına kadar %21'e varan artıştan azaltım hedefi güncellenmiş ve %41 olarak bildirilmiştir. 2030 yılı için yaklaşık 500 milyon ton emisyon azaltımı hedeflendiği belirtilmiştir (<https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa>).

Bu çalışmanın içeriği ve amacına yönelik yapılan genel literatür taraması ve çalışmalar şu şekildedir;

Dönmezçelik ve arkadaşları 2023 yılında yaptıkları çalışmalarında net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda karayolu ve demiryolu taşımacılığında enerji modellemesi çalışmışlar ve içten yanmalı motor teknolojilerinde yeni üretimlerin azaltılması gerektiğini, ulaşım tercihlerinde ise karayolu taşımacılığında çok demiryolu taşımacılığına yönlendirici politikaların, ulaştırmada net sıfır emisyon hedefine ulaşmada katkı sağlayacağını önemini ortaya koymuşlardır (Dönmezçelik ve ark. 2023). Bulut (2022) tarafından 2022 yılında yaptığı çalışmasında 2015-2021 yılları dahil 7 yıllık zaman diliminde Sivas ilinde kara yolu taşımacılığında kaynaklanan karbon ayak izi miktarını belirleyerek küresel ısınmaya etkisini araştırılmış ve 2021 yılında 2015 yılına oranla CO₂ emisyonunda %20 oranında artış olduğunu ön görmüşlerdir (Bulut, 2022). Kılıç ve Önler 2022 yılında yaptıkları çalışmalarında Tekirdağ ilinin Çorlu ilçesindeki şehir içi ulaşımda kullanılan 7 numaralı hattaki toplu taşıma araçlarının 2020 yılındaki karbon ayak izi miktarını Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli IPCC Tier-1 yaklaşımı ile hesaplamışlar ve taşınan her bir yolcu başına 0,276 kilogram CO₂ emisyonu salınımı gerçekleştiğini hesaplamışlardır (Kılıç ve Önder, 2022). Kırbaş ve Kocakulak 2022 yılında yaptıkları araştırmalarında Burdur ili CO₂ emisyon salınımını 1.097,60 bin ton/yıl olarak belirlemişlerdir. Bu miktarın 723,54 ton/ yıl kısmı kapsam 1 ve kapsam 1 de gerçekleşen CO₂ salınımının da %32,41'i ulaşım kaynaklı olduğunu belirtmişlerdir. Ulaşımda ise en yüksek oranda emisyon salınımı dizel taşıtlar tarafından gerçekleştiğini belirtmişlerdir (Kırbaş ve Kocakulak, 2022). Kılıç ve arkadaşları 2021 yılında yaptıkları araştırmalarında Çanakkale ilinde 2015-2018 yılları arasındaki karayolu taşımacılığına bağlı karbon ayak izi değişimlerini incelemişler. Hesaplamalarında IPCC tarafından önerilen Tier 1 ve Tier 2 yaklaşımını kullanmışlar ve Tier 1 yaklaşımında 2018 yılındaki emisyon miktarının 2015 yılına oranla yaklaşık %7 arttığını, Tier 2 yaklaşımında ise 2018 yılındaki CO₂ emisyon miktarının 2015 yılına oranla %7,28 oranında arttığını tespit etmişlerdir (Kılıç ve Ark, 2021). Behçet ve Yakın 2020 yılındaki araştırmalarında Malatya

ilindeki trafik kaynaklı hava kirletici emisyonları incelemişler ve Malatya ilinde kara yolu taşıtı kaynaklı hava kirliliğinin azaltılması için, fosil yakıt yerine alternatif yakıtların kullanılması gerektiğini ve ayrıca kısa mesafelerde ise yürümenin teşvik edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir (Behçet ve Yakın, 2020).

Ülkemizde ve Dünya’da iklim değişikliği ile ilgili açıklanan önlem planlarına paralel olarak motorlu kara taşıtlarının emisyon salınımlarında önem arz etmektedir. Bu çalışma ile vurgulanmak istenen motorlu kara taşıtı zorunlu araç muayenelerini yapmak için kurulan veya kurulacak olan araç muayene istasyonlarının yer seçiminin emisyon salınımlarını azaltmak açısından önemini ortaya koymaktır.

2. Materyal ve Metot

Ülkelerin, kuruluşların ya da bireylerin faaliyetleri sonucunda atmosfere saldıkları ısıyı tutma kapasitesi yüksek sera gazlarının karbondioksit cinsinden karşılığına karbon ayakizi denilmektedir. (Plassmann ve Edwards-Jones, 2010). Karbon ayakizi hesabı doğanın atmosferdeki sera gazlarını dengeleme kapasitesinin ne durumda olduğunu belirlemeye yardımcı olmaktadır.

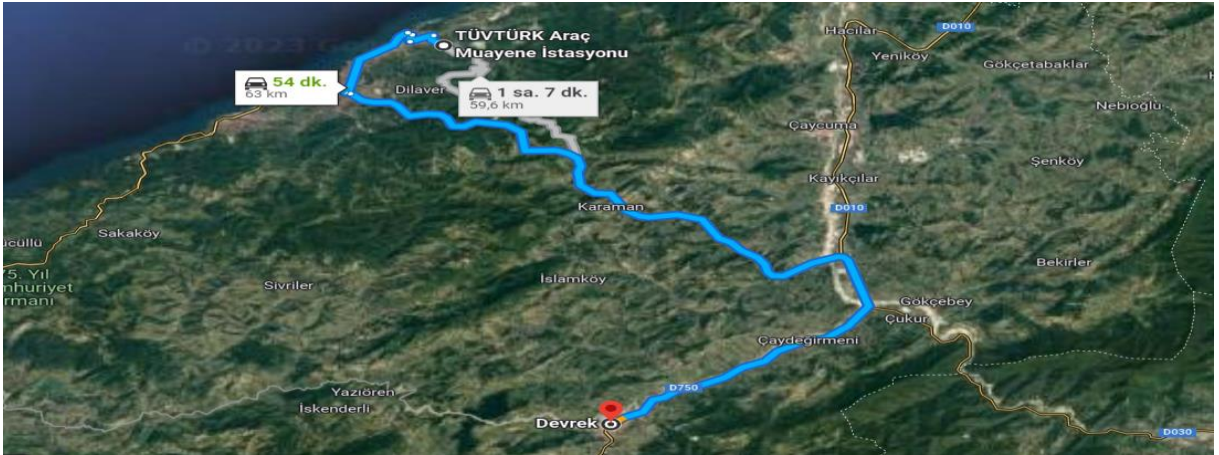
Bu çalışmada Zonguldak ili Devrek, Çaycuma ve Gökçebey ilçelerindeki motorlu kara taşıtlarının taşıt muayeneleri yaptırmak için kat ettikleri mesafede atmosfere saldıkları toplam CO₂ emisyon miktarının belirlenmesi ve Ereğli ilçesi ve Kilimli ilçesindeki mevcut istasyonlara ek yeni bir muayene istasyonunun planlanması durumunda bu istasyonun yer tespiti ile karbon emisyon oranındaki azalmanın etkilerini belirlemek amaçlanmaktadır. 2010 ve 2022 yılları arasında Zonguldak ilinde bulunan araç sayıları Tablo-1’ de gösterilmiştir (TÜİK 2023).

Tablo-1 Zonguldak’ taki Motorlu Kara Taşıtları Sayısı (2010-2022)

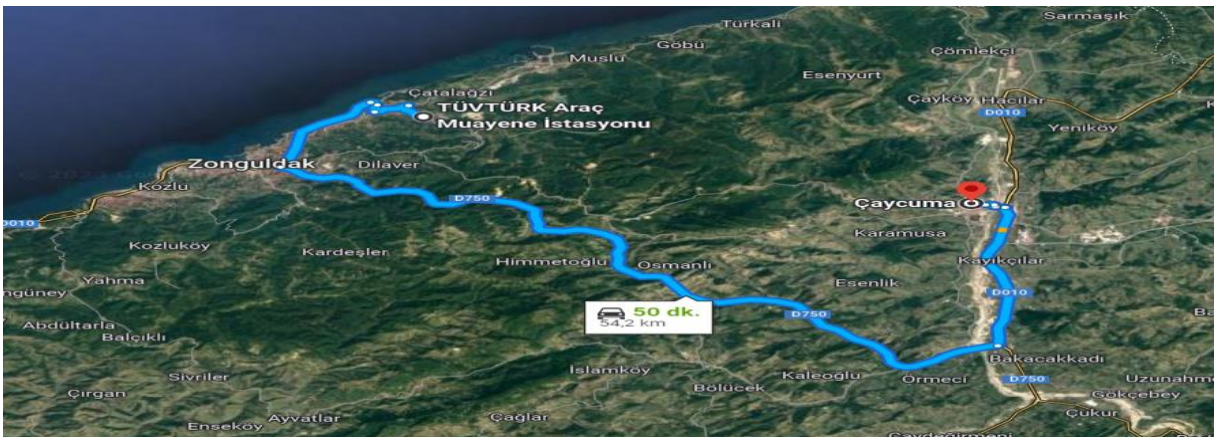
	Toplam	Otomobil	Minibüs	Otobüs	Kamyonet	Kamyon	Motosiklet	Özel amaçlı	Traktör
2010	109.782	61.571	4.684	2.004	19.381	6.195	7.061	356	8.530
2011	115.457	66.217	4.607	2.005	20.260	6.021	7.341	346	8.660
2012	120.911	70.103	4.588	2.127	21.342	6.039	7.657	338	8.717
2013	126.330	74.796	4.631	2.031	21.977	5.904	7.909	327	8.755
2014	131.282	78.677	4.484	1.977	22.682	5.843	8.394	342	8.883
2015	138.114	83.361	4.454	1.969	23.809	6.040	8.991	360	9.130
2016	145.811	88.663	4.501	1.994	25.021	6.211	9.687	379	9.355
2017	152.986	93.843	4.547	1.985	26.112	6.276	10.214	416	9.593
2018	155.064	95.169	4.504	1.899	26.277	6.221	10.850	428	9.716
2019	155.221	94.977	4.484	1.821	26.011	6.137	11.523	453	9.815
2020	159.177	97.374	4.372	1.789	26.057	6.285	12.887	471	9.942
2021	163.071	99.279	4.244	1.756	26.494	6.382	14.253	537	10.126
2022	166.743	100.342	4.178	1.726	26.744	6.500	16.463	573	10.217

Batı Karadeniz Bölgesi'nde bulunan Zonguldak ili, Karadeniz'e batı ve kuzeyden kıyısı olan bir ildir. Zonguldak 3.309 km²'lik yüzölçümüyle Türkiye topraklarının binde altısını oluşturmaktadır. Karadeniz kıyılarından başlayan Zonguldak ili toprakları, kuzeydoğudan Bartın, doğudan Karabük, güneyden Bolu, batıdan Düzce illeriyle çevrilidir. Nüfus yoğunluğu sıralamasında ilk üç sırayı Kdz. Ereğli, Merkez İlçe ve Çaycuma İlçeleri almaktadır. Toplam nüfusu 2021 yılı itibari ile 589.684 kişidir (Zonguldak İli 2021 Yılı Çevre Durum Raporu, 2022).

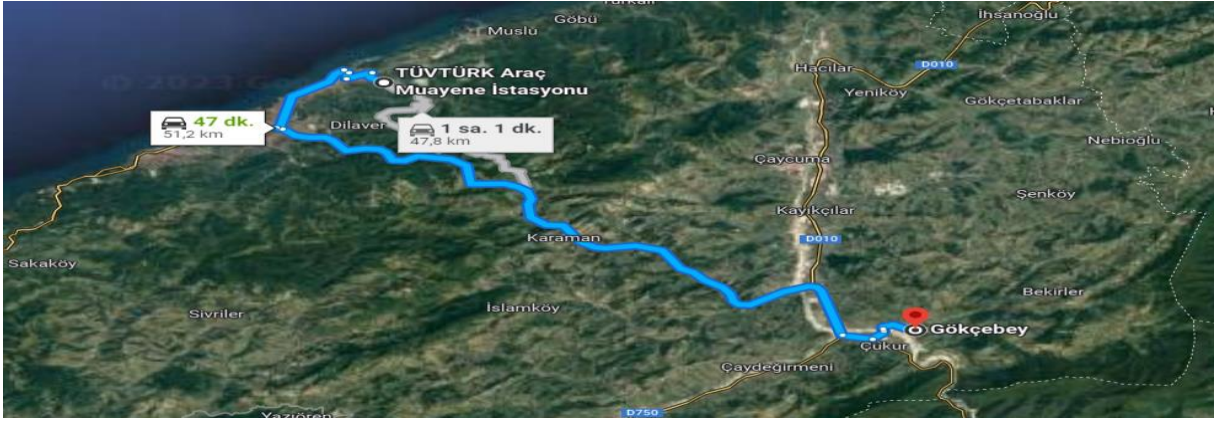
Çalışmada değerlendirilecek olan Devrek, Çaycuma ve Gökçebey ilçelerinin Kilimli ilçesindeki mevcut araç muayene istasyonuna uzaklıkları sırasıyla yaklaşık 63 km, 54 ve 51 km'dir. Alaplı ilçesindeki araçlar karayolu ile yakın olan Ereğli ilçesindeki araç muayene istasyonu kullanmaktadırlar. Bu sebepten ötürü Alaplı ve Ereğli ilçeleri hesaplama dahil edilmemiştir. Kozlu ilçesindeki araçlar ise Merkez ilçeye çok yakın olduğundan Merkez ilçe ile birlikte değerlendirmeye alınmıştır. Çalışmaya konu ilçeler ile Kilimli ilçesindeki araç muayene istasyonu arasındaki mesafeleri gösteren haritalar Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil-1 Devrek İlçesi ile Kilimli İlçesi Tüvtürk Araç Muayene İstasyonu Arasındaki Mesafe

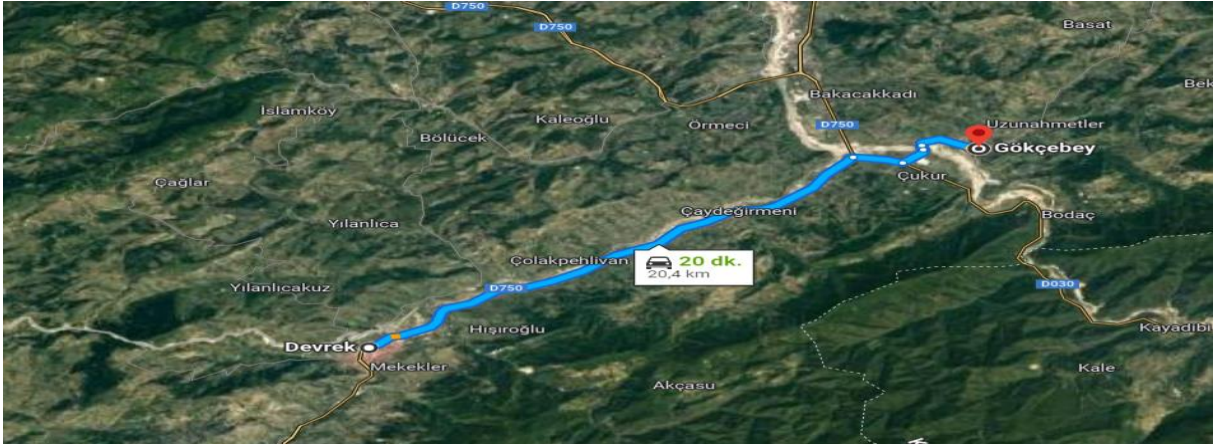


Şekil-2 Çaycuma İlçesi ile Kilimli İlçesi Tüvtürk Araç Muayene İstasyonu Arasındaki Mesafe



Şekil-3 Gökçebey İlçesi ile Kilimli İlçesi TÜVTÜRK Araç Muayene İstasyonu Arasındaki Mesafe

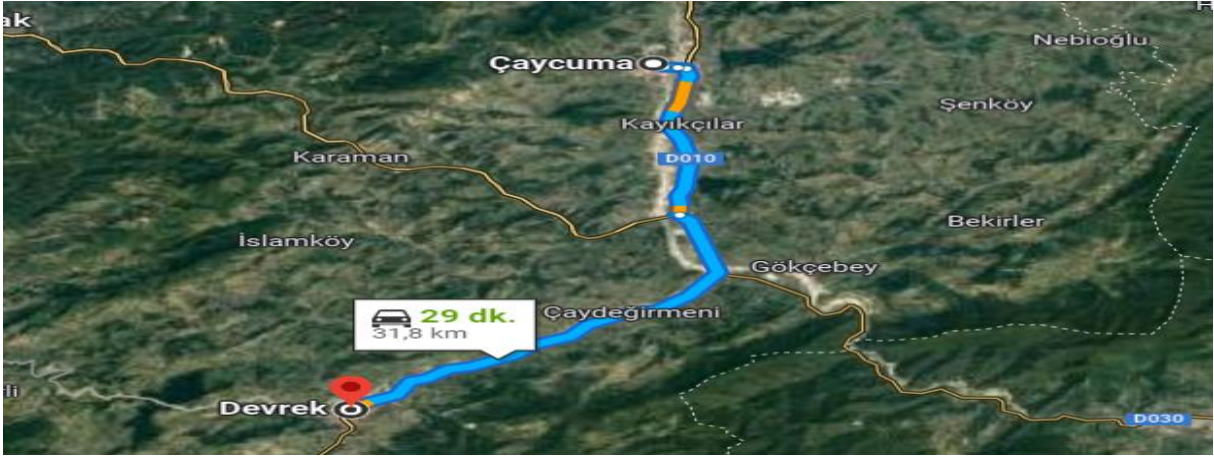
Çalışmada yeni bir araç muayene istasyonunun CO₂ emisyonu miktarında azaltma sağlayacağı düşünülmüş ve bu yeni araç muayene istasyonunun Devrek, Çaycuma veya Gökçebey ilçelerinden hangisinde azalmanın daha fazla olacağı belirlenmiştir. Yeni istasyonların bu ilçelerden birinde olması durumunda oluşacak yeni mesafeleri gösteren haritalar Şekil-4, Şekil-5 ve Şekil-6 da gösterilmiştir.



Şekil-4 Gökçebey İlçesi ile Devrek İlçesi Arasındaki Mesafe



Şekil-5 Gökçebey İlçesi ile Çaycuma İlçesi Arasındaki Mesafe



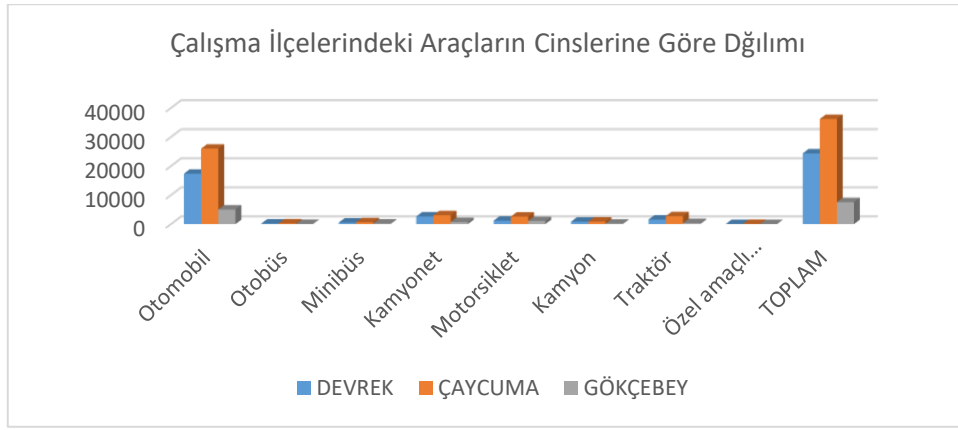
Şekil-6 Devrek İlçesi ile Çaycuma İlçesi Arasındaki Mesafe

Zonguldak ilinde 2023 Şubat ayı itibarı ile 167.926 araç olduğu TÜİK raporlarında belirtilmiştir. TÜİK veri portalında ilçe bazlı veriler 2017 yılına kadar temin edilebilmektedir. 06 Ocak 2017 tarih ve 29940 sayılı Resmî Gazete' de yayımlanarak yürürlüğe giren 680 Sayılı Kanun Hükmünde Kararname'nin 61'inci maddesiyle 2918 sayılı Karayolları Trafik Kanunu'na Ek-18'inci madde eklenmiş ve araç tescil işlemleri noterliklerce yapılacağı hükme bağlanmıştır. 2017- 2023 yılları arasında orantısal bir varsayım yapılarak 2022 yılının yaklaşık araç verileri alınmıştır. 31 Ocak 2018 tarih ve 30318 sayılı Resmî gazetede yayımlanan yönetmelik hükümleri gereğince, Plakaların, il plaka kodu ile sıra esasına göre tahsis edileceği ve ilçe bazlı plaka tahsisi olmayacağı belirtilmiştir. Belirtilen nedenlerden dolayı 2018 yılından itibaren ilçelere kayıtlı araç sayıları istatistiki olarak hesaplanmamaktadır (TÜİK, 2023).

Devrek, Çaycuma ve Gökçebey İlçelerindeki toplam araç sayıları ve araç cinsleri Tablo-2 ve Şekil-7' de gösterilmektedir.

Tablo-2 Devrek, Çaycuma ve Gökçebey'de Bulunan Araç Sayıları ve Cinsleri (2022)

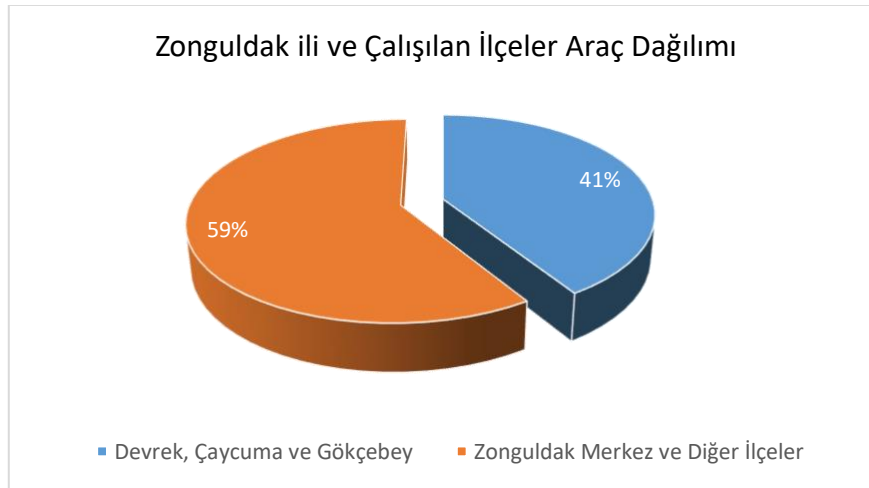
ARAÇ CİNSİ	DEVREK	ÇAYCUMA	GÖKÇEBEY
Otomobil	17.347	25.981	5.030
Otobüs	177	244	48
Minibüs	543	639	185
Kamyonet	2.628	3.063	704
Motosiklet	1.188	2.593	1.064
Kamyon	847	866	167
Traktör	1.567	2.726	346
Özel amaçlı taşıt	41	64	9
TOPLAM	24.338	36.176	7.553



Şekil-7 Devrek, Çaycuma ve Gökçebey’de Bulunan Araç Sayıları ve Cinsleri

Araç cinslerine göre yakıt türleri ve motor hacimleri motorlu kara taşıtları, Aralık 2022 TÜİK trafiğe kaydı yapılan otomobillerin motor silindir hacimlerine göre dağılımı, 2017–2023 istatistiklerine göre ve ayrıca trafiğe kayıtlı otomobillerin yakıt cinsine göre dağılımı istatistiki verilerinden yararlanılarak orantısal dağılım yapılarak yaklaşık olarak hesaplanmıştır. 2017 yılından 2022 yılına kadar Zonguldak’taki araç artış oranı %8,25 olarak TÜİK tablosunda görülmektedir. Bu artış oranı ilçe bazlı hesaplamalarda da kullanılmıştır. Ayrıca 2022 yılı motor hacimleri verileri dikkate alınmış ve oranlar tüm yakıtlarda aynı varsayımı yapılmıştır.

Zonguldak ili araç sayısı ve çalışılan ilçelerdeki araç sayılarının dağılımını gösteren grafik Şekil-8’de gösterilmiştir. Çalışma alanındaki araç sayısı il içerisindeki toplam araç sayısının % 41’ini oluşturduğu görülmektedir.



Şekil-8 Devrek, Çaycuma ve Gökçebey’deki Araçların İl İçerisindeki Oransal Gösterimi

TÜİK’in 2022 yılı istatistiki verilerine göre Türkiye’deki toplam araç sayısının 26.482.847 olduğu, Zonguldak’taki araç sayısının ise 166.743 olduğu görülmektedir. Şekil-9’da Zonguldak

ilindeki toplam araç sayısı Türkiye'deki toplam araç sayısının yaklaşık %0,63' ünü oluşturduğu gösterilmektedir.



Şekil-9 Zonguldak'taki Araç Sayısının Türkiye'deki Araç Sayısına Oranı

Bu çalışmadaki CO₂ karbon ayak izi hesaplamaları İngiltere Gıda ve Köy İşleri Departmanı (DEFRA) kriterlerine göre yapılmıştır. DEFRA, İngiltere'de kurumsal sera gazı muhasebe kılavuzu olarak oluşturulmuş ve kurumların emisyonları raporlanmasına destek olmak üzere tasarlanmıştır. Bu rehber büyük ölçüde sera gazı protokolüne dayanmakta olup işletmeler ile yoğun görüşmelerle geliştirilmiştir. DEFRA kriterleri Kyoto protokolünde belirtilen altı adet sera gazının CO₂ eşdeğeri olarak sonuçlandırılmasını içerir. Çalışmada 2022 yılı dönüşüm faktörleri kullanılmıştır (Conversion factors 2022: condensed set -for most users-). DEFRA kriterleri her yıl güncellenerek kurumların hizmetine sunulmaktadır. DEFRA' nın her yıl güncelleyerek yayımladığı hesaplama tablosunda istenilen veriler (Araç cinsleri, yapılan mesafeler, atık miktarları vb.) tabloda yerlerine girilerek tüm hesaplama sonuçları eşdeğer CO₂ (eCO₂) değerinde alınmaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma

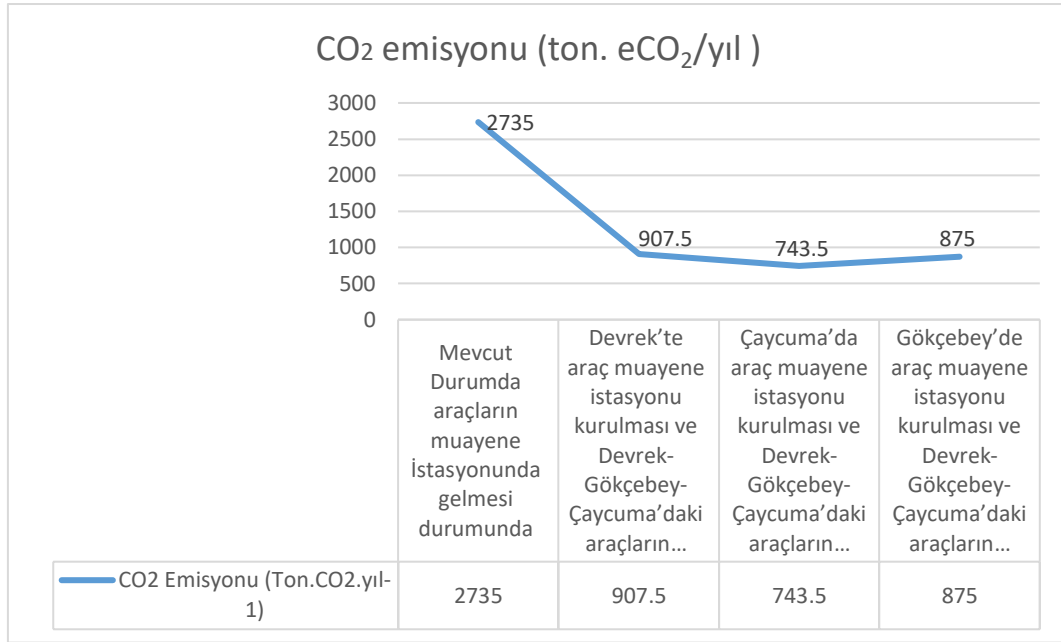
Zonguldak kilimli ilçesindeki mevcut araç muayene istasyonuna ek olarak yeni bir istasyon önerisinin Devrek, Çaycuma veya Gökçebey ilçelerinden hangisinde olması durumunda sera gazı emisyon salınımının azaltılmasında katkı sağlayacağı varsayımı ile motorlu kara taşıtlarının emisyon miktarları DEFRA kriterlerine göre hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Hesaplamalarda CO₂, CH₄ ve N₂O emisyonlarına ait emisyon faktörleri kullanılmış ve toplam CO₂ eşdeğeri olarak ifade edilmiştir.

Mevut durumda Zonguldak Kilimli ilçesindeki araç muayene istasyonuna Devrek, Çaycuma ve Gökçebey'deki araçların muayene için gittiklerindeki hesaplamalara göre bulunan emisyon değerleri ve yeni bir istasyonun Devrek, Çaycuma veya Gökçebey ilçelerinden birinde olması durumunda ve

bu ilçelerdeki araçların yeni istasyona muayene için gittikleri varsayımı ile belirlenen emisyon değerleri ton eCO₂ olarak Tablo-3'te ve Şekil-10'da verilmiştir.

Tablo-3 Mevcut İstasyon ve Yapılması Planlanan İstasyona Göre Ton CO₂ Eşdeğeri Olarak Karbon Ayak İzi Emisyon Değerleri

ARAÇ CİNSİ	CO ₂ Emisyonu (ton. eCO ₂ /yıl)	Fark
Mevcut Durumda araçların muayene İstasyonunda gelmesi durumunda	2735	-
Devrek'te araç muayene istasyonu kurulması ve Devrek-Gökçebey-Çaycuma'daki araçların gelmesi durumunda	907,5	1.827,5
Çaycuma'da araç muayene istasyonu kurulması ve Devrek-Gökçebey-Çaycuma'daki araçların gelmesi durumunda	743,5	1.991,5
Gökçebey'de araç muayene istasyonu kurulması ve Devrek-Gökçebey-Çaycuma'daki araçların gelmesi durumunda	875	1.860



Şekil-10 İlçelere Göre Araç Muayene İstasyonu Gidiş Geliş Kaynaklı Emisyon Değerleri

Tablo-3 ve Şekil-10' da ki değerler incelendiğinde Zonguldak ili Kilimli ilçesindeki mevcut istasyona Devrek, Çaycuma ve Gökçebey'deki motorlu kara taşıtlarının araç muayenesi için gittiklerindeki karbon ayak izi değerinin 2.735 ton eCO₂/yıl olduğu görülmektedir. Mevcut istasyona ilave yeni bir araç muayene istasyonu yapılması planlanması durumunda bu istasyon Devrek İlçe merkezinde olur ise ve çalışma yapılan ilçelerdeki araçların bu yeni istasyona araç muayenesi için

gelecekleri varsayıldığında karbon ayak izi değerinin 907,5 ton eCO₂/yıl olduğu görülmektedir. Yeni istasyonun Çaycuma merkezde olması ve bu ilçelerdeki araçların yeni istasyona araç muayenesi için gittikleri varsayımı yapıldığında ise bu değer 743,5 ton eCO₂/yıl olduğu hesaplanmıştır. Son olarak ise Gökçebey’de yeni istasyonun kurulduğu ve Devrek, Çaycuma ve Gökçebey’deki araçların bu istasyona araç muayenesi için geldikleri varsayıldığında oluşacak olan karbon ayak izi miktarını ise 875 ton eCO₂/yıl olduğu hesaplanmıştır.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Çalışmada Ereğli ve Kilimli ilçelerindeki istasyonlara ek yeni bir istasyonun Devrek, Çaycuma ve Gökçebey İlçelerinden herhangi birisine kurulması durumunda mevcut Kilimli ilçesinde bulunan araç muayene istasyonuna nazaran, yaklaşık 2.000 ton eCO₂/yıl emisyon salınımının azaltılacağı görülmektedir. Alaplı ilçesi yakın olmasından dolayı araç muayene istasyonu olarak ereğlideki istasyonu tercih etmeleri muhtemeldir. Kilimli ilçesindeki istasyona Merkez ilçe, Devrek, Çaycuma ve Gökçebey ilçelerindeki araçların gittiği düşünülmektedir. İlçeler bazlı bakıldığı zaman yeni kurulabilecek araç muayene istasyonunun Çaycuma ilçesine yapılması diğer ilçelere kıyasla bakıldığında emisyon azalımı konusunda daha etkili olacağı görülmektedir. Türkiye’nin emisyon azalımı konusundaki hedefleri doğrultusunda bu çalışmanın diğer illerde yeni kurulacak araç muayene istasyonlarının veya istasyon değişikliklerinin belirlenmesinde yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

TÜİK veri portalında İlçe bazlı veriler 2017 yılına kadar temin edilebilmektedir. 2017 yılından itibaren ilçelerdeki araç sayılarına ilişkin veriler ayrıca hesaplanmamaktadır. Bu durum ilçelerdeki araç sayılarındaki değişimlerin ve bu değişimlere bağlı olarak emisyon miktarlarının belirlenmesinde engel olarak karşımıza çıkmaktadır. Sonuçların daha sağlıklı yorumlanabilmesi için bu verilerin TÜİK tarafından tekrar tutulmasında fayda olacağı 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

- Behçet, R., ve Yakın, A. (2020). Malatya İli Trafik Kaynaklı Hava Kirleticilerinin Emisyon Envanteri. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(4), 2783-2790.
- Bulut, A. P. (2023). Sivas İlinde Karayolundan Kaynaklanan Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 166-17
- Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, İklim Değişikliği Ulusal Eylem Planı, 2011-2023, Ankara, 2012. <https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa>
- ÇŞİDB (2018). Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Türkiye 7. Ulusal Bildirim Raporu Ankara.
- Dönmezçelik, O., Kocak, E., ve Örcü, H. (2023). Net Sıfır Emisyon Hedefine Doğru Türkiye Kara Yolu ve Demir Yolu Taşımacılığının Enerji Modellemesi (2025-2050), *Politeknik Dergisi*, ISSN: 2147-9429 (ONLINE)
<https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2022>
- IPCC, (2022). Approved Summary for Policymakers, https://report.ipcc.ch/ar6syrr/pdf/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf
- Kılıç, E., ve Önler, E. (2022). Tekirdağ İli Çorlu İlçesinde Toplu Taşıma Kaynaklı Karbon Ayak İzinin Hesaplanması Üzerine Bir Araştırma. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (41), 67-72.
- Kılıç, M. Y., Dönmez, T., ve Adalı, S. (2021). Karayolu ulaşımında yakıt tüketimine bağlı karbon ayak izi değişimi: Çanakale örneği. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(3), 943-955.
- Kırbaş, İ., ve Kocakulak, T. (2022). Burdur İli Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 24(70), 317-327.
- Plassmann, K., & Edwards-Jones, G. (2010). Carbon footprinting and carbon labelling of food products. In *Environmental Assessment and Management in the Food Industry* (pp. 272-296). Woodhead Publishing.
- TUİK, (2023), İstatistiklerle Türkiye, İllere Göre Motorlu Kara Taşıtları Sayısı Şubat 2023 <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Ocak-2023-49433#:~:text=Ocak%20ay%C4%B1%20sonu%20itibar%C4%B1yla%20trafi%C4%9Fe,%C3%BCn%C3%BC%20%C3%B6zel%20ama%C3%A7li%20ta%C5%9F%20olu%C5%9Fturdu.Eri%C5%9FimTarihi:05.04.2023>
- TUİK, (2022), İstatistiklerle Türkiye, İllere Göre Motorlu Kara Taşıtları Sayısı Aralık 2022 <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Aralik-2022-49436#:~:text=Aral%C4%B1k%20ay%C4%B1%20sonu%20itibar%C4%B1yla%20trafi%C4%9Fe%20kay%C4%B1tl%C4%B1%2014%20milyon%20269%20bin,0%20C1'i%20elektriklidir.Eri%C5%9FimTarihi:08.04.2023>
- Zonguldak İli 2021 Yılı Çevre Durum Raporu, Zonguldak Valiliği Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü, (2022).

Araklı ve çevresinde (Trabzon) Sel ve Taşkına Neden Olan Derelerin Morfometrik Analizlerle Taşkın Duyarlılıklarının Belirlenmesi

Vedat AVCİ^{1*}, İskender DÖLEK², Taygun UZELLİ³

Öz

Bu çalışmada, Trabzon iline bağlı Araklı ilçesi ve çevresinde sel ve taşkına yol açan derelerin morfometrik özellikleriyle taşkın duyarlılıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. 18 Haziran 2019 tarihinde Araklı ilçesi Çamlıktepe Mahallesi'nde meydana gelen taşkında 9 kişi hayatını kaybetmiştir. Karadere Çayı Havzası'nda meydana gelen taşkında çok sayıda yapı yıkılmıştır. Çalışmada Karadere Çayı Havzası, komşu Yanbolu Deresi, Küçükdere Çayı, Manahoz Çayı ve Kastel Deresi Havzaları ile morfometrik özellikleri açısından birlikte değerlendirilmiştir. Havzaları kapsayan 10*10 m hücre boyutuna sahip Sayısal Yükselti Modeli (SYM) kullanılarak, havzaların sınırları belirlenmiştir. Belirlenen havzalara Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yazılımları kullanılarak drenaj yoğunluğu (Dd), akarsu sıklığı (Fs), havza şekli (Rf), uzama oranı (Re), havza reliefi (Bh), relief oranı (Rh), engebelilik değeri (Rn), akım toplanma zamanı (Tc), hipsometrik integral (Hi) ve eğri (He) indisleri uygulanmıştır. İndis sonuçları kullanılarak derecelendirme yapılmış ve havzaların taşkın duyarlılığı belirlenmiştir. Buna göre; Karadere Çayı ve Kastel Deresi Havzalarında taşkın duyarlılığı yüksek, Manahoz Deresi Havzası'nda orta, Yanbolu Deresi ve Küçükdere Çayı Havzası'nda düşük olarak bulunmuştur. Rölyef özellikleri ve iklim-beşeri özellikleri nedeniyle havzalarda afet boyutunda taşkınların yaşanması muhtemeldir. Havza yönetimi çalışmalarında sel ve taşkınlara yol açan doğal (morfometrik ve jeomorfolojik) ve beşeri tüm faktörlerin dikkate alınması yararlı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Araklı, Trabzon, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS), Morfometri, Taşkın Duyarlılığı.

Determination of Overflow Susceptibility of the Streams causing Flood-Overflow in Araklı District and its surroundings (Trabzon) by Morphometric Analyses

Abstract

The aim of this study is to determine overflow susceptibility of the streams causing flood-overflow in Araklı district of Trabzon province and its surroundings with their morphometric features. On the 18th of June in 2019, 9 people lost their lives in the overflow that occurred in the Çamlıktepe neighborhood of Araklı District. The overflow that took place in Karadere Stream Basin destroyed many buildings. In the study, Karadere Stream Basin has been evaluated together with neighboring Yanbolu Stream, Küçükdere Creek, Manahoz Creek and Kastel Creek Basin in terms of morphometric features. Using Digital Elevation Model having 10*10 m cell size covering the basins, the boundaries of the basins have been determined. Indices of drainage density (Dd), stream frequency (Fs), basin shape (Rf), elongation ratio (Re), basin relief (Bh), relief ratio (Rh), ruggedness number (Rn), time of concentration (Tc), hypsometric integral (Hi) and curve (Hc) have been applied to the specified basins by using Geographic Information System software. With the results of the indices, a grading has been done in terms of flood-overflow, and overflow susceptibility of the basins has been determined. Accordingly, overflow susceptibility has been specified as high in Karadere and Kastel Stream Basins, medium in Manahoz Stream Basin, and low in Yanbolu stream and Kucukdere Basin. Due to the relief and climatic-human characteristics of the basins, experiencing overflow on a disaster scale is probable in the basins. It will be beneficial to consider natural (morphometric and geomorphological) and human factors causing flood and overflow when basin management studies are carried out.

Keywords: Araklı, Trabzon, Geographic Information Systems, Morphometry, Overflow Susceptibility

¹Bingöl Üniversitesi, Coğrafya Bölümü, Bingöl, Türkiye, vavci@bingol.edu.tr

²Muş Alparslan Üniversitesi, Afet Yönetimi Uygulama ve Araştırma Merkezi, Muş, Türkiye, isdolek@gmail.com

³İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Jeotermal Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi, İzmir, Türkiye, taygunuzelli@iyte.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0003-1439-3098>

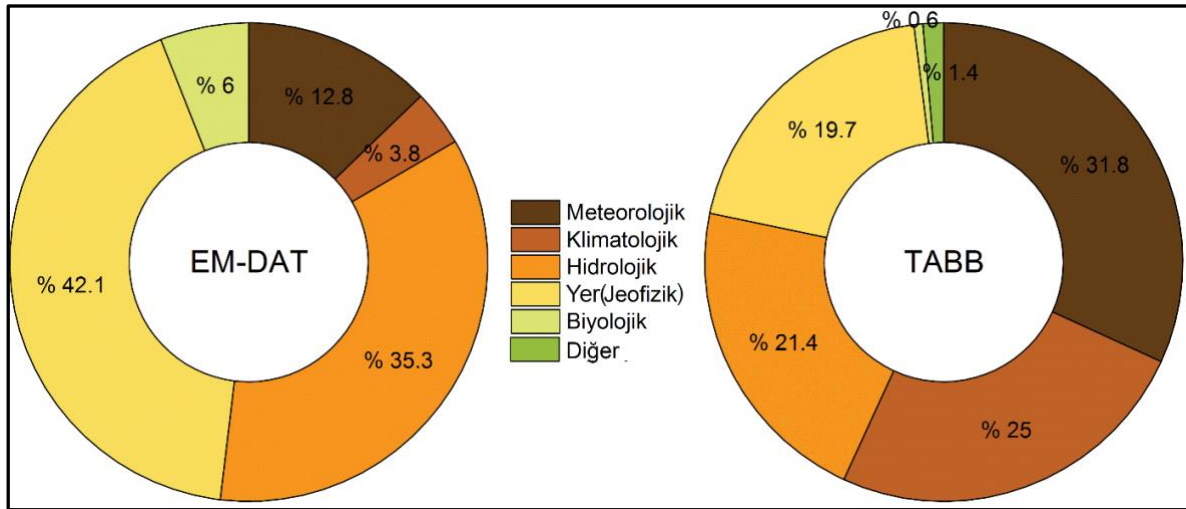
²<https://orcid.org/0000-0002-5922-8515>

³<https://orcid.org/0000-0003-0846-5921>

1. Giriş

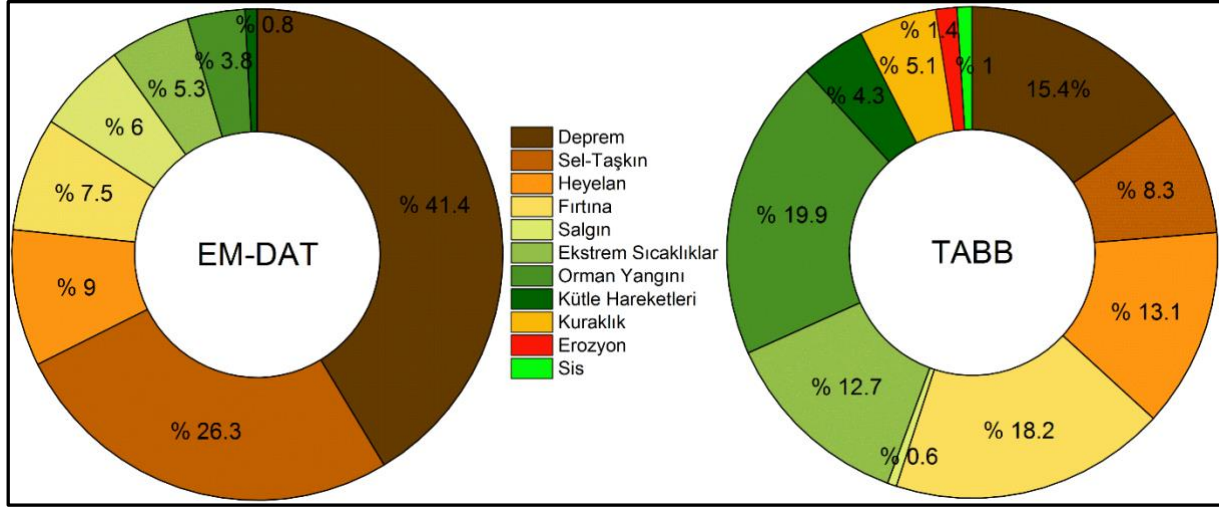
Sel ve taşkınlar, bir su kütesinin seviyesinin doğal kıyılarını veya yapay bentlerini taşana kadar yükseldiğinde ve genellikle kuru olan alanları sular altında bıraktığında meydana gelen doğal süreçlerdir (Luino, 2016). Sel ve taşkınlar, dünya çapında en yaygın doğal afet olup, doğal afet kaynaklı ölümlerin önde gelen nedenidir. Ormansızlaşma ve büyük nüfusun kıyı bölgelerine, nehir havzalarına ve göl kıyılarına artan yakınlığı göz önüne alındığında, selden kaynaklanan katastrofik kayıp riski önemlidir (Doocy ve ark., 2013). Sel ve taşkınlar, doğal koşullar (topografya, yağış), bölgesel coğrafi koşullar ve bir alandaki arazi kullanımında değişikliklere (arazinin amaç dışı kullanımı, ormansızlaşma) neden olan insan faaliyetlerinden kaynaklanır (Sholihah ve ark., 2020). Sel ve taşkınların meydana gelmesinde küresel iklim değişikliğinin de etkili olduğu bilinmektedir. Küresel ısınma ile birlikte ekstrem yağışların yoğunluğunun artması, bu durumun da taşkın riskini artırması beklenmektedir (Tabari, 2020). Yağış için gerekli suyu sağlayan atmosferik su buharı konsantrasyonu arttıkça, aşırı yağışların dünyanın büyük bir bölümünde küresel ısınmayla birlikte yoğunlaşması ve sel-taşkın riskinin artması öngörülmektedir (Tabari, 2020; Allen ve Ingram, 2002; Ingram, 2016). Yapılan değerlendirmelere göre taşkın yoğunluğunun nemli bölgelerde arazi alanının %75,9' unda, yarı nemli bölgelerde % 68,7' sinde, yarı kurak bölgelerde ise % 63,4'ünde artış göstermesi beklenmektedir (Tabari, 2020; URL-1).

Emergency Events Database (EM-DAT) kayıtlarına göre 1960-2014 yılları arasında Türkiye'de meydana gelen doğal afetler (olay sayısı dikkate alınmıştır) kökenlerine göre değerlendirildiğinde yer kökenli (depremler) afetler 1.sırada (% 42,1), hidrolojik kökenli (sel-taşkınlar) afetler % 35,3 ile 2.sırada yer almaktadır. Türkiye Afet Bilgi Bankası (TABB) verilerine göre ise meteorolojik kökenli afetler 1.sırada (% 31, 8), klimatolojik kökenli afetler 2.sırada (% 25) ve hidrolojik afetler 3.sırada (% 21.4) yer almaktadır (URL-2, URL-3, Koç ve Thieken, 2016; Şekil 1).



Şekil 1. 1960-2014 yılları arasında Türkiye'de meydana gelen doğal afetlerin, kökenlerine göre dağılımı (URL-2, URL-3, Koç ve Thieken, 2016).

EM-DAT verisine göre 1960-2014 yılları arasındaki dönemde Türkiye’de en fazla meydana gelen doğal afetler depremler, sel-taşkınlar ve heyelanlar olarak sıralanmıştır. TABB verisine göre ise en fazla meydana gelen doğal afetler; deprem, sel-taşkınlar ve heyelanlar şeklinde sıralanmaktadır (Koç ve Thieken, 2016; Şekil 2).



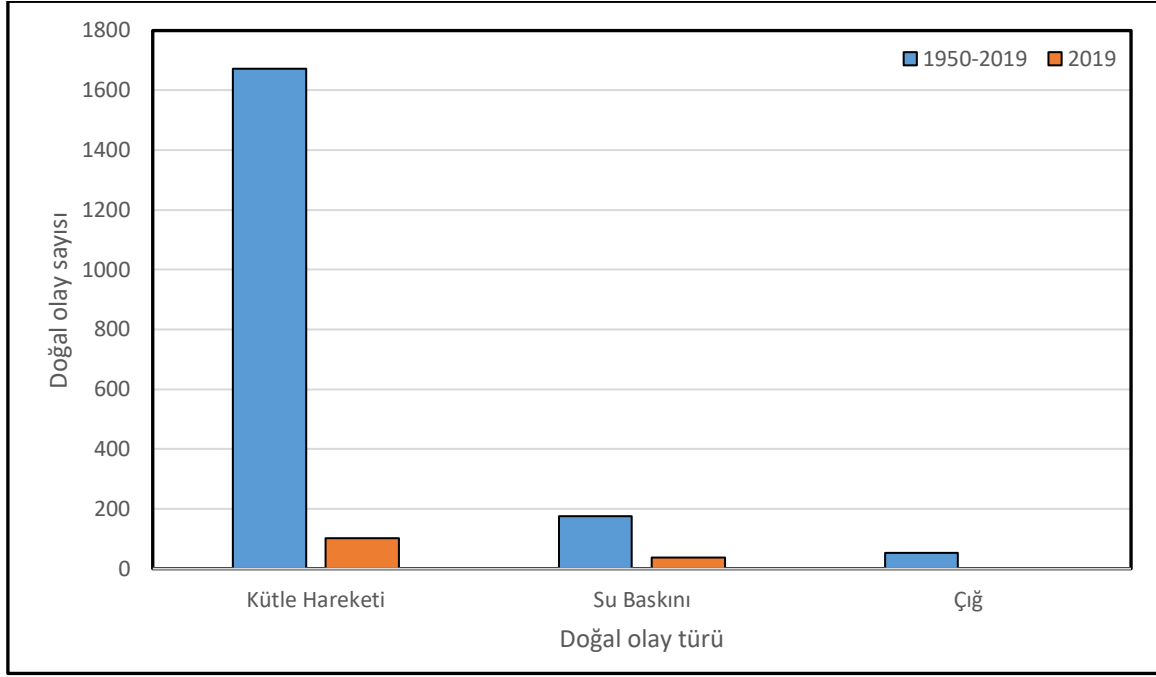
Şekil 2. Türkiye’de 1960-2014 yılları arasında meydana gelen doğal afetlerin alt gruplara göre dağılımı (URL-2, URL-3, Koç ve Thieken, 2016)

EM-DAT verilerine 1960-2014 yılları arasında Türkiye’de katastrofik 25 sel-taşkın olayı yaşanmıştır. Bu katastrofik olaylara Mersin-Adana (Aralık 1968), Batı Karadeniz (1998) sel-taşkın olayları örnek verilebilir. EM-DAT kaynağına göre, Mersin-Adana sel-taşkını Türkiye'deki en yıkıcı olay olup, can kaybı 147’dir. Aynı veri kaynağına göre Mayıs 1998’de Batı Karadeniz’i (Zonguldak, Karabük, Bartın, Sakarya) etkileyen sel-taşkınlar, ekonomik kayıplar açısından en yıkıcı olay olarak kayıtlara geçmiştir. Yaşanan sel-taşkınlarda 10 kişi ölmüştür. Bu olayda etkilenen insan sayısı 1240047 ve ekonomik kayıp 1,0 milyar ABD Dolarıdır (URL-2, Koç ve Thieken, 2016). Türkiye’de katastrofik sel-taşkın olaylarına, 1995 İzmir ve Senirkent selleri de diğer örneklerdir. 3-4 Kasım 1995 yılında İzmir’de meydana gelen selde 63 kişi hayatını kaybetmiştir. Olay sırasında (3 saat 54 dakikalık süre içerisinde) m²’ye 100 kg’den fazla yağış düşmüştür (Sezer, 1997). Isparta-Senirkent’te 13 Temmuz 1995 günü 20:10-20:30 saatleri arasında meydana gelen sel ve sonrasında yaşanan çamur akıntısı ile 74 kişi ölmüş, 46 kişi de yaralanmıştır (Biricik, 1996). 2018 yılında Ordu ve ilçelerinde, 2020 yılında Rize ve Giresun’da, 2021 yılında Sinop, Bartın, Kastamonu (Bozkurt), Artvin ve Rize’de meydana gelen sel felaketleri yakın zamanda yaşanan insan yaşamını etkileyen ve yerleşim alanlarında yıkıma neden olan sel-taşkın olaylarının en yeni örneklerdir. 1975-2012 yılları arasında ülkemizde meydana gelen 889 taşkın olayında, can kaybı 685’dir (Kadioğlu, 2019). Ülkemizde taşkınlar 1990’ların ortalarından bu yana artış eğilimindedir (Kömüscü ve Çelik, 2013; Kadioğlu, 2019). Önceden tahmin edilebilen sel ve taşkınların, zararlarını azaltmak için potansiyel olarak sel-

taşkınlarla duyarlı alanların belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla duyarlılık, tehlike ve risk haritalarının yapılması önem arz etmektedir.

Sel ve taşkın riski taşıyan potansiyel alanların belirlenebilmesinde farklı yöntemler kullanılmaktadır. İstatistiksel yöntemler, uzman puanlama ve çok kriterli karar verme yöntemleri ile sel-taşkın duyarlılığı belirlenebilmektedir (Samanta ve ark., 2018; Mind'je ve ark., 2019; Akay, 2021; Fang ve ark., 2021; Sachdeva ve Kumar, 2022; Xu ve ark., 2023). Bu çalışmalarla duyarlı alanlar belirlenebildiği için doğal olayların, afet boyutuna dönüşmesi engellenebilir. Havzaların alansal, geometrik (şekil) ve relief morfometrik özellikleri ile de sel-taşkın potansiyeli belirlenebilmektedir. Örneğin, sel-taşkın olasılığı, drenaj yoğunluğunun artmasına bağlı olarak yükselir. Uzunlamasına havzalarda daha uzun süre su akışı görülebilir. Engebelilik değeri yüksek olan havzalarda yüzeysel akış ve erozyon artarken, infiltrasyon (sızma) azalmaktadır. Bu özelliklerle sahip olan havzalarda sel-taşkın duyarlılığı yüksek olmaktadır. Havza morfometrik parametrelerinden hipsometrik eğrinin (He) şekli ve integral değeri (Hi) de bu konuda ipucu vermektedir. He görünümü dışbükey olan ve Hi değeri yüksek olan havzalar jeomorfolojik açıdan genç (Strahler, 1952; Melton, 1957; Verstappen, 1983; Keller ve Pinter, 2002; Ullah ve Zhang, 2020; Rawat ve ark., 2021) ve sel-taşkın duyarlılığı yüksek olan havzalardır.

Akgül ve ark. (2022) Türkiye'de çığ, kütle hareketleri (heyelan, kaya düşmesi) ve su baskını olaylarını kümelenme yöntemiyle araştırdıkları çalışmalarında, bu afet türleri açısından Karadeniz'de en riskli ilin Trabzon olduğunu belirtmiştir. 1950-2019 yılları arasında Trabzon ilinde meydana gelen doğal olay sayısı açısından kütle hareketleri (heyelan-kaya düşmesi) 1.sırada gelmektedir. Bu dönemde 1673 kütle hareketi ve 175 su baskını olayı meydana gelmiştir. Su baskınları, kütle hareketlerinden sonra en fazla görülen 2.doğal olaydır. Çığ ise 52 olayla kütle hareketlerini (heyelan-kaya düşmesi) ve su baskını olaylarını takip etmektedir. 2019 yılında 102 kütle hareketi ve 37 su baskını olayı meydana gelmiştir (Şekil 3; AFAD, 2020). Şiddetli yağışa bağlı olarak meydana gelen heyelanlar aynı zamanda taşkınlarla neden olabilmektedir. Çünkü heyelanlar sonucu ortaya çıkan malzeme dere yataklarını doldurarak setler oluşturmakta ve menfezleri kapatarak suyun yatağında doğal seyrini engellemektedir. Ülkemizde son yıllarda yaşanan ani sağanaklara bağlı olarak meydana gelen sel-taşkınlar ile heyelanların birbirini tetiklediği literatürde ortaya konmuştur (Avcı, 2023; Avcı ve Ünsal, 2023).



Şekil 3. 1950-2019 yılları Trabzon ilinde görülen doğal olayların dağılımı (AFAD, 2020)

Bu çalışmada Araklı ilçesi ve çevresinde sel-taşkın olaylarına yol açan, Yanbolu Deresi, Karadere Çayı, Küçükdere Çayı, Manahoz Çayı ve Kastel Deresi havzalarının morfolojik özellikleri ile Karadere Çayı Havzası'nda Çamlıktepe Mahallesi'nde yaşanan sel-taşkın olayının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Işık ve ark. (2020) tarafından çok kriterli karar verme yöntemi ile Karadere Çayı Havzası için taşkın duyarlılık analizi yapılmıştır. Bu çalışma sonuçlarına göre, Araklı şehir merkezi taşkın duyarlılığı yüksek bir alanda bulunmaktadır. Yıldırım (2021) Trabzon'daki akarsu havzalarının morfolojik özelliklerini genel olarak değerlendirmiştir.

Çalışmamızda arazi gözlemleri ile Çamlıktepe sel-taşkınını incelenmiş, havzalar morfolojik özellikleri açısından göreceli olarak karşılaştırılmış ve taşkın duyarlılığı belirlenmiştir. Bu durum morfolojik parametreler ve arazi gözlemlerine göre hazırlanan çalışmamızı farklı kılmaktadır.

2. Çalışma Sahasının Yeri ve Başlıca Coğrafi Özellikleri

Çalışma alanı, Doğu Karadeniz Bölümü'nde, Trabzon ili sınırları içerisinde yer almaktadır. İncelemeye konu edinilen Yanbolu Deresi, Karadere Çayı, Küçükdere Çayı, Manahoz Çayı ve Kastel Deresi havzaları Doğu Karadeniz akçılama havzası içerisinde yer almaktadır (Şekil 4). Havza, Türkiye'nin en fazla yağış alan ve bu nedenle su kaynakları açısından zengin, yoğun bir orman örtüsüne sahip bir havzadır (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2020).

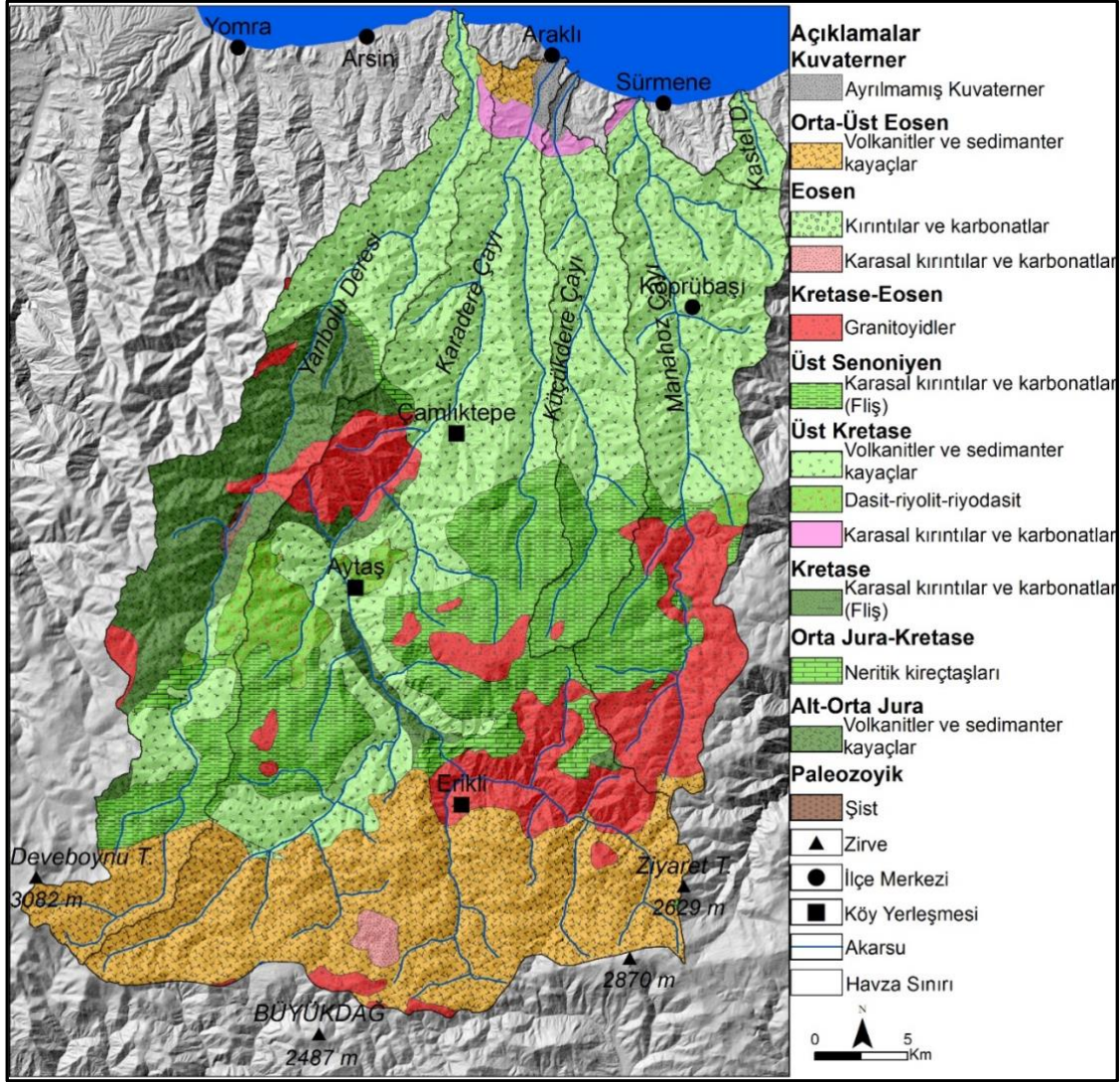


Şekil 4. Çalışma alanının lokasyon haritası

Doğu Karadeniz Havzası, kıyıda doğuda Artvin ilinden başlayıp; batıda Samsun iline dayanmaktadır. Havzayı oluşturan akarsular, diğer havzalardaki tek bir ana kol şeklinde denize ulaşmamakta, irili ufaklı denize ulaşan pek çok dereden oluşmaktadır (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2020). Doğu Karadeniz Havzası, alansal büyüklük açısından ülkemizdeki 25 havza içinde 15. sıradadır. Karadeniz, İç Anadolu ve Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan toplam 11 il (Ordu, Trabzon, Giresun, Rize, Gümüşhane, Artvin, Sivas, Bayburt, Erzurum, Samsun ve Tokat), Doğu Karadeniz Havzası içerisinde yer almaktadır (Yüksek ve ark., 2022).

Araştırma sahasında Paleozoyik yaşlı şistler en yaşlı birimleri oluştururken, Kuvaterner dönemli alüvyonlar en genç birimleri oluşturmaktadır. Paleozoyik şistler, sınırlı olarak Aytaş batısında görülmektedir. Alt-Orta Jura, volkanit ve sedimanterlerden oluşan birim Yanbolu Deresi Havzası güneyinde, Orta Jura-Kretase neritik kireçtaşları, Erikli kuzeyi ile Aytaş güneybatısında, Kretase karasal kırıntılar ve karbonatlar, Erikli kuzeybatısında, Üst Kretase volkanitler ve sedimanter kayalar çalışılan havzaların orta ve aşağı kesimlerinde yüzeylenmektedir. Üst Kretase dasit-riyolit ve riyodasit birimleri Aytaş ve çevresinde, bu dönemin ürünleri olan karasal kırıntılar ve karbonatlar, Araklı ilçe merkezinin güneyinde görülmektedir. Üst Senoniyen fliş birimleri Aytaş güneybatısı ile doğusunda, Kretase-Eosen granitoidler Aytaş kuzeyi, Erikli doğusu ve kuzeydoğusunda ve Köprübaşı güneyinde yüzeylenmektedir. Eosen kırıntılar ve karbonatlar, Erikli güneybatısında, Orta-Üst Eosen

volkanitler ve sedimanter kayalar, Erikli güneyinde, ayrılmamış Kuvaterner birimleri Karadere ve Küçükdere'nin ağız kısmında yüzeylenmektedir (Şekil 5; Akdeniz ve Güven, 2002).

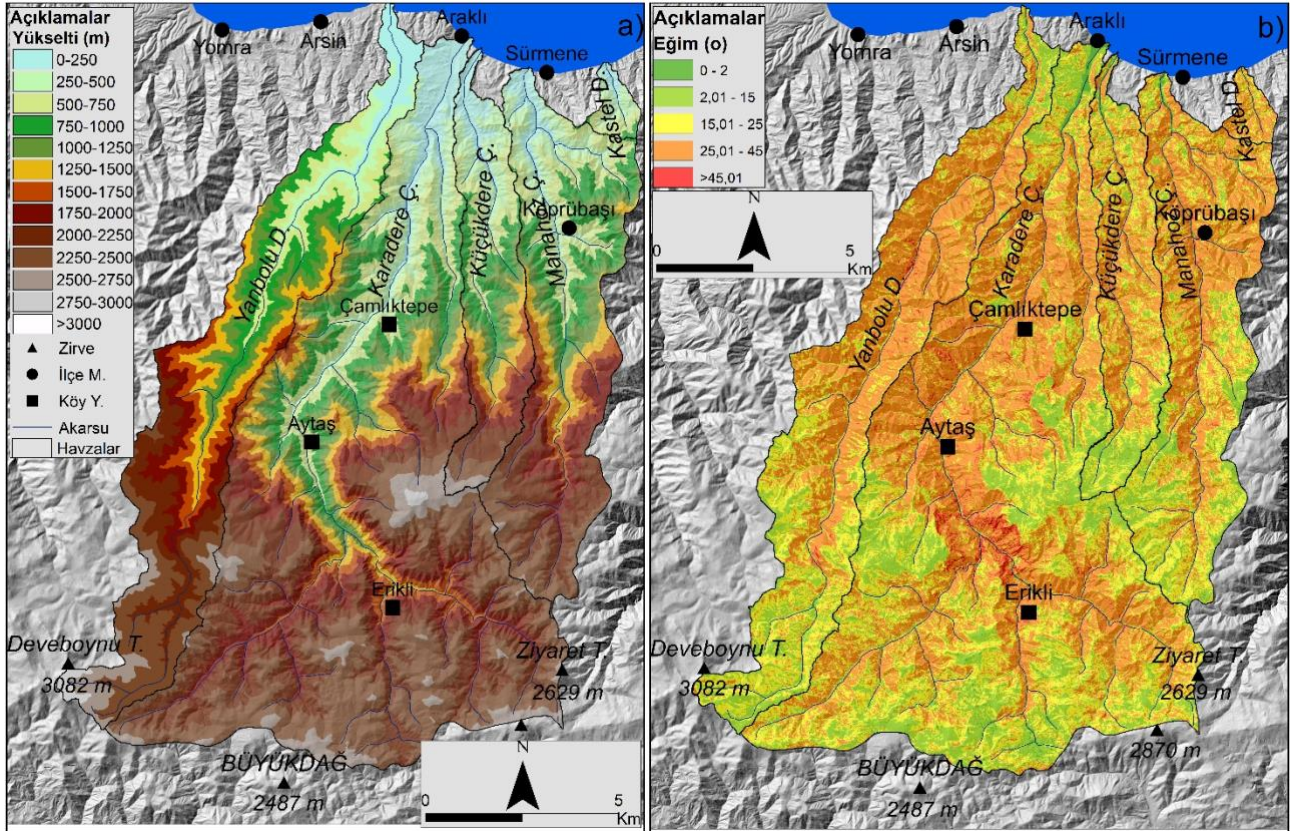


Şekil 5. Çalışılan havzaların litoloji haritası (Kaynak: Akdeniz ve Güven, 2002)

Zeminin killi şist gibi geçirimsiz kayalardan oluştuğu sahalarda yağış sularının büyük bir kısmı yüzeysel akışa geçer (Atalay, 2018). Çalışma sahası güneyinde litoloji geçirimsiz birimlerden oluşmaktadır. Bu durum yüzeysel akış miktarını artırıcı yönde rol oynamaktadır. Çalışma alanında litoloji ve morfoloji heyelanların meydana gelmesini kolaylaştırmaktadır. Sahada yaşanan taşkınların nedenlerinden biri de heyelanlarla dere yataklarının tıkanmasıdır.

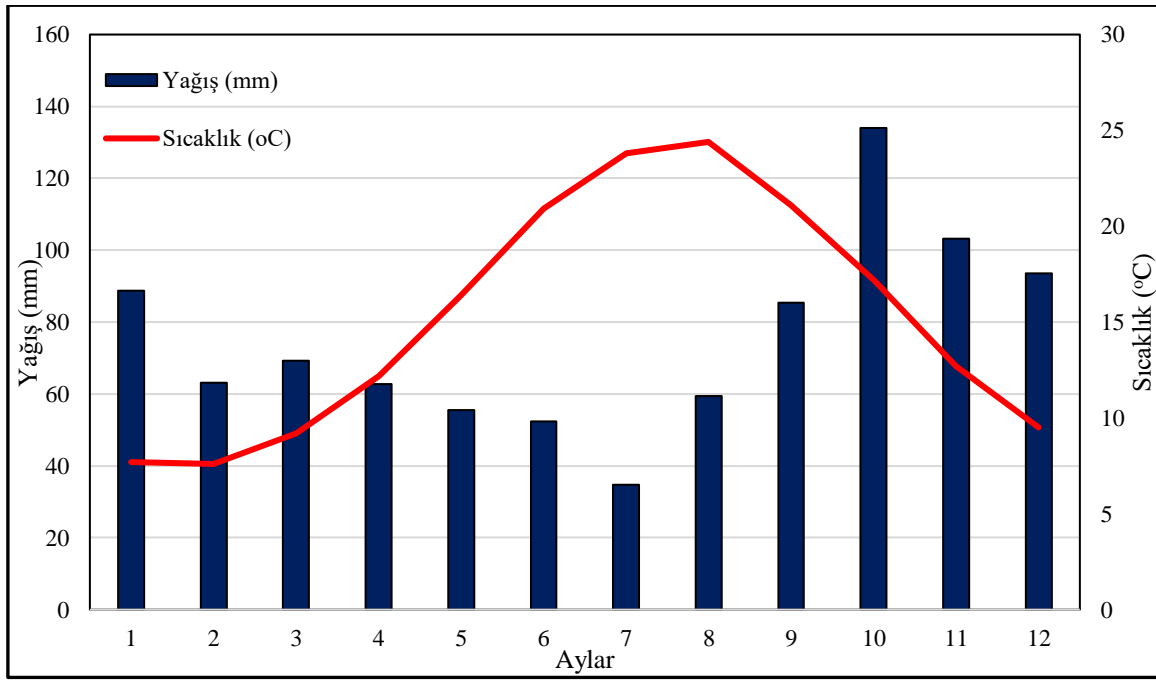
Çalışma alanı, kıyıdan itibaren yükselen Kuzey Anadolu Dağ sırası (Ketin, 1966) içerisinde yer almaktadır. İnceleme sahasının yeryüzü şekilleri açısından en belirgin özelliği kıyıdan itibaren yükseltinin kısa mesafelerde artmasıdır. Bu durum Doğu Karadeniz Bölümü'nde dağların kuzeye bakan yamaçları ile kıyı arasında kalan yerler için olağan bir durumdur. Bu doğal özellik, Doğu

Karadeniz’de doğal (iklim, doğal bitki örtüsü, toprak türleri, akarsuların akım özellikleri vb.) ve beşeri (nüfus, yerleşme, tarım vb.) birçok hususu etkilemektedir. İnceleme sahası, Doğu Karadeniz Dağları’nın kuzeye bakan yamaçlarından kaynağını alan Yanbolu Deresi, Karadere Çayı, Küçükdere Çayı, Manahoz Çayı ve Kastel Deresi ile drene edilmektedir. Bu akarsuların havza alanları 12,14-737,52 km² arasında değişmektedir. Karadere Çayı Havzası, yaklaşık 737 km² alanı ile sahayı drene eden en büyük akarsu havzasını oluşturmaktadır. En küçük akarsu havzası ise Kastel Deresi Havzası’dır. Karadere Çayı’nın menba kısmından ağız kısmına kadar olan mesafe, yaklaşık 64 km’dir. Bu mesafede yükselti değişimi 2875 m’dir. Kısa mesafelerde bu yükselti farklarına erişilmesi eğimin yüksek olduğunu göstermektedir. Analiz edilen tüm havzaların eğim değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Ortalama eğim değerleri 23,5-27° arasında değişmektedir (Şekil 6). Kastel Deresi Havzası’nda ortalama eğim maksimum, Küçükdere Çayı Havzası’nda minimumdur. Yüksek eğime paralel olarak, yüzeysel akış miktarı ve yüzeysel akış hızı artarken, sızma azalmaktadır. Eğim değerlerinin yüksek oluşu akım toplanma süresinin kısılmasına yol açmaktadır. Yan kollardan ana akarsuya kısa sürede ulaşan kollar taşkınlara sebebiyet vermektedir. Ayrıca eğimin yüksek olduğu sahalarda yükseltinin de fazla olmasına bağlı olarak sıcaklık ve dolayısıyla buharlaşma da azalmaktadır. Bunun yanında suyun yüzeyi hızlı terk etmesi de buharlaşmayı azaltmaktadır (Hoşgören, 2004; Atalay, 2018). Bu durum yüzeysel akışa geçen su miktarını artırıcı bir rol oynamaktadır.



Şekil 6. Çalışma sahasının yükselti basamakları (a) ve eğim (b) haritası

Genel olarak Karadeniz Dağları'nın kuzeyli yamaçlarında Karadeniz iklimi egemendir. Çalışma sahasında da Karadeniz iklim özellikleri görülmektedir. Bu iklim tipi, nispeten mevsimlere düzenli bir şekilde dağılmış, yüksek yağış miktarı ile diğer sahalara göre ayırt edilebilir bir özelliğe sahiptir. Bu iklim, konum, rölyef ve bakıyla ilgili belirli şartlara bağlı olarak dar kıyı şeridinde hüküm sürer. Karadeniz ikliminde yağış azamisi frontal faaliyetlere bağlı olarak sonbahar ve kışta, yağış asgarisi ise güneyli hava kütlelerinin frekansının yüksek olduğu ve fön tesirlerinin görüldüğü ilkbahar döneminde görülür. Karadeniz iklim tipinin diğer ayırt edici özellikleri, yıllık sıcaklık farklarının düşük olması ve kış sıcaklıklarının 0°C'nin üstünde olmasıdır (Erinç, 1996). Trabzon Meteoroloji istasyonu verilerine göre, Araklı ilçesinde, yıllık ortalama sıcaklık 15,2 °C, olup, yıllık toplam yağış miktarı 902,1 mm'dir. Her mevsim yağışın görüldüğü Araklı ilçesinde en fazla yağış sonbahar, en az yağış ise yaz mevsiminde düşmektedir (Şekil 7). Karadere Havzası'nda 2900 m'ye ve Yanbolu Deresi Havzası'ndaki 3000 m'ye varan yükselti değişimi dikkate alındığında; sıcaklık ve yağış havza orta ve yukarı bölümlerinde kıyıya göre çok farklı olacaktır.

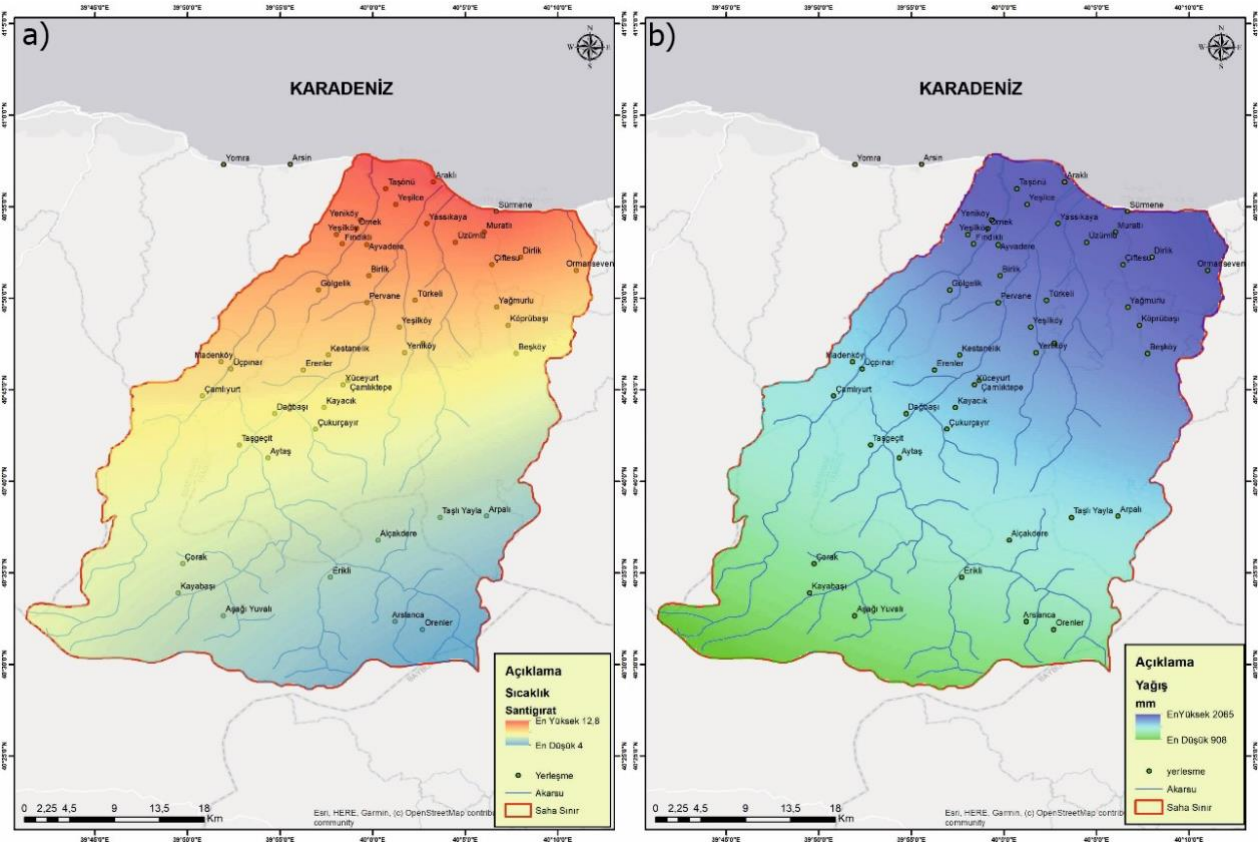


Şekil 7. Trabzon meteoroloji istasyonu verilerine göre aylık ortalama sıcaklık ve yağış miktarının dağılımı (1991-2020, URL-4).

Çalışma sahasında kıyı gerisindeki yüksek dağlarda kış yağışlarının kar şeklinde olması ve yerde örtü oluşturan karın ilkbahar mevsiminde erimesi sel-taşkın olaylarını artırmaktadır. Bu durum kış yağışlarının kar şeklinde düştüğü ülkemizin diğer yöreleriyle benzerdir. Araştırma alanında ilkbahar ve yaz yağışlarının konvektif türde olması (Karadeniz, 1995) sel-taşkın riskini artırmaktadır. Jeomorfolojik, iklimatik ve antropojenik etkilerin sonucunda Doğu Karadeniz Bölümü, ülkemizde afet

boyutunda sel ve taşkın olaylarının en fazla meydana geldiği lokasyon olma özelliği kazanmaktadır (Şahin ve Sipahioğlu, 2003).

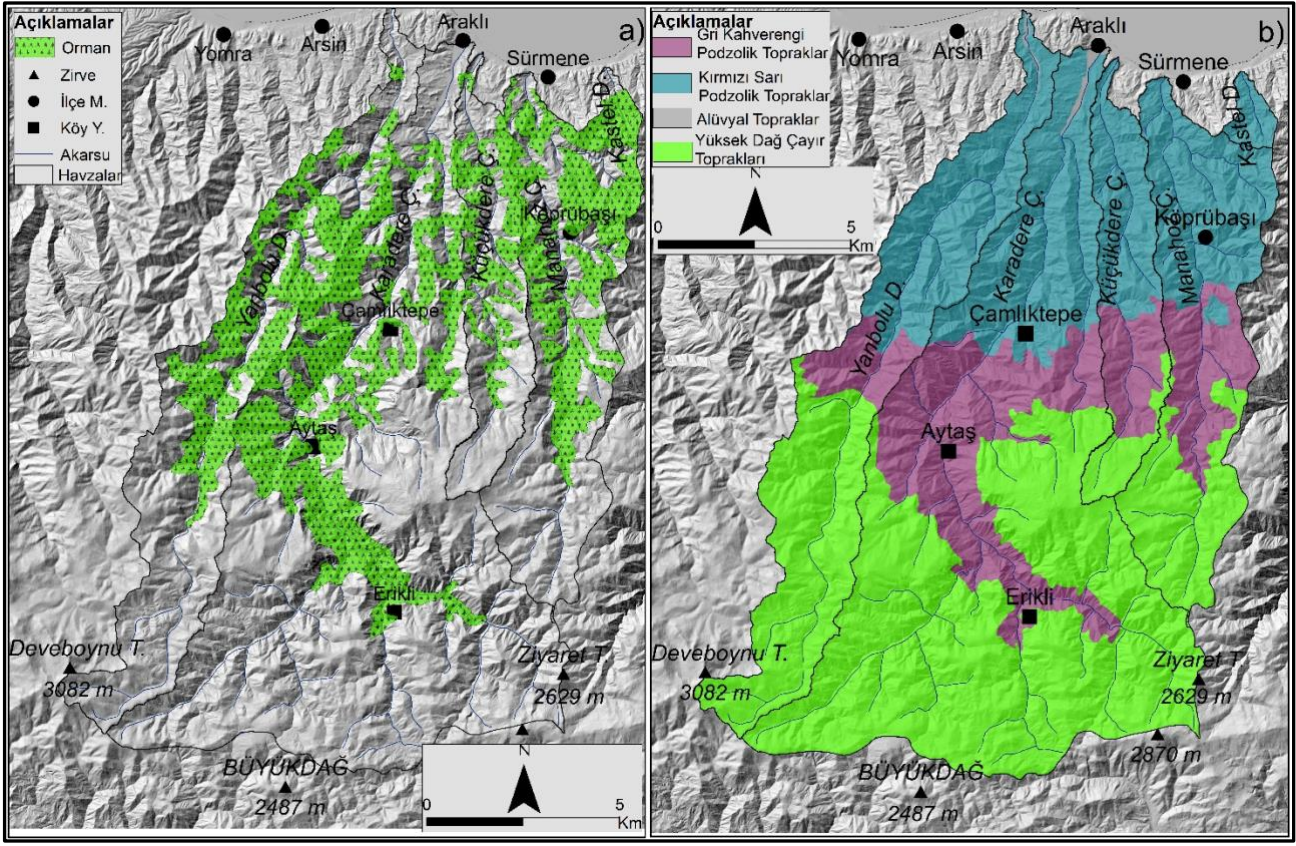
Çalışma alanı ve çevresinde yer alan Trabzon, Rize, Gümüşhane, Bayburt, Akçaabat ve Pazar Meteoroloji istasyonu yıllık ortalama sıcaklık ve yağış toplamı verisinden (Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM, 2021) faydalanarak sıcaklık ve yağış haritaları hazırlanmıştır. Oluşturulan haritaya göre yıllık ortalama sıcaklık değeri 4-12,8°C arasında değişmektedir. Kıyı kuşağından gerideki dağlık kuşağa doğru sıcaklığın azaldığı dikkati çekmektedir. Çalışma alanında yağış miktarı minimum 908 mm, maksimum 2085 mm'dir. Kıyıdan itibaren yağışın azaldığı ve dağlık kuşakta minimum yağışın ölçüldüğü görülmektedir (Şekil 8).



Şekil 8. Çalışma alanının sıcaklık (a) ve yağış (b) haritası

Gür bitki örtüsü, akarsu akımları üzerinde düzenleyici rol oynar. Karadeniz Bölgesi'nde ani sağanaklar olmadıkça ani taşkınların oluşmama nedeni, bitki örtüsüdür (Atalay, 2018). Çalışma alanında doğal bitki örtüsünü ormanlar oluşturmaktadır. Kıyı kuşağında orman örtüsü tahrip edilmiştir (Uzun ve Özcan, 2016). Orman Genel Müdürlüğü meşcere verisine göre; havza yukarı bölümleri de orman örtüsünden yoksundur (Şekil 9a). Çalışılan havzaların yukarı bölümlerinde yüksek dağ çayır toprakları görülürken, aşağı bölümlerinde kırmızı-sarı podzolik topraklar, orta bölümlerinde ise gri kahverengi podzolik topraklar, akarsuların ağız kısımlarında sınırlı olarak

alüvyal topraklar görülmektedir (Gümüşhane ili arazi varlığı, 1996; Trabzon ili arazi varlığı, 1996, Şekil 9b).



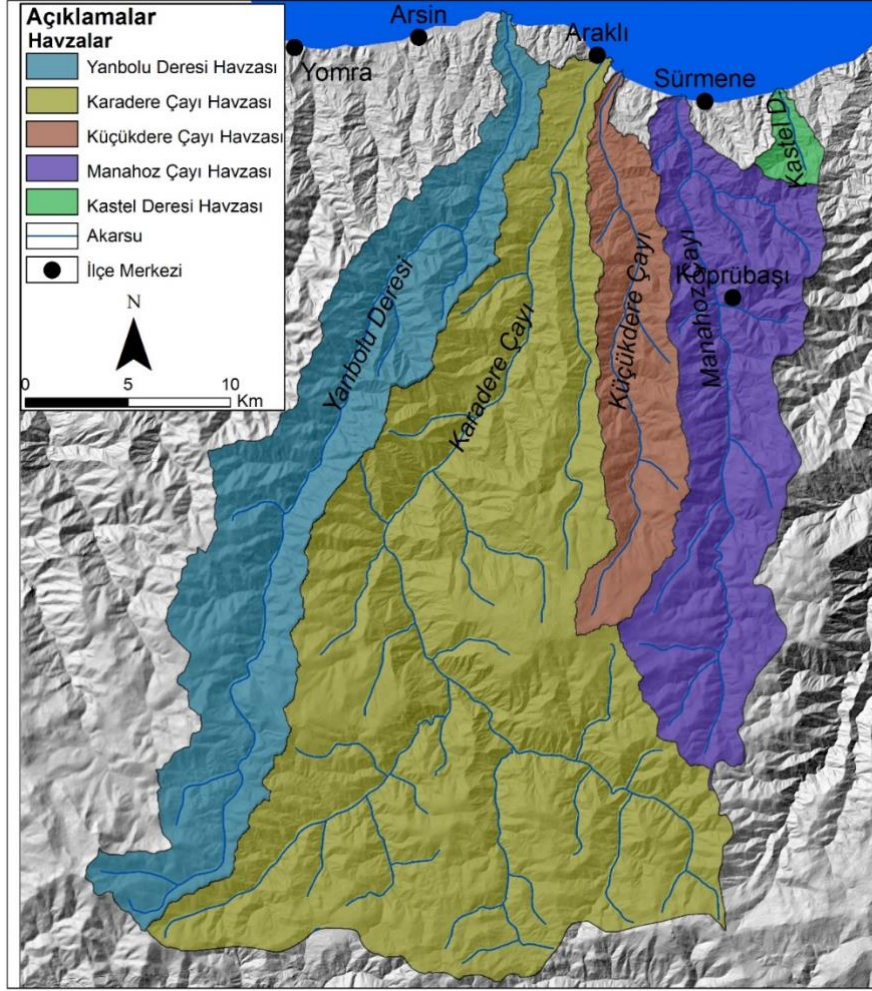
Şekil 9. Çalışma alanının bitki örtüsü (a) ve toprak (b) haritası

Karadere Çayı'nın oluşturduğu küçük delta ve taban seviyesi ovası içeri doğru genişçe bir koyu doldurmuştur (Ardel, 1963; Ayaydın, 2020). Araklı, Sürmene, Köprübaşı araştırma sahası içerisinde kalan önemli ilçe merkezleridir. 2022 yılı nüfus miktarları sırasıyla 48581, 25950 ve 4318'dir (URL-5).

3. Veri ve Yöntem

Sel ve taşkınlar havzaların jeomorfometrik, hidrolojik ve meteorolojik özelliklerinden kaynaklanabilir (Tehrany ve ark., 2014; Mahmood ve Rahman, 2019). Literatürde havzaların morfolojik özellikleri ile sel-taşkınlar arasındaki ilişkiyi konu edinen çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Horton, 1932;1945; Strahler, 1964; Youssef ve ark., 2011; Elmaghraby ve ark., 2014; Avcı ve Sunkar, 2015, 2018; Umrikar, 2017; Mahmood ve Rahman, 2019; Apaydın, 2021; Chakraborty, 2023; Ganie ve ark., 2023; Ghimire ve ark., 2023; Kamuş ve Atalay Dutucu, 2023; Kant ve ark., 2023). Bu çalışmada topoğrafya haritalarından Sayısal Yükseklik Modeli (SYM), ArcGIS 3D Analiz Modülü ile oluşturulmuştur. SYM'den havza sınırları, ArcHydro Modülü kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 10). Belirlenen havzalara Tablo 1'deki formüller uygulanmış ve sonuçlar bulgular bölümünde değerlendirilmiştir. Çalışmamızda Yanbolu Deresi, Karadere Çayı, Küçükdere

Çayı, Manahoz Çayı ve Kastel Deresi havzalarının alansal, geometrik (şekil) ve relief morfometrik özelliklerini ortaya koyan; drenaj yoğunluğu (Dd), akarsu sıklığı (Fs), havza şekli (Rf), uzama oranı (Re), havza reliefi (Bh), relief oranı (Rh), engebелilik değeri (Rn), akım toplanma zamanı (Tc), hipsometrik eğri (He) ve integral (Hi) indisleri hesaplanmış ve havzalar indis sonuçlarına göre karşılaştırılmıştır (Tablo 1).



Şekil 10. Morfometrik indislerin uygulandığı havzalar

Tablo 1. Havza Morfometrik Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Formüller

İndis	Formül	Kaynak
Alansal Morfometrik Özellikler		
Drenaj Yoğunluğu (Dd)	$D_d = \sum L/A$	Horton, 1932; 1945
Akarsu Sıklığı (Fs)	$F_s = N / A$	Horton, 1945; Strahler, 1964; Reddy ve ark., 2004
Havza Şekil (Geometrik) Özellikleri		
Havza Şekli (Rf)	$R_f = A / Lb^2$	Horton, 1932; 1945
Uzama Oranı (Re)	$Re = (2/Lm) \times [A/\pi]^{0,5}$	Schumm, 1956
Havza Relief Özellikleri		
Havza Reliefi (Bh)	$B_h = H_{maks} - H_{min}$	Schumm, 1956

Relief Oranı (Rh)	$R_h = H / L$	Schumm, 1956
Engebelilik değeri (Rn)	$Rn = B_h \times D_d$	Melton, 1957
Akım Toplanma Zamanı (Tc)	$T_c = 0,0195 \times L^{0,77} / S^{0,385}$	Kirpich, 1940
Hipsometrik Eğri	$y = h / H, x = a / A$	Strahler, 1952
Hipsometrik İntegral (Hi)	$Hi = (Hort - H \min) / (Hmaks - H \min)$	Strahler, 1952

Morfometrik indis sonuçları ile Turoğlu ve Aykut (2019)'un Ergene Çayı Havzası için yaptıkları duyarlılık sınıflandırması dikkate alınarak Araklı ve çevresinde yer alan akarsu havzaları için duyarlılık sınıflandırılması yapılmıştır. Her bir havza için indis sonuçlarına göre 1'den 5'e kadar değerler belirlenmiştir (Maksimum değer havza sayısına göre belirlenmiştir). Maksimum değer her bir parametre açısından yüksek taşkın riskini, minimum değer ise düşük taşkın riskini göstermektedir. Havzalar için indislere göre belirlenen değerler toplanmış ve indis sayısına bölünmüş, böylece taşkın duyarlılık değeri bulunmuştur. Havzaların taşkın duyarlılık değerine göre duyarlılık sınıfları, göreceli olarak, yüksek, orta ve düşük olarak belirlenmiştir. Yüksek değerler görece sel-taşkın riskinin yüksek olduğu havzaları, düşük değerler riskin düşük olduğu havzaları göstermektedir. 2019 yılında sel-taşkın bölgesinde arazi çalışmaları yapılmıştır. Arazi çalışmaları, morfometrik analiz sonuçları literatürle birlikte değerlendirilmiş, sonuçlar bulgular bölümünde tartışılmıştır.

4. Bulgular ve Tartışma

4.1. Çamlıktepe Mahallesi Sel-Taşkın

18 Haziran 2019'da Karadere Çayı Havzası'nda yer alan Çamlıktepe (Araklı) Mahallesi'nde meydana gelen sel ve taşkında 9 kişi hayatını kaybetmiş, 1 kişi kaybolmuş, 4 kişi yaralanmış ve 20'den fazla konut hasar görmüş, bazıları da yıkılmıştır (AFAD, 2019). Yüksek ve ark. (2022) olayı değerlendirirken; Araklı'da 24 saatlik sürede yaklaşık 14 mm yüksekliğinde yağış düştüğünü ve bu yağışın bu boyutta bir afete sebep olmasının mümkün olmadığını belirtmiştir. Olayın öncesinde düşen yağışın afete zemin hazırladığını bildirmiştir. Zira, 13-18 Haziran tarihleri arasında belli aralıklarla düşen yağış, zemini kısmen suya doymun hale getirmiştir. Bu durumun sonucunda sızma azalmış ve sel-taşkın oluşturacak suyun miktarı artmıştır. Afet öncesinde düşen yağış, zeminin su içeriğini artırarak heyelanları tetiklemiş ve afetin yaşanmasına neden olmuştur (Yüksek ve ark., 2022). Benzer bir değerlendirme de Işık ve ark., (2020) tarafından yapılmıştır. 6 saat aralıklarla çekilen uydu görüntülerine göre 17 Haziran'da saat 12.00'de Türkiye üzerindeki bulut yoğunluğunun fazla olduğu, havzaya yağışın bu aralıkta düştüğü ve zemin doymunluğunun arttığı, 18 Haziran'da saat 12.00

dolaylarında da bulut yoğunluğunun meydana gelmesiyle birlikte şiddetli yağışların başladığı ve saat 14.00 dolaylarında taşkın olayının meydana geldiği bildirilmiştir (Işık ve ark., 2020). Çamlıktepe Mahallesi konutların dere yatağına oldukça yakın ve eğim doğrultusunda olması sel-taşkın afete dönüşmesinde etkili olan diğer nedenlerdir. Sel-taşkınlarda mahalle içerisindeki yollar, enerji iletim hatları, Araklı ilçesinde bulunan 3 adet HES'in regülatörleri ile iletim yapıları ve mahallede yer alan ilköğretim okulu zarar görmüştür (AFAD, 2019; Şekil 11, 12).



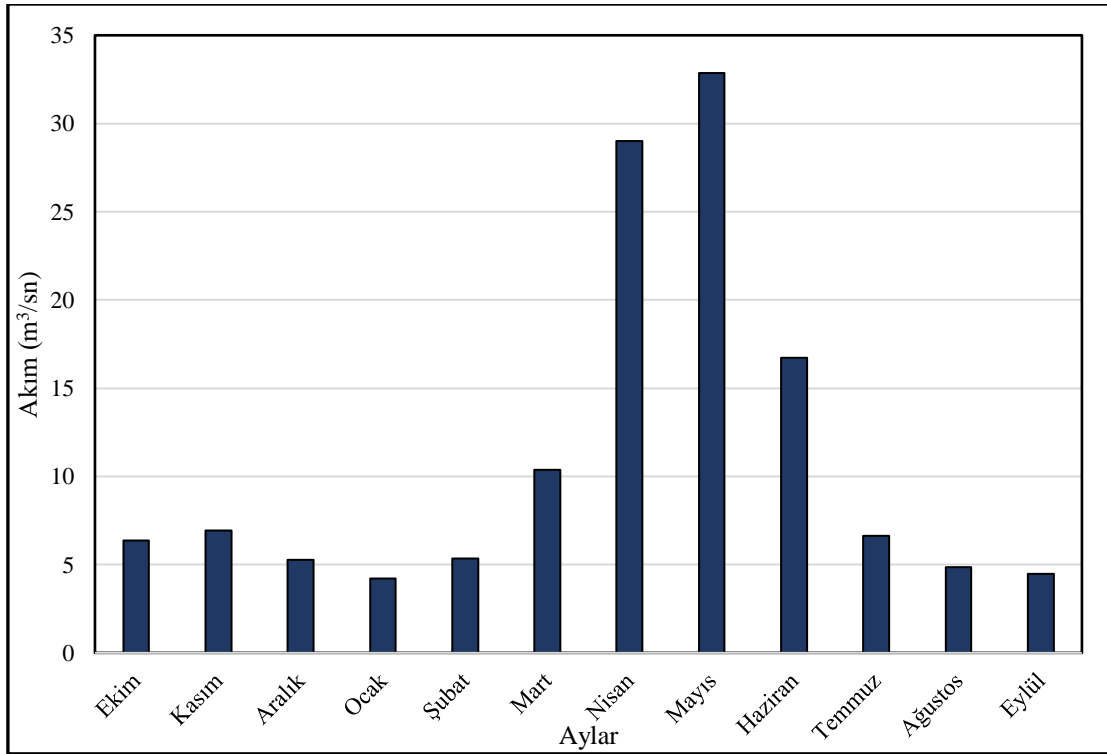
Şekil 11. Çamlıktepe sel-taşkınından görünüşler (AFAD, 2019)

18 Haziranda yaşanan sel ve taşkınlar sonrası yapılan çalışmalarda yağışlar esnasında meydana gelen heyelan sonucu akarsu yatağında oluşan setin gerisinde biriken büyük hacimdeki suyun, setin yıkılması ile serbest kaldığı ve sel ve taşkına neden olduğu belirtilmektedir (AFAD, 2019). Havza yukarı kesimlerinde aşırı yağış, zemin doygunluğunu artırarak, heyelana neden olmuş, 7-8 m yüksekliğinde set meydana gelmiş, bu seddin gerisinde biriken su, seddin yıkılması ile taşkına yol açmıştır. Dere yataklarına müdahale edilmesi, dere yatağının hafriyat malzemeleriyle doldurulması, dere en kesitinin değiştirilmesi taşkın şiddetini artıran nedenler olarak değerlendirilmiştir (URL-6). Yaptığımız arazi çalışmalarında vadi boyunca meydana gelmiş çok sayıda heyelan fotoğraflanmıştır. Heyelanlarla ve yağışlarla taşınan rüsubatın bazı binaların yıkılmasına ve can kayıplarına neden olduğu bildirilmiştir. Topoğrafik koşullar nedeniyle havzalarda erozyon ve heyelanların fazla olduğu, yer değiştiren malzemenin az eğimli yerlerde birikerek taşkınlara yol açtığı, bu nedenle sahanın yerleşmeye kapatılması önerilmektedir (AFAD, 2019).



Şekil 12. Sel taşkında Çamlıktepe Mahallesi'nde yapılar zarar görmüştür.

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü akım gözlem istasyonları verisine göre; Karadere Çayı üzerinde yer alan akım gözlem istasyonunun ortalama akım verilerine göre debinin en yüksek olduğu ay Mayıs'tır. Mayıs'tan sonra akım fazlalığı açısından Nisan ayı gelmektedir. Trabzon meteoroloji istasyonu uzun yıllar sıcaklık ve yağış verilerine göre en yağışlı ay Ekim ayıdır. Bu durum akarsuyun beslenmesinde yağmurun ikinci planda kaldığını göstermektedir. Akım üzerinde kar erimelerinin etkisi ön plandadır. Akım değerlerinin kış mevsiminde en az seviyede olması havzada kar şeklindeki yağışların fazlalığına bir işarettir (Şekil 13).



Şekil 13. Karadere Değirmencik (Ağnas) köyü mevki akım gözlem istasyonu akım verileri (1967-2005)

Kar erimelerinin haziran ayına kadar devam etmesi ve yağışlar, haziran ayına kadar akım değerlerinin yükselmesine neden olmaktadır.

4.2. Morfometrik Özellikler

Araklı ve yakın çevresinde yer alan akarsu havzalarına ait sayısal bazı değerler Tablo 2’de, morfometrik özellikler ise Tablo 3’de verilmiştir. Akarsu havzalarının alan, çevre, uzunluk gibi 2.boyut özellikleri ile rölyef gibi 3.boyut özelliklerinin yorumlanması akarsu havzalarının, hidrografik özelliklerinin anlaşılmasını sağlayacaktır.

Tablo 2. Çalışma Alanındaki Akarsu Havzalarına Ait Bazı Sayısal Değerler

Havza	Havza Alanı (Km ²)	Havza Çevresi (Km)	Ana Akarsu Uzunluğu (Km)	Maksimum Havza Uzunluğu (Km)	Toplam Dizin Sayısı	Ortalama Eğim (o)	Maksimum Yükseklik (m)	Ortalama Yükseklik (m)
Yanbolu Deresi H.	281,20	184,34	62,39	54,53	2458	25,2	3060	1490
Karadere Çayı H.	737,52	198,37	64,25	53,23	7076	24,6	2875	1702
Küçükdere Çayı H.	114,26	95,69	33,03	30,99	971	23,5	2740	1099
Manahoz Çayı H.	233,25	116,81	39,8	37,48	2222	24,5	2706	1312
Kastel Deresi H.	12,14	19,84	4,83	5,71	113	27	929	450

4.2.1 Alansal ve Geometrik (Şekil) Morfometrik Özellikler

Bu bölümde Dd, Fs, Rf ve Re indisleri ile analize tabi tutulan havzaların alansal ve şekil özellikleri ile sel-taşkın ilişkisi değerlendirilmiştir.

Drenaj Yoğunluğu (Dd)

Drenaj yoğunluğu, bir drenaj havzasının yüzeyinin geçirgenliğinin mükemmel bir göstergesidir. Dd değeri, yüksek yağışlı bölgeler, dik sahalarda ve geçirimsiz alanlar için 1,5 ila 2,0 arasında değişir, yeterince geçirimli havzalarda ise Dd değeri sıfır veya neredeyse sıfıra yakın olur (Horton, 1932). Dd, topoğrafyanın akarsular tarafından parçalanma derecesini gösteren bir indistir (Strahler, 1964). İnceleme sahası içerisinde kalan akarsu havzalarına ait drenaj yoğunluğu değerleri 2,31 ile 2,65 arasında değişmektedir. En yüksek drenaj yoğunluğu değeri Küçükdere Çayı Havzası’nda, en düşük drenaj yoğunluğu değeri ise Manahoz Çayı Havzası’nda bulunmuştur. Turoğlu ve Aykut (2019) Ergene Nehri alt havzalarının morfometrik parametrelerinin ortalama

değerlerinin üzerinde kalan değerlere sahip havzaları taşkın duyarlılığı yüksek havzalar olarak sınıflandırmıştır. 5 akarsu havzasının drenaj yoğunluğu değerlerinin ortalaması 2,53'dür. Bu değerlendirmeye göre ortalamanın altında Dd değerine sahip havzalar, Yanbolu Deresi Havzası ve Manahoz Çayı Havzası'dır. Diğer havzaların Dd değeri ortalamanın üzerindedir (Tablo 3). Bu açıdan taşkın duyarlılığı yüksek olan havzalar Karadere Çayı, Küçükdere Çayı ve Kastel Deresi havzalarıdır. Reddy ve ark. (2004) tarafından Merkezi Hindistan'da yapılan bir çalışmada, akarsu havzalarının drenaj yoğunluğu karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada Dd değeri 2'den düşük olan alt havzalar düşük drenaj yoğunluğu ile karakterize edilmiştir. Dd değeri 2'nin üzerinde olan havzalar ise drenaj yoğunluğunun yüksek olduğu havzalar olarak değerlendirilmiştir. Dd değerinin düşük olduğu havzalarda bu durum; geçirimli yüzeyler, yoğun bitki örtüsü ve alçak relief, yüksek olduğu havzalarda ise geçirimsiz yüzeyler, seyrek bitki örtüsü ve yüksek relief ile ilişkilendirilmiştir. Reddy ve ark. (2004) tarafından yapılan sınıflandırmaya göre, tüm havzalarda Dd değeri yüksektir. Alt havzalarda yağışın fazla ve eğimin yüksek olması ile geçirimsiz litoloji nedeniyle Dd değerleri yüksektir.

Akarsu Sıklığı (Fs)

Akarsu sıklığı (Fs), drenaj sisteminin havzadaki gelişme seviyesini sayısal olarak gösteren bir indistir (Turoğlu ve Aykut, 2019). Fs, birim alandaki (km^2) akarsu sayısıdır. Fs, drenaj havzasında yer alan toplam akarsu sayısının (segment), havza alanına oranlamasıyla bulunan bir indistir. Drenaj yoğunluğu ve akarsu frekansı değerleri küçük ve büyük drenaj havzaları için, genellikle drenaj alanının boyutuna göre değiştiği için doğrudan karşılaştırılabilir değildir. Çünkü büyük bir drenaj havzası, birim alan başına küçük bir drenaj havzası kadar çok sayıda küçük kol içerebilir ve buna ek olarak genellikle daha büyük bir akarsu veya akarsular içerebilir (Horton, 1945). Büyük drenaj alanlarında kol sayısı fazla olmasına karşın havza alanı büyük olduğundan akarsu sıklığı küçük drenaj alanlarına göre daha düşük çıkabilir. Fs değeri, havzaların geçirgenlik, sızma kapasitesi, relief ve deşarj özellikleri ile ilişkilidir (Patton ve Baker 1976; Montgomery ve Dietrich 1989; Eze ve Efiog 2010; Bhat ve ark., 2019). Fs, farklı litolojilerin yüzeylediği havzaları karşılaştırmak için de yararlıdır. Geçirimsiz yüzeyler, seyrek bitki örtüsü, yüksek relief koşulları ve düşük sızma kapasitesi (Reddy ve ark., 2004; Bhatt ve Ahmed 2014) yüksek Fs değerleri verir (Bhat ve ark., 2019). Akarsu sıklığı değerinin yüksek olması, yağış suyunun sızma, intersepsiyon ve evaporasyon gibi nedenlerle kayba uğramadan yüzeysel akışa geçtiğini gösterir (Atalay, 2018; Turoğlu ve Aykut, 2019). Yüzeysel akışın yüksek olması da sel-taşkın duyarlılığını artırır. İnceleme sahasındaki havzaların, akarsu sıklık değeri 8,49 ile 9,59 arasında değişir. Bu değerler inceleme sahasının litolojisi ve jeomorfolojisi (eğim değerleri) ile ilgilidir. Akarsu sıklık değeri en yüksek olan havza Karadere Çayı Havzası, en düşük olan havza ise Küçükdere Çayı Havzası'dır. Akarsu sıklık değeri ortalaması ise 9,12 olup, Yanbolu Deresi Havzası ile Küçükdere Çayı Havzası'nda akarsu sıklık değerleri ortalamanın altında, diğer

havzalarda ise ortalamanın üzerindedir. Bu açıdan Karadere Çayı, Manahoz Çayı ve Kastel Deresi havzalarında taşkın duyarlılığı yüksek, diğer havzalarda ise taşkın duyarlılığı düşüktür. Genel olarak tüm havzalarda akarsu sıklık değerleri yüksektir (Tablo 3).

Tablo 3. Havzalara Uygulanan Morfometrik İndislerin Sonuçları

İndisler	Yanbolu Deresi Havzası	Karadere Çayı Havzası	Küçükdere Çayı Havzası	Manahoz Çayı Havzası	Kastel Deresi Havzası
Drenaj Yoğunluğu	2,46	2,59	2,65	2,31	2,64
Akarsu Sıklığı	8,74	9,59	8,49	9,52	9,3
Havza Şekli	0,09	0,26	0,11	0,16	0,37
Uzama Oranı	0,34	0,57	0,38	0,45	0,68
Havza Reliefi	3060	2875	2740	2706	929
Relief Oranı	0,05	0,05	0,08	0,07	0,16
Engebelik Değeri	7,52	7,44	7,26	6,25	2,45
Akım Toplanma Zamanı (saat)	4,66	4,73	2,9	3,47	1,17
Hipsometrik İntegral	0,48	0,59	0,40	0,48	0,48

Havza şekli (Rf)

Horton (1932) tarafından havza şekli indisi, drenaj havzası genişliğinin uzunluğuna oranı olarak tanımlanır. Bu indis, havza alanının, maksimum havza uzunluğunun karesine bölünmesiyle bulunur. Formülde maksimum havza uzunluğu, ana akarsuya paralel olarak alınmalıdır. Rf ile havzaların hangi geometriye sahip olduğu yorumlanabilir ve Rf, yağış sonrasında taşkınımın şekli hakkında bilgi verir. Geçirgen topraklara sahip düzensiz şekilli drenaj havzaları için, havza şekil faktörü hidrolojik özellikler değerlendirilirken, hassas bir gösterge olarak alınmamalıdır (Horton, 1932). Rf değeri uzunlamasına bir geometriye sahip havzalarda düşüktür. Bu nedenle, bu şekle sahip havzalarda, yan kollar genellikle kısa ve daha az dizine sahip olduğundan, su toplama havzaları daha küçük olur ve yan kollar ana akarsuya aynı zamanda bağlanmaz, aralıklı olarak ulaşır. Bu durum, ekstrem yağışların sonrasında suyun aynı anda bir araya gelerek toplanmasını geciktirir ve büyük hacimli su kütlelerinin oluşmasını engeller. Rf değeri, 0,8 veya 1,0'e yakın olan havzalar dairesel bir şekle sahip olur, bu havzalarda yan kollar, ana akarsuya daha kısa zamanda bağlanırlar ve bu kollardan gelen su, aynı zamanda bir araya geldiği için taşkına yol açabilecek çok büyük hacimli su kütleleri oluşabilir (Turoğlu ve Aykut, 2019). Kısa sürede gerçekleşen yüzeysel akım ve düşük absorpsiyona bağlı olarak hızlı ve dik bir yükselme görülür (Atalay, 2018). İnceleme sahasında yer alan akarsu havzalarına ait havza şekli değeri 0,09 ile 0,37 değeri arasında değişmektedir. Havza şekli için farklı değer aralıkları vardır. Önerilen bir sınıflandırmaya göre; Rf için aralık değerleri <0,78 (uzun havza) ve >0,78 (daireysel havza) şeklindedir (Vinutha ve Janardhana, 2014; Rai ve ark., 2017; Sukristiyanti ve ark.,

2018). Bu sınıflandırmaya göre tüm havzalar uzun havza sınıfında yer almaktadır. Rf değerleri, Yanbolu Deresi Havzası, Karadere Çayı Havzası, Küçükdere Çayı Havzası, Manahoz Deresi Havzası ve Kastel Dere Havzası için sırasıyla 0,09-0,26-0,11-0,16-0,37'dir. Havza şekil değerlerinin ortalaması 0.19'dur. Bu değer üzerinde Rf değerine sahip havzalar, Karadere Çayı ve Kastel Deresi havzalarıdır. Rf değerleri havzaların uzunlaşmasına bir forma sahip olduğunu gösterir. Bu nedenle inceleme alanındaki akarsu havzalarında yan kollar ana akarsuya daha uzun sürede katılır. Ana akarsuda suyun yükselmesi dairesel havzalara göre kısa sürede gerçekleşmez. Göreceli olarak karşılaştırıldığında ortalamasının üzerinde Rf değerine sahip olan Kastel Deresi ve Karadere Çayı havzalarında taşkın duyarlılığı daha yüksek iken, Yanbolu Deresi, Küçükdere Çayı ve Manahoz Çayı havzalarında duyarlılık düşüktür (Tablo 3).

Uzama Oranı (Re)

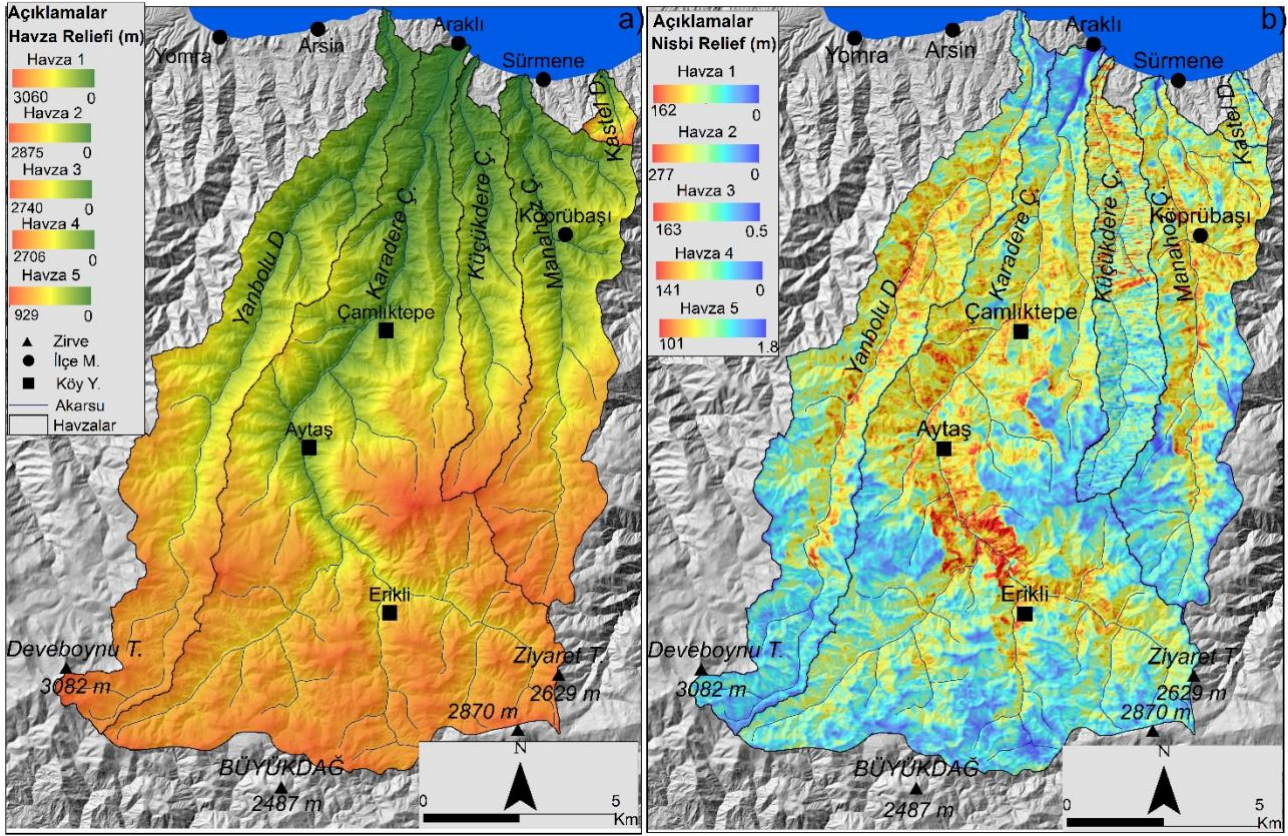
Herhangi bir drenaj havzasının şekli, uzama oranı ile de ifade edilir; uzama oranı, havza ile aynı alana sahip bir dairenin çapı ile havzanın maksimum uzunluğu arasındaki oranla bulunur (Schumm, 1956; Turoğlu ve Aykut, 2019). Uzama oranı değerleri 0-1 arasında değişmektedir. Re değeri 1'e yaklaştığında drenaj havzasının şekli daireye yaklaşır (Schumm, 1956). Uzama oranı indisi için, farklı iklim ve jeolojilerde 0,6-1,0 arasında değişen değerler önerilmektedir. Re değeri 0,6-0,8 arasında değişen alanlarda bu durum, güçlü relief ve dik yamaçlarla ilişkilendirilmiştir (Strahler, 1964). Güçlü relief ve dik yamaçların bulunduğu sahalarda havzalar, relief ve eğime paralel olarak uzanmaktadır. Aşınımın artmasına bağlı olarak uzun havzalar, zamanla dairesel bir şekil alabilir. Bu durum tektonizmanın etkin olduğu bölgeler için de geçerlidir. Tektonik olarak aktif alanlardaki havzalar, uzun ve eğime paraleldir. Zamanla tektonik aktivitenin yavaşlamasına bağlı olarak havzalar dairesel şekillere dönüşebilir (Bull ve McFadden, 1997; Pichetsopon ve Pailoplee, 2020).

Güçlü relief ve dik eğime sahip alanlarda infiltrasyon miktarı az iken, yüzeysel akış miktarı fazladır. 1'e yaklaşan Re değeri, taşkına duyarlı alanları karakterize etmektedir (Turoğlu ve Aykut, 2019). İnceleme sahasında yer alan akarsu havzalarına ait Re değerleri 0,34 ile 0,68 arasında değişmektedir. Uzama oranı ile ilgili önerilen bazı sınıflandırmalar literatürde bulunmaktadır. Bu sınıflandırmayı örneklendirmek gerektiğinde; uzun havza ($Re < 0.7$), az uzamış havza ($Re = 0.7-0.8$), oval havza ($Re = 0.8-0.9$) ve dairesel havza ($Re > 0.9$) şeklindedir (Sukristiyanti ve ark., 2018). Bu sınıflandırmaya göre inceleme alanında yer alan havzaların tümü uzun havza sınıfında yer almaktadır. Araştırma sahasında Re değerlerinin ortalaması 0,48'dir. Yanbolu Deresi Havzası, Küçükdere Çayı Havzası ve Manahoz Deresi havzalarında Re, ortalama değer altında, diğer havzalarda ise ortalamasının üstündedir. Bu açıdan Kastel Deresi ve Karadere Çayı havzalarında uzama oranı değerleri ile taşkın duyarlılığı daha yüksek, diğer havzalarda taşkın duyarlılığı düşüktür (Tablo 3).

4.2.2. Relief Morfometrik Özellikleri

Havza Reliefi (Bh)

Schumm (1956), havza reliefini drenaj havzasının maksimum yükseltisi ile minimum yükseltisi farkı olarak tanımlamaktadır. Bh değeri yüksek olan drenaj havzalarında engebeler derecesi ile akarsu yatak eğimleri yüksek ve yamaçlar dikdir. Havza reliefi, alt havzalarda drenaj gelişiminde, yüzey ve yeraltı su akışında, geçirimsizlik ve yeryüzü şekilleri üzerinde önemli rol oynayan bir faktördür (Reddy ve ark., 2004). Havza reliefi değerleri inceleme sahası içerisinde 929- 3060 m arasında değişir. Yanbolu Deresi Havzası'nda havza reliefi 3060 m, Karadere Çayı Havzası'nda 2875 m, Küçükdere Çayı Havzası'nda 2740 m, Manahoz Deresi Havzası'nda 2706 m, Kastel Deresi Havzası'nda 929 m'dir. Bh değeri, Yanbolu Deresi Havzası'nda en yüksek, Kastel Deresi Havzası'nda en düşüktür. Ortalama havza reliefi değeri 2462 m'dir. Bu değer altında kalan havza sadece Kastel Deresi Havzası'dır. Diğer havzaların Bh değeri ortalamasının üzerindedir. Bu parametre açısından havzalar göreceli olarak karşılaştırıldığında; Yanbolu Deresi, Karadere Çayı, Küçükdere Çayı ve Manahoz Çayı havzalarında duyarlılık yüksek, Kastel Deresi Havzası'nda düşüktür. Havza reliefi değerleri dışında çalışılan havzalar için 1000*1000 m boyutunda oluşturulan karelejlere havzaların maksimum ve minimum yükseltileri arasındaki farktan yararlanarak nisbi relief değerleri bulunmuştur. Nisbi relief havza içerisinde yükselti değişkenliğinin kısa mesafelerdeki durumunu göstermektedir. Bu durum yüzeyin engebeleri ve suyun yüzeyde kalma süresi hakkında bilgi verdiğinden oldukça önemlidir. Buna göre nisbi relief değerleri Yanbolu Deresi Havzası'nda 0-162 m, Karadere Çayı Havzası'nda 0-277 m, Küçükdere Çayı Havzası'nda 0,5-163 m, Manahoz Çayı Havzası'nda 0-141 m, Kastel Deresi Havzası'nda 1,8-101 m arasında değişmektedir. Nisbi relief değerlerinin en yüksek olduğu havza Karadere Çayı Havzası, en düşük olduğu havza ise Kastel Deresi Havzası'dır (Tablo 3; Şekil 14, 15).



Şekil 14. Havza reliefi (a) ve nisbi reliefin (b) dağılışı

Havzalardaki büyük yükselti farkına kısa mesafelerde erişilmesi de hızlı akışları ve erozyonu artırmaktadır. Havza reliefi ile sel-taşkın ilişkisi değerlendirildiğinde; havzalarda jeomorfolojik özelliklerinin bir sonucu olarak, kısa mesafelerde büyük yükseltilere ulaşılması, yüzeysel akışın miktarı ve hızı ile kısa sürede büyük miktarlarda su toplanma potansiyelinin artmasına neden olarak (Turoğlu ve Aykut, 2019), taşkın duyarlılık derecesini artırdığı söylenebilir. Nisbi relief değerleri de Karadere Çayı Havzası'nda sel-taşkın duyarlılığının yüksek olduğu göstermektedir.



Şekil 15. Karadere Çayı Havzası'nda engebellik ve eğim fazladır

Relief Oranı (Rh)

Relief oranı, havzada maksimum yükselti ile minimum yükselti arasındaki farkın ana akarsuya paralel en uzun drenaj hattına olan oranı ile belirlenebilir. Rh, biri yatay, diğeri havzanın en yüksek noktasından geçen iki düzlemin havza ağzında kesişerek oluşturduğu açının tanjantına eşit, boyutsuz bir yükseklik-uzunluk oranıdır. Relief oranı, topografya ölçeğindeki farklılıklardan bağımsız olarak havzalardaki nispi reliefin karşılaştırılmasını sağlar (Schumm, 1956). Yüksek relief oranı, taşkın gecikme süresini azaltır, pik noktasına kısa sürede erişilmesini sağlar ve ani yüksek taşkın olasılığını gösterir (Patton, 1988). Literatürde göreceli olarak çalışma alanlarındaki relief oranı değerlerine göre sınıflandırma yapılmaktadır. Genel olarak, relief oranının düşük değeri, düşük rölyefi, yüksek değeri ise dik eğim ve yüksek rölyefi ifade eder (Sukristiyanti ve ark., 2018). Yüksek relief oranı taşkın duyarlılığının da artması anlamına gelir. İnceleme sahası içerisinde relief oranı değerleri 0,05 ile 0,16 arasında değişir. Havzalar karşılaştırıldığında en yüksek değer Kastel Deresi Havzası'nda (0,16), en düşük değer ise Yanbolu Deresi Havzası (0,05) ile Karadere Çayı Havzası'nda (0,05) ölçülmüştür. Havza relief oranı değerlerinin ortalaması, 0,082'dir. Bu değer üzerinde olan havza sadece Kastel Deresi Havzası olup, diğer havzalarda bu değer ortalamasının altındadır. Bu parametre açısından Kastel Deresi Havzası'nda taşkın duyarlılığı, diğer havzalara göre daha yüksektir (Tablo 3).

Engebelilik Değeri (Rn)

Engebelilik değerinin hesaplanması için havza reliefi ile drenaj yoğunluğu değerleri gerekmektedir. Engebelilik değeri, Dd ile Bh değerinin çarpımı ile elde edilmektedir. Rn, birimsiz olup, yüksek değerleri yüzeysel akışa geçen su miktarının fazla, sızma ile kaybedilen su miktarının az olduğunu göstermektedir (Melton, 1957). Yağışla yere düşen suyun hızla yüzeysel akışa katılması ve suyun miktarı sel ve taşkın üzerinde oldukça etkilidir. Engebelilik değeri de, suyun yüzeyde kalma süresi, sızma ve havzanın yarıma derecesi hakkında bilgi veren bir indis olduğundan su baskını olaylarının yaşanmasında belirleyici olmaktadır (Verstappen, 1983; Reddy ve ark., 2004; Turoğlu ve Aykut, 2019). İnceleme sahası içerisinde engebelilik değeri 2,45 ile 7,52 arasında değişir. Engebelilik değeri ile ilgili olarak önerilen bir sınıflandırmaya göre; $R_n < 1$ düz yüzeyleri, $1 \leq R_n \leq 2$ dalgalı yüzeyleri, $R_n > 2$ yarılmış (badlans) yüzeyleri göstermektedir (Adnan ve ark., 2019; Alam ve ark., 2021; Bashir, 2023). Bu sınıflandırmaya göre tüm havzalar yarılmış yüzeylerin bulunduğu bir özellik göstermektedir. Havzalar kıyaslandığında Yanbolu Deresi, Karadere Çayı ve Küçükdere Çayı havzalarında en yüksek engebelilik değeri ölçülmüştür. Bu açıdan en küçük değer Kastel Deresi Havzası'na aittir. Engebelilik değeri ortalaması 6,17 olup, bu değer altında kalan havza sadece Kastel Deresi Havzası'dır. Diğer havzaların Rn değeri ortalamasının üzerindedir. Genelde seçilen drenaj alanlarında engebelilik değerinin yüksek olması erozyonun yüksek olmasına neden olmaktadır. Buna bağlı olarak sel-taşkın duyarlılığı artmaktadır. Ayrıca yüksek Rn değerinin

ölçülmesi yüzeysel akışların da fazla olmasını sağlayarak sel ve taşkın oluşumunu kolaylaştırmaktadır (Tablo 3; Şekil 16).



Şekil 16. Karadere Çayı Havzası'nda engebellik ve yarıлма derecesi yüksektir.

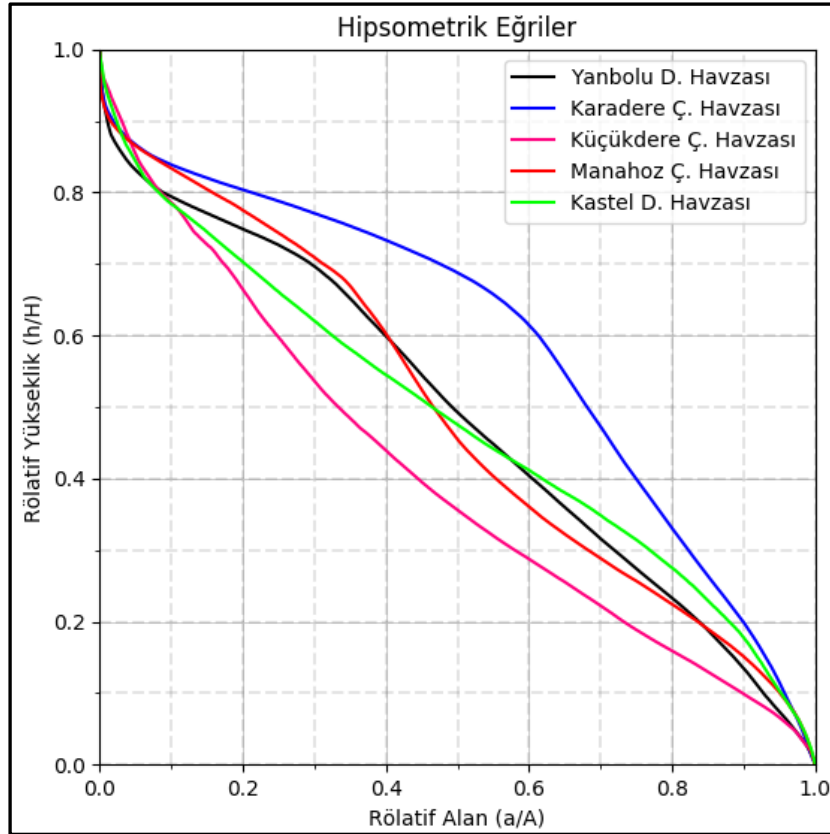
Akım Toplanma Zamanı (Tc)

Akım toplanma zamanı, bir akarsu havzasının yağışa tepkisini tahmin edebilmek için kullanılan en önemli parametrelerden biridir ve yağış-yüzeysel akış simülasyonunda önemli bir rol oynamaktadır. Tc, drenaj havzasında; suyun havzadaki en uzak noktadan, havzanın çıkışına ulaşması için gereken süre olarak tanımlanmaktadır (Salimi ve ark., 2017). Akım toplanma zamanı kavramı en azından Mulvaný'e (1851) kadar uzanır (Beven, 2020). Tc'nin hesaplanması için önerilen bazı yöntemler; Kirpich (1940), Kerby (1959), Mockus (1961), Sheridan (1994) ve Simas (1996) yöntemleridir. Akım toplanma zamanı, çalışılan sahanın eğim ve engebellik durumu, bitki örtüsü özellikleri ve zeminin geçirimsizliğine göre değişmektedir (Turođlu ve Aykut, 2019). Çünkü bu özellikler suyun yüzeyde kalma süresi üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Çalışma sahası içerisinde Kirpich (1940) yöntemine göre havzalar için akım toplanma zamanı 1,17 ile 4,73 (saat) arasında değişmektedir. Bu açıdan Karadere Çayı Havzası'nda 4,73, Kastel Deresi Havzası'nda 1,17'lik süre bulunmuştur. Bu fark, havza alanlarının farklı büyüklükte olmalarından kaynaklanmaktadır. Ortalama Tc değeri, 3,38 saattir (Tablo 3). Bu değerin altında olan havzalar Küçükdere Çayı Havzası ile Kastel Deresi Havzası'dır. Bu havzalar bu parametre açısından sel-taşkına daha fazla duyarlıdır. Genel olarak akım toplanma zamanının tüm havzalarda düşük olduğu görülür. Yani havzaların en yüksek noktalarına (kaynak sahaları) düşen suyun havza çıkışına ulaşması kısa sürede gerçekleşir. Bu durum da sel-taşkın potansiyelinin yüksek olduğunu gösterir.

Hipsometrik Eğri (He) ve İntegral (Hi)

He, yükselti alan dağılımı gösteren bir indis olup, eğrinin gösterdiği şekil, havzaların genç, olgun ve yaşlı olduklarına dair çıkarım yapmamıza olanak verir. Dışbükey eğriler genç topoğrafyayı, içbükey eğriler yaşlı bir topoğrafyayı temsil eder (Strahler, 1952; Keller ve Pinter, 2002). Hi,

havzaların minimum, maksimum ve ortalama yükseklik değerlerinden yararlanılarak bulunur. Hipsometrik integralin yüksek değerleri, topografyanın çoğunun ortalamaya göre yüksek olduğunu gösterir. İntegralin orta ila düşük değerleri, daha eşit derecede yarılmış drenaj havzaları ile ilişkilidir (Strahler, 1952; Keller ve Pinter, 2002). İncelenen havzaların hipsometrik eğrileri CalHypso eklentisi (Pérez-Peña ve ark., 2009) kullanılarak oluşturulmuştur. Havzalar içerisinde dışbükey hipsometrik eğri Karadere Çayı Havzası'na aittir. Bu nedenle Karadere Çayı Havzası'nın diğer havzalara nazaran daha genç topoğrafyaya sahip ve sel-taşkın duyarlılığının yüksek olduğu söylenebilir. İncelenen akarsu havzalarında H_i değerleri ise, 0,40-0,59 arasında değişmektedir (Tablo 3; Şekil 17). En yüksek H_i değeri Karadere Çayı Havzası'nda, en düşük H_i değeri ise Küçükdere Çayı Havzası'nda ölçülmüştür. Bu açıdan en genç havza Karadere Çayı Havzası iken, Küçükdere Çayı Havzası olgun havza karakterindedir.



Şekil 17. Çalışılan havzaların hipsometrik eğrileri

H_i değerlerinin ortalaması 0,486 olup, bu değer üzerinde olan havza, sadece Karadere Çayı Havzası'dır. H_e ve H_i birlikte değerlendirildiğinde; Karadere Çayı Havzası'nda taşkın potansiyelinin yüksek olduğu ortaya çıkmaktadır.

4.2.3. Taşkın Duyarlılık Sınıflandırması

Bu bölümde morfometrik indis sonuçları ile havzaların taşkın duyarlılıkları belirlenmiştir. Havzaların duyarlılık seviye aralığı 25-34 arasında değişmektedir (Tablo 4).

Tablo 4. Çalışılan Havzaların Morfometrik İndis Sonuçlarına Göre Belirlenen Duyarlılık Değerleri

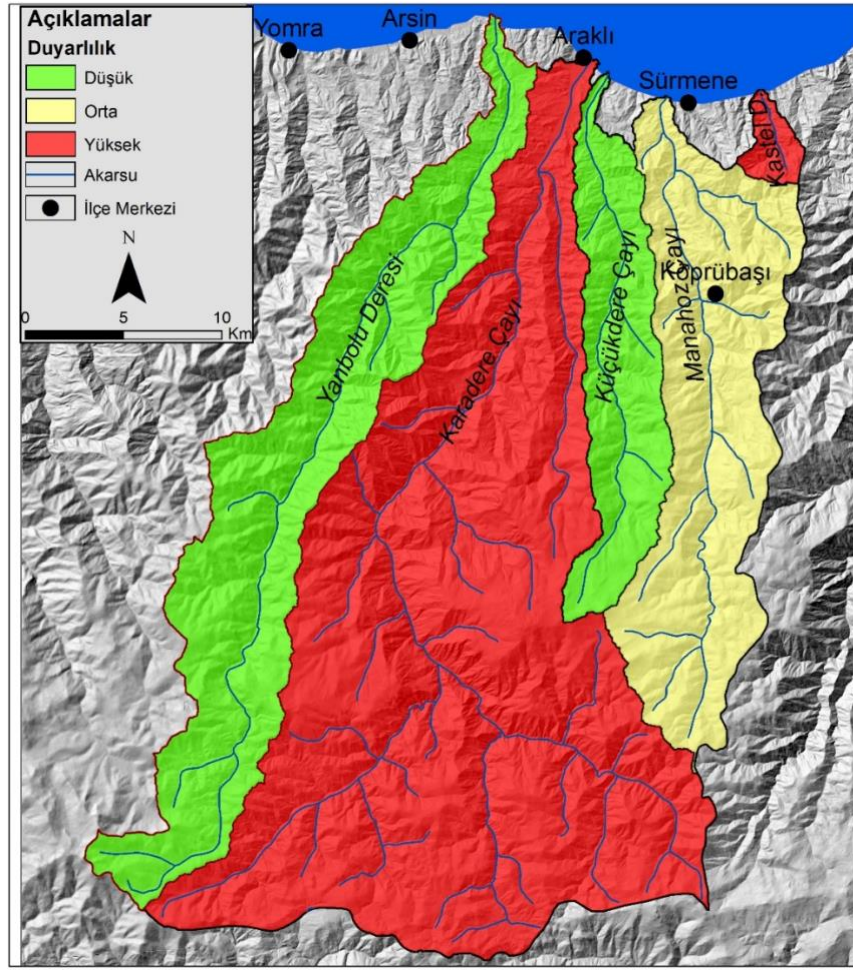
İndis	Yanbolu Deresi Havzası	Karadere Çayı Havzası	Küçükdere Çayı Havzası	Manahoz Çayı Havzası	Kastel Deresi Havzası
Dd	3	4	5	3	5
Fs	3	5	3	5	4
Rf	1	4	2	3	5
Re	3	4	3	4	5
Bh	5	4	3	3	1
Rh	1	1	2	2	5
Rn	5	5	4	3	1
Tc	1	1	2	3	5
Hi	3	5	2	3	3
Toplam	25	33	26	29	34

Taşkın duyarlılık değeri en küçük olan havza Yanbolu Deresi Havzası iken, duyarlılık değeri en yüksek olan havza ise Kastel Deresi Havzası'dır (Tablo 5).

Tablo 5. Çalışılan Havzaların Duyarlılık Sınıfları

Havzalar	Duyarlılık Değerleri	Duyarlılık Seviye Aralığı	Duyarlılık Sınıfı
Yanbolu Deresi Havzası	25	25-26	Düşük
Karadere Çayı Havzası	33	33-34	Yüksek
Küçükdere Çayı Havzası	26	25-26	Düşük
Manahoz Çayı Havzası	29	27-29	Orta
Kastel Deresi Havzası	34	33-34	Yüksek

Taşkın duyarlılık değerlerine göre belirlenen sınıflar dikkate alındığında; 2 havza yüksek duyarlılık sınıfında, bir havza orta duyarlılık sınıfında, 2 havza ise düşük duyarlılık sınıfındadır. Bu sınıflandırmaya göre duyarlılık; Kastel Deresi Havzası ile Karadere Çayı Havzası'nda yüksek, Manahoz Çayı Havzası'nda orta, Yanbolu Deresi Havzası ile Küçükdere Çayı Havzası'nda düşüktür (Şekil 18).



Şekil 18. Çalışılan havzaların duyarlılık sınıfları

5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada Araklı ve çevresinde sel-taşkına yol açan derelerin havza morfolojik özellikleri analiz edilmiştir. 18 Haziran 2019 tarihinde meydana gelen sel-taşkında Çamlıktepe Mahallesi'nde 9 kişi hayatını kaybetmiş, çok sayıda yapı yıkılmıştır. Sel-taşkının meydana gelmesinde havza yukarı bölümlerinde şiddetli yağış ve buna bağlı olarak meydana gelen heyelanların ve sediment taşımının büyük etkisi olduğu değerlendirilmiştir. Sel-taşkının afet boyutunda sonuçlara neden olmasında yıkılan HES'e ait malzemenin dere yatağını doldurmasının da etkili olduğu düşünülmektedir. Çalışma alanında ormanların fındık bahçelerine dönüştürülmesi, yapıların dere yatağına oldukça yakın konumlandırılması afetin diğer nedenleridir. Zira Şekil 11'den de görüleceği üzere Çamlıktepe Mahallesi'nde yer alan ilköğretim okulu dere yatağına oldukça yakın bir alanda bulunmaktadır. Bu çalışmada havzalara; 10*10 m çözünürlüklü SYM kullanılarak; drenaj yoğunluğu, akarsu sıklığı, havza şekli, uzama oranı, havza reliefi, relief oranı, engebellelik değeri, akım toplanma zamanı, hipsometrik eğri ve integral indisleri uygulanmıştır.

Genel olarak; havzalarda Dd, Fs, Bh ve Rn değerlerinin yüksek, akım toplanma zamanının kısa olması sel-taşkın riskinin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca tüm havzalar uzunlamasına bir şekle sahiptir. Bu durum havzalarda meydana gelebilecek taşkınlarda yan kolların ana akarsuya daha uzun sürede katılması nedeniyle ana akarsuda suyun yükselmesinin kısa sürede gerçekleşmesini önlemektedir. Morfometrik parametreler açısından havzalar karşılaştırıldığında; taşkın riskinin Karadere Çayı Havzası'nda en yüksek olduğu görülmüştür. Karadere Çayı Havzası'nda, Hi değeri en yüksek (0,59) bulunmuş ve hipsometrik eğrisi dışbükey görünüm göstermektedir. Bu durum havzanın gençlik döneminde olduğunu kanıtlamaktadır. Buna bağlı olarak sel karakterli akışlar taşkına yol açmıştır. Havzada havza reliefi ile engebelilik değeri de yüksektir. Bu durum afet boyutunda yaşanan sel ve taşkınların bir diğer nedenidir. Morfometrik indis sonuçlarına göre havzalar taşkın duyarlılığı açısından sınıflandırıldığında; Kastel Deresi ve Karadere Çayı havzalarında duyarlılık yüksek, Manahoz Çayı Havzası'nda orta, Yanbolu Deresi ve Küçükdere Çayı havzalarında düşük olarak belirlenmiştir.

Havzaların topoğrafik, iklimik ve morfometrik özellikleri ve arazi kullanımları sahanın potansiyel sel-taşkın alanı göstermektedir. Afet yönetimi kapsamında sel-taşkın riski yüksek olan sahalarda yapılacak çalışmalarda, morfometrik özelliklerin dikkate alınmasının, olası kayıpların azaltılmasına önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Yazarların Katkısı

1.yazar çalışmayı tasarlamış ve analiz sonuçlarına göre metni hazırlamış, arazi çalışmalarına katılmıştır. 2.yazar analizleri yapmış ve arazi çalışmalarına katılmıştır. 3.yazar havza sınırlarını belirlemiş ve analizleri yapmıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Adnan, M. S. G., Dewan, A., Zannat, K. E., Abdullah, A. Y. M. (2019). The use of watershed geomorphic data in flash flood susceptibility zoning: A case study of the Karnaphuli and Sangu river basins of Bangladesh. *Natural Hazards*, 99, 425–448.
- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). (2020). Afet Yönetimi Kapsamında 2019 Yılına Bakış ve Doğa Kaynaklı Olay İstatistikleri. *Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı*, Ankara.
- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD). (2019). Jeolojik Etüd Raporu. *Trabzon İl Afet ve Acil Durum Müdürlüğü*, Trabzon.
- Akay, H. (2021). Flood hazards susceptibility mapping using statistical, fuzzy logic, and MCDM methods. *Soft Computing*, 25, 9325–9346.
- Akdeniz, N. ve Güven, İ. H. (2002). *1/500000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Trabzon Paftası*. MTA Genel Müdürlüğü, No:5, Ankara.
- Akgül, M., Akay, A.O., Özocak, M., Esin, A. İ. and Şentürk, N. (2022). A new approach to spatial risk analysis in the long-term (1950–2020) assessment of natural disasters (avalanche, landslide, rockfall, flood) in Turkey. *Natural Hazards* 114, 3471–3508. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05528-z>
- Alam, A., Ahmed, B. and Sammonds, P. (2021). Flash flood susceptibility assessment using the parameters of drainage basin morphometry in SE Bangladesh. *Quaternary International*, 575–576, 295–307.
- Allen, M. R. and Ingram, W. J. (2002). Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*, 419, 224–232.
- Apaydın, A. (2021). 22 Ağustos 2020 Tarihli Taşkına Neden Olan Dereli Deresi (Giresun) Havza Analizleri, Taşkın Nedenleri ve Sonuçları. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 11 (2), 392-425. DOI: 10.31466/kfbd.908878.
- Ardel, A. (1963). Samsun-Hopa Arasındaki Kıyı Bölgesinde Coğrafi Müşahedeler. *İstanbul Üniversitesi Coğrafya Enstitüsü Dergisi*, 7 (13), 36-49.
- Atalay, İ. (2018). *Uygulamalı Hidrografya*. İzmir: Meta Basım Matbaacılık Hizmetleri.
- Avcı, V. ve Sunkar, M. (2105). Giresun'da Sel ve Taşkın Oluşumuna Neden Olan Aksu Çayı ve Batlama Deresi Havzalarının Morfometrik Analizleri. *İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü Coğrafya Dergisi*, Sayı 30, 91-119.
- Avcı, V. ve Sunkar, M. (2018). Bulancak'ta (Giresun) sel ve taşkın olaylarına neden olan Pazarsuyu, İncüvez, Kara ve Bulancak derelerinin morfometrik analizleri. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 28 (2), 15,41.
- Avcı, V. (2023). Esmahanım Deresi Havzası'nın (Akçakoca-Düzce) Morfometrik Özellikleri ve Taşkınlara Etkisi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 25 (1), 96-118. DOI: 10.24011/barofd.1148666
- Avcı, V. and Ünsal, Ö. (2023). A Morphometric Approach to Bozkurt (Kastamonu-Türkiye) Flood. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 9 (2), 216-239. DOI: 10.21324/dacd.1210797
- Ayaydın, N. (2020). *Araklı'nın Kent Coğrafyası*. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Coğrafya Anabilim Dalı, Erzurum.
- Bashir, B. (2023). Morphometric Parameters and Geospatial Analysis for Flash Flood Susceptibility Assessment: A Case Study of Jeddah City along the Red Sea Coast, Saudi Arabia. *Water*, 15, 870. <https://doi.org/10.3390/w15050870>
- Beven, K. J. (2020). A History of the concept of time of concentration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 2655-2670, <https://doi.org/10.5194/hess-2019-588>
- Bhatt, S. and Ahmed, S. A. (2014). Morphometric analysis to determine floods in the Upper Krishna basin using Cartosat DEM. *Geocarto Int*, 29(8), 878–894.
- Bhat, M. S., Alam, A., Ahmad, S., Farooq, H. and Ahmad, B. (2019). Flood hazard assessment of upper Jhelum basin using morphometric parameters. *Environmental Earth Sciences*, 78, Article number: 54
- Biricik, A. S. (1996). Senirkent'de Sel Afetleri (13 Temmuz 1995-18-19 Temmuz 1996) Isparta. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 1, 9-30.
- Bull, W. B. and McFadden, L. D. (1977). Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault. California. Proceedings of the Eighth Annual Geomorphology Symposium, in: Geomorphology in Arid Regions, Doehring, D. O., (Ed), State University of New York, Binghamton, 115– 138
- Chakraborty, S. (2023). Application of Basin Morphometry for Hydro-geomorphological Implications: A Study of the Indo-Bhutanese Duduya Watershed. *Journal of the Geological Society of India*, 99, 473–486. <https://doi.org/10.1007/s12594-023-2335-8>

- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ). Akım Gözlem İstasyonları Akım verileri. *Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü*, Ankara.
- Doocy, S., Daniels, A., Murray, S. and Kirsch, T. D. (2013). The human impact of floods: a historical review of events 1980-2009 and systematic literature review. *PLoS Curr.* DOI: 10.1371/currents.dis.f4deb457904936b07c09daa98ee8171a
- Elmaghraby, M., Masoud, M. and Niyazi, B. (2014). Assessment of surface runoff in arid, data scarce regions; an approach applied to Wadi Al-Hamd, Al Madinah Al Munawarah, Saudi Arabia. *Life Science Journal*, 11 (4), 271–289.
- Erinç, S. (1996). *Klimatoloji ve Metodları*. İstanbul: Alfa Basım Yayım Dağıtım.
- Eze, E. B ve Efiog, J. (2010). Morphometric parameters of the Calabar River basin: implication for hydrologic processes. *Journal of Geography and Geology*, 2 (1),18–26.
- Fang, Z., Wang, Y., Peng, L. and Hong, H. (2021). Predicting flood susceptibility using LSTM neural networks. *Journal of Hydrology*, 594, 125734.
- Ganie, P. A., Posti, R., Kunal, K., Kunal G., Bharti, V. S., Sehgal, V. K., Sarma, D., Pandey, P.K. (2023). Modelling of the Himalayan Mountain river basin through hydro-morphological and compound factor-based approaches using geoinformatics tools. *Modeling Earth Systems and Environment* 9, 3053–3084. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01691-9>
- Ghimire, M., Timalina, N. and Zhao, W. (2023). A Geographical approach of watershed prioritization in the Himalayas: a case study in the middle mountain district of Nepal. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03610-5>
- Gümüşhane ili arazi varlığı (1996). Başbakanlık, Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, yayınları ; il rapor no:29, Ankara
- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Eos, transactions american geophysical union*, 13(1), 350-361.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin*, 56(3), 275-370.
- Hoşgören, M. Y. (2004). Hidrografya'nın Ana Çizgileri 1 Yeraltı suları-Kaynaklar-Akarsular. İstanbul: Çantay Kitabevi.
- Ingram, W. (2016). Extreme precipitation: increases all round. *Nat. Clim. Change*, 6, 443–444.
- İşik, F. Bahadır, M., Zeybek, H. İ. ve Çağlak, S. (2020). Karadere Çayı Taşkını (Araklı -Trabzon). *Mavi Atlas*, 8 (2), 526-547.
- Kadioğlu, M. (2019). Kent Selleri Yönetim ve Kontrol Rehberi. İstanbul: Marmara Belediyeler Birliği Kültür Yayınları. 373 sayfa
- Kamuş, A. O. ve Atalay Dutucu, A. (2023). Hidromorfometrik Analizlerle Esmahanım Deresi Havzasının Taşkın Duyarlılığının Belirlenmesi. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi*, (11), 1-21. DOI: 10.46453/jader.1182773
- Kant, C., Kumar, G. and Meena, R.S. (2023), Modeling morphometric and geomorphological parameters of mountainous river basin for water resource management using remote sensing and GIS approach. *Modeling Earth Systems and Environment* 9, 2151–2163,. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01614-0>
- Karadeniz, Y. (1995). *Trabzon ve çevresinin iklimi*. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Fiziki Coğrafya Anabilim Dalı, İstanbul.
- Keller, E. A. and Pinter, N. (2002). *Active Tectonics Earthquakes, Uplift, and Landscape*. New Jersey: Prentice Hall. 362ss
- Kerby, W.S. (1959). Time of concentration for overland flow. *Journal of Civil Engineering*, 26(3). Amer. Soc. of Civil Eng., Reston, VA. pp. 60.
- Ketin, İ. (1966). Anadolu'nun Tektonik Birlikleri. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 66, 20-37.
- Kirpich, Z. P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil engineering*, 10(6), 362.
- Koç, G. and Thielen, A. H. (2016). Societal and economic impacts of flood hazards in Turkey, An overview. *E3S Web of Conferences* 7, 05012 (2016), *FLOODrisk 2016-3. European Conference on Flood Risk Management*, DOI: 10.1051/76e3sconf/2010705012.
- Kömüşcü, A.Ü. and Çelik, S. (2013). Analysis of the Marmara flood in Turkey, 7–10 September 2009: an assessment from hydrometeorological perspective. *Natural Hazards*, 66, 781–808, <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0521-x>

- Luino, F. (2016). Floods. In: Bobrowsky, P., Marker, B. (eds) Encyclopedia of Engineering Geology. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12127-7_126-1
- Mahmood, S. and Rahman, Au. (2019). Flash flood susceptibility modeling using geo-morphometric and hydrological approaches in Panjkora Basin, Eastern Hindu Kush, Pakistan, *Environmental Earth Sciences*, 78:43
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM). (2021), Trabzon, Rize, Gümüşhane, Bayburt, Akçaabat ve Pazar İstasyonlarının sıcaklık ve yağış verileri. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Melton, M. A. (1957). An analysis of the relations among elements of climate, surface properties, and geomorphology. Columbia Univ, Department of Geology, Technical Report, No: ONR-11, New York.
- Mind'je, R., Li, L., Amanambu, A. C., Nahayo, L., Nsengiyumva, J. B., Gasirabo, A. and Mindje, M. (2019). Flood susceptibility modeling and hazard perception in Rwanda. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 38, 101211.
- Mockus, V. (1961). Watershed lag. U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, ES-1015, Washington, DC.
- Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E. (1989). Source areas, drainage density and channel initiation. *Water Resources Research* 25 (8), 1907-1918.
- Mulvany, T.J. (1851). On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rainfall and flood discharges in a given catchment. *Proc. Inst. Civil Eng. Irel.* 4, 18-33.
- Orman Genel Müdürlüğü (OGM). Meşçere verisi. *Orman Genel Müdürlüğü*, Ankara.
- Patton, P. C. ve Baker, V. R. (1976). Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. *Water resources research*, 12(5), 941-952.
- Patton, P.C. (1988). Drainage basin morphometry and floods. In: Baker, V.R., Kochel, R.C., Patton, P.C. (Eds.), *Flood Geomorphology*. Wiley, New York, pp. 51-65.
- Pérez-Peña, J. V., Azañón, J. M. and Azor, A. (2009). CalHypso: An ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain. *Computers & Geosciences*, 35(6), 1214-1223.
- Pichetsopon, T. and Pailoplee, S. (2020). DEM and GIS analysis of geomorphic indices for evaluating tectonic activity of Phetchabun province, *Bulletin of Earth Sciences of Thailand*. 12 (10), 1-14
- Rai, P. K., Mishra, V. N. and Mohan, K. (2017). A study of morphometric evaluation of the Son basin, India using geospatial approach, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 7, 9-20, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.05.001>
- Rawat, A., Bisht, M.P.S., Sundriyal, Y. P., Banerjee, S. and Singh, V. (2021). Assessment of soil erosion, flood risk and groundwater potential of Dhanari watershed using remote sensing and geographic information system, district Uttarkashi, Uttarakhand, India, *Applied Water Science* 11. 119
- Reddy, G. P. O., Maji, A. K. and Gajbhiye, K. S. (2004). Drainage morphometry and its influence on landform characteristics in a basaltic terrain, Central India-a remote sensing and GIS approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6(1), 1-16.
- Sachdeva, S. and Kumar, B. (2022). Flood susceptibility mapping using extremely randomized trees for Assam 2020 floods, *Ecological Informatics*, 67, 101498, <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101498>.
- Salimi, E. T., Nohegar, A., Malekian, A., Hoseini, M. and Holisaz, A. (2017). Estimating time of concentration in large watersheds, *Paddy and Water Environment*, 15, 123-132.
- Samanta, S., Pal, D.K. and Palsamanta, B. (2018). Flood susceptibility analysis through remote sensing, GIS and frequency ratio model. *Applied Water Science*, 8, 66. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0710-1>
- Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological society of America bulletin*, 67(5), 597-646.
- Sezer, L. İ. (1997). İzmir'de 3-4 Kasım 1995 Karşıyaka-Çiğli Sel Felaketi (Meteorolojik- Klimatolojik Açından Bir Yaklaşım). *Ege Coğrafya Dergisi*, 9, 185-242.
- Simas, M. (1996). *Lag time characteristics in small watersheds in the United States*. A dissertation submitted to School of Renewable Natural Resources, University of Arizona, Tucson, AZ.
- Sheridan, J. M. (1994). Hydrograph time parameters for flatland watersheds. *Transactions of the ASAE*, 37(1), 103-113, doi: 10.13031/2013.28059)
- Sholihah Q., Kuncoro, W., Wahyuni, S., Suwandi, S. P. and Feditasari, E. D. (2020). The analysis of the causes of flood disasters and their impacts in the perspective of environmental law. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 437, 012056 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/437/1/012056
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological society of America bulletin*, 63(11), 1117-1142.

- Strahler, A. N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel net work. In: Chow, V., Ed., Handbook of Applied Hidrology, McGraw Hill Newyork, 39-76.
- Sukristiyanti S., Maria R. and Lestiana H. (2018), Watershed-based Morphometric Analysis: A Review, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 118, 012028, doi:10.1088/1755-1315/118/1/012028.
- Şahin, C. ve Sipahioğlu, Ş. (2003). *Doğal Afetler ve Türkiye*. Ankara: Gündüz Eğitim Yayıncılık.
- Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. Scientific reports, 10,13768. doi: 10.1038/s41598-020-70816-2.
- Tarım ve Orman Bakanlığı (2020). Doğu Karadeniz Havzası Taşkın Yönetim Planı Yönetici Özeti, Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü Taşkın ve Kuraklık Yönetimi Daire Başkanlığı, Ankara.
- Tehrany M. S., Pradhan, B. and Jebur, M. N. (2014). Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of Hydrology*, 512, 332–343.
- Trabzon İli Arazi Varlığı (1996). Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Turoğlu, H. ve Aykut, T. (2019). Ergene nehri havzası için hidromorfometrik analizlerle taşkın duyarlılık değerlendirmesi. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi*, 2, 1-15.
- Ullah, K. and Zhang J (2020). GIS-based flood hazard mapping using relative frequency ratio method: A case study of Panjkora River Basin, eastern Hindu Kush, Pakistan. PLoS ONE 15(3): e0229153. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229153>
- Umrikar, B. N. (2017). Morphometric analysis of Andhale watershed, Taluka Mulshi, District Pune, India. *Applied Water Science*, 7, 2231–2243.
- Uzun, M. ve Özcan, S. (2016). Solaklı Dere-İyidere Arasında (Trabzon / Of) Kıyı Kullanımının Zamansal Değişimi ve Sürdürülebilir Yönetimi. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 21 (35), 175-196. DOI: 10.17295/dcd.61537
- URL-1 <https://www.mathworks.com/products/mapping.html>
- URL-2 www.emdat.be
- URL-3 tabb.afad.gov.tr
- URL-4 <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A&m=TRABZON> 22/05/2021 tarihli erişim
- URL-5 <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=95&locale=tr> erişim 14/04/2023
- URL-6 <https://www.haberturk.com/ktu-arakli-daki-sel-felaketi-icin-rapor-hazirladi-dere-yatagina-hafriyat-dokulmus-3542120?page=4> 26/12/2022 tarihli erişim
- Verstappen, H. T. (1983). *Applied geomorphology: Geomorphological surveys for environmental development*. Amsterdam: Elsevier.
- Vinutha, D.N. ve Janardhana, M. R. (2014). Morphometry of the Payaswini Watershed, Coorg District, Karnataka, India, Using Remote Sensing and GIS Techniques. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET)*, 3 (5), 516-524
- Yıldırım, Ü. (2021). Trabzon (KD Türkiye) Akarsu Havzalarının Coğrafi Bilgi Sistemi Kullanılarak Morfometrik Analiz Yoluyla Hidrolojik Değerlendirmesi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 23(1), 244-253.
- Youssef, A. M., Pradhan, B. and Hassan, A. M. (2011). Flash flood risk estimation along the St. Katherine Road, Southern Sinai, Egypt using GIS based morphometry and satellite imagery. *Environmental Earth Sciences*, 62, 611–623.
- Yüksek, Ö., Babacan, H. T. ve Yüksek, O. (2022). Doğu Karadeniz Havzası'nda Taşkın Sebepleri, Zararları ve Taşkın Yönetimi Çalışmaları. *Turkish Journal of Hydraulics*, 6 (2), 36-46.
- Xu, K., Han, Z., Xu, H. and Bin, L. (2023). Rapid Prediction Model for Urban Floods Based on a Light Gradient Boosting Machine Approach and Hydrological–Hydraulic Model. *International Journal of Disaster Risk Science* 14, 79–97. <https://doi.org/10.1007/s13753-023-00465-2>

Kazein ve Glüten İzolatlarının Bazı Fonksiyonel Özelliklerinin Karşılaştırılması

Ümran CANSU^{1*}, Gülistan OKUTAN², Gökhan BORAN³

Öz

Bu çalışmada, gıda endüstrisinde önemli bir yere sahip olan kazein ve glüten fonksiyonel özellikleri bakımından karşılaştırılmıştır. Protein örneklerinde viskozite, iletkenlik, kitle yoğunluğu, Hausner oranı ve Carr indeksi, ıslanabilirlik, su tutma kapasitesi, yağ bağlama kapasitesi, köpük oluşturma kapasitesi ve stabilitesi, renk, emülsiyon aktivitesi ve stabilitesi ve son olarak çözünürlük analizleri gerçekleştirilmiştir. Kazeinin (2.05±0.16 g su/g protein) su tutma kapasitesi glütene (1.64±0.10 g su/g protein) göre daha yüksek bulunmuştur. Glütenin köpük oluşturma kapasitesi kazeinden daha yüksek olduğu, köpük stabilitesinin ise glütende 60. dakika sonunda bile aynı düzeyde kaldığı gözlenmiştir. Glütenin emülsiyon stabilitesinin kazeinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Protein örneklerinin, beklendiği gibi, izoelektronik noktalarda en düşük çözünürlük gösterdiği, yüksek pH değerlerinde ise oldukça yüksek çözünürlük gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, kazeinin glütene göre daha viskoz çözeltiler oluşturduğu, glütenin ise yüksek pH değerlerinde kazeine göre daha fazla çözündüğü gözlenmiştir. Her iki proteinin de iyi akış özelliği gösterdiği Hausner oranı ve Carr indeksi ile belirlenmiştir. Hausner oranı kazeinde 1.69±0.02 ve glütende 1.86±0.10; Carr indeksi ise kazeinde 40.84±0.85 ve glütende 46.24±1.80 olarak belirlenmiştir. Renk ölçümlerine göre glütenin daha parlak ve açık renk olduğu, kazeinin ise daha yüksek a* ve b* değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçların, çalışılan proteinlerin gıda ve farmasötik uygulamalarda kullanımına katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Fonksiyonel özellikler, glüten, kazein, viskozite.

Comparison of Some Functional Features of Casein and Gluten Isolates

Abstract

In this study, casein and gluten that have an important place in the food industry, were compared in terms of their functional properties. Viscosity, conductivity, bulk density, Hausner ratio and Carr index, wetting ability, water-holding capacity, fat-binding capacity, foam formation capacity and stability, color, emulsion activity and stability, and finally solubility analyses were performed on protein samples. It was found that the water-holding capacity of casein (2.05±0.16 g water/g protein) was higher than gluten (1.64±0.10 g water/g protein). It was determined that foam formation capacity of gluten was higher and the foam stability remained almost the same after 60 minutes in gluten. It was determined that the emulsion stability of gluten was higher than that of casein. As expected, protein samples showed the lowest solubility at the isoelectric points and showed very high solubility at high pH values. In addition, it was observed that casein formed more viscous solutions than gluten, and gluten dissolved more than casein at high pH values. The good flow properties of both proteins were determined by the Hausner ratio and Carr index. The Hausner ratio was determined to be 1.69±0.02 in casein and 1.86±0.10 in gluten, while the Carr index was determined to be 40.84±0.85 in casein and 46.24±1.80 in gluten. According to the color measurements, it was found that gluten had a brighter and lighter color, while casein had higher a* and b* values. It is thought that the results obtained can contribute to the use of these proteins in food and pharmaceutical applications.

Keywords: Casein, functional features, gluten, viscosity.

¹Harran Üniversitesi, Organize Sanayi Bölgesi Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye, umrancansu@harran.edu.tr

²Siirt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Gıda İşleme Bölümü, Siirt, Türkiye, gulistan.okutan@siirt.edu.tr

³Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye, gboran@yyu.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0002-0504-8308>

²<https://orcid.org/0000-0002-1936-7633>

³<https://orcid.org/0000-0002-8871-8433>

1. Giriş

Proteinler, besinsel faydaları ve gıda formülasyonlarındaki işlevsellikleri nedeniyle gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Akharume ve ark., 2020). Proteinler oldukça fonksiyonel moleküller olduğundan, hava kabarcıklarını veya yağ damlacıklarını stabilize edebilir ve jel yapısı oluşturabilir (Wu ve ark., 2019). Gıda proteinleri beslenme, biyoaktivite ve sağlıkta önemli roller üstlenmektedir. Ancak gıda proteinlerinin işlevselliği; çözünürlük, su tutma, yağ emilimi, emülsifiye etme, köpürme ve jelleşme gibi fonksiyonel özelliklerine bağlı olarak belirlenmektedir. Bu özellikler, gıda proteinlerini çok çeşitli ürünlerin geliştirilmesi, formülasyon çalışmaları ve diğer uygulamalarında çok yönlü ve kullanışlı bileşenler haline getirir (Aryee ve ark., 2018).

Kazein, süt proteinlerinin yaklaşık %80'nini oluşturmakla beraber α_{s1} , α_{s2} , β ve κ olmak üzere amfibik özellikte olan 4 farklı alt gruba sahiptir. Kazeinin protein yapısı, kazein miselleri olarak bilinen küresel olmayan parçacıklardan oluşur (Silva ve ark., 2018). Ayrıca, yüksek hidrofobik yapıları nedeniyle kazein alt grupları ve amorf kalsiyum fosfattan oluşan heterojen bir yapı oluşturmaktadır. Kuru ağırlık bazında, miseller %94 protein ve %6 iyonlardan (başlıca kalsiyum, fosfat, magnezyum ve sitrat) oluşur (Ranadheera ve ark., 2016). Ticari olarak üretilen kazein izolatları, besleyici ve fonksiyonel özellikleri nedeniyle gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılır ve ayrıca biyoaktif maddelerin (vitaminler, yağ asitleri vb.) doğal taşıyıcıları olarak kabul edilir. Kazein proteini; emülsiyon oluşturma, su ve yağ bağlama, viskoz yapı oluşturma, köpürtme ajanı ve çeşitli işlevsel özelliklerine bağlı olarak; süt ürünleri, bebek mamaları, unlu mamuller, et ürünleri, şekerlemeler ve içeceklerin stabilizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır (Lu ve ark., 2015). Ayrıca, kazein protein izolatları düşük maliyetli, kolay erişilebilir, kararlı ve toksik değildir. Kazein proteinleri, biyolojik olarak uyumlu ve parçalanabilir oldukları için genel olarak güvenli olan (GRAS, generally regarded as safe) moleküllerdir (Rehan ve ark., 2019).

Glüten, buğday nişastası endüstrisinin ekonomik açıdan önemli bir yan ürünüdür. Glüten, gliadin ve glütenin proteinlerinden oluşmaktadır. Farklı buğday çeşitleri, protein içeriği ve glüten proteinlerinin bileşimi ve dağılımı bakımından farklılık gösterir. Gliadin ve glütenin proteinleri, suda çözünmeyen ancak sulu etanolde ekstrakte edilebilen tohum proteinlerini temsil eden ve yüksek düzeyde glutamin (%38) ve prolin kalıntıları (%20) içeren prolaminler olarak anılır (Biesiekierski, 2017). Glutenin reolojik ve fonksiyonel özellikleri, gluteninlerin gliadinlere oranına ve bu yapıların etkileşimlerine bağlı olarak değişmektedir. Reolojik özellikleri, glutenin fonksiyonel kullanımlarının temelini oluşturmaktadır. Bundan dolayı glüten en önemli bitkisel proteinlerden biri olarak kabul edilmekte ve özellikle fırıncılık ürünlerinde (ekmek, kek, bisküvi, kahvaltılık gevrekler), et ürünlerinde, hazır çorbaların formülasyonu ile ilaç ve kimyasal ürünlerde kullanımı ile ön plana çıkmaktadır. Glütenin sayısız uygulamaları, temel olarak oluşturduğu viskoelastik yapı, su emme ve

kıvam artırıcı etkileri gibi farklı fonksiyonel özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Majzoobi ve Abedi, 2014).

Bu çalışmada, gıda ve farmasötik endüstrisinde yoğun olarak kullanılan kazein ve glütenin bazı fonksiyonel özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Farklı yapılaraya sahip olan bu iki proteinin emülsiyon oluşturma karakteristiklerinin yanında su tutma kapasitesi, yağ bağlama kapasitesi ve köpük oluşturma özellikleri ele alınmıştır. Bunun yanında ticari protein hidrolizatlarının toz özellikleri arasında değerlendirilen Hausner oranı, Carr indeksi, ıslanabilirlik ve renk özellikleri ile çözünme ve viskozite özellikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Kazein ve glüten proteinleri Sigma Aldrich (St. Louis, MO, USA) firmasından satın alınmıştır. Çalışmada kullanılan diğer tüm kimyasallar analitik saflıkta olmakla birlikte aynı firmadan temin edilmiştir.

2.2. Biyokimyasal kompozisyon

Kazein ve glüten proteinlerinin biyokimyasal kompozisyonu AOAC yöntemlerine (kurumadde tayini için 930.15; protein tayini için 984.13.15, mineral tayini için 942.05, yağ tayini için 991.36) göre belirlenmiştir (AOAC, 1990).

2.3. Kitle yoğunluğu ve yığın yoğunluğu

Proteinlerin kitle yoğunluğu ve yığın yoğunluğu analizleri Tatar ve ark. (2014) tarafından belirtilen yöntemde bazı modifikasyonlar uygulanarak yapılmıştır. Proteinlerden 5 g alınarak 25 mL'lik mezür içerisine belirli bir yükseklikten aktarılıp hacim kaydedilmiştir. Örneklerin kütlesi kapladığı hacme oranlanarak kitle yoğunluğu hesaplanmıştır. Ardından yığın yoğunluğunu belirlemek için örneklerin bulunduğu mezürler düz bir zemine 200 defa elle vurulmuş ve yeni hacim kaydedilmiştir. Kitle yoğunluğu değerleri aşağıdaki formüller kullanılarak ile belirlenmiştir.

$$\text{Kitle yoğunluğu} = \frac{\text{Örnek miktarı}(g)}{\text{İlk hacim}(mL)} \quad (1)$$

$$\text{Yığın yoğunluğu} = \frac{\text{Örnek miktarı}(g)}{\text{Son hacim}(mL)} \quad (2)$$

2.4. Hausner oranı ve Carr indeksi

Proteinlerin Carr indeksi ve Hausner oranı aşağıdaki formüllere göre kitle yoğunluğu ve yığın yoğunluğundan yararlanarak hesaplanmıştır (Turchiuli et al., 2005).

$$Carrindeksi = \frac{(sıkıştırılmış kitleyoğunlu - kitle yoğunluğu) * 100}{sıkıştırılmış kitle yoğunluğu} \quad (3)$$

$$Hausneroranı = \frac{sıkıştırılmış kitleyoğunluğu}{kitle yoğunluğu} \quad (4)$$

2.5. Islanabilirlik ölçümü

Proteinlerin ıslanabilirlik analizi için Jinapong ve ark. (2008) tarafından kullanılan yöntem uygulanmıştır. 250 mL'lik bir behere 100 mL saf su ilave edilmiştir. Beherdeki su yüzeyinin 10 cm üstünden 0.1 g protein suya bırakılıp aynı anda zaman ölçülmüştür. Partiküller tamamen ıslanmaya kadar geçen zaman (dak) kaydedilmiştir.

2.6. Viskozite ve iletkenlik değerleri

Protein örnekleri kullanılarak saf suda %5'lik çözeltileri hazırlanmış ve 0.5 N NaOH çözeltisi kullanılarak pH 12'ye ayarlanmıştır. Kazein ve glüten izolatlarının viskozitesi, kalibre edilmiş Cannon Fenske (CANNON, USA) kapiler viskozimetre kullanılarak 60°C'deki su banyosunda ölçülmüştür (Aksun-Tümerkan ve ark., 2019). Viskozite ölçümleri için hazırlanan çözeltilerin iletkenlik değeri bir multimetre (SevenGO SG23, Mettler Toledo, USA) kullanılarak ölçülmüştür.

2.7. Su tutma ve yağ bağlama kapasitesi

Proteinlerin su tutma kapasitesi (STK) Cho ve ark. (2004) belirttiği yöntemle ölçülmüştür. İlk olarak 50 mL'lik santrifüj tüpünün darası alınmış ve tüp içine 1 g protein örneği tartılıp üzerine 10 mL saf su eklenmiştir. Hazırlanan karışım vorteks yardımıyla 15 dakikada bir 5 saniye süreyle 1 saat boyunca karıştırılmıştır. Tüpün içinde karıştırılan çözelti oda sıcaklığında 450 ×g kuvvetinde ve 20 dakika boyunca santrifüj edilmiştir. Daha sonra tüpün dibinde kalan pelet ve üstteki saydam kısmın ayrılması için santrifüj tüpü 45°'lik eğik açıyla filtre kâğıdı üzerinde 30 dakika boyunca süzdürülmüş ve tartılmıştır. Proteinlerin su tutma kapasitesi aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$\%STK = \{ [Pelet ağırlığı (g) - Protein ağırlığı (g)] / Protein ağırlığı (g) \} \times 100 \quad (5)$$

Proteinlerin yağ bağlama kapasitesi (YBK) de yukarıda verildiği gibi aynı şekilde belirlenmiş ancak YBK için su yerine ayçiçek yağı kullanılmıştır.

$$\%YBK = \{[\text{Pelet ağırlığı (g)} - \text{Protein ağırlığı (g)}] / \text{Protein ağırlığı (g)}\} \times 100 \quad (6)$$

2.8. Köpük oluşturma kapasitesi ve stabilitesi

Elde edilen kuru protein örneklerinden saf su ile %1'lik çözelti hazırlanmış ve 60°C'deki su banyosunda çözündürülmüştür. Daha sonra çözelti homojenizatör (T-25 Ultra Turrax, IKA, Staufen, Almanya) ile 5 dakika boyunca 10.000 rpm hızla karıştırıldıktan sonra 250 mL hacimli bir ölçülü silindire aktarılmıştır. Bu işlem sonunda köpük hacmi 30. ve 60. dakikalarda ölçülmüştür. Köpük oluşturma kapasitesi (KOK) ve köpük stabilitesi (KS) aşağıdaki formüllere göre hesaplanmıştır (Cho ve ark., 2004).

$$\%KOK = \{[\text{ÇH}_0 \text{ (mL)} - \text{ÇH (mL)}] / \text{ÇH (mL)}\} \times 100 \quad (7)$$

$$\%KS_{30} = \{[\text{ÇH}_{30} \text{ (mL)} - \text{ÇH}_0 \text{ (mL)}] / \text{ÇH (mL)}\} \times 100 \quad (8)$$

$$\%KS_{60} = \{[\text{ÇH}_{60} \text{ (mL)} - \text{ÇH}_0 \text{ (mL)}] / \text{ÇH (mL)}\} \times 100 \quad (9)$$

ÇH: Başlangıçtaki çözelti hacmi (mL)

ÇH₀: Homojenizasyondan hemen sonraki çözelti hacmi (mL)

ÇH₃₀: Homojenizasyondan 30 dakika sonraki çözelti hacmi (mL)

ÇH₆₀: Homojenizasyondan 60 dakika sonraki çözelti hacmi (mL)

2.9. Emülsiyon aktivitesi ve emülsiyon stabilitesi indeksi

Protein örneklerinden saf su kullanılarak %1'lik çözeltiler hazırlanıp çözündürülmüştür. Ardından çözeltilerden 30 mL alınarak 10 mL ayçiçeği yağı kullanılarak oda sıcaklığında 1 dakika süreyle ve 10000 rpm hızla homojenize edilmiştir. Homojenizasyon işleminden hemen sonra ve 10 dakika sonra karışımdan 50 µL alınmış, %0.1'lik sodyum dodesil sülfat çözeltisi ile 100 kat seyreltilmiştir. Ardından vorteks ile 10 saniye süreyle karıştırılmıştır. Daha sonra örneklerin absorbansı spektrofotometre kullanılarak 500 nm dalga boyunda okunmuştur. Absorbanslar kullanılarak emülsiyon aktivite indeksi (EAI) ve emülsiyon stabilitesi indeksi (ESI) aşağıdaki formüllere göre hesaplanmıştır (Pearce ve Kinsella, 1978).

$$EAI \text{ (m}^2\text{/g)} = (2 \times 2.303 \times A_0 \times N) / (C \times \text{Ø} \times 10000) \quad (10)$$

$$ESI \text{ (dak)} = (A_0 \times 10) / (A_0 - A_{10}) \quad (11)$$

A_0 : Homojenizasyondan hemen sonra okunan absorbands

A_{10} : Homojenizasyondan 10 dakika sonra okunan absorbands

N: Dilüsyon faktörü

C: Birim hacim başına protein miktarı (g/mL)

\emptyset : Yağın hacim fraksiyonu (0.25)

2.10. Emülsiyon morfolojisi

Emülsiyon aktivitesi indeksi analizindeki gibi hazırlanan emülsiyonların yapısı, yağ damlacıklarının dağılımını kontrol etmek için optik mikroskopta (Eclipse E600, Nikon, Japonya) 1000 kat büyütme yapılarak entegre bir dijital video kamera (DXM1200, Nikon, Japonya) ile incelenmiştir. Hazırlanan emülsiyonlardan emülsiyon oluşumundan hemen sonra birer damla alınarak mikroskop lamaları arasına yerleştirilmiş ve görseller kaydedilmiştir (Nesterenko ve ark., 2014).

2.11. Çözünürlük profili

Toz protein örneklerinin çözünürlük analizi Liang and Tang (2013) tarafından belirtilen yöntem kısmen değiştirilerek uygulanmıştır. Kazein ve gluten proteinlerinden 0.1 g tartılarak 5 mL saf su ile karıştırılmıştır. Protein çözeltilerinin pH değerleri 0.5 M HCl ve 0.5 M NaOH kullanılarak 2-10 arasında ayarlanmıştır. Son hacimleri saf suyla 10 mL'ye tamamlanan protein çözeltileri inkübatörde 90 dakika boyunca 150 rpm'de karıştırılmıştır. Proteinlerin çözünmeyen kısımlarının uzaklaştırılması için 5000 rpm'de santrifüjlenerek süpernatant kaba filtreden geçirilmiştir. Elde edilen süpernatantların protein içeriği Biüret metodu ile belirlenmiştir (Gornall ve ark., 1949). Kuru kitledeki protein miktarı Kjeldahl yöntemine göre tespit edilmiştir (AOAC, 1990). Örneklerin % çözünürlük değerleri, aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$\text{Çözünürlük(\%)} = \frac{As}{Ak} \times 100 \quad (12)$$

As = Süpernatant protein miktarı

Ak = Kuru kitledeki protein miktarı

2.12. Renk ölçümü

Proteinlerin renk ölçümü bir kolorimetre (CSM4, PCE Instruments, Germany) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla yaklaşık 10 g protein şeffaf petri kaplarına konularak yapılmış ve 'Beyazlık İndeksi (WI), hue ve chroma değerleri aşağıdaki formüllere göre hesaplanmıştır.

$$WI=100-\sqrt{\{(100-L)^2+a^2+b^2\}} \quad (13)$$

$$Chroma = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (14)$$

$$Hue = \arctan \frac{b}{a} \quad (15)$$

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Biyokimyasal kompozisyon ve toz özellikleri

Kazein (Sigma, C7078, saflık değeri; %77-85.5) ve glüten (Sigma, G5004, saflık değeri \geq %75) protein izolatlarının biyokimyasal kompozisyonu ve toz özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Kazein ve glüten protein izolatu örneklerinde toplam protein miktarı sırasıyla %84.1 \pm 1.2 ve %72.6 \pm 0.5 olarak tespit edilmiştir. Ticari kazein izolatlarının kullanılan üretim tekniğine göre %70 ile %90 oranında protein bulundurduğu Atamer ve ark. (2017) tarafından belirtilmiştir. Ticari glüten izolatlarında ise protein içeriğinin ortalama %75 civarında olduğu belirlenmiştir (Day ve ark., 2006; Atamer ve ark., 2017). Toplam kuru madde değerleri birbirine yakın olan protein örneklerinde mineral madde oranı kazein ve glütende sırasıyla %3.3 \pm 0.0 olarak 1.9 \pm 0.0 olarak tespit edilmiştir.

Tablo 1. Kazein ve glütenin biyokimyasal kompozisyonu ve bazı fonksiyonel özellikleri

	Kazein	Glüten
Protein (%)*	84.1 \pm 1.24	72.6 \pm 0.50
Kuru madde (%)	95.5 \pm 1.32	94.3 \pm 2.70
Mineral madde (%)	3.24 \pm 0.20	1.95 \pm 0.04
Ham yağ (%)	0.3 \pm 0.00	0.8 \pm 0.14
Hausner oranı	1.69 \pm 0.02	1.86 \pm 0.10
Carr indeksi	40.84 \pm 0.85	46.24 \pm 1.80
Islanabilirlik (dak)	0.37 \pm 0.01	2.59 \pm 0.02
Viskozite (cP)	1.83 \pm 0.09	1.26 \pm 0.03
İletkenlik (μ S/cm) (pH 12)	4.42 \pm 0.45	12.55 \pm 0.64

*Azot çevrim faktörleri glüten ve kazein için sırasıyla (N \times 5.70) ve (N \times 6.38) olarak kullanılmıştır, Ortalamalar standart sapma S.S. (\pm) ile beraber verilmiştir.

Üretim zinciri sırasında bazı toz gıdalarda aglomerasyon ve sıkıştırma gibi akış özelliklerini etkileyebilecek, istifleme, paketleme ve nakliyyede sorunlara yol açabilecek istenmeyen fiziksel

değişiklikler olabileceğinden bunların akış özelliklerinin belirlenmesi önemlidir. Yoğunluk önemli bir akış özelliğidir (Acosta-Domínguez ve ark., 2021). Toz protein izolatlarının kitle yoğunlukları birbirine yakın olup kazein ve glütene sırasıyla 0.56 ± 0.04 , 0.47 ± 0.08 (Tablo 1) olarak bulunmuştur. Yığın yoğunluğu ise kazein ve glütene sırasıyla 0.95 ± 0.07 ve 0.88 ± 0.05 (Tablo 1) olarak belirlenmiştir. Granül tozların akışkanlığı; gıda, farmasötikler, mineraller ve diğer mühendislik dallarında toz işleme süreçlerinde önem arz etmektedir. Çeşitli endüstrilerde kullanılan toz örneklerin akışkanlığı Hausner oranı ve Carr indeksi değerleri ile belirlenmektedir. Ampirik olarak 1.22'den büyük bir Hausner oranı veya 0.18'den büyük bir Carr indeksi, zayıf akışkanlığın bir göstergesidir. Hausner oranı 1.18'in altında veya Carr indeksi 0.15'in altında ise akışkanlık iyi olarak kabul edilir. Bununla birlikte birçok deneysel kanıt, hem Hausner oranının hem de Carr indeksinin yalnızca bazı toz sistemleri için geçerli olduğunu, tutarlı ve tahmin edilebilir akışkanlık değerleri olmadığını göstermektedir (Hao, 2015). Hausner oranı kazeinde 1.69 ± 0.02 iken glütene 1.89 ± 0.10 olarak tespit edilmiştir. Carr indeksi değerleri ise kazein ve glütene sırasıyla 40.84 ± 0.85 ve 46.24 ± 0.180 düzeylerinde ölçülmüştür. Sonuçlar her iki protein izolatının söz konusu değerlerin üzerinde olduğunu ve zayıf bir akışkanlık gösterdiklerini belirtmektedir.

Gıda tozlarının ıslanabilirliği katı ve su fazı arasındaki moleküler bir etkileşimi gösterir ve genellikle toz parçacıklarının suyun neden olduğu yüzey gerilimini aşma yeteneği olarak kabul edilir (Lee ve ark., 2014.). Kazeinin ıslanabilirliğinin (0.37 dak) glütene (2.59 dak) kıyasla daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu durum, kazeinde granüler yapının daha küçük ve suyla oluşan yüzey geriliminin daha düşük olduğunu göstermektedir (Lee ve ark., 2014).

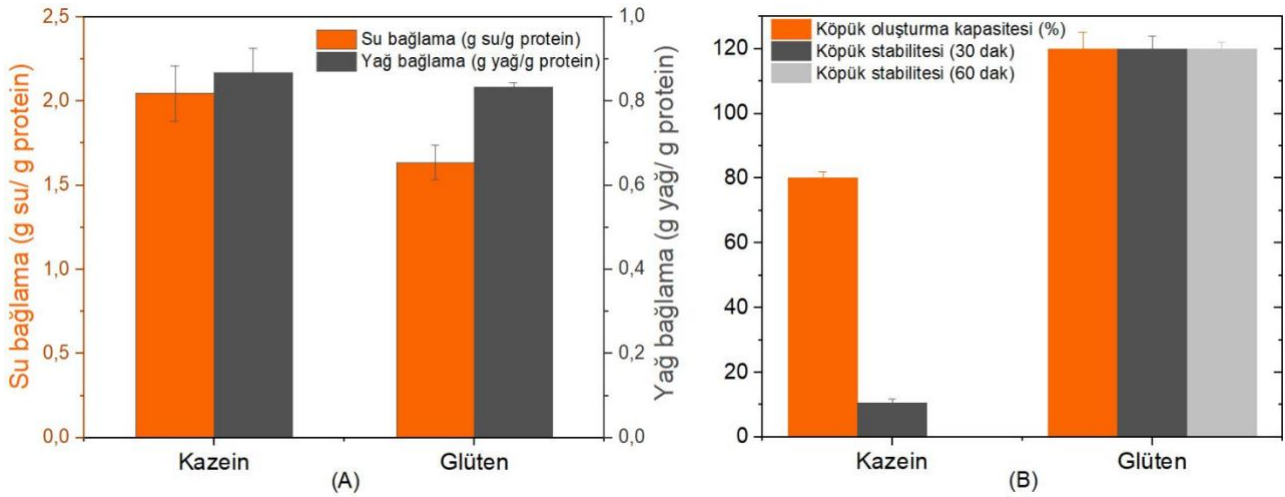
3.2. Viskozite ve iletkenlik

Viskozite, gıda proteinlerinin önemli bir fonksiyonel özelliğidir ve emülsiyonlara ve gıdalardaki diğer asılı partiküllere fiziksel stabilite sağlar ve gıdaların ağız hissine katkıda bulunur (Ren ve ark., 2020). Kazein ve glüten protein izolatlarının viskozite değerleri 1.83 ± 0.09 ve 1.26 ± 0.03 cP olarak ölçülmüştür (Tablo 1). Kazeinin glütene göre viskozitesinin yüksek olması yüksek molekül yapısı ve polidispersitesinin daha fazla olmasından kaynaklanıyor olabilir. Gıdalarda proteinlerin kullanımı kalınlaştırıcı ajan olarak değerlendirildiğinde yüksek viskozite değerine sahip proteinler tercih edilmektedir.

Normal şartlar altında protein çözeltilerinin iletkenlikleri viskozite ve konsantrasyona bağlı değişmektedir. %5'lik konsantrasyona sahip protein çözeltileri ile yapılan ölçümlerde kazein ve glüten izolatlarının iletkenlik değerleri sırasıyla 4.42 ± 0.45 ve 12.55 ± 0.64 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olarak ölçülmüştür. Bu durum glüten protein çözeltilerinde protein parçacıkları ve serbest iyonlardan kaynaklı iyonik salınımın daha yüksek olduğunu göstermektedir (Alshami ve ark., 2017).

3.3. Su tutma ve yağ bağlama kapasitesi

Protein örneklerinin su tutma kapasitesi ve yağ bağlama kapasitesi Şekil 1 A’da verilmiştir. Su tutma kapasitesi (STK), proteinlerin temel kalite özellikleri ve verimini etkileyen önemli bir faktördür, çünkü gıdalarda mekanik mukavemetin, esnekliğin, plastik davranışın ve akış özelliklerinin belirlenmesinde önemlidir (Karami ve Akbari-adergani, 2019). Bir gıdanın STK, birim kuru madde kütlesi başına emilebilen ve tutulabilen su miktarıdır ve gıda kalitesinin belirlenmesinde önemlidir (Liang ve ark., 2020). Bir proteinin STK ve hidrasyon kapasitesi, hidrofilik grup dağılımı ve üç boyutlu ağ yapısı ile yakından ilişkilidir. Bu durum, ürünlerin prosesini ve depolanmasını etkiler (Zhang ve ark., 2021). Kazeinin (2.05 ± 0.16 g su/g protein) STK değeri glütene (1.64 ± 0.10 g su/g protein) göre daha yüksek bulunmuştur. Kazeinin glütene oranla yüksek su tutma eğilimi muhtemelen kazeinin yüksek hidrofilik karakterinden kaynaklanmaktadır. Lara-Castellenos ve ark. (2021), kazeinin STK değerini 2.51 g su/g protein olarak tespit etmiştir. Majzoobi ve Abedi (2014) glutenin nötr pH değerinde 1.2 g su/g protein STK değerine sahip olduğunu belirtmiştir.



Şekil 1. Protein örneklerinin su tutma, yağ bağlama (A) ve köpük oluşturma değerleri (B)

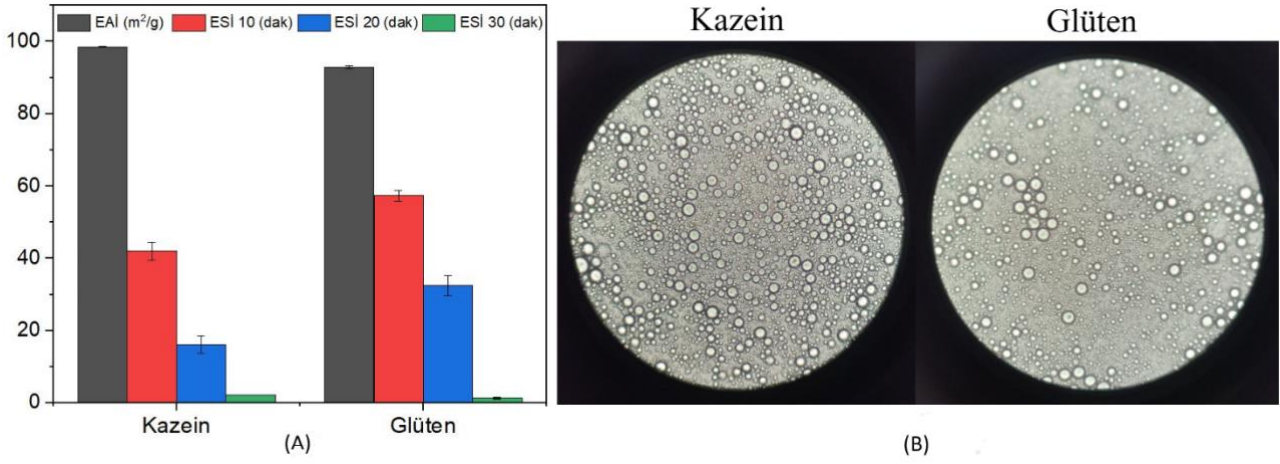
Yağ bağlama kapasitesi (YBK), proteinlerin yan zincirlerinde bulunan polar olmayan amino asitler tarafından yağın bağlanmasıdır. Proteinlerin YBK, unlu mamuller gibi işlenmiş gıdalarda dokuyu iyileştirir ve verim kayıplarını azaltır (Aslan-Türker ve ark., 2022). Hidrofobik grup sayısının çok olması yağ bağlama kapasitesinin yüksek olmasına sebep olmaktadır (Ömeroğlu, 2018). Kazein (0.87 ± 0.05 g yağ/g protein) ve glüten (0.84 ± 0.01 g yağ/g protein) izolatlarının YTK değeri birbirine yakın bulunmuştur. Zhang ve ark. (2021), glutenin YTK değerinin 0.88 g yağ/g protein olduğunu belirtmiştir. Deng ve ark. (2016), glutenin YBK değerini 0.92 g yağ/g protein olarak belirlemiştir. Bu çalışmada elde edilen STK ve YBK değerlerinin literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir.

3.4. Köpük oluşturma kapasitesi ve köpük stabilitesi

Gıda köpüğü hava, sıvı ve proteinler gibi yüzey aktif maddelerden oluşur. Hava kabarcıklarının oluşumu, havalandırılmış gıdanın dokusunu ve reolojik özelliklerini değiştirir (Sadahira ve ark., 2016). Proteinler, hidrofobik özellikleri ve hava-su arayüzünde hızlı adsorpsiyona izin veren olası konformasyonel yeniden düzenlemeleri aracılığıyla iyi bir köpük oluşturma ve yüksek köpük stabilitesi sağlar (Schmidt ve ark., 2010). Elde edilen verilere göre glutenin köpük oluşturma kapasitesi kazeinden yüksektir. Glütende bu değer 120.00 ± 5.20 bulunurken kazeinde 80.00 ± 2.20 olarak bulunmuştur (Şekil 1 B). Kazeinin köpük stabilitesi zamanla düşüş göstermesine rağmen, glutenin stabilitesinde bir düşüş meydana gelmemiştir. Zhang ve ark. (2021), yaptıkları çalışmada glutenin köpük oluşturma kapasitesini 124.20 olarak tespit etmiştir. Han ve ark. (2020) yaptıkları bir çalışmada herhangi bir işlem uygulanmamış kazeinde sonuçlarımıza benzer sonuçlar elde etmiştir. Elde edilen sonuçlar, glutenin oluşturmuş olduğu köpüğün daha kararlı bir yapıda olduğu tespit edilmiştir.

3.5. Emülsiyon aktivitesi, emülsiyon stabilitesi indeksi ve emülsiyon morfolojisi

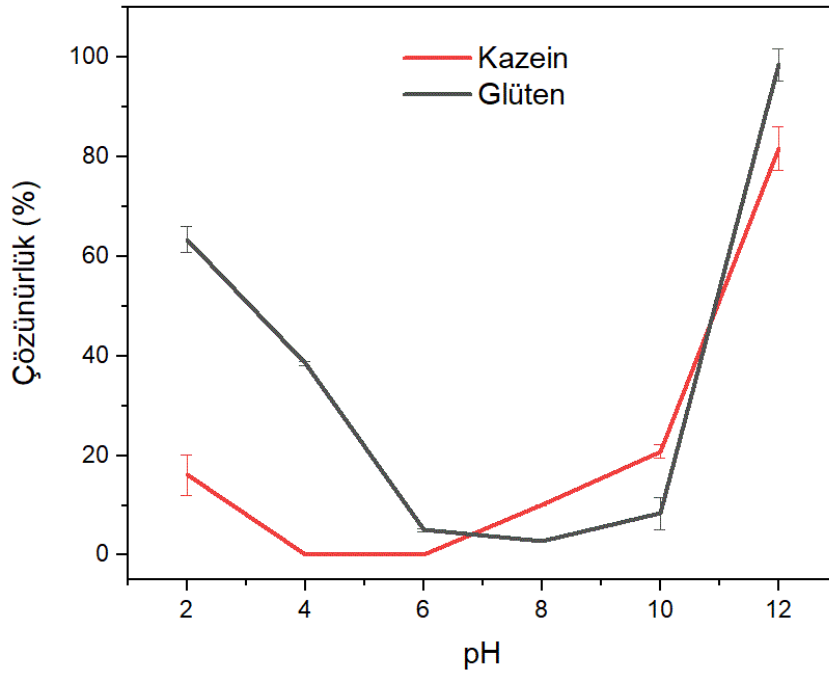
Emülsiyon aktivitesi, bir proteinin bir emülsiyon oluşumuna yardımcı olma kabiliyetini ve kapasitesini yansıtır ve proteinin bir emülsiyondaki yağ ve suyu arayüzey alanına absorbe etme kabiliyeti ile ilgilidir. Emülsiyon stabilitesi ise normalde proteinlerin bir emülsiyona strese ve değişikliklere karşı direnç için güç verme yeteneğini yansıtır ve bu nedenle belirli bir süre boyunca ara yüzey alanının tutarlılığı ile ilgilidir (Du ve ark., 2013). Doğal proteinler, iki fazlı bir ara yüzde adsorbe olma ve böylece yağ globülleri etrafında güçlü bir viskoelastik film oluşturma yeteneklerinden dolayı emülsiyon aktivitesi sergilerler (Mirmoghtadaie ve ark., 2016). Kazein ve glutene ait emülsiyon aktivitesi ve stabilitesi değerleri ile emülsiyonlara ait mikroskop görüntüleri Şekil 2 (A, B)'de verilmiştir. Kazeinin emülsiyon aktivitesi nispeten yüksek olmasına karşın glutenin oluşturduğu emülsiyonların daha stabil olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, glutenin amfifilik karakterini, yüzey aktif özelliklerini ve yağ asidi zincirlerinin proteine bağlanma düzeyinin daha iyi olduğunu göstermektedir (Yusoff ve Murray, 2011). Glutenin matris zincirinin damlacıklar etrafında aglomerasyonu muhtemelen daha yüksek olmuştur, bu durum mikroskop altında çekilen emülsiyon resimlerinde de görülmektedir. Bununla birlikte, glutenin emülsiyonunda aktif çekirdek (yağ) damlacıklarının üniform olduğu ve yağ damlacıklarının ortalama çapının daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla gluten ile oluşturulan emülsiyonların yağ damlacıklarının topaklanması veya flokülasyonu açısından daha kararlı olduğu görülmektedir. (Nesterenko ve diğerleri, 2014).



Şekil 2. Emülsiyon aktivitesi ve stabilitesi indeksleri (A) ve emülsiyonların morfolojik görüntüleri (B)

3.6. Protein izolatlarının çözünürlük profili

Genel olarak, iyi bir protein ürününün gıda sistemlerinde iyi performans göstermesi için birden fazla işlevselliğe sahip olması gerekir. Protein ürünlerinin en önemli tekno-işlevsel özellikleri, emülsifikasyon, köpürme ve jelleşmenin yanında bir de çözünürlüktür. Gıda işleme uygulamalarında optimum işlevsellik için proteinlerin iyi çözünürlüğü arzu edilir (Barac ve ark., 2015). Kazein ve glütene ait çözünürlük profili Şekil 3'te verilmiştir. Kazeinin en düşük çözünürlüğünün pH 4 civarında, glütenin ise pH 8 civarında olduğu görülmektedir. Bu pH değerleri kazein ve glütenin izoelektronik noktalarına yakın değerlerdir ve bu nedenle çözünürlük en düşüktür. pH değerlerinin artması ile birlikte her iki proteinin de çözünürlükleri hızlı bir şekilde artış göstermiştir.



Şekil 3. Kazein ve glüten proteinlerinin pH değerine bağlı çözünürlük profili.

3.7. Protein izolatlarının renk değerleri

Renk, tüketicilerin tercih, seçim ve yeme isteklerini doğrudan etkileyen gıda maddelerinin en etkileyici ve hoş özelliklerinden biri olarak kabul edilebilir (Martins ve ark., 2016). Renk, gıda kalitesi algısını etkiler ve lezzetle ilgili olduğu algılandığından iştahı uyarır (Oplatowska-Stachowiak ve Elliott, 2015). Genellikle gıdalarda renk pigmentlerini değerlendirmek için CIELab renk sistemi kullanılmaktadır. Bu sistem, farklı gıda matrislerinde L* (parlaklık, siyahtan beyaza), a* (kırmızıdan yeşile koordinat) ve b* (sarıdan maviye koordinat) renk koordinatlarını belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Cortez ve ark., 2016). Kazeinin L* değeri 76.33 ± 0.70 iken glütenin L* değeri 87.78 ± 1.01 olarak bulunmuştur (Tablo 2). Glütenin L* değerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Kazeinin a* ve b* değerleri glütenden daha yüksek bulunmuştur. Bununla birlikte L*, a* ve b* değerleri birlikte değerlendirildiğinde hesaplanan WI değeri glütende daha yüksek bulunmuştur. Sonuç olarak glütenin daha açık renkli olduğu belirlenmiştir.

Tablo 2. Kazein ve glütenin renk değerleri

	Kazein	Glüten
L*	76.33 ± 0.70	87.78 ± 1.01
a*	10.53 ± 0.29	2.67 ± 0.11
b*	27.34 ± 0.39	16.83 ± 0.40
WI	62.33 ± 0.71	78.67 ± 0.93
Hue	1.20 ± 0.02	1.41 ± 0.03
Chroma	29.30 ± 0.48	17.04 ± 0.41

Ortalamalar standart sapma S.S. (\pm) ile beraber verilmiştir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada gıda uygulamalarında oldukça sık kullanılan kazein ve glüten izolatlarının fonksiyonel özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Kazeinin su tutma kapasitesi glütene göre daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca kazeinle oluşturulan çözeltilerin daha viskoz bir yapı sergilediği tespit edilmiştir. Glütenin köpük oluşturma kapasitesi ve stabilitesi, Hausner oranı, Carr indeksi, ıslanabilirlik değeri, L* ve WI değerleri kazeine göre daha yüksek bulunmuştur. Emülsiyon aktivite indeksi kazeinde daha yüksek bulunmasına karşın, oluşturulan emülsiyonlarda glüten izolatlarının daha kararlı bir yapı sergilediği gözlenmiştir. Proteinlerin genel özellikleri arasında sayılan çözünürlük profilleri yüksek pH değerlerinde benzerlik göstermiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçların süt kazeini ve buğday glütene kullanılan ürünler ile ilgili çalışmalarda yararlı olabileceği 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

- Acosta-Domínguez, L., Cocotle-Ronzón, Y., Alamilla-Beltrán, L., Hernandez-Martinez, E. 2021. Effect of a cryogenic treatment in the microstructure, functional and flow properties of soy protein isolate. *Food Hydrocolloids*, 119: 106871.
- Akharume, F.U., Aluko, R.E., Adedeji, A.A. 2020. Modification of plant proteins for improved functionality: A review. *Comprehensive Review in Food Science and Food Safety*, 20:198–224.
- Aksun-Tümerkan, E. T., Cansu, Ü., Boran, G., Regenstein, J. M., Özoğul, F. (2019). Physicochemical and functional properties of gelatin obtained from tuna, frog and chicken skins. *Food Chemistry*, 287, 273–279.
- Alshami, A.S., Tang, J., Rasco, B. (2017). Contribution of proteins to the dielectric properties of dielectrically heated biomaterials. *Food Bioprocess Technol*, 10:1548–1561.
- AOAC, 1990. Official methods of analysis. Fifteenth edition. Association of Official Analysis Chemists, Washington, DC.
- Aryee, A.N.A., Agyei, D., Udenigwe, C.C. 2018. Impact of processing on the chemistry and functionality of food proteins. *Proteins in Food Processing*, 27-45.
- Aslan-Türker, D., Göksel-Saraç, M., Doğan, M. 2022. Glütensiz unların tekno-fonksiyonel özellikleri ile toz akış davranışlarının belirlenmesi. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 26(4): 528-537.
- Atamer, Z., Post, A. E., Schubert, T., Holder, A., Boom, R. M., & Hinrichs, J. 2017. Bovine β -casein: Isolation, properties and functionality. A review. *International dairy journal*, 66, 115-125.
- Barać, M.B., Pešić, M.B., Stanojević, S.P., Kostić, A.Z., Čabrilo, S.B. 2015. Techno-functional properties of pea (*Pisum sativum*) protein isolates- a Review. *BIBLID*, 1450-7188 46: 1-18.
- Biesiekierski, J.R. 2017. What is gluten? *Journal of Gastroenterology and Hepatology*, 32 (Suppl. 1): 78–81.
- Cho, S. M., Kwak, K. S., Park, D. C., Gu, Y. S., Ji, C. I., Jang, D. H. 2004. Processing optimization and functional properties of gelatin from shark (*Isurus oxyrinchus*) cartilage. *Food Hydrocolloids*, 18: 573-579.
- Cortez, R., Vital, D.A.L., Margulis, D., Mejia, E.G. 2016. Natural Pigments: Stabilization Methods of Anthocyanins for Food Applications. *Comprehensive Review in Food Science and Food Safety*, 00:1-19.
- Day, L., Augustin, M. A., Batey, I. L., & Wrigley, C. W. 2006. Wheat-gluten uses and industry needs. *Trends in food science & technology*, 17(2), 82-90.
- Deng, L., Wang, Z., Yang, S., Song, J., Que, F., Zhang, H., Feng, F. 2016. Improvement of functional properties of wheat gluten using acid protease from *Aspergillus usamii*. *Plos One*, 11(7): e0160101.
- Du, S.K., Jiang, H., Yu, X., Jane, J.L. 2013. Physicochemical and functional properties of whole legume flour. *LWT - Food Science and Technology*, 2013: 1-6.

- Gaiani, C., Banon, S., Scher, J., Schuck, P., Hardy, J. 2005. Use of a turbidity sensor to characterize micellar casein powder rehydration: Influence of some technical effects. *Journal of Dairy Science*, 88:2700–2706.
- Gornall, A. G., Bardawill, C. J., David, M. M. 1949. Determination of serum proteins by means of the biuret reaction. *Journal of Biological Chemistry*, 177: 751-66.
- Han, T., Wang, M., Wang, Y., Tang, L. 2020. Effects of high-pressure homogenization and ultrasonic treatment on the structure and characteristics of casein. *LWT - Food Science and Technology*, 130, 109560.
- Hao, T. 2015. Understanding empirical powder flowability criteria scaled by Hausner ratio or Carr index with the analogous viscosity concept. *RSC Advances*, 5: 57212.
- Jinapong, N., Supphantharika, M., Jamnong, P. 2008. Production of instant soy milk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. *Journal of Food Engineering*, 84(2): 194–205.
- Karami, Z., Akbari-edergani, B. 2019. Bioactive food derived peptides: a review on correlation between structure of bioactive peptides and their functional properties. *Food Science Technology*, 56(2):535–547.
- Lara-Castellanos, M.J., Azuara, E., Jimenez-Fernandez, V.M., Luna-Solano, G., Jimenez, G. 2021. Effect of casein replacement by modified casein on physicochemical, textural, sensorial properties and microbiological stability of fresh cheese. *International Dairy Journal*, 112, 104864.
- Lee, J., Chai, C., Park, D.J., Lim, K., Imm, J.Y. 2014. Novel convenient method to determine wettability and dispersibility of dairy powders. *Korean Journal for Food Science of Animal*, 34(6): 852–857.
- Lee, S.W., Shimiz, M., Kaminogawa, S., Yamauchi, K. 1987. Emulsifying properties of a mixture of peptides derived from the enzymatic hydrolyzates of bovine caseins., *Agricultural and Biological Chemistry*, 51: 1535–1540.
- Liang, H.N, Tang, C.H. 2013. pH-dependent emulsifying properties of pea [*Pisum sativum* (L.)] proteins. *Food Hydrocolloids*, 33: 309-319.
- Lu, Y., McMahan, D. J., Metzger, L. E., Kommineni, A., Vollmer, A. H. 2015. Solubilization of rehydrated frozen highly concentrated micellar casein for use in liquid food applications. *Journal of Dairy Science*, 98 (9): 5917–5930.
- Majzoobi, M., Abedi, E. 2014. Effects of pH changes on functional properties of native and acetylated wheat gluten. *International Food Research Journal*, 21(3): 1219-1224.
- Martins, N., Roriz, C.L., Morales, P., Barros, L., Ferreira, I.C.F.R. 2016. Food colorants: Challenges, opportunities and current desires of agroindustries to ensure consumer expectations and regulatory practices. *Trends in Food Science & Technology*, 52: 1-15.
- Mirmoghtadaie, L., Aliabadi, S.S., Hosseini, S.M. 2016. Recent approaches in physical modification of protein functionality. *Food Chemistry*, 199, 619-627.
- Mwasaru, A. M., Muhammad, K., Bakar, J., Cheman, Y. B. 1999. Effect of isolation technique and conditions on the extractability, physiochemical and functional properties of pigeon pea (*Cajanus cajan*) and cow pea (*Vigna unguiculata*) protein isolates. II. Functional properties. *Food Chemistry*, 67: 445–452.
- Nesterenko, A., Alric, I., Violleau, F., Silvestre, F., Durrieu, V. 2014. The effect of vegetable protein modifications on the microencapsulation process. *Food Hydrocolloids*, 41, 95-102.
- Ömeroğlu, L. 2018. Kazein hidrolizatlarının işlevsel özellikleri. *Yüksek Lisans Tezi*. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi.
- Oplatowska-Stachowiak, M., Elliott, C.T. 2015. Food colours: Existing and emerging food safety concerns. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(3), 524-548.
- Ranadheera, C.S., Liyanaarachchi, W.S., Chandrapala, J., Dissanayake, M., Vasiljevic, T. 2016. Utilizing unique properties of caseins and the casein micelle for delivery of sensitive food ingredients and bioactives. *Trends in Food Science & Technology*, 57(A): 178-187.
- Rehan, F., Ahemad, N., Gupta, M. 2019. Casein nanomicelle as an emerging biomaterial—A comprehensive review. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 179: 280–292.
- Ren, X., Li, C., Yang, F., Huang, Y., Huang, C., Zhang, K. 2020. Comparison of hydrodynamic and ultrasonic cavitation effects on soy protein isolate functionality. *Journal of Food Engineering*, 265: 109697.
- Sadahira, M.S., Rodrigues, M.I., Akhtar, M., Murray, B.S., Netto, F.M. 2016. Effect of egg white protein-pectin electrostatic interactions in a high sugar content system on foaming and foam rheological properties. *Food Hydrocolloids*, 58: 1-10.
- Schmidt, I., Novales, B., Boué, F., Axelos, M.A.V. 2010. Foaming properties of protein/pectin electrostatic complexes and foam structure at nanoscale. *Journal of Colloid and Interface Science*, 345: 316–324.

- Silva, D.F., Ipsen, L.A.R., Hougaard, A.B. 2018. Casein-based powders: Characteristics and rehydration properties. *Comprehensive Review in Food Science and Food Safety*, 17(1): 240-254.
- Tatar, F., Tugçe, M., Dervisoglu, T.M., Cekmecelioglu, D., Kahyaoglu, T. 2014. Evaluation of hemicellulose as a coating material with gum arabic for food microencapsulation. *Food Research International*, 57 (2014): 168–175.
- Turchiuli, C., Eloualia, Z., El Mansouri, N., Dumoulin, E. 2005. Fluidised bed agglomeration: Agglomerates shape and end-use properties. *Powder Technology*, 157(1-3), 168-175.
- Van Hekken, D.L., Strange, E.D. 1993. Functional properties of dephosphorylated bovine whole casein. *Journal of Dairy Science*, 76(11): 3384-3391.
- Wu, D., Tu, M., Wang, Z., Wu, C., Yu, C., Battino, M., El Seedi, H. R., Du, M. 2019. Biological and conventional food processing modifications on food proteins: Structure, functionality, and bioactivity. *Biotechnology Advances*, 40, 107491.
- Yusoff, A., Murray, B.S. 2011. Modified starch granules as particle-stabilizers of oil-in-water emulsions. *Food Hydrocolloids*, 25: 42-55.
- Zhang, C., Yang, Y.H., Zhao, X.D., Zhang, L., Li, Q., Wu, C., Ding, X., Qian, J.Y. 2021. Assessment of impact of pulsed electric field on functional, rheological and structural properties of vital wheat gluten. *LWT - Food Science and Technology*, 147, 111536.

An Experimental Investigation into Roughness Transfer in Asymmetrical Rolling of Steel Strips

Bilal ÇOLAK^{1*}, Zahoor AHMED², Batuhan ÖZAKIN³, Naci KURGAN⁴

Abstract

This study investigated the effect of rolling parameters such as speed, thickness reduction, roll surface roughness, material thickness, surface condition (dry or lubricated), and rolling force on the roughening characterization in asymmetrical rolling. The surface roughness of the samples subjected to rolling tests was measured. The roughness values' average and standard deviation were found, and 3-D scanning images were acquired. Lubricated texturing experiments revealed that lubrication reduced roughness transfer. It was found that the introduction of roughness on the material surface decreased as the rolling speed increased. On the other hand, a higher speed increases the rolling force, which increases the surface roughness. The effect of speed on the standard deviation varies in direct proportion. Furthermore, lubricated rolling produced a more homogenous roughness distribution at higher speeds, while dry rolling produced homogeneous roughness at lower speeds. It was revealed that the rolling force is higher with thicker materials. While the roll roughness did not affect the rolling force using thicker material much, this effect was more pronounced in the very rough roll using thinner material. The standard deviation was lower in smaller reduction ratios using rough and very rough rolls. According to the results, although asymmetrical rolling has some advantages compared to conventional rolling, it was concluded that it is not a suitable method for roughening steel strips.

Keywords: Asymmetrical rolling, Homogeneous roughness, Rolling force, Rolling speed, Roll roughness, Roughness (transfer).

Çelik Sacların Asimetrik Haddelenmesinde Pürüzlülük Transferinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Öz

Bu çalışmada asimetrik haddelenmede hız, kalınlık azalması, merdane yüzey pürüzlülüğü, malzeme kalınlığı, yüzey durumu (kuru veya yağlanmış) ve haddelenme kuvveti gibi haddelenme parametrelerinin pürüzlendirme karakterizasyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Haddelenme testine tabi tutulan numunelerin yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Pürüzlülük değerlerinin ortalaması ve standart sapması belirlenerek 3 boyutlu tarama görüntüleri elde edilmiştir. Yağlanmış pürüzlendirme deneyleri, yağlamanın pürüzlülük transferini azalttığını ortaya çıkarmıştır. Haddelenme hızı arttıkça malzeme yüzeyindeki pürüzlülüğün azaldığı bulunmuştur. Öte yandan yüksek hız, yüzey pürüzlülüğünü artıran haddelenme kuvvetini artırıcı bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Hızın standart sapma üzerindeki etkisi doğru orantılı olarak değişmektedir. Ayrıca yağlı haddelenme yüksek hızlarda daha homojen bir pürüzlülük dağılımı sağlarken, kuru haddelenme daha düşük hızlarda homojen bir pürüzlülük vermiştir. Kalın malzemelerle haddelenme kuvvetinin daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Kalın malzeme kullanımında merdane pürüzlülüğünün haddelenme kuvvetine fazla etkisi olmazken, ince malzeme kullanımında çok pürüzlü merdanede bu etki daha belirgin olmuştur. Pürüzlü ve çok pürüzlü merdanelerin kullanıldığı küçük ezme oranlarında standart sapmanın daha düşük olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre asimetrik haddelenmenin geleneksel haddelenmeye göre bazı avantajları olmasına rağmen çelik sacların pürüzlendirilmesi için uygun bir yöntem olmadığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Asimetrik haddelenme, Homojen pürüzlülük, Haddelenme kuvveti, Haddelenme hızı, Merdane pürüzlülüğü, Pürüzlülük transferi

¹Karabük University, Eskipazar Vocational School, Karabük, Türkiye, bilalcolak@karabuk.edu.tr

²Karabük University, Engineering Faculty, Karabük, Türkiye, zahoorjamali6@gmail.com

³Samsun University, Kavak Vocational School, Samsun, Türkiye, batuhan.ozakin@samsun.edu.tr

⁴Ondokuz Mayıs University, Engineering Faculty, Samsun, Türkiye, naci.kurgan@omu.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0002-1988-1464>

²<https://orcid.org/0000-0002-6905-9591>

³<https://orcid.org/0000-0003-1754-949X>

⁴<https://orcid.org/0000-0001-7297-7249>

1. Introduction

Surface roughness is critical to giving the sheet its ultimate form. Surface roughness (Ra) is the arithmetic mean of the surface profile's centerline distance. Surface roughness supplies oil pockets on the material surface where mold oil can cling. It is an advantage in terms of shaping as it increases the lubricating property on the contact surface of the sheet and the mold. Despite this, a significant degree of roughness causes the painted surface to seem dull (Elkoca 2008; SMS DEMAG 2003). That is why surface roughness should be in a definite range on the sheet's surface. While surface roughness between 1.0 and 1.5 μm is preferred in the outer body parts of automobiles, higher roughness is desired in the interior parts (Thyssen Krupp Stahl 2004).

Many factors influence roughness transfer in rolling. It was discovered that roughness transfer increased with elongation (Kimura, Ueno, and Mihara 2009). The SMS Group achieved equivalent results as Kimura, and this increase in roughness transfer was more pronounced in thinner materials (SMS DEMAG 2003). Kijima conducted dry and lubricated testing with 50- and 250-mm-radius rolls and found results comparable to the SMS group (Kijima 2015). Kijima, in another study, revealed the effect of rolling force on roughness transfer. He conducted conventional rolling (acronym CR) experiments using two radii of rolls with different surface roughnesses. He revealed that the transfer ratio increased as the rolling force increased for both roughnesses (Kijima 2014). Wentink reached similar results and proved this result via microscopic images (Wentink et al. 2015). The findings of Çolak and Kurgan also show parallelism with this result (Çolak and Kurgan 2018). It has been found that the transfer rate increased with the reduction ratio, but the rolling speed did not have a dramatic effect (Özakın and Kurgan 2021; Wu et al. 2019). Xu et al. found that the strip surface topography increasingly became the same as the roll surface topography as the reduction ratio increased (Xu et al. 2020). On the other hand, Wu et al. stated that the entire transfer (100%) of surface roughness was impossible, and almost no roughness was obtained on the rolled material surface at minimal reduction ratios due to elastic deformation (Wu et al. 2018). Li et al. obtained a surface roughness in a narrower range in simulating a two-stand skin-pass rolling mill which has the second-stand roll roughness being lower than the first one (Li et al. 2015). Wu et al. revealed that as roughened work rolls wear, surface texture transfer to the rolled sheet decreases gradually (Wu et al. 2021).

Homogeneous distribution on the material surface is as vital as the roughness level. Studies investigating the effect of rolling parameters on roughness found that lubrication, slight reduction, low speed, and low roll roughness reduced transfer but increased homogeneity (Çolak and Kurgan 2018; Özakın, Çolak, and Kurgan 2021; Özakın and Kurgan 2021). The rolling factors impact not only the surface roughness of the material and the rolls but also the surface topographical orientation of the rolls. To minimize extra tensile stresses that may induce ripping in the strip width direction,

Mazur reasoned that the surface micro-relief should be consistent along the roll-barrel axis (Mazur 2015).

The surface roughness is imparted by conventional cold rolling (CR) with textured rolls. Although many studies have been published on roughening by CR and the effects of process parameters in AR on microstructure, grain refinement, crystallographic orientation, rolling force, mechanical behaviour, and texture evolution, studies regarding AR texturing have yet to be conducted. This study aims to determine whether surface roughening can be done with asymmetrical rolling and how the rolling parameters affect the result.

2. The Principles of Asymmetrical Rolling

Mechanical properties are in good balance in materials with heterogeneous microstructures (formation of plastic gradients) (Muñoz et al. 2021). Asymmetrical rolling (acronym AR) is an effective method to create heterogeneous microstructure in the material. Due to the asymmetry and this heterogeneous structure, there is no deterioration in the strip profile but an improvement (Vincze, Simões, and Butuc 2020). In the CR process, which is a symmetrical rolling (Fig 1a), until the neutral point, the tangential friction force act in the direction to draw the material into the roll. After the neutral point, the frictional force's direction is reversed and opposes the delivery of the sheet from the rolls (Beddoes and Bibby 1999). Since the neutral points of both rolls are on the same vertical plane due to the symmetry, as shown in Fig 1a, the direction of tangential frictional force is always the same in all vertical planes through the roll gap for both rolls. In this way, the material would flow through the roll gap with a symmetric deformation texture (Fig 1c).

AR conditions can be produced using rolls of varying radii, rotation speeds, or surface conditions. Because of this asymmetry, the sheet tends to bend. With a smaller diameter top roll, the neutral points are no longer on the same vertical plane. The neutral point of the small roll (top roll) shifts toward the entry side, while the neutral point of the larger roll (bottom roll) shifts toward the exit side, and the sheet tends to bend due to this asymmetry (Fig 1b). In the region between the neutral points, the frictional forces acting in opposite directions on both surfaces and the greater sliding distance cause a heterogeneous and more significant shear deformation through the thickness of the material in AR. Vincze et al. stated that the roll diameters (asymmetry ratio) ratio is 1.5 to create uniform shear deformation across the thickness and decrease normal pressure (Vincze et al. 2020). Wauthier et al. reported various thickness reductions (32.2-36.8%) in the tests with different asymmetry ratios (1.10-1.45), although the gap between the rolls and the roll surface roughness is the same (Wauthier et al. 2009). This introduced shear strain changes the deformation stream and microstructure evolution (Fig 1d). In CR, texture twist only occurs in the surface zones, while in AR,

it occurs in the central region throughout the thickness of the material. Thanks to these properties in AR, finer microstructure, improved mechanical behavior, and highly formable material can be obtained. Munoz et al. compared low-carbon steel subjected to AR after cold rolling regarding texture evolution, strain path heterogeneity, microstructure, and mechanical properties. They stated that AR applied after CR for the same thickness reduction enhances material strength (Muñoz et al. 2021). Cho et al. also reached similar conclusions in their research. They revealed that AR applied after CR reduces basal texture density and improves mechanical properties (Cho et al. 2013). Also, a lower rolling force by almost half and lower torque is another advantage of AR compared to CR (Fajfar et al. 2017; Kiefer and Kugi 2008; Liu and Kawalla 2012; Orlov et al. 2013; Vincze et al. 2020). Moreover, it is possible to get thinner material in AR with the same gap between the rolls comparing the CR process (Vincze et al. 2020).

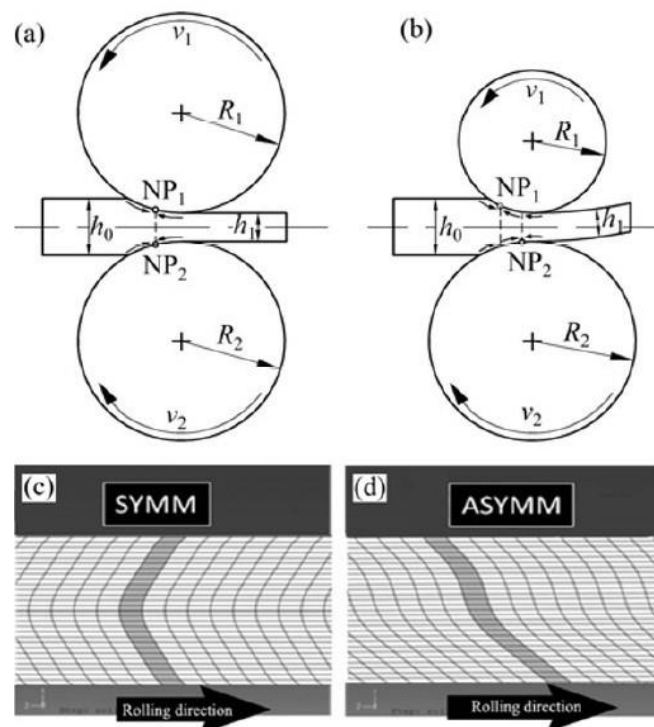
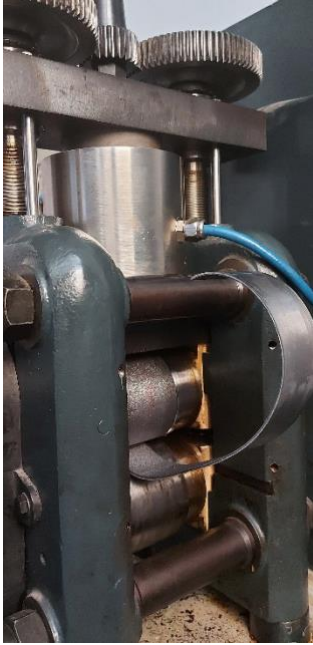


Figure 1. Schematic illustrations **a)** Symmetric rolling ($R_1=R_2$, $V_1=V_2$) **b)** Asymmetric rolling ($R_1<R_2$, $V_1<V_2$) **c)** Shear deformation texture through the thickness in CR **d)** Heterogeneous shear deformation texture through the thickness in AR (Liu & Kawalla, 2012).

Curvature tendency can be reduced by adjusting the thickness reduction (Kiefer and Kugi 2008). According to their mathematical and computer modeling, the closer the shape factor, calculated by the ratio of contact arc length to average thickness in asymmetric rolling, is to 1.8, the straighter the material will come out. Material curvature in AR can also be eliminated by equipping the rolling mill with a table roller (Fajfar et al. 2017; Kiefer and Kugi 2008). The difference in rolls' speeds and the percentage of thickness reduction affect the curvature tendency. The solution suggestion is small

reductions per pass rather than a higher final reduction (Muñoz et al. 2021). The material curvature, which occurred during AR, is shown in Figure 2a. In our tests, the curvature effect of AR is much more pronounced at lower speeds. It is seen that much less curvature occurs in the sample rolled at 50 rpm than in the sample rolled at 10 rpm (Fig. 2b). On the other hand, curvature in the asymmetric rolled sheet may be advantageous during coiling in a down-coiler (Vincze et al. 2020).



a) Curvature occurred during AR.



b) The speed effect on material curvature.

Figure 2. Material curvature

The surface roughness of the sheet is imparted mainly by conventional cold rolling (CR) with textured rolls. As shown above, many studies have been published on process parameters in AR and their effects on microstructure, grain refinement, crystallographic orientation, rolling force, mechanical behaviour, and texture evolution. However, there needs to be more research on roughness transfer in AR. The study aims to clarify the rolling variables' impact on the AR transfer ratio and compare it with the CR results.

3. Experimental Procedure

3.1. Test Equipment and Material

Rolling tests were performed with a 2-high rolling configuration that allows the speed to be varied from 5 to 100rpm equipped with a 100-ton-capacity load cell to measure the rolling force accurately. The tests were conducted with three rolls, one bright but the others roughened in different values (Table 1). The top roll was roughened, but a bright and larger roll was used as the bottom roll

to produce AR conditions. The samples in two different thicknesses were cut to be 30mm wide and 200mm long, and their properties as seen in Table 2.

Table 1. Rolling rolls

	Roll diameter (mm)	Barrel Length (mm)	Surface Roughness (μm) ^a	Surface Hardness (HRC)	Surface condition	Roll material
Rough roll	68	60	3.8	60	Roughened with laser	Cold work tool steel (2379)
Very rough roll			8.0			
Bright roll	75	60	Less than 0.4	60	Ground	

Table 2. Material properties

Standard	Grade	Erdemir Grade	Thickness (mm)	Yield Strength (N/mm ²)	Tensile Strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Surface Roughness (μm) [*]
DIN-EN 10130-2006	DC01	ERD6112	0.73 2.00	236.3	339.3	36	1.123

3.2 Rolling Experiments

Rolling tests were performed in lubricated and dry conditions at various thickness reductions and speeds, using different thicknesses of materials and different roughness rolls. Table 3 shows the indication of these parameters. According to the presentation in this table, the 2.0/VR/10/HR/D test indicates 2.0mm material thickness, 8.0 μm roll surface roughness (VR), 10rpm speed, higher reduction ratio (HR), and dry (D) condition. All tests were performed at room temperature. The surface roughness was measured with a Mitutoyo SJ-201 surface roughness measuring equipment.

Table 3. Rolling parameters

Material thickness	Indicator	0.7	2.0
	Meaning	0.73mm	2.0mm
Roll surface roughness	Indicator	R (Rough)	VR (Very Rough)
	Meaning	3.8 μm	8.0 μm
Speed	Indicator	10	50
	Meaning	10 rpm	50 rpm
Thickness Reduction	Indicator	SR	HR
	Meaning	Smaller Reduction (100 μm)	Higher Reduction (200 μm)
Surface condition	Indicator	D	L
	Meaning	Dry	Lubricated

The surface roughness of the material should be at a specified level, and the standard deviation should be as low as feasible in white appliances and automobiles body where the surface look is highly essential. By taking at least ten measurements from the rough surface (top surface) of each sample, the standard deviation of the final surface roughness and the standard deviation were calculated, and it was shown the consistency between these results and the 3-D area scan images taken with the Nanovea optical profile measuring device. Scans were performed on a 2×2 mm field with an accuracy of $5\mu\text{m}$. The obtained results were compared with the results of CR results.

The roughness transfer ratio (RTR) was calculated using Equation (1).

$$RTR[\%] = \frac{Ra_1 - Ra_0}{Ra_r - Ra_0} \times 100 \quad (1)$$

Ra_0 represents the surface roughness of the material before rolling, Ra_1 represents the surface roughness of the rolled material, and Ra_r represents the roll surface roughness.

4. Results

4.1 The effect of the rolling speed

In roughening tests performed at various speeds (10 rpm and 50 rpm), as long as the other variables are identical, it is seen that the roughness on the material surface is higher at lower speeds (Fig. 3). This is a disadvantage regarding production tonnage when producing materials with high roughness is desired. This may be due to the increased contact time under pressure required for plastic deformation. Qu et al., in their symmetrical rolling tests, explained the situation by flattening the surface asperity as the speed increases, increasing the actual contact area. They also stated that fast-rolling affects this result since it speeds up the progressive shearing process in the contact zone (Qu et al., 2016). However, in the CR study conducted in 2018, the result was the opposite; RTR increased as speed increased (Çolak & Kurgan, 2018).

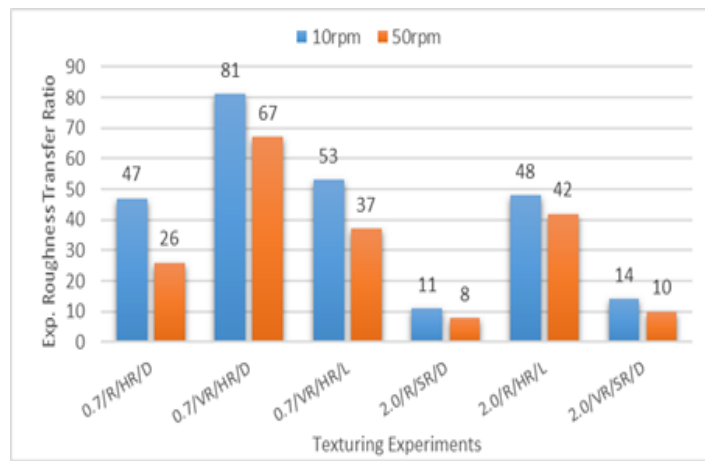


Figure 3. The speed effect on RTR.

4.2 The effect of the lubrication

According to the test results performed by keeping the variables in Table 3 constant, the surface roughness of the dry-rolled material is 14–81 per cent higher than the lubricated one (Fig. 4). This may be because of the increased rolling force due to the higher coefficient of friction in dry rolling (Beddoes & Bibby, 1999). Indeed, experiments found that the roughness transfer increased with the increase of rolling force (Fig. 5). The result is consistent with the previous CR study (Çolak & Kurgan, 2018). The hydrodynamic effect induced at the roll-material contact during lubricated rolling is assumed to be responsible for the poor transfer in both oily symmetric and oily asymmetric rolling.

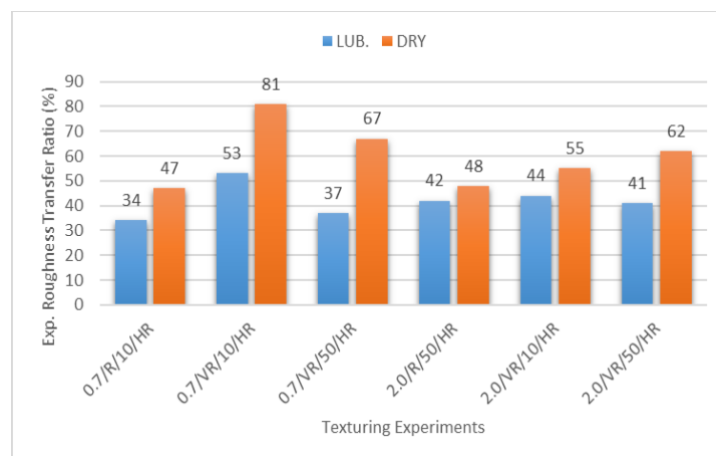


Figure 4. The lubrication effect on RTR

4.3 The Effect of the Rolling Force

4.3.1 Rolling force - roughness transfer relation

The results of thirty-two rolling tests with various parameters given in Table 3 show that the higher the rolling force, the higher the transfer ratio (Fig. 5). It is seen that when the force increases from 1 kN/mm to 3 kN/mm, the transfer increases from 10% to about 50%; that is, the increase in the transfer is greater than the increase in the rolling force. In another study (Çolak & Kurgan, 2018) examining the roughness transfer in symmetrical rolling it was concluded that the transfer ratio was directly proportional to the rolling force, as in this study. The high forces at the exceedingly small contact region between the sharp peaks on the roll surface and the material surface cause the peaks to sink deeper into the material surface, causing deeper craters to form on the material surface. Furthermore, with high loads, lower-height peaks begin to sink into the material surface and contribute to crater formation.

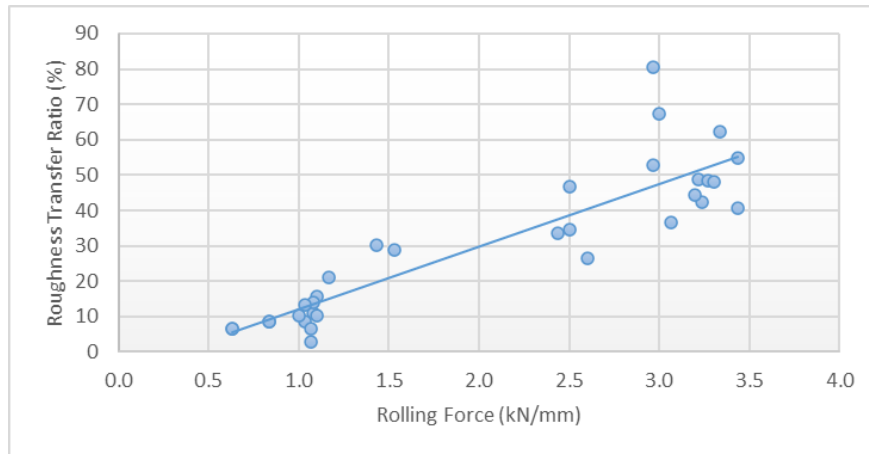


Figure 5. The rolling force effect on RTR

Note: The values under 2kN/mm are for smaller reduction (SR); the values above 2kN/mm are for higher reduction (HR)

4.3.2 Rolling force – material thickness relation

The rolling force is higher in thicker materials under the same conditions in AR (Fig. 6). It may be because in the region between the neutral points, the frictional forces acting in opposite directions on both surfaces and the greater sliding distance cause a heterogeneous and more significant shear deformation through the thickness of the material in AR. Since the rolling force increases the transfer, it should be expected that the roughness transfer is higher in thicker materials. It may be considered

an advantage when there needs to be more surface roughness in thicker material during asymmetric rolling. On the other hand, the rolling load was higher in thinner material in the CR process (Fig. 7).

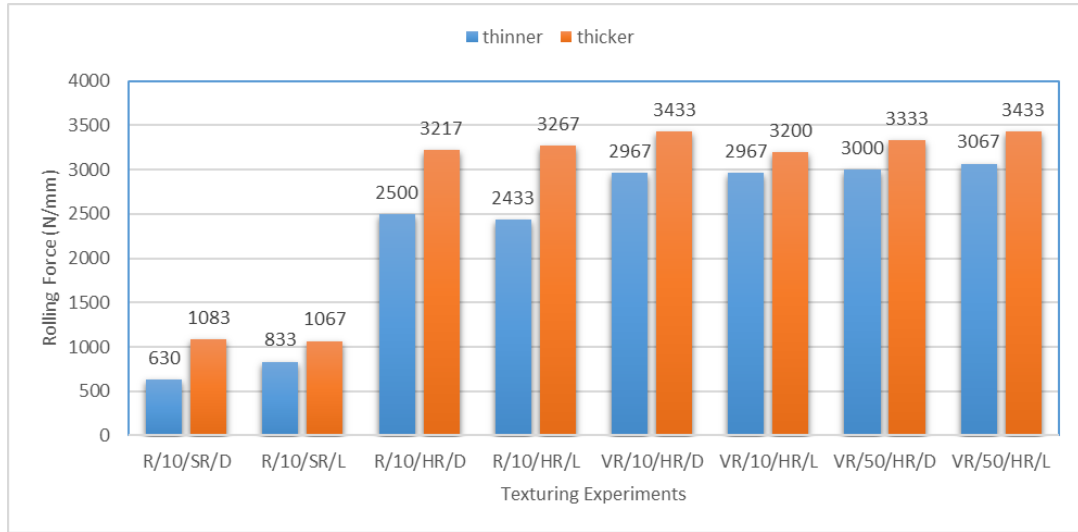


Figure 6. The material thickness effect on rolling force

Rolling occurs under forces of up to two thousand tons, depending on the rolling mill and material properties. Low rolling force means that the rolling system and rolls operate under less load, which means less wear and less cost. According to the literature, one of AR's advantages is the lower rolling load. However, in AR, this benefit only applies to thinner materials. We found that the rolling load is higher in thicker material than the CR results obtained in the previous research (Çolak & Kurgan, 2018). In the CR and AR tests carried out under the same conditions, it is seen that low rolling force occurs in AR with thin material, while low rolling force occurs with thick material in CR (Fig.7).

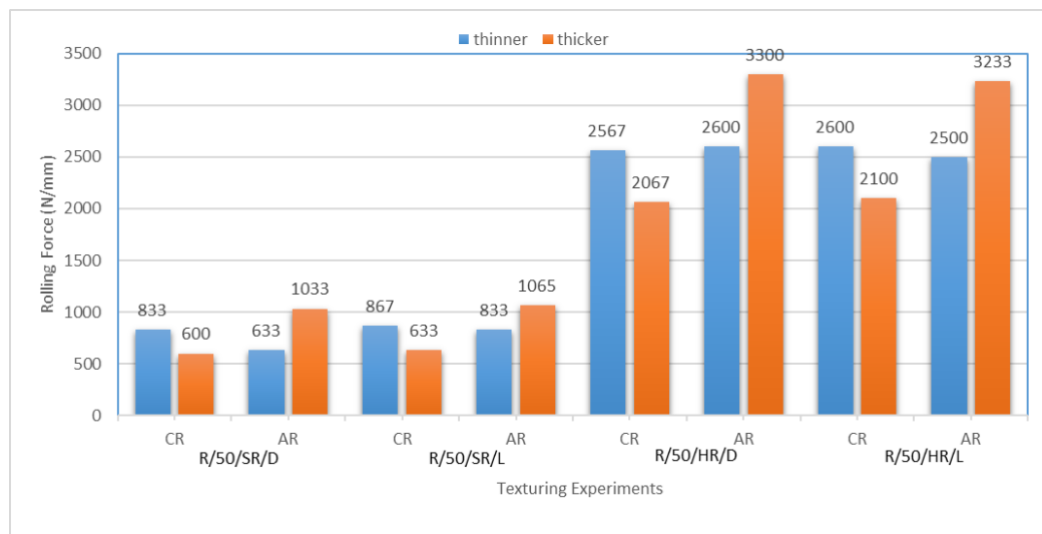


Figure 7. Comparison of rolling force in CR and AR based on material thickness reduction (CR data is taken from the other article (Çolak & Kurgan, 2018))

4.3.3 Rolling force – speed relation

The roughness transfer is larger in AR roughening trials at various speeds (10 and 50 rpm) but with constant roll roughness, reduction ratio, lubrication condition, material thickness, and type (Fig. 8). Although the speed increased five times, the rolling force has a maximum increase of 7%. This relationship and rate are the same as in the other study (Çolak & Kurgan, 2018). Due to the high rolling force concern, this increase in rolling force is not large enough to force the producer to produce at low speeds. The effect of high speeds on increasing the rolling force, which increases the transfer, is another advantage of asymmetric rolling at high speeds. In addition, it is seen that the material tends to curvature less in the AR process performed at high speeds (Fig. 2b).

The sheet is plastically shaped by the force exerted by a pair of opposingly rotating rolls. The increase in the rolling force at high speeds is because, as the speed increases, the volume of material that needs to be plastically shaped per unit of time increases.

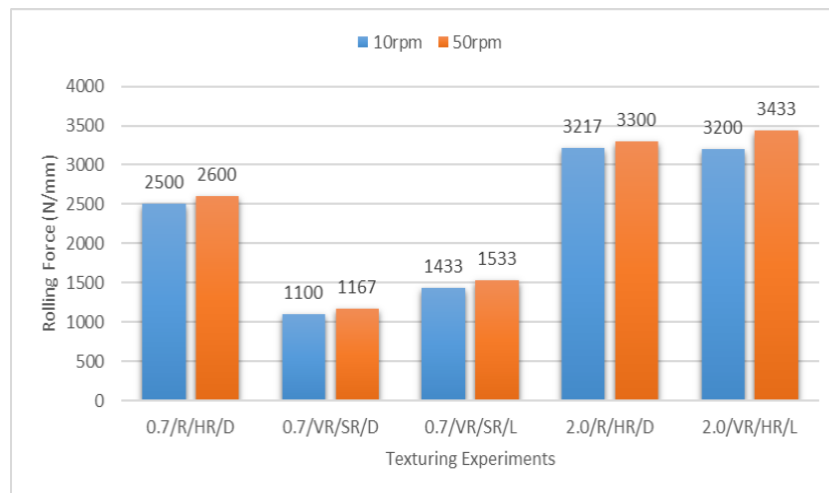


Figure 8. The speed effect on rolling force

4.3.4 Rolling force-roll surface roughness relation

Very rough rolls resulted in greater rolling force than the rough rolls in tests with thinner materials (Fig. 9). Neutral points aren't on the same vertical plane in AR, and the neutral point shifts towards the entry side as friction increases (as roll surface roughness increases) (Fig 1b). In the region between the neutral points, greater sliding distances due to the shifting of neutral points and the frictional forces acting in opposite directions on both sheet surfaces increase the rolling force in AR. This means the transfer will be higher when rolling asymmetrically with very rough rolls. This result agrees with the other research results (Çolak & Kurgan, 2018). However, this is not the case for

thicker materials. In the experiments conducted with thicker materials, no meaningful change was observed in the rolling force because of the increase in surface roughness of the roll (Fig. 10).

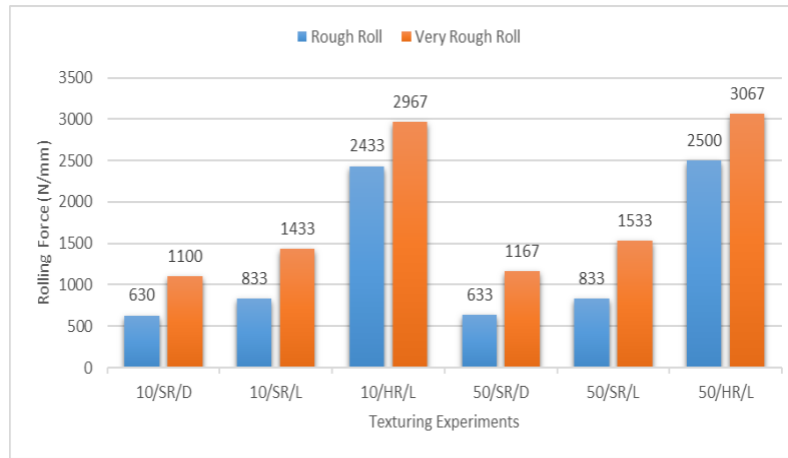


Figure 9. The roll roughness effect on rolling force (for thinner material)

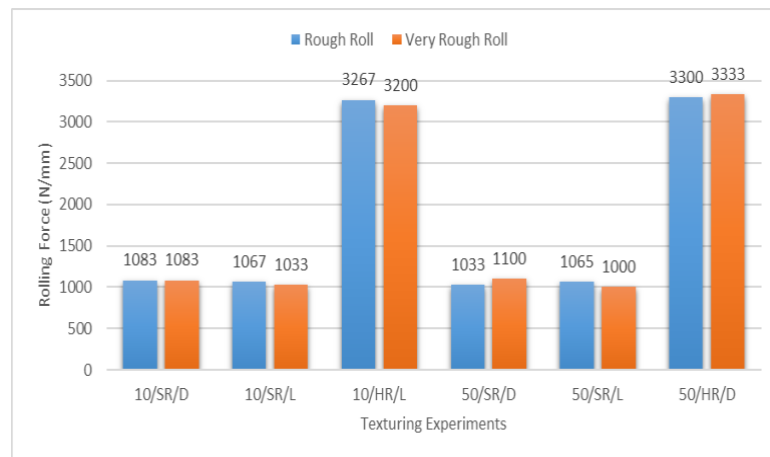


Figure 10. The roll roughness effect on the rolling force (for thicker material)

4.4 Experimental Standard Deviation

The average roughness values (R_a) were calculated by obtaining different measurements from the test samples. Most of the time, more than obtaining this value is required for the appearance quality of the dyed surface. Also, the roughness should vary within a narrow range for the entire surface. Roll surface roughness is vital in imparting these properties to a sheet surface (Çolak, 2021; Çolak & Kurgan, 2018). No matter how homogeneous the roll surface roughness is, it may not be sufficient to get a homogeneous roughness distribution on the material surface. Other parameters affecting this need to be known and controlled. These variables in CR were explored in the previous study, and the situation in AR is as follows.

4.4.1 Reduction ratio effect

When the test findings obtained at a smaller reduction (SR) ratio are compared to those obtained at a higher reduction (HR) ratio, it is seen that a narrower range of roughness distribution is obtained at smaller reduction ratios in the tests performed with rough rolls and very rough rolls (Fig. 11 and Fig. 12). This is also the case with symmetrical rolling (Çolak & Kurgan, 2018). However, it is seen that the standard deviation is higher in the AR rolling tests performed with the very rough roll compared to the symmetrical rolling results (Fig. 13). 3D surface scans were used to visualize this phenomenon. Figures 14a and 14b show 3D surface topographies for the tests performed under 2.0/R/10/SR/L conditions in AR and CR, respectively. After comparison, the symmetrical rolled surface is observed to have a more homogeneous roughness distribution than the asymmetrical rolled surface. The roughness measuring device results from the specimen surface are likewise the same. The standard deviation was 0.08 in CR, while it was measured as 0.15 in AR. It is thought that the friction forces acting in opposite directions on both surfaces in the region between the neutral points in asymmetrical rolling destroy the surface roughness (Fig. 1b).

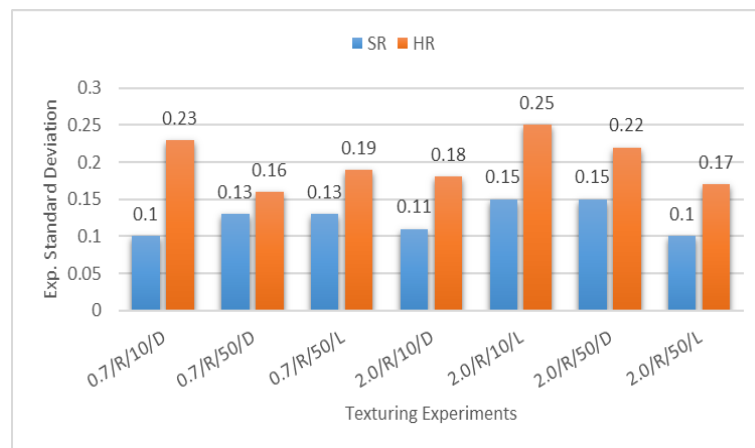


Figure 11. Experimental standard deviation (with rough roll-R)

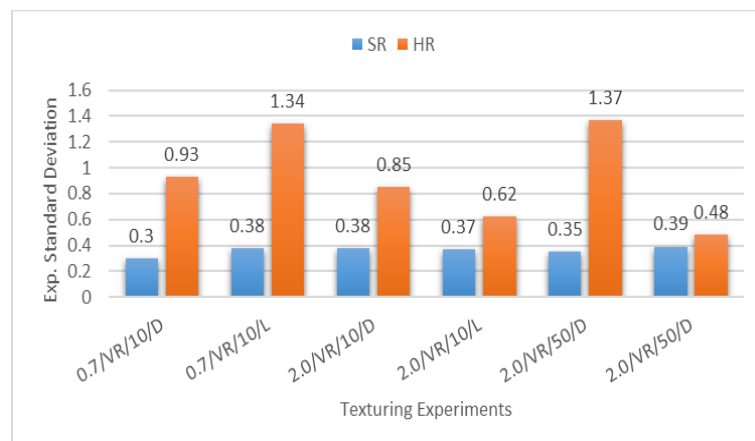


Figure 12. Experimental standard deviation (with very rough roll-VR)

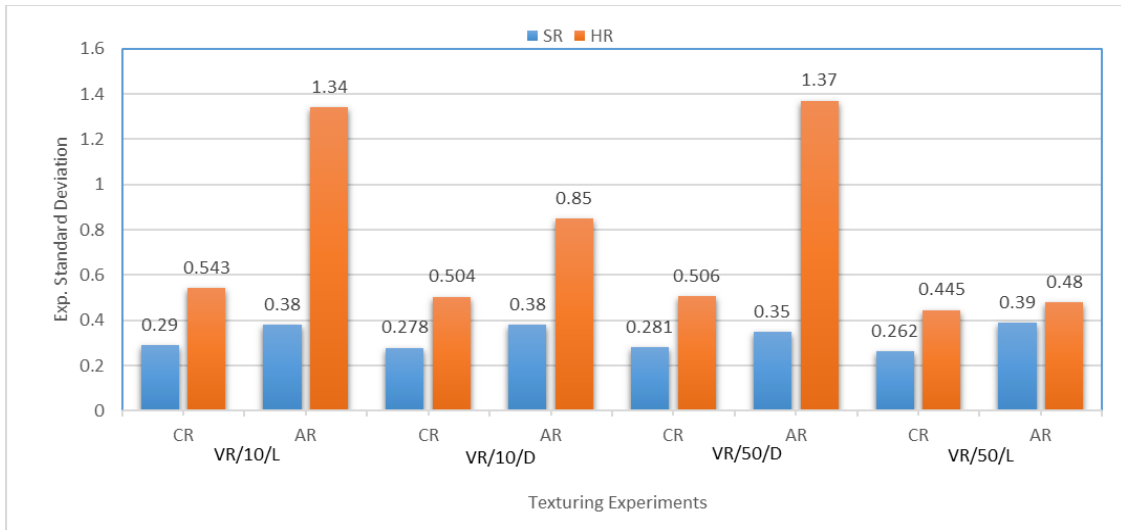
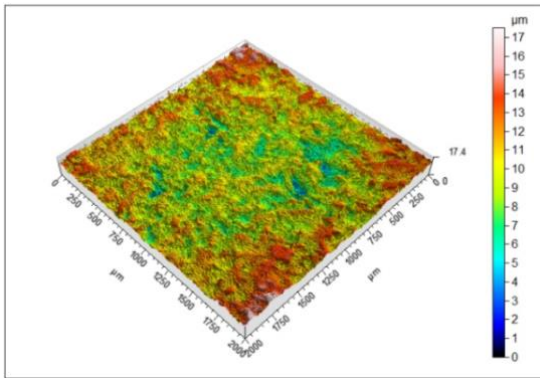
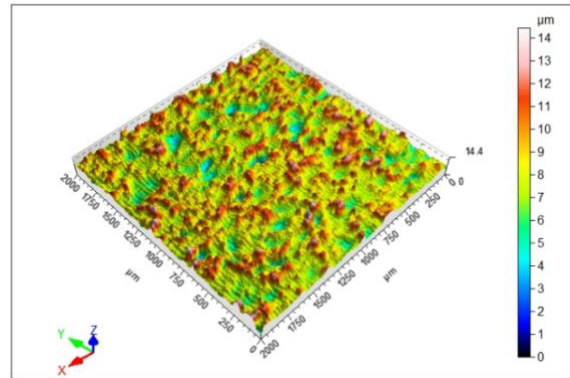


Figure 13. Comparison of standard deviation in CR and AR based on thickness reduction (CR data is taken from other article (Çolak & Kurgan, 2018))



(a) AR (standard deviation: 0.15)



(b) CR (standard deviation: 0.08)

Figure 14. 3D optical field scan image for 2.0/R/10/SR/L conditions: **(a)** AR, and **(b)** CR

4.4.2 Lubrication effect

When we look at Figure 15 and Figure 16, it is seen that the roughness distribution changes depending on the surface condition (dry or lubricated) in AR. A lower standard deviation is obtained in dry rolling at lower speeds, while a lower standard deviation is obtained in lubricated rolling at higher speeds. However, in the previous study (Çolak & Kurgan, 2018), the standard deviation was lower at each speed value (lower or higher) in lubricated rolling. This can be attributed to the fact that while the hydrodynamic effect occurs at higher speeds in AR, this effect cannot be shown at lower speeds despite the lubricant. 3D surface scans were used to visualize this phenomenon. Figure 17 shows 3D surface topography images for the tests under 2.0/R/50/SR conditions. Comparing Figure 17a for dry AR with Figure 17b for lubricated AR, it is seen that the surface of lubricated rolled has a more homogeneous surface roughness at a higher speed (50 rpm). The roughness values measured

manually on the material surface also parallel this result. In lubricated rolling, the standard deviation is 0.10, but in dry rolling, it is 0.15. It is seen that the surface of the symmetrical rolled sample has a more homogeneous roughness than the asymmetrical rolled surface under lubricated conditions when comparing Figure 17b with Figure 17c, showing the conventional rolled surface topography.

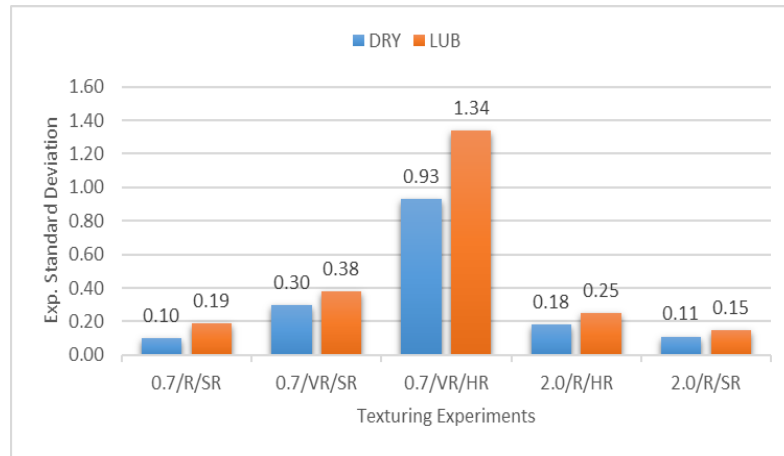


Figure 15. The effect of lubrication on standard deviation at low speed (10 rpm)

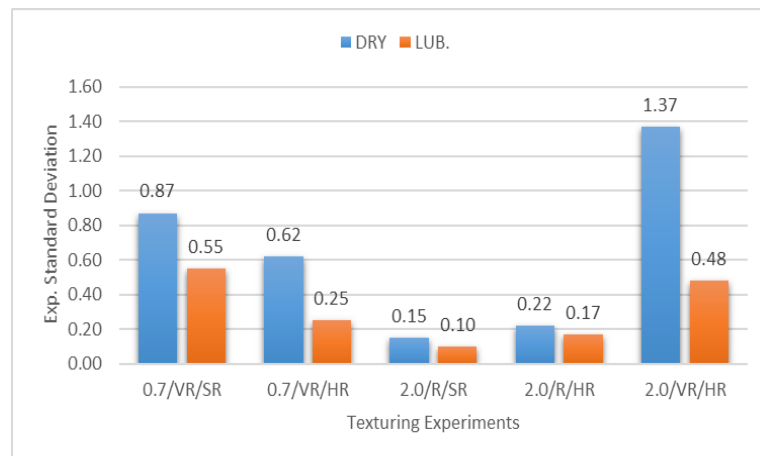
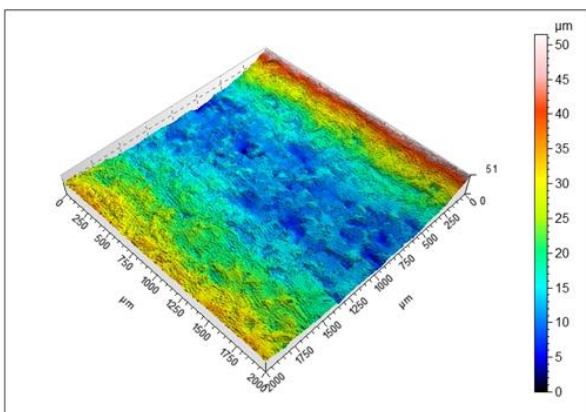
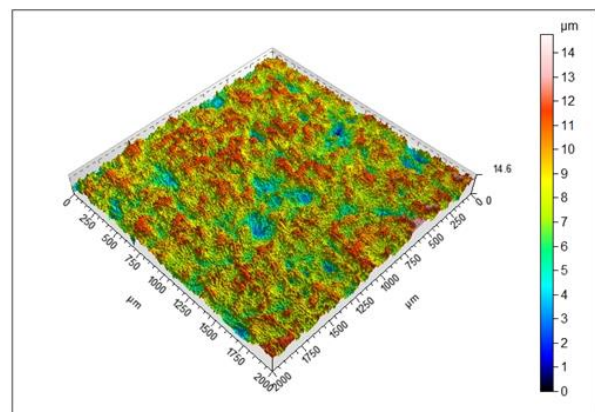


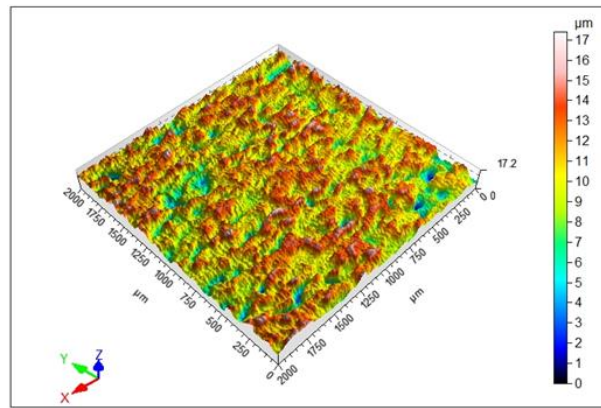
Figure 16. The effect of lubrication on standard deviation at high speed (50rpm)



(a) Dry AR (standard deviation: 0.15)



(b) Lubricated AR (standard deviation: 0.10)

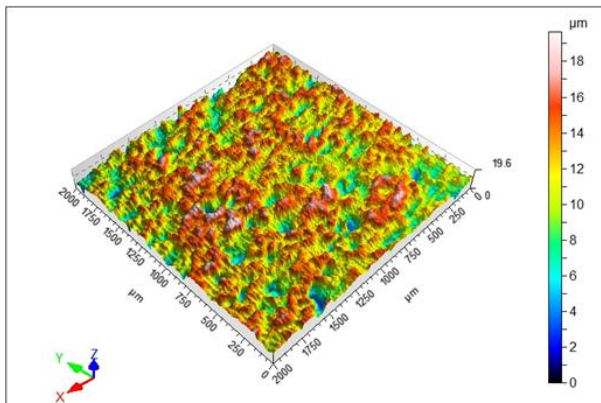


(c) Lubricated CR (standard deviation: 0.09)

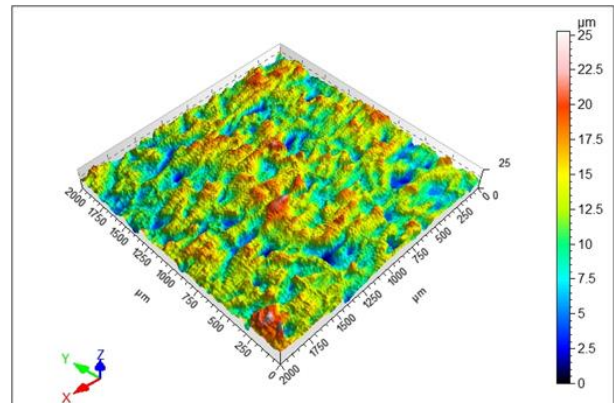
Figure 17. Rolling under 2.0/R/50/SR conditions: (a) Dry AR, (b) Oily AR, and (c) Oily CR

4.4.3 Speed effect

In most of the AR tests performed at different speeds, it was observed that the roughness distribution changed depending on the rolling speed. Considering the test result conducted under 0.7/R/HR/D conditions, it is seen that the roughness distribution increases with the speed increase in AR (Fig. 18). The roughness values measured manually on the material surface are also parallel to this result. The standard deviation is 0.17 at lower speeds and 0.22 at higher speeds. This was also the case in CR (Çolak & Kurgan, 2018).



(a) 10rpm (standard deviation: 0.17)



(b) 50rpm (standard deviation: 0.22)

Figure 18. 3D optical field scan images for 0.7/R/HR/D conditions at various speeds: (a) 10rpm, and (b) 50rpm

When the tests' results were compared with those obtained in the other study (Çolak & Kurgan, 2018), it was found that the standard deviation was more significant in AR under the same conditions. This is assumed to be because asymmetrical circumstances provide a higher sliding distance on the material surface (Fig. 1). Although fast asymmetrical rolling is an advantage in terms of both the

production tonnage and the low tendency of the material to bend, it is seen that there is no advantage in terms of roughness homogeneity on the material surface. This shows that asymmetrical rolling is unsuitable for producing materials that should have homogeneous surface roughness.

5. Discussion

As in CR, roughness transfer increases with increasing rolling force in AR. In the same conditions, the higher rolling force in thicker material than thinner material means that the AR method is more effective in roughening thicker material. Conversely, in CR, the rolling force is higher in thinner materials. While the roll roughness does not have much effect on the rolling force in the use of thicker material, it is higher in the very rough roll comparing the rough roll when using thinner material.

Contrary to CR, transfer decreases as speed increases in AR. On the other hand, due to the rolling force, which causes the transfer to increase, decreases as the speed increases; there are two opposite effects on the transfer change.

The fact that the transfer is higher in dry rolling, and the standard deviation is lower at lower speeds and in the dry condition results in the conclusion that dry AR at lower speeds is more appropriate for suitable surface topography. If asymmetric rolling is to be conducted at higher speeds, a lubricant should be used to obtain a more homogeneous surface. However, the standard deviation in lubricated AR is more significant than in lubricated CR. The standard deviation is lower for rough and very rough rolls at a minor thickness reduction but not as low as in CR.

One advantage of AR is its lower rolling force (This advantage is only seen in thinner material in this study.) and lower torque comparing the CR process (Vincze et al., 2020). However, the fact that the increase in the rolling force at high speeds is higher than the increase in CR shows that AR is not suitable for rapid and mass production. The decrease in roughness transfer and increase in roughness distribution range as the speed increases is another difficulty to rapid and mass production with the AR method. AR can be applied after CR to increase material strength rather than to obtain good surface conditions (Cho et al., 2013; Muñoz et al., 2021). Another advantage of the AR method is that it can reduce the thickness more than CR with the same roll gap (Vincze et al., 2020).

Although the curvature of the sheet due to asymmetry is an obstacle to working in tandem order, it can be seen as an advantage in facilitating the down-coiling process. Applying multiple passes and turning the material with each pass can reduce the curvature effect in the machined sheet. It can also be reduced by adjusting the thickness reduction and by equipping the rolling mill with a table roller (Fajfar et al., 2017; Kiefer & Kugi, 2008).

Changes in dislocation densities and grain size are more pronounced on the surface of the material processed by AR than in CR conditions. This is an advantage in producing materials where the hard core of the surface is desired to be ductile. If conducted under the same conditions as CR, AR stands out mainly because it provides higher strength on the material's surface and requires lower rolling forces.

6. Conclusion

This work experimentally investigated the influences of rolling variables on roughening characterization in AR, and the findings are below.

- Lubricated rolling tests revealed that lubrication reduces roughness transmission by 13-45 per cent. However, this rate is around 7–23% in conventional rolling. Also, lubricated rolling provided a more homogeneous roughness distribution at higher speeds (around 22-65%), while dry rolling provided this at lower speeds (around 26-90 %). Lubricated symmetrical rolling has a homogeneity advantage at all speeds, and this rate is 16–35% at lower speeds and 5-27% at higher speeds.
- As the thickness reduction increases, the rolling force increases, as in CR.
- As the speed increases, although the rolling force, which acts to increase the roughness transfer, increases (max. 7%), the introduction of roughness decreases (max. 45%) but the roughness distribution range increases at around 30%. However, with the increase in speed in symmetrical rolling, a maximum of 12% in rolling force, there was an increase of up to 57% in transfers.
- The rolling force is higher (around 11–72%) when using a thicker material than thinner material. However, the rolling force in symmetric rolling is 24–38% higher in thin material.
- While the roll roughness does not have much effect on the rolling force in using thicker material, it is higher (around 22-88%) in the very rough roll compared to the rough roll when using thinner material. However, as the roll roughness increased in symmetrical rolling, there was an increase in the rolling force of 6-44%, independent of the material thickness.
- The standard deviation was lower in lower reduction ratios using rough (around 19-56%) and very rough rolls (around 19-72%). Conventional rolling (CR) ratios are 20-45% and 40-55%, respectively.

This study aims to provide information for parameter selection to generate a good surface roughness on sheet metal in AR. However, the test results revealed that AR is unsuitable for getting a surface roughened sheet compared to the CR.

Acknowledgements

The Research Fund of Karabük University supported this work. Project Numbers: KBÜBAP-22-YL-052

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

- Beddoes, J. and J. Bibby. 1999. *Bulk Deformation Processes*.
- Cho, Jae Hyung, Sang Soo Jeong, Hyoung Wook Kim, and Suk Bong Kang. 2013. "Texture and Microstructure Evolution during the Symmetric and Asymmetric Rolling of AZ31B Magnesium Alloys." *Materials Science and Engineering A* 566:40–46.
- Çolak, Bilal. 2021. "A Comparison of Tonnage-Dependent Shot Blast and Electro-Discharge Texturing Methods." *Surface Topography: Metrology and Properties* 9(3):35051.
- Çolak, Bilal and Naci Kurgan. 2018. "An Experimental Investigation into Roughness Transfer in Skin-Pass Rolling of Steel Strips." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 96(9–12):3321–30.
- Elkoca, Oktay. 2008. "A Study on the Characteristics of Electrical Discharge Textured Skin Pass Mill Work Roll." *Surface and Coatings Technology* 202(12):2765–74.
- Fajfar, Peter, Alenka Šalej Lah, Jakob Kraner, and Goran Kugler. 2017. "Asymmetric Rolling Process." *Materials and Geoenvironment* 64(3):151–60.
- Kiefer, Thomas and Andreas Kugi. 2008. "An Analytical Approach for Modelling Asymmetrical Hot Rolling of Heavy Plates." *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems* 14(3):249–67.
- Kijima, Hideo. 2014. "Influence of Roll Radius on Roughness Transfer in Skin-Pass Rolling of Steel Strip." *Journal of Materials Processing Technology* 214(5):1111–19.
- Kijima, Hideo. 2015. "An Experimental Investigation on the Influence of Lubrication on Roughness Transfer in Skin-Pass Rolling of Steel Strip." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 96(9–12):3321–30.
- Kimura, Yukio, Masayasu Ueno, and Yutaka Mihara. 2009. "Printing Behavior of Roll Surface Texture to Hot-Dip Galvanized Steel Sheet in Temper Rolling." 95(5):399–405.
- Li, R., Q. Zhang, X. Zhang, M. Yu, and B. Wang. 2015. "Control Method for Steel Strip Roughness in Two-Stand Temper Mill Rolling." *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)* 28(3):573–79.
- Liu, Jie and Rudolf Kawalla. 2012. "Influence of Asymmetric Hot Rolling on Microstructure and Rolling Force

- with Austenitic Steel." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)* 22(SUPPL.2):s504–11.
- Mazur, V. L. 2015. "Production of Rolled Steel with Specified Surface Roughness." *Steel in Translation* 45(5):371–77.
- Muñoz, Jairo Alberto, Martina Avalos, N. Schell, H. G. Brokmeier, and Raúl E. Bolmaro. 2021. "Comparison of a Low Carbon Steel Processed by Cold Rolling (CR) and Asymmetrical Rolling (ASR): Heterogeneity in Strain Path, Texture, Microstructure and Mechanical Properties." *Journal of Manufacturing Processes* 64(March 2020):557–75.
- Orlov, Dmitry, Arnaud Pougis, Rimma Lapovok, Laszlo S. Toth, Ilana B. Timokhina, Peter D. Hodgson, Arunansu Haldar, and Debashish Bhattacharjee. 2013. "Asymmetric Rolling of Interstitial-Free Steel Using Differential Roll Diameters. Part I: Mechanical Properties and Deformation Textures." *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science* 44(9):4346–59.
- Özakın, Batuhan, Bilal Çolak, and Naci Kurgan. 2021. "Effect of Material Thickness and Reduction Ratio on Roughness Transfer in Skin-Pass Rolling to DC04 Grade Sheet Materials." *Industrial Lubrication and Tribology* 73(4):676–82.
- Özakın, Batuhan and Naci Kurgan. 2021. "Experimental Investigation of Roughness Transfer with Skin-Pass Rolling to High Strength Low Alloy (HSLA) Material." *Arabian Journal for Science and Engineering* 46(12):12137–44.
- Qu, Feijun, Haibo Xie, and Zhengyi Jiang. 2016. "Finite Element Method Analysis of Surface Roughness Transfer in Micro Flexible Rolling." *MATEC Web of Conferences* 80:04002.
- SMS DEMAG. 2003. *Influence of Temper Rolling on Material Properties*. Zürich.
- ThyssenKrupp Stahl. 2004. *Roughness Measuring of Metal Surfaces*. Essen.
- Vincze, Gabriela, Fabio Simões, and Marilena Butuc. 2020. "Asymmetrical Rolling of Aluminum Alloys and Steels: A Review." *Metals* 10(9):1–24.
- Wauthier, Aurelie, Helene Regle, Jorge Formigoni, and Gwenola Herman. 2009. "The Effects of Asymmetrical Cold Rolling on Kinetics, Grain Size and Texture in IF Steels." *Materials Characterization* 60(2):90–95.
- Wentink, D. J., D. Matthews, N. M. Appelman, and E. M. Toose. 2015. "A Generic Model for Surface Texture Development, Wear and Roughness Transfer in Skin Pass Rolling." *Wear* 328–329:167–76.
- Wu, Chuhan, Liangchi Zhang, Peilei Qu, Shanqing Li, and Zhenglian Jiang. 2018. "A Simple Approach for Analysing the Surface Texture Transfer in Cold Rolling of Metal Strips." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 95(1–4):597–608.
- Wu, Chuhan, Liangchi Zhang, Peilei Qu, Shanqing Li, and Zhenglian Jiang. 2019. "A New Method for Predicting the Three-Dimensional Surface Texture Transfer in the Skin Pass Rolling of Metal Strips." *Wear* 426–427(September 2018):1246–64.
- Wu, Chuhan, Liangchi Zhang, Peilei Qu, Shanqing Li, Zhenglian Jiang, and Wei Li. 2021. "Surface Texture Transfer in Skin-Pass Rolling with the Effect of Roll Surface Wear." *Wear* 476(March):203764.
- Xu, Dong, Quan Yang, Xiaochen Wang, Hainan He, Youzhao Sun, and Wenpei Li. 2020. "An Experimental Investigation of Steel Surface Topography Transfer by Cold Rolling." *Micromachines* 11(10).

Şebeke Bağlantılı Hibrit Yenilenebilir Enerji Sisteminin Homer ile Ekonomik ve Çevresel Analizi: İzmir Endüstriyel Bölgesi Örneği

Güler YILMAZ¹, Mertkan ŞAHİN², Ömür AKYAZI^{3*}, Barış ÖZTÜRK⁴

Öz

Bu çalışma kapsamında İzmir ilinde bulunan endüstriyel bölgenin elektrik ihtiyacının karşılanması için şebeke bağlantılı hibrit enerji sistemi tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarımla, seçilen endüstriyel bölgenin enerji talebinin karşılanması, birim elektrik maliyetinin minimize edilmesi ve elektrik üretiminden kaynaklanan karbon emisyonunun azaltılması amaçlanmıştır. Bölgenin meteorolojik verileri incelendiğinde yıllık güneş radyasyon miktarı ve rüzgâr hızının yenilenebilir enerji santralleri kurulumu açısından yeterli olduğu görülmüştür. Çalışmada enerji potansiyeli yüksek olan İzmir ilinde şebeke bağlantılı ve yenilenebilir enerji sistemlerinden oluşan beş farklı senaryo tasarlanmıştır. Senaryoların oluşturduğu santrallerde kullanılan bileşenler; güneş paneli, rüzgâr türbini, dönüştürücü ve bataryadan oluşmaktadır. HOMER yazılımı kullanılarak alınan simülasyon sonuçlarında birim enerji maliyeti, net şimdiki maliyeti, başlangıç maliyeti ve yıllık emisyon değerleri karşılaştırılmıştır. Özellikle yıllık emisyon değeri ve birim elektrik maliyet kriterleri göz önüne alındığında en verimli sistemin bataryalı hibrit enerji sistem tasarımı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sistem tasarımı birim elektrik maliyeti 0,0730 \$ seviyesine düşürülmüş ve elektrik tüketiminden kaynaklanan yıllık emisyon değerleri %82 azaltılmıştır.

Anahtar Kelimeler: HOMER, Hibrit Enerji Sistemi, Güneş Enerjisi, Rüzgâr Enerjisi, Batarya Sistemleri, Emisyon.

Economic And Environmental Analysis of Grid-Connected Hybrid Renewable Energy System with Homer: Case of İzmir Industrial Region

Abstract

Within the scope of this study, a grid-connected hybrid energy system was designed to meet the electricity needs of the industrial region in İzmir. The design aims to meet the energy demand of the selected industrial region, minimize the unit electricity cost, and reduce the carbon emissions caused by electricity production. Upon examination of meteorological data from the region, it was found that the annual amount of solar radiation and wind speed is sufficient for the establishment of renewable energy power plants. In this study, five different scenarios consisting of grid-connected and renewable energy systems were designed for İzmir, a region with high energy potential. The power plants created by these scenarios consist of solar panels, wind turbines, converters, and batteries. Simulation results obtained using HOMER software compared unit energy cost (COE), net present cost (NPC), initial cost, and annual emission values. The most efficient system was found to be the battery-powered hybrid energy system design, especially when considering annual emission value and unit electricity cost criteria. In this system design, the unit electricity cost was reduced to \$0.0730 and annual emission values from electricity consumption were reduced by 82%.

Keywords: HOMER, Hybrid Energy System, Solar Energy, Wind Energy, Battery Systems, Emission.

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, 385893@ogr.ktu.edu.tr

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, 385894@ogr.ktu.edu.tr

³Karadeniz Teknik Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, oakyazi@ktu.edu.tr

⁴Karadeniz Teknik Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye, 397184@ogr.ktu.edu.tr

¹<https://orcid.org/0009-0002-7077-0521>

²<https://orcid.org/0009-0006-6235-7541>

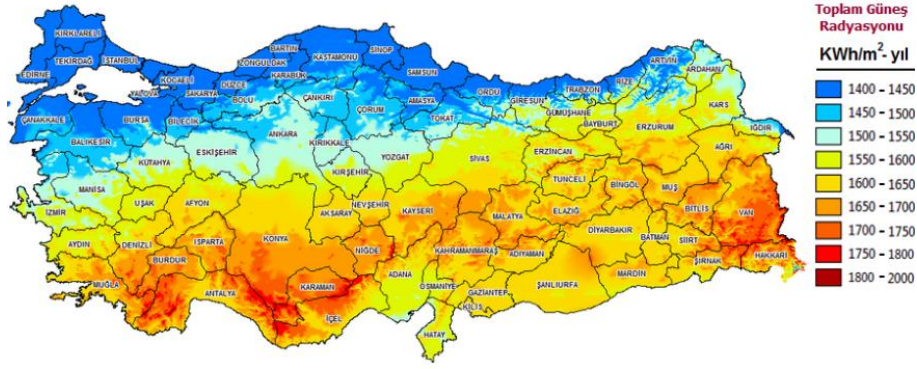
³<https://orcid.org/0000-0001-6266-2323>

⁴<https://orcid.org/0009-0008-1069-4428>

1. Giriş

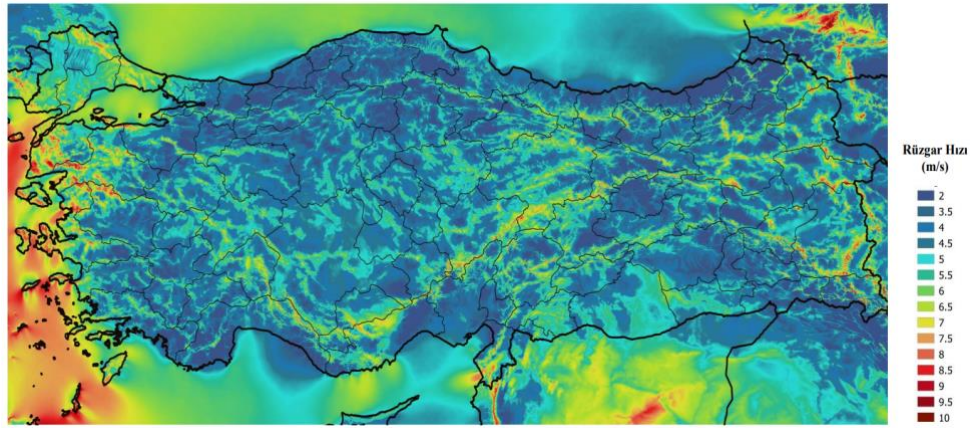
Gün geçtikçe artan insan popülasyonu, gelişen sanayi ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak enerji talebi giderek artmaktadır. Bu artan enerji talebini karşılamak için yıldan yıla enerji sektörü büyümektedir. 2021 yılındaki global enerji üretimi on yıl öncesine göre %28 artarak 27.782,64 TWh'e ulaşmıştır (Global Electricity Review, 2022). Geçmiş yıllara ait enerji tüketimlerine bakıldığında 2020 yılı kaynaklara göre birincil enerji tüketiminin %27,2'si kömür, % 31,2'si petrol, % 24,7'si doğalgaz, % 4,3'ü nükleer, % 6,9'u hidro, %2,6'sı rüzgâr, % 1,4'ü güneş ve %0,5'i diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşmaktadır (Holechek ve ark., 2022). 2019 yılında yaşanan pandemi sebebiyle enerji tüketimlerinde keskin bir düşüş yaşanmıştır. Bu keskin düşüşün ardından 2021' de tarihibir zirveyi ulaşılarak birincil enerji tüketimleri 31 EJ'e ulaşmıştır (Statistical Review of World Energy, 2022). Her geçen yıl artan enerji talebini karşılamak ve kesintisiz enerji sağlamak amacıyla fosil yakıt kullanımlarında artış gözlemlenmiştir (Güven ve Mete, 2022). 1990-2020 TÜİK Karbon Emisyonu verilerine göre karbondioksidin büyük bir kısmı Çin, ABD, Hindistan, Rusya ve Avrupa Birliği tarafından üretilmektedir (URL-1, 2022). Çin, dünyanın en büyük CO₂ üreticisi olup küresel emisyonların dörtte birini tek başına neden olmaktadır (URL-2, 2023). Türkiye, 2021 yılında küresel emisyonların %1,2'sine sahip olarak, dünyada en çok emisyonu neden olan 14. ülke konumundadır. Kişi başı karbon emisyonlarına bakıldığında ise Türkiye, yılda 5,3 ton karbon emisyonu ile dünya ortalamasının üzerinde yer almaktadır (Akyüz ve ark., 2019). Fosil yakıt kullanım sonucunda küresel ısınmanın giderek artması ülkeleri bu sorunları çözmeye yöneltmiştir. Bu sorunlara bir çözüm olarak ülkeler arasında iklim değişikliğini önlemek için Paris İklim Anlaşması 4 Aralık 2015 yılında yürürlüğe girmiş olup aralarında Türkiye'nin de olduğu 191 ülke tarafından imzalanmıştır. Anlaşma gereği 2030'a kadar %50 sera gazı salınımının engellenmesi, 2050 yılına gelindiğinde ise net sıfır emisyon hedefine ulaşılması hedeflenmektedir. Planlanan bu çözümler doğrultusunda çevre ve iklim koşullarının eski haline dönmesi sağlanamayacak olsa da canlı yaşamının devamı için daha kötü şartların oluşması engellenebilecektir (IPCC, 2014).

Türkiye'nin 2022 yılında elektrik tüketimi 328,9 TWh olup bu tüketimin %34,6'sı kömür, %22,2'si doğalgazdan, %20,6'sı hidrolik enerjisinden, %10,8'i rüzgârdan, %4,7'si güneşten, %3,3'ü jeotermalden ve %3,7'si diğer kaynaklardan karşılanmıştır (URL-3). Şekil 1'de verilen güneş enerji potansiyel atlasına (GEPA) göre, ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2.741 saat olup ortalama yıllık toplam ışınım değeri 1.527,46 kWh/m² olarak hesaplanmıştır (Bilhan ve Emikönel, 2021). Türkiye, coğrafi konumu sebebiyle Avrupa ülkelerinden daha çok güneş enerjisi potansiyeline sahiptir (Gyam, 2022). Son yıllarda güneş enerjisine talep giderek artmaktadır. Bunun başlıca nedeni yapılan teşvikler, alım garantisi, yönetmelikler, vergi muafiyeti gibi düzenlemeler güneş santrallerine yönelimi artırmıştır (Hakyemez, 2022).



Şekil 1. Türkiye Toplam Güneş Radyasyonu Haritası (GEPA 2023)

Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA) rüzgâr enerjisi verileri incelendiğinde yer seviyesinden 50 metre yükseklikte ve 7,5 m/s üzeri yıllık ortalama rüzgâr hızlarına sahip km^2 başına 5 MW gücünde rüzgâr potansiyeli olan bölgede rüzgâr santrali kurulabileceği kabul edilmiştir. Şekil 2’de verilmiş olan Türkiye’nin yıllık ortalama rüzgâr hızı dağılımına bakıldığında diğer bölgelere kıyasla ege bölgesinin ortalama rüzgâr hızı potansiyelinin açık ara önde olduğu görülmektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığında alınan verilere göre Türkiye’de rüzgâr enerji santrallerinin toplam kapasitesi 47.849,44 MW olduğu belirlenmiştir (URL-4, 2022). Haziran 2022 sonu itibariyle rüzgâr enerjisine dayalı elektrik kurulu gücü 10.976 MW, toplam kurulu güç içerisindeki oranı % 10,81’dir (URL-4, 2022).



Şekil 2. Yıllık Ortalama Rüzgâr Hızı Dağılımı Haritası – 100 metre (REPA 2023)

TEİAŞ 2022 raporlarına göre Türkiye’deki yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu gücü yıldan yıla arttığı gözlemlenmiştir (TEİAŞ, Aralık 2022 Kurulu Güç Raporu, 2022). Dünyada ve Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının gün geçtikçe hayatımızdaki yeri giderek artmaktadır. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli kullanılabilmesi için teknolojik gelişmeler ve yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bir tanesi birbirini tamamlayıcı etkisi bulunan farklı enerji kaynaklarının bir arada kullanıldığı hibrit enerji sistemleridir. Örneğin; Güneş enerji santrali

ile rüzgâr enerji santralının bir arada kullanılmasıdır. Güneş ışınlarının en kuvvetli ve parlak olduğu yaz aylarında rüzgâr hızı düşüktür, daha az güneş enerjisinin bulunduğu kış aylarında ise rüzgâr hızı yüksektir. Rüzgâr ve güneş enerjisi sistemlerinde verimli enerji üretimi, günün ve yılın değişik zaman aralıklarında farklılık göstermektedir. Rüzgâr hızının yetersiz veya verimsiz olduğu günlerde alternatif olarak güneş enerjisinden yararlanılabilmektedir. Böylece sistemde enerji üretiminin devamlılığı ve verimliliği sağlanmış olunur (Atik ve Sekin, 2022).

2. Literatür Araştırması

Literatürde Homer programı kullanılarak hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin analizine yönelik pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları; Bursa'nın Gemlik ilçesinin elektrik yük ihtiyacını karşılayacak hibrit yenilenebilir enerji sistemi tasarımı HOMER yazılımı kullanılarak yapılmıştır (Öztürk ve ark., 2019). Mamur ve arkadaşları, kamu binası olan Kozlu Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi'nin (Kozlu EML) 23 kW güneş panelli ve 36 kW rüzgâr türbininden oluşan hibrit enerji santrali tasarlamışlardır. Bu çalışma sonunda Kozlu EML'nin enerji ihtiyacını karşılayabilecek hibrit sistem tasarlayarak 7,8 yılda amortisman süresi hesaplanmıştır (Mamur ve ark., 2019). Kılıç ve Adalı, Bursa ili Nilüfer ilçesinde yer alan bir süpermarketin 2020 yılı elektrik tüketim değerleri baz alınarak HOMER Pro programı kullanılarak rüzgâr-güneş-şebeke hibrit enerji sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir (Kılıç ve Adalı, 2022). Yılmaz ve Dinçer, Kilis'te bulunan bir yazlık evin elektrik ihtiyacını karşılamak için fotovoltaik panel, dizel jeneratör ve bataryadan oluşan en optimum hibrit enerji sistemini dizayn etmişlerdir (Yılmaz ve Dinçer, 2017). Padrón ve arkadaşlarının çalışmasında Kanarya Adaları'nda bulunan otonom tuz arıtma sisteminin güç ihtiyacını yenilenebilir enerji sistemlerinden karşılanmasını hedeflemişlerdir. Yapılan bu çalışmada oluşturulan hibrit enerji sistem modellerini HOMER programı aracılığıyla teknik ve ekonomik açıdan incelemişlerdir. (Padrón ve ark., 2019). Tabak, çalışmasında Konya ilindeki fabrikanın elektrik ihtiyacını karşılamak için on-grid hibrit sistem kurmuştur. Bu sistemi HOMER programı üzerinde kurarak güneş enerji santrali, akü ve dizel jeneratörden yararlanmıştır (Tabak, 2021). Türkdoğan ve arkadaşları, Yalova'da bulunan bir çiftlik evinin elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla HOMER programı üzerinde hibrit enerji sistemi kurmuştur (Türkdoğan ve ark., 2018). Bu çalışmalara ek olarak literatür de son yıllarda yapılan benzer çalışmalar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Literatür Araştırması

Referans	Yıl	Tasarım Bölgesi	Bileşenler	Şebeke Bağlantılı/ Şebeke Bağlantısız	Tasarım Kriteri
Kalamaras ve ark.	2019	Yunan Adaları, Yunanistan	FV-Rüzgâr Türbini- Elektrolizer-Batarya-Hidrojen Tankı-Yakıt Pili	Şebeke Bağlantısız	Ekonomik
Baran ve ark.	2019	-	FV- PHEs-Atıktan Enerji Santrali-Rüzgâr Türbini	Şebeke Bağlantılı	Teknik
Kılıç ve Kayıkçı	2019	Aydın, Türkiye	FV-Rüzgâr Türbini	Şebeke Bağlantılı	Ekonomik ve Çevre
Çetin ve Avcı	2019	-	Buhar Türbini- Yoğunlaştırılmış Güneş Sistemi	Şebeke Bağlantılı	Teknik, Ekonomik ve Çevresel
Kayıkçı	2020	Aydın, Türkiye	FV-Rüzgâr Türbini	Şebeke Bağlantılı	Ekonomik ve Çevre
Bhattacharjee ve Nandi	2020	Odisha, Hindistan	FV-Rüzgâr Türbini - Biyokütle Santrali	Şebeke Bağlantılı	Teknik, Ekonomik ve Çevresel
Sawle ve Thirunavukkarasu	2020	Tamil Nadu, Hindistan	FV-Dizel-Jeneratör-Batarya	Şebeke Bağlantısız	Teknik ve Ekonomik
Güven ve Poyraz	2021	Muğla, Türkiye	FV-Rüzgâr türbini- Batarya	Şebeke Bağlantısız	Ekonomik
Kırbaş ve Kocakulak	2021	Burdur, Türkiye	FV- Rüzgâr Türbini	Şebeke Bağlantılı	Ekonomik
Güven ve Mete	2021	Balıkesir, Türkiye	FV-Rüzgâr Türbini-Batarya- Biyogaz Jeneratörü	Şebeke Bağlantılı	Teknik ve Ekonomik
Kılıç	2022	İzmir, Türkiye	FV-Rüzgâr Türbini	Şebeke Bağlantısız	Ekonomik
Yalılı Kılıç, M. ve ark	2022	Bursa, Türkiye	FV Sistem-Batarya	Şebeke Bağlantılı ve Şebeke Bağlantısız	Teknik ve Ekonomik
Güçyetmez	2023	Kırşehir, Türkiye	Düşey Rüzgâr Türbini- FV- İnvertör-Batarya	Mikro-Akıllı Şebeke	Teknik ve Ekonomik

Bu çalışmada, İzmir ilinde varsayılan endüstriyel bölgenin elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla farklı enerji kaynaklarının bir arada kullanıldığı hibrit enerji santrali modelleri tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemler HOMER yazılımı kullanılarak farklı senaryolar için optimize edilmiştir. İncelenen senaryolarda birim elektrik maliyeti, yıllık karbon salımı (kg/yıl) ve kurulan santralin amortisman süresi gibi değerlerle karşılaştırma yapılmıştır. Karşılaştırma sonucunda en optimize ve en verimli senaryo modeli belirlenmiştir. Senaryolarda oluşturulan hibrit enerji sistemleri on-grid model olup, çalışma boyunca 5 adet senaryo incelenecektir.

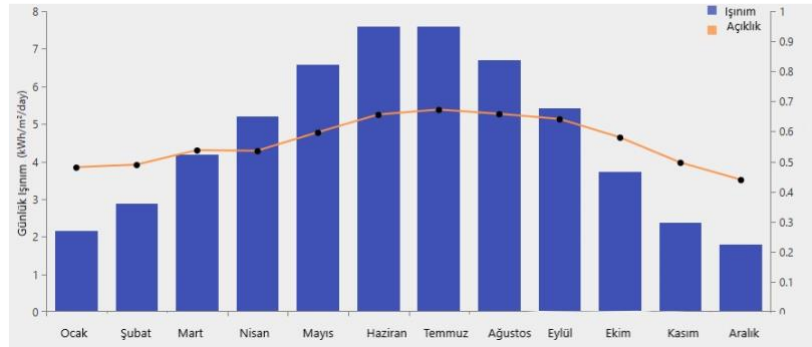
3. Materyal ve Metot

Tasarımı yapılan hibrit enerji sisteminin analizi farklı senaryolar için HOMER yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda baz alınan kriterlere göre en uygun sistem modeli belirlenmiştir. HOMER, NREL (National Renewable Energy Laboratory) tarafından geliştirilmiş olup, gerçek dağıtılmış üretim sistemlerinin karşılaştırmalı ekonomik analizini yaparak hibrit sistemleri birim elektrik maliyeti, yıllık karbon salımı (kg/yıl) ve kurulan santralin amortisman süresi gibi değerlere göre sıralamayı sağlayan simülasyon programıdır (URL-5,2023). Hibrit sistemlerin tasarlanmasında fizibilite analizlerinin en iyi şekilde gerçekleştirilmesi büyük önem

taşımaktadır. HOMER yazılımı teknik, ekonomik ve çevresel açıdan yaptığı değerlendirmelerle en uygun şekilde bütünleşmiş olan sistemi, simülasyon sonucu olarak göstermektedir (Özkoca, 2019).

3.1. Bölgenin Konumu ve Meteorolojik Veriler

Bu çalışmanın yapılacağı konum olarak Türkiye'nin İzmir ili seçilmiştir. İzmir ili ($38^{\circ} 25' 60''N$, $27^{\circ} 9' 0'' E$) 12.012 km^2 yüz ölçümüne sahip olup Ege Bölgesinde bulunmaktadır (URL-6, 2023). Bölgenin aylık ortalama güneş ışınım grafiği Şekil 3'te verilmiştir. İncelenen çalışmalara göre ekonomik güneş enerji santrali yatırımı için bölgenin yıllık ortalama global radyasyon değerinin $1.500 \text{ kWh/m}^2/\text{yıl}$ değerinin üzerinde olması gerekmektedir (Öztürk ve ark., 2019). İzmir ili Aylık Ortalama Işınım Miktarları Tablo 2'de verilmiştir. NASA veri tabanından alınan meteorolojik verilere bakıldığında İzmir ilinin günlük ortalama güneş radyasyonu $4,68 \text{ kWh/m}^2/\text{gün}$ ve yıllık ortalama global radyasyon değerinin $1.708,2 \text{ kWh/m}^2/\text{yıl}$ olduğu görülmektedir. Bölgenin yıllık ortalama global radyasyon değerine bakıldığında güneş enerji santrali kurulumuna uygun olduğu gözlemlenmiştir.



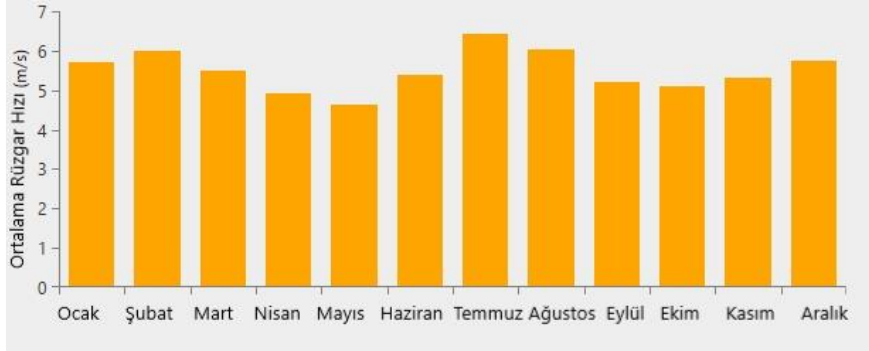
Şekil 3. İzmir İli Aylık Ortalama Güneş Radyasyonu Grafiği

Tablo 2. Aylık Ortalama Işınım Miktarları

Ay	Netlik Endeksi	Günlük Işınım (kWh/m²/Gün)
Ocak	0,479	2,16
Şubat	0,488	2,87
Mart	0,536	4,19
Nisan	0,534	5,20
Mayıs	0,595	6,58
Haziran	0,655	7,58
Temmuz	0,671	7,58
Ağustos	0,657	6,70
Eylül	0,64	5,41
Ekim	0,579	3,73
Kasım	0,495	2,38
Aralık	0,438	1,79

İzmir ilinin aylık ortalama rüzgâr hız grafiği Şekil 4'te verilmiştir. Rüzgâr türbinlerinin çoğu devreye alınabilmesi için yaklaşık rüzgâr hızının $3-4 \text{ m/s}$ olması gerekmektedir (Al-Ameri, A. ve ark.,

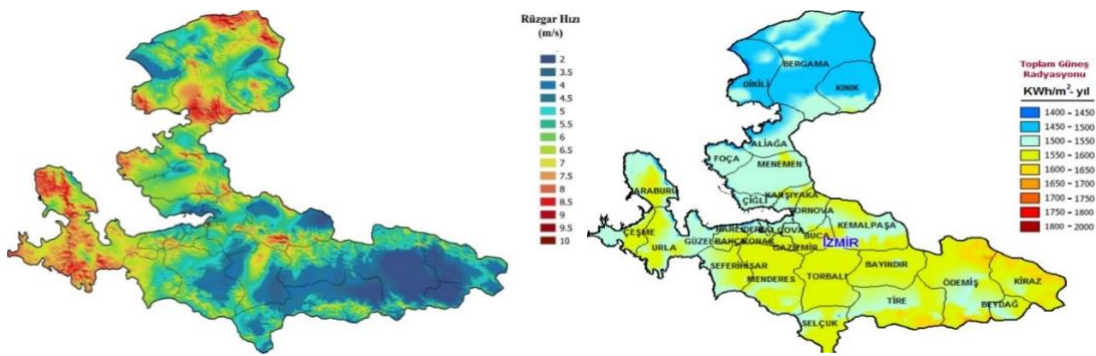
2017). Tablo 3'te İzmir ili aylık ortalama rüzgâr hızı değerleri verilmiştir. NASA veri tabanından alınan meteorolojik verilere bakıldığında yıllık ortalama rüzgâr hızının 5,50 m/s olduğu görülmektedir. İncelemeler sonucunda, İzmir ilinin rüzgâr enerji santrali kurulumuna uygun olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5'te İzmir ilinin rüzgâr ve güneş enerjisi potansiyeli atlası verilmiştir.



Şekil 4.İzmir İli Aylık Ortalama Rüzgâr Hızı Grafiği

Tablo 3. Aylık Ortalama Rüzgâr Hızı

Aylar	Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s)
Ocak	5,7
Şubat	6
Mart	5,5
Nisan	4,91
Mayıs	4,63
Haziran	5,38
Temmuz	6,43
Ağustos	6,04
Eylül	5,22
Ekim	5,11
Kasım	5,32
Aralık	5,74



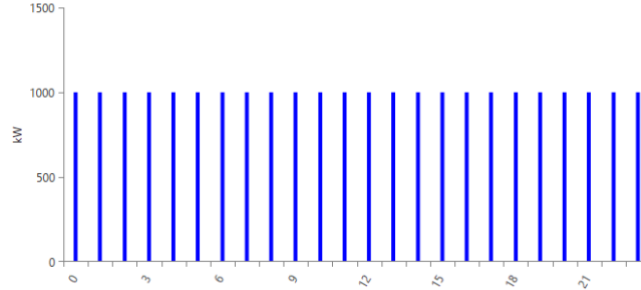
a) İzmir İli Rüzgâr Enerji Potansiyeli Atlası

b) İzmir İli Güneş Enerji Potansiyeli Atlası

Şekil 5. İzmir İlinin Rüzgâr ve Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası

3.2. Yük Profili

Yapılan çalışmada İzmir ilinde belirlenen endüstriyel bölgenin elektrik ihtiyacının karşılanması hedeflenmiştir. Bu nedenle endüstriyel bölgelerin güç talepleri ve çalışma saatleri göz önüne alınarak kesintisiz bir elektriğe ihtiyaç duyulmaktadır. Belirlenen endüstriyel bölgenin günlük yük profili Şekil 6’da belirtilmiştir. HOMER yazılımı, endüstriyel bölgenin enerji talebini 24.000 kWh/gün ve pik gücünü 1.833,2 kW olacak şekilde yük profilini modellemiştir.



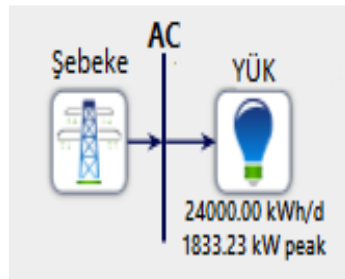
Şekil 6. Bölgenin Günlük ve Aylık Endüstriyel Yük Profili

3.3. Hibrit Sistem Bileşenleri

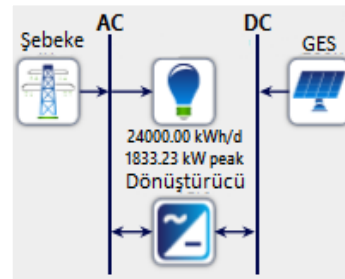
Çalışmada şebeke bağlantılı beş farklı enerji sistemi modeli incelenmiştir. Şekil 7’de, modellenmesi yapılan enerji sistemlerinin şematik diyagramları verilmiştir. Senaryolarda kullanılan sistem bileşenlerin birim maliyetleri Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Bileşenlerin Birim Maliyetleri

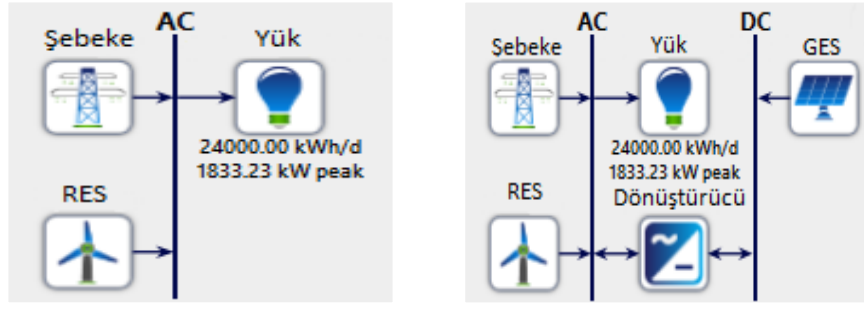
Bileşenler	Kurulum Maliyeti (\$)	Yenileme Maliyeti (\$)	İşletme ve Bakım Maliyeti (\$/yıl)
Rüzgâr Türbini (1.5 MW)	\$3.000.000	\$3.000.000	\$30.000
Güneş Paneli (1 kW)	\$640	\$640	-
Batarya (MWh)	\$500.000	\$500.000	\$5.000
Dönüştürücü (1 kW)	\$300	\$300	-



a) Senaryo 1

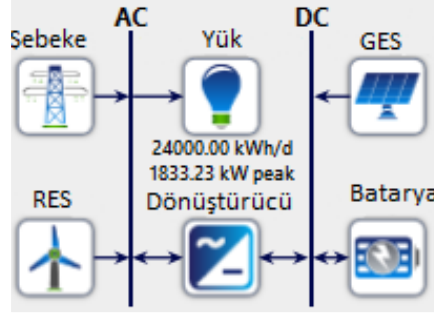


b) Senaryo 2



c) Senaryo 3

d) Senaryo 4



e) Senaryo 5

Şekil 7. Sistem Modellemeleri

3.3.1. Rüzgâr Türbini

İzmir ilinin rüzgâr hızı atlasına bakıldığında ortalama rüzgâr hızının yüksek olduğu Şekil 5a'dan görülmektedir. Endüstriyel bölgedeki elektrik tüketiminin yüksek olmasından dolayı ihtiyacı karşılayabilecek rüzgâr türbininin kapasitesi 1.5 MW ve yüksekliği 80 m olarak seçilmiştir. Seçilen türbinin rüzgâr hızı-güç çıkışı değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5.Rüzgâr Hızı-Çıkış Gücü Tablosu

Rüzgâr Hızı (m/s)	Güç çıkışı (kW)
0	0
4	0
4	80
5	150
6	250
7	400
8	600
9	850
10	1150
11	1350
12	1450
13	1490
14	1500
16	1500
20	1500
25	1500
>25	0

3.3.2. Güneş Paneli

İzmir ilinde kurulacak güneş enerji santralinde Peimar SG20M5 marka, 200W gücündeki güneş paneli seçilmiştir. Bu panel 5,41A Impv ve 37 V Vmpv değerine sahip %15,7 verimliliğinde monokristal bir güneş panelidir.

3.3.3. Batarya

Bu çalışmada 1 Mwh enerji depolama kapasitesine sahip, nominal voltajı 600 V olan Li-İon batarya kullanılmıştır. Gidiş-Dönüş verimliliği %90 olarak HOMER yazılımı belirlemiştir. HOMER yazılımı bataryanın ömrünü ortalama 15 yıl olarak belirlemiştir.

3.3.4. Dönüştürücü

Bu çalışmada dönüştürücü, güneş enerji santralının ürettiği DC gücü AC güce çevirerek yükün beslenmesini sağlamak veya rüzgâr enerji santralının ürettiği AC gücü DC güce çevirerek bataryanın şarj olmasını sağlamaktır. Senaryolarda kullanılan dönüştürücülerin %95 verimlilikte ve %100 bağlı kapasitede, 15 yıl çalışma süresinin olduğu HOMER’da belirtilmiştir.

4. Bulgular ve Metot

4.1. Senaryo 1

Bu senaryoda elektrik tüketiminin sadece şebekeden karşılanması ve çalışma sonucunun diğer senaryolarla karşılaştırılması hedeflenmiştir. Senaryo 1 diyagramı Şekil 7a’da verilmiştir. 2022 verilerine göre şebekeden elektrik alış fiyatı kWh başına 0,116 \$ ve şebekeye elektrik satış fiyatı kWh başına 0,019 \$ olarak belirlenmiştir (TÜİK Kurumsal, 2022). HOMER programına bilgileri girilen şebeke elektrik fiyatları sonucunda simülasyon yürütülmüş olup endüstriyel yükün yıllık elektrik tüketim miktarı Tablo 6’da verilmiştir. Simülasyon sonucunda yıllık elektrik tüketim maliyeti, birim kW başına elektrik maliyeti, net şimdiki maliyet Tablo 7’de verilmiştir.

4.2. Senaryo 2

Şekil 7b’de şeması verilen senaryoda güneş enerji santrali ve şebekenin bulunduğu sistem tasarlanmıştır. Bölüm 3.3’te verilen 200 W gücünde Peimar SG200M5 modelindeki güneş paneli ve

dönüştürücü bilgileri HOMER programına girilerek sistemin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonucunda senaryo 2'ye ait güneş enerji santrali ve dönüştürücünün kurulu gücü Tablo 6'da verilmektedir. Elektrik tüketiminin %41,9 'u güneş enerji santralinden, %58,1 'i şebekeden karşılanmaktadır. Tablo 6'da güneş enerji santralinin yıllık üretimi ve şebekeden çekilen miktar gösterilmiştir.

4.3. Senaryo 3

Şekil 7c'de şeması verilen rüzgâr enerji santrali ve şebekenin bulunduğu model tasarımı yapılmıştır. Bölüm 5'te türbin özelliği ve maliyeti verilmiş olan HOMER programının kütüphanesinde bulunan Generic 1.5 MW gücündeki model kullanılmıştır. Senaryo 3'te kullanılan rüzgâr enerji santralinin kurulu gücü Tablo 6'da verilmiştir. Elektrik tüketiminin %50,1'i rüzgâr enerji santralinden, %49,9'u şebekeden karşılanmaktadır. Tablo 6'da rüzgâr enerji santralinin yıllık elektrik üretim miktarı, şebekeye satılan yıllık elektrik miktarı ve şebekeden alınan elektrik miktarı verilmiştir.

4.4. Senaryo 4

Senaryo 4'te güneş ve rüzgâr enerji santrallerinin birlikte kullanıldığı hibrit enerji sistemi incelenmiştir. Sistem modellemesi Şekil 7d'de verilmiştir. Bölüm 3.3'te bilgileri verilen güneş paneli, rüzgâr türbini ve dönüştürücü kullanılarak sistemin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonucunda kullanılan hibrit enerji santralinde elektrik üretiminin %21,6'sı güneş enerji santralinden, %43,9'u rüzgâr enerji santralinden ve %34,5'i şebekeden karşılanmıştır. Tablo 6'da hibrit santralin yıllık elektrik üretimi ve bileşenlerin kurulu güçleri verilmiştir.

4.5. Senaryo 5

Senaryo 5'in sistem diyagramı Şekil 7e'de görüldüğü üzere güneş enerji santrali, rüzgâr enerji santrali ve enerji depolama birimlerinden oluşmaktadır. Yapılan çalışmada sistem bileşenlerinin yıllık üretimleri ve kurulu güçleri Tablo 6'da verilmiştir. Bu sistemde yük takibi uygulanmıştır. Yük takibinin amacı önce yükü besleyip daha sonra batarya sisteminde enerji depo etmektir. Benzetim sonucunda hibrit enerji santralinde üretilen elektriğin %42,5'i güneş enerji santralinden, %43,9'u rüzgâr enerji santralinden, %13,6'sı şebekeden karşılanmaktadır.

Tablo 6. Senaryo Verileri

Senaryo	Güneş Enerji Santrali (kW)	Rüzgâr Enerji Santrali (kW)	Batarya Depolama Sistemi (Adet)	Dönüştürücü (kW)	Şebeke Kullanımı (%)	Şebekeden Alınan Elektrik Miktarı (kWh/Yıl)	Şebekeye Satılan Elektrik Miktarı (kWh/yıl)	Yıllık Elektrik Üretimi (kWh/yıl)
Senaryo 1	-	-	-	-	100	8.760.000	-	-
Senaryo 2	2.746	-	-	1.361	58,1	5.904.330	615.335	4.255.949
Senaryo 3	-	1.500	-	-	49,9	4.800.324	853.920	4.813.595
Senaryo 4	1.529	1.500	-	892	25,5	3.776.919	1.911.959	7.183.901
Senaryo 5	3.004	1.500	2	1.010	13,6	1.491.058	1.259.553	9.470.347

5. Ekonomik ve Çevresel Analiz

5.1. Ekonomik Analiz

Bu bölümde benzetim çalışmaları yapılan senaryoların ekonomik analizleri incelenmiştir. Yapılan çalışmada senaryolar birim elektrik maliyeti, net şimdiki maliyeti, başlangıç maliyeti ve işletme maliyetine göre karşılaştırılmış elde edilen sonuçlar Tablo 7’de verilmiştir. Karşılaştırma sonucunda senaryo 1’de birim elektrik maliyetinin 0,116 \$ ile en fazla olduğu görülmektedir.

Tablo 7. Senaryoların Ekonomik Analizi

Senaryo	Net Şimdiki Maliyeti (\$)	Birim Elektrik Maliyeti (\$/kWh)	İşletme Maliyeti (\$/yıl)	Başlangıç Maliyeti (\$)	Amortisman Süresi (Yıl)
Senaryo 5	\$9,46M	\$0,0730	\$250.101	\$6,23M	7,53
Senaryo 4	\$10,3M	\$0,0747	\$468.193	\$4,25M	7,27
Senaryo 3	\$10,8M	\$0,0868	\$602.902	\$3,00M	6,73
Senaryo 2	\$10,9M	\$0,0903	\$678.662	\$2,17M	6,31
Senaryo 1	-	\$0,116	\$1,02M	-	-

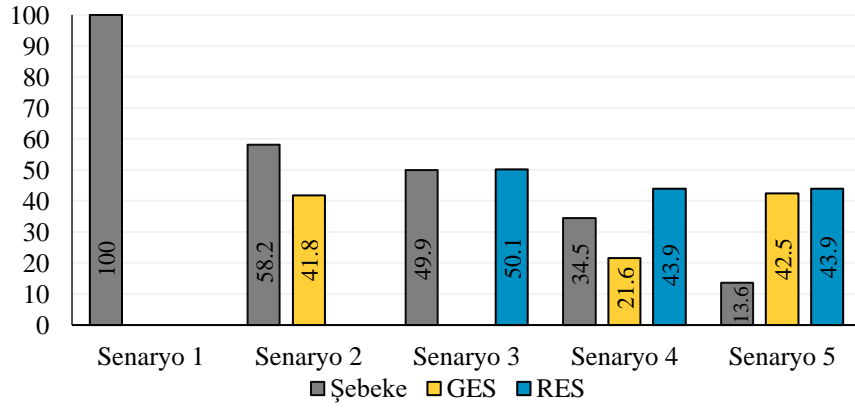
Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmaya başlandığı senaryo 2 ve senaryo 3 çalışmalarında birim elektrik maliyeti sırasıyla 0,0903 \$ ve 0,0868 \$ olarak hesaplanmıştır. Tablo 7’de verilen ekonomik verilere bakıldığında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasıyla birim elektrik maliyetinin düştüğü görülmüştür. Yenilenebilir enerji kaynaklarının bir arada kullanıldığı hibrit enerji sistemlerinin (senaryo 4 ve senaryo 5) birim elektrik maliyeti sırasıyla 0,0747 \$ ve 0,0730 \$ olduğu Tablo 7’de görülmektedir. Senaryo 4 ve senaryo 5’teki birim elektrik başına maliyet farkının sebebi senaryo 5’teki batarya sisteminden kaynaklanmaktadır. Ayrıca senaryolar amortisman süreleri bakımından karşılaştırıldığında en kısa olan senaryo 2 olduğu anlaşılmaktadır.

5.2. Emisyon Analizi

Senaryoların emisyon değerleri karşılaştırılmış ve elde edilen değerler Tablo 8’de verilmiştir. Referans alınan senaryo 1’in elektrik tüketiminden kaynaklanan yıllık emisyon değerlerine bakıldığında, senaryo 5’in yıllık emisyon değerlerinin en düşük olduğu görülmektedir. Depolamalı hibrit enerji sisteminin kullanılmasıyla endüstriyel yükün elektrik tüketiminden kaynaklı yıllık CO₂ salınımlarında %82’lik bir düşüş sağlanmış olacaktır. Şekil 8’de tüm senaryolarda kaynaklarına göre enerji kullanım oranları verilmiştir. Tablo 8 ve Şekil 8 incelendiğinde yenilenebilir enerji kullanım oranı arttıkça elektrik tüketiminden kaynaklanan emisyon değerlerinde azalma olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 8.Emisyon Değerleri

Senaryo	Karbondioksit (CO ₂)	Karbon Monoksit (CO)	Yanmış Hidrokarbonlar)	Partikül Madde	Kükürt Dioksit SO ₂	Nitrojen Oksit N ₂ O	Birim
Senaryo 1	5.536.320	0	0	0	24.002	1.738	Kg/yıl
Senaryo 2	3.731.536	0	0	0	16.178	7.912	Kg/yıl
Senaryo 3	3.033.805	0	0	0	13.153	6.432	Kg/yıl
Senaryo 4	2.387.013	0	0	0	10.349	5.061	Kg/yıl
Senaryo 5	942.348	0	0	0	4.085	1.998	Kg/yıl

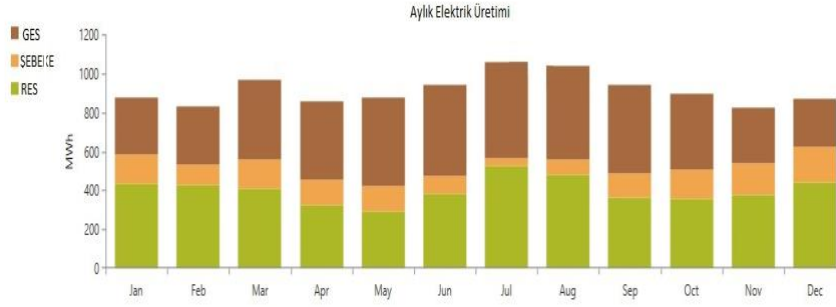


Şekil 8.Kaynaklarına Göre Enerji Kullanım Oranı

6. Sonuçlar ve Öneriler

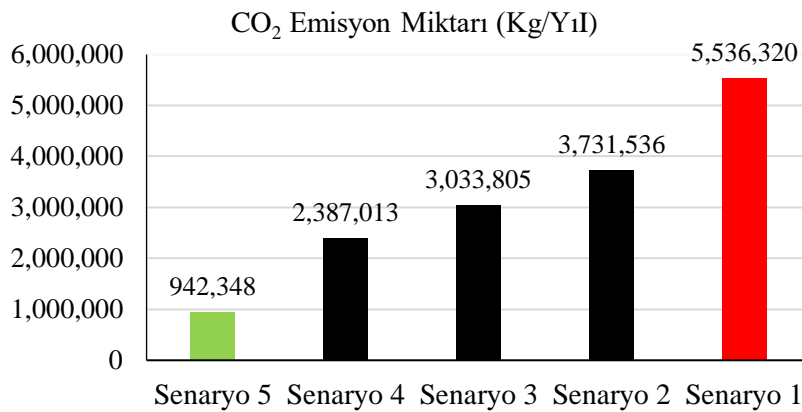
İzmir ilinde bulunan günlük 24.000 kWh elektrik tüketimine sahip endüstriyel bölgenin enerji ihtiyacını karşılamak için hibrit enerji üretim santralli tasarımı HOMER yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tasarlanan 5 farklı senaryonun ekonomik ve çevresel analizleri yapılmıştır. Yapılan benzetimler sonucunda birim elektrik maliyeti en düşük olan sistem depolamalı hibrit enerji sistem (Senaryo 5) olduğu görülmüştür. Senaryo 5’te bulunan yenilenebilir enerji

kaynaklarının ve şebekenin aylık elektrik üretimindeki payları Şekil 9'da verilmiştir.

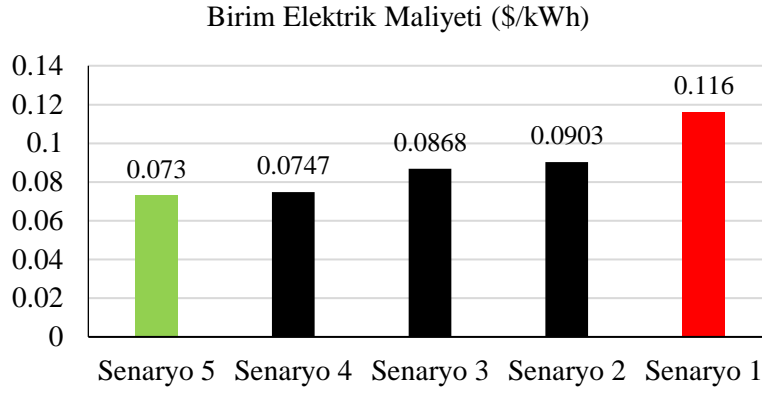


Şekil 9. Enerji Kaynaklarının Elektrik Üretimindeki Dağılımları

Şekil 9'da görüldüğü üzere rüzgâr enerji santralının yıllık elektrik üretimi 4.813.595 kWh, güneş enerji santralının yıllık elektrik üretimi 4.656.752 kWh ve şebekeden çekilen yıllık elektrik miktarı ise 1.491.058 kWh olarak bulunmuştur. Bataryada yıllık depolanan enerji miktarı 2.297.491 kWh olarak hesaplanmıştır. Depolamalı hibrit enerji sisteminin şebekeye sağlamış olduğu yıllık enerji miktarı 1.259.553 kWh'tir. Ayrıca sistemin birim elektrik maliyeti 0,0730 \$, net şimdiki maliyeti 9,46M\$ olarak hesaplanmıştır. Senaryoların birim elektrik maliyeti karşılaştırmaları Şekil 10.b'de verilmiştir. Bataryalı hibrit enerji sisteminin kurulum maliyeti 6,23 M\$, yıllık işletme maliyeti 250.101 \$ ve amortisman süresi 7,53 yıl olarak hesaplanmıştır. Yıllık CO₂ salınımına göre senaryolar karşılaştırıldığında senaryo 5'te %82'lik bir düşüş görülmektedir. Bu sayede yılda 4.593.952 kg CO₂'nin doğaya salınımı engellenmektedir. Senaryoların yıllık CO₂ emisyon miktarları karşılaştırılması Şekil 10.a'da verilmiştir.



a) CO₂ Emisyon Miktarları



b) Birim Elektrik Maliyeti

Şekil 10. Senaryoların Birim Elektrik Maliyetleri ve Emisyon Miktarları

Sonuç olarak elektrik tüketimi ve enerji potansiyeli yüksek olan bölgelere çevreye duyarlı yenilenebilir enerji kaynaklarının birlikte kullanıldığı hibrit enerji sistemlerinin kurulmasının çevresel ve ekonomik açıdan avantajlı olduğu anlaşılmaktadır.

Yazarların Katkısı

Bu çalışmada tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Al-Ameri, A., Ounissa, A., Nichita, C., & Aouzellag, D. (2017). Power Loss Analysis for Wind Power Grid Integration Based on Weibull Distribution, *Energies*, 10, 463. <https://doi.org/10.3390/en10040463>
- Atık, İ., ve Sekin, A. (2022). Hibrit yenilenebilir enerji sistem tasarımı: Balıkesir örneği, *DÜMF Mühendislik Dergisi*. <https://doi.org/10.24012/dumf.1148223>
- Baran, B., Mamis, M. S., ve Alagöz, B. B .,(2016, Aralık). Çok-Kaynaklı Yenilenebilir Enerji Mikro-şebekesinin Yönetim Simülasyonu. *ELECO 2016-Elektrik Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı* (s. 33-37). Bursa
- Bhattacharjee, S., & Nandi, C., (2021). Design of a voting based smart energy management system of the renewable energy based hybrid energy system for a small community. *Energy*, 214, 118977. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118977>

- Bilhan, A., & Emikonel, S. (2021). Nevşehir İli Güneş Enerji Potansiyelinin Analizi ve Kurulu Güneş Enerji Santralleri. *European Journal of Science and Technology*, 24, 289-294 <https://doi.org/10.31590/ejosat.900024>
- BP Statistical Review of World Energy 2022, British Petroleum, 2022.
- Çetin, B., & Avcı, H. (2019). Mevcut Kömürlü Bir Termik Santralin Güneş Destekli Hibrit Santrale Dönüşümünün Teknik ve Ekonomik Analizi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35 (2), 1027-1046. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.418417>
- Elektrik Piyasası 2022 Yılı Aralık Ayı Piyasa Gelişim Raporu, T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara 2022.
- Global Electricity Review. (2022). EMBER. <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2022/>
- Güçyetmez, M. (2023). Mikro ve Akıllı Şebekelere Geçiş Sürecinde Binaya Entegre Düşey Rüzgâr Türbini ve Güneş Hibrit Enerji Sistemi (DRTG-HES)'in İncelenmesi, *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(1). <https://doi.org/10.21597/jist.1142036>
- Güven, A. F., & Mete, M. K. (2021). Balıkesir'in Erdek İlçesi için Şebeke Bağlantılı Hibrit Enerji Sistemi Fizibilite Çalışması ve Ekonomik Analizi, *Mühendis ve Makina*, 63(706), 706. <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.1085748>
- Gyam, M. (2022). *Güneş Enerjisi Santrallerinin Türkiye ve Avrupa'daki Geri Ödeme Sürelerinin Karşılaştırması*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük. <http://acikerisim.karabuk.edu.tr:8080/xmlui/handle/123456789/2400>
- Hakyemez, C., (2022). Aylık Enerji Bülteni, *TSKB Ekonomik Araştırmalar*, 7,1-7.
- Holechek, J. L., Geli, H. M. E., Sawalhah, M. N., & Valdez, R. (2022). A Global Assessment: Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050? *Sustainability*, 14(8), <https://doi.org/10.3390/su14084792>
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Kalamaras, E., Belekoukia, M., Lin, Z., Xu, B., Wang, H., & Xuan, J. (2019). Techno-economic Assessment of a Hybrid Off-grid DC System for Combined Heat and Power Generation in Remote Islands. *Energy Procedia*, 158, 6315-6320. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.406>
- Kayıkci, B. (2020). *Aydın İli Didim İlçesindeki Kırsal Bölgede Yer Alan Bir Konutun Elektrik İhtiyacının Hibrit Güneş-Rüzgar Enerji Sistemi İle Karşılmasının Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Kılıç, M., & Adalı, S., (2022). Elektrik İhtiyacının Karşılmasında Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemi-Süpermarket Örneği, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(1). <https://doi.org/10.47495/okufbed.998900>
- Kılınç, C., (2022), Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemleri ile Sera Sulama Sistemi Tasarımı: İzmir Örneği. *Politeknik Dergisi*, 25(1). <https://doi.org/10.2339/politeknik.1085855>
- Kumaş, K., Akyüz, A. Ö., Zaman, M., & Güngör, A., (2019). Sürdürülebilir Bir Çevre İçin Karbon Ayak izi Tespiti: MAKÜ Bucak Sağlık Yüksekokulu Örneği. *El-Cezeri*, 6(1). <https://doi.org/10.31202/ecjse.459478>
- Mamur, H., Yakar, M. C., & Zerafet, A. (2019). Bir Kamu Binası İçin Hibrit Enerji Sistemi Fizibilitesi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 11(1).
- Özkoca, M. İ. (2019). *Kojenerasyon ve Güneş Enerjisinin Bütünleştirildiği Hibrit Sistemin Ekonomik Ve Emisyon Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Öztürk, Z., Tosun, S., & Öztürk, A. (2019). Örnek Bir Hibrit Yenilenebilir Enerji Sisteminin HOMER ile Modellenmesi, Ekonomik ve Teknik Yönden Analizleri, *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2(2).
- Padrón, I., Avila, D., Marichal, G. N., & Rodríguez, J. A. (2019). Assessment of Hybrid Renewable Energy Systems to supplied energy to Autonomous Desalination Systems in two islands of the Canary Archipelago, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 221-230. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.009>
- Tabak, A. (2021). Analysis and Design of a Hybrid Energy Production System to Meet the Energy Demand of a Plant in Konya, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 13(1), 220-230. <https://doi.org/10.29137/umagd.794898>
- TEİAŞ Aralık Kurulu Güç Raporları (2022). Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Web Site: <https://www.teias.gov.tr/kurulu-guc-raporlari>, (Erişim Tarihi: 2 Ocak 2023)

- Thirunavukkarasu, M., & Sawle, Y. (2020). Design, analysis and optimal sizing of standalone PV/diesel/battery hybrid energy system using HOMER. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 937(1), 012034. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/937/1/012034>
- TÜİK, “Türkiye İstatistik Kurumu”, Elektrik ve Doğal Gaz Fiyatları. Web. (https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Electricity-and-Natural-Gas-Prices-Period-I:-January-June,-2021-37459%20), (Erişim Tarihi: 12 Aralık 2022).
- Türkdoğan, S., Mercan, M. T., & Çatal, T. (2020). Şebekeden Bağımsız Hibrit Enerji Sistemleri Kullanılarak 40 Hanelik Bir Topluluğun Elektrik ve Termal Yük İhtiyacının Karşıllanması: Teknik ve Ekonomik Analizleri, *European Journal of Science and Technology*, 476-485. <https://doi.org/10.31590/ejosat.688048>
- URL-1: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2020-45862> (Erişim Tarihi 23 Kasım 2022).
- URL-2: <https://www.bbc.com/turkce/haberler-dunya-59088481> , (Erişim Tarihi 14 Nisan.2023)
- URL- 3 : <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> (Erişim Tarihi: 08.08.2023)
- URL-4:2022 <https://www.enerji.gov.tr/anasayfa>, (Erişim Tarihi 20 Aralık 2023)
- URL-5:2023 <https://www.homerenergy.com/> (Erişim tarihi: 11 Kasım 2022)
- URL-6: <https://tr.db-city.com/T%C3%BCrkiye--%C4%B0zmir--%C4%B0zmir>, (Erişim tarihi: 09 Nisan 2023).
- Yalılı Kılıç, M., Adalı, S. & Aydın, M. (2022). Elektrik İhtiyacının Sağlanmasında Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistem Tasarımı: Bursa Tekstil Fabrikası Örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 27 (3), 897-910. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1161361>
- Yılmaz, S., ve Dincer, F. (2017). Optimal design of hybrid PV-Diesel-Battery systems for isolated lands: A case study for Kilis, Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 344-352. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.037>

Investigation Mechanical Properties of Shipbuilding Steel Joined By Submerged Metal Arc Welding And Gas Metal Arc Welding Methods

Dursun Murat SEKBAN^{1*}, Resul KILIÇASLAN²

Abstract

Merchant ships are generally built by joining steels with various welding methods. When the welding methods used in shipyards are examined, it is seen that gas metal arc welding (GMAW), submerged arc welding (SAW), covered electrode arc welding and tungsten inert gas (TIG) welding come to the fore. In the assembly of ship hull sheets, GMAW and SAW are generally preferred. In this sense, it is extremely important to characterize the mechanical properties of the weld zone after welding of the shipbuilding steel joined by these two welding methods. When the studies examined, although there are few studies on the joining with GMAW and SAW of shipbuilding steels, no study has been found on the comparative examination of these two welding methods. In this context, within the scope of the study, 3701 shipbuilding steel, which is used extensively in shipbuilding, was joined with SAW and GMAW methods and the hardness, tensile, impact and bending properties of the welding zone were examined comparatively. In consequence of the tests, it was determined that higher mechanical properties were obtained than the base metal in both welding methods. Also, it was found that the welding zone of the shipbuilding steel joint by the SAW method had relatively better mechanical qualities.

Keywords: Shipbuilding, gas metal arc welding, submerged arc welding, mechanical properties.

Tozaltı Ve Gazaltı Kaynak Yöntemleri İle Birleştirilen Gemi İnşa Çeliğinin Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Öz

Ticari gemiler genellikle çeliklerin çeşitli kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi ile üretilmektedir. Tersanelerde kullanılan kaynak yöntemleri incelendiğinde gazaltı kaynağı, tozaltı kaynağı, örtülü elektrod ark kaynağı ve tungsten inert gaz kaynağının öne çıktığı görülmektedir. Gemi gövde saclarının bir araya getirilmesinde ise genellikle gazaltı kaynağı ve tozaltı kaynakları tercih edilmektedir. Bu anlamda bu iki kaynak yöntemi ile birleştirilen gemi inşa çeliğinin kaynak sonrasında kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin karakterize edilmesi son derece önemlidir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde gazaltı ve tozaltı kaynağı ile gemi inşa çeliklerinin birleştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmış olsa da bu iki kaynağın karşılaştırmalı olarak incelenmesi üzerine bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu yüzden bu çalışmada gemi inşaatında geniş bir kullanım bulan 3701 gemi inşa çeliği tozaltı ve gazaltı yöntemi ile birleştirilmiş ve kaynak bölgesinin sertlik, çekme, darbe ve eğme gibi mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda her iki kaynak yönteminde de ana yapıdan daha yüksek mekanik özellikler elde edildiği saptanmıştır. Öte yandan tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen gemi inşa çeliğinin kaynak bölgesinde gazaltı ile birleştirilen göre nispeten daha yüksek mekanik özellikler elde edildiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gemi inşaatı, gazaltı kaynağı, tozaltı kaynağı, mekanik özellikler.

¹Department of Marine Engineering Operations, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey, msekban@ktu.edu.tr

²Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey, resulkilicaslan@gmail.com

¹<https://orcid.org/0000-0002-7493-1081>

²<https://orcid.org/0009-0002-1408-3882>

1. Introduction

Marine vessels are generally built from composite materials, wood materials, aluminum or steel. When we look at the merchant ships in particular, it is seen that steels come to the fore due to their advantages both in strength and in the construction process (Sekban, 2021). Steels used in shipbuilding are divided into low-medium strength and high strength depending on the alloying elements they contain and the differences in production processes. Although high-strength steels provide significant advantages in terms of strength, they are relatively less preferred due to both welding difficulties and high costs. Also, low-medium strength steels are used extensively in ships due to their high weldability, easy availability and low cost. During the construction process, these steels are combined with various welding methods to form ships.

When the various welding techniques employed in shipbuilding are reviewed, it becomes clear that gas metal arc welding (GMAW), submerged arc welding (SAW), tungsten inert gas welding (TIG) and covered electrode arc welding stand out (Pamnani, Vasudevan, Jayakumar, & Vasantharaja, 2017; Pan et al., 2013; Turan, Koçal, & Ünlügençoğlu, 2011; Wu et al., 2023). While covered electrode arc welding is mostly used in narrow parts and repair processes where it is difficult for the GMAW torch to enter, TIG is generally preferred for welding stainless steels and aluminum alloys. In the panel lines, GMAW and SAW methods are generally used for the joining of the ship's outer cladding sheets. GMAW has important advantages such as having portable welding equipment, availability of many welding wires compatible with welding and low equipment cost. SAW, on the other hand, is advantageous in terms of being applied to thick steels thanks to the high heat input generated during welding and welding at higher welding speeds. Thanks to these advantages, these two welding methods have become the two most used welding methods in shipbuilding.

In ships made of steel, plates of various sizes and forms are welded together. Since it is known that significant hydrodynamic and hydrostatic loads affect ships during navigation, the mechanical properties of the welding zones should be at levels to withstand these loads in order to avoid problems during navigation. In this context, the quality of the welding area is extremely important after the welding methods used in ship construction, and many visual and mechanical tests are applied in the welding area before sailing. In addition, academic studies are carried out to determine and improve the mechanical properties of the welding area after joining the steels used in ship construction with various welding methods and welding parameters. The number of research on the joining of steels used in ship building with SAW or GMAW processes has been found to be quite little when the studies are analyzed (Donizete Borba, Duarte Flores, de Oliveira Turani, & Cardoso Junior, 2017; Gook, Midik, Biegler, Gumenyuk, & Rethmeier, 2022; Jokinen, Vihervä, Riikonen, & Kujanpää, 2000; Kim, Lee, & Choo, 2003; Sirisatien, Mahabunphachai, & Sojiphan, 2018; Wang et al., 2023;

Yuan et al., 2022; Zhang, Coetsee, Dong, & Wang, 2020a, 2020b; Zhong et al., 2023; Zhong, Li, Basu, Wang, & Wang, 2022). On the other hand, as a result of the combination of 3701 coded low-medium strength shipbuilding steel, which is used extensively in shipbuilding, with these two welding methods, it has been determined that no study has been carried out on the examination of the mechanical properties of the welding zone. In this work, shipbuilding steel was joined using SAW and GMAW techniques, and the mechanical properties of the welding zone were investigated. As a result of the examinations, it was determined that the hardness, tensile strength, impact strength and bending strength values increased after both welding methods. On the other hand, it has been determined that the mechanical values of the welding zone after SAW show better values than the welding made with GMAW.

2. Materials and Methods

In the investigation, SAW and GMAW techniques were used to join 3701 low-medium strength shipbuilding steel from Erdemir. The chemical content of the steel used in the experiment is shown in Table 1.

Table 1. Chemical content of the steel.

C	Mn	P	S	Si	Cu	Cr	V	Mo	Fe
0,16	0,7	0,01	0,008	0,18	0,03	0,05	0,05	0,13	Balance

1.2 mm diameter welding wire with basic character is used in GMAW. Also in the GMAW, the welds were carried out with a current of 220 A and a voltage of 30 V. While CO₂ was used as the shielding gas, 12 lt/min was chosen as the gas flow rate in the GMAW.

In SAW, while solid character welding wire is used, basic character ESAB welding powder is used as protective powder. While the current value used in SAW was chosen as 500 A, the voltage value was selected as 33 V.

After the welded joints, hardness, tensile, impact and bending tests were carried out on the samples removed from the weld zone as shown in Figure 1. Before the mechanical tests, certain procedures were followed in order to reduce the microcracks that may remain in the samples after cutting and affect the mechanical properties. After cutting with EDM, the samples were first sanded from coarse to fine. After sanding, the samples were polished with Al₂O₃ solution and after the absence of capillary scratches in stereo microscopes, mechanical tests were applied. Hardness measurements were made in Duramin brand hardness device using Vickers hardness measurement

method. In this method, a pyramid-shaped tip with a square base is immersed under a certain load on the piece of material whose hardness will be measured, and the hardness value is determined by measuring the diagonal lengths of the trace formed after the load is removed. Measurements were made at least 3 times and the measurement averages are given in the tables. In the tensile test using a deformation rate of $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, samples were taken at least 3 times and average values were determined. Impact experiments were carried out using the Charpy notch method according to DIN 50115 standard on an Instron brand impact device with a capacity of 50 J. The tests were performed at room temperature and at least 3 repetitions for each condition, and the average values were reflected in the table. To find out how formable the samples were after welding, three point bending tests were conducted according to ASTM D790. The tests were conducted with the jaw moving at a pace of 1 mm per minute, at least three times for each condition. After the experiments, the bending force and deflection values for each condition were determined and reflected in the table.

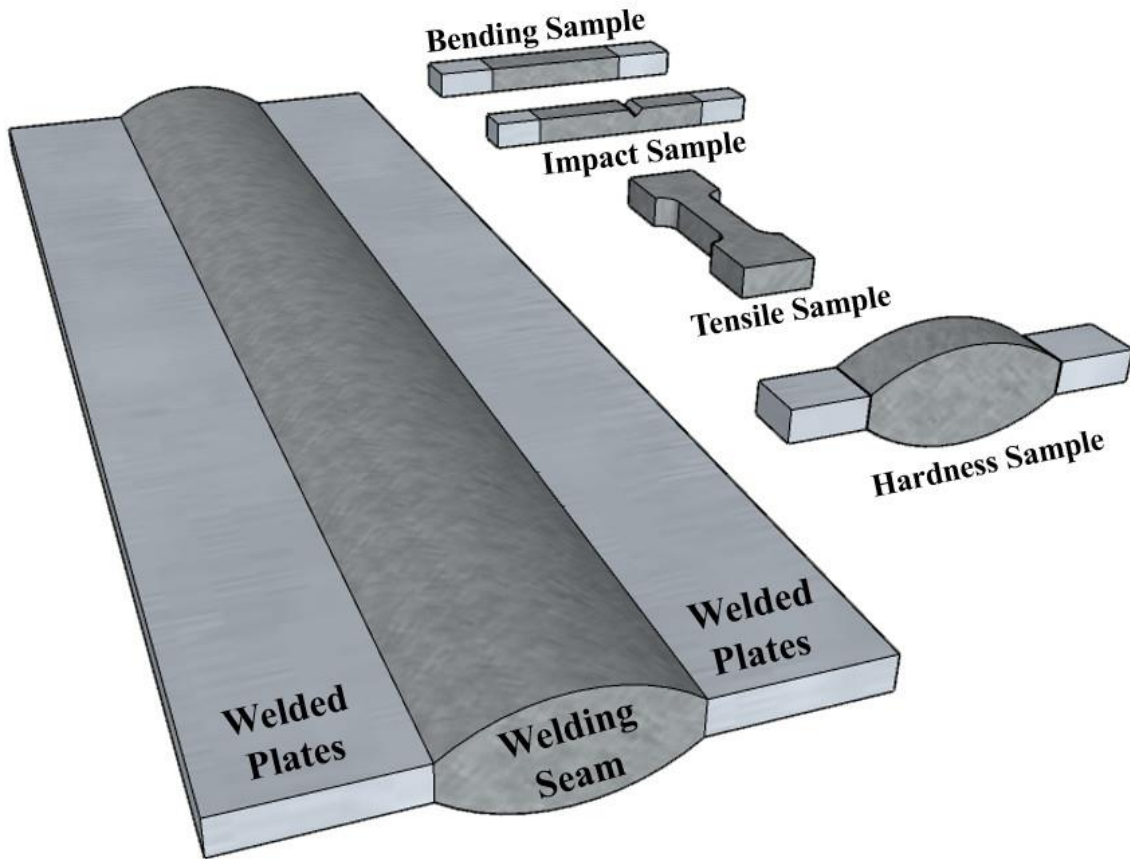


Figure 1. Schematic illustrations of test samples removed from welded plates.

3. Findings and Discussion

3.1. Hardness

The hardness values obtained from the base material, the welding zone of the steel joined by GMAW and the welding zone of the steel joined by SAW are given in Table 2. The table shows that following both GMAW and SAW, the hardness value in the weld zone increase in comparison to the base material. This situation is caused by changes in the microstructure depending on the temperature increase and cooling rate during welding. In addition, the hardness of the additional wires used in these welding methods is higher than the base material, causing an increase in the hardness in the weld area. Also, when GMAW and SAW were compared, it was determined that the hardness

value reached after SAW was higher. This is caused by the relatively lower cooling rates after SAW and the harder wire used in SAW.

Table 2. Hardness values of base material, GMAWed and SAWed samples.

Condition	Hardness (Hv)
Base material	138 ± 5
Gas metal arc welded	205 ± 7
Submerged arc welded	220 ± 9

3.2. Strength

The increase in the strength of the welded area means that the welded structure will withstand higher hydrostatic and hydrodynamic loads during the ship's navigation. On the other hand, the increase in strength in the welding area also means the need for higher forces to shape the plates after welding. In this context, it is possible to say that the strength increase of the weld zone has advantages and disadvantages. Figure 2 illustrates the strength and elongation curves for the base material, the weld zone of the steel joined by GMAW, and the weld zone of the steel joined by SAW. Also, Table 3 presents the data from these curves. As can be seen from the table, it is seen that the strength of the weld area is stronger than the base material after both welding methods, due to the post-weld microstructural changes and the use of welding wires with higher strength than the base material. Also, the highest strength values were reached after submerged arc welding due to the cooling rate decreased after submerged arc welding and the higher strength of the additional wire used in submerged arc welding. It is known that grain size decreases in the weld zone as a result of such

welding methods (Hajian et al., 2015; Sekban, Aktarer, & Purcek, 2019). As a result, and as was predicted, the elongation values of the welded regions reduced following both welds.

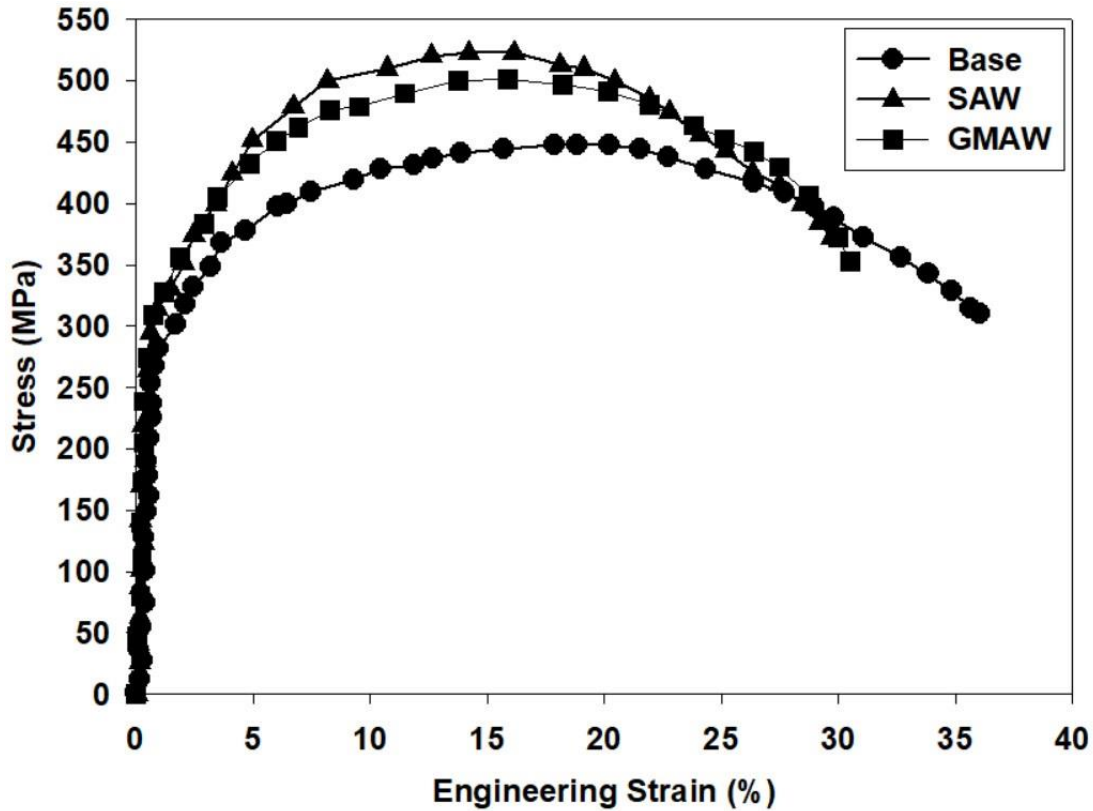


Figure 2. Stress–strain curves of base material, GMAWed and SAWed samples.

Table 3. Strength and elongation values of base material, GMAWed and SAWed samples.

Condition	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
Base material	242±8	427±10	37
GMAW	356±11	493±11	31
SAW	371±10	513±14	32

3.3. Impact Toughness

The fracture energy of the welded areas in ships is extremely important. In this context, the impact test was performed on the samples extracted from the weld areas, and the results are shown in Table 4. As it is known, both strength and elongation values must be high in order for the strength values to be higher. As can be observed, relative to the base material, the welded regions' impact strength increased after both welds. This is because, while the elongation values have not greatly decreased, the strength values of the welded regions have increased dramatically. Also, when the

GMAW and SAW methods are compared, the toughness values reached higher levels as a result of the higher strength values achieved after the submerged arc welding.

Table 4. Impact toughness of base material, GMAWed and SAWed samples.

Condition	Impact Toughness (Joule)
Base material	7,9 ±0,9
Gas metal arc welded	8,8±0,5
Submerged arc welded	9,5±0,7

3.4. Formability

Figure 3 depicts the welding zone of the steel joined by SAW, the welding zone of the steel joined by GMAW, and the bending force and deflection curves produced from the base material. Also, Table 5 presents the results from these curves. As can be observed, the maximum bending forces increased after both welding processes. Also, due to the higher strength achieved in submerged arc welding, the highest bending forces were achieved in submerged arc welding. On the other hand, the deflection values decreased after both welds as a result of the decreasing elongation values. It is possible to examine the formability of the weld zone from two perspectives. When it is necessary to shape the welded area during ship construction after welding, the low strength of the welded area can be considered as an advantage in order to be able to shape it with lower forces. However, it will be a great advantage if the strength values of this region are high and the deflection values are low in order to prevent the ship from being deformed in the welding area during the loadings the ship is exposed to during voyage. In this context, it is possible to say that the values obtained after SAW welding are the most advantageous in terms of navigation.

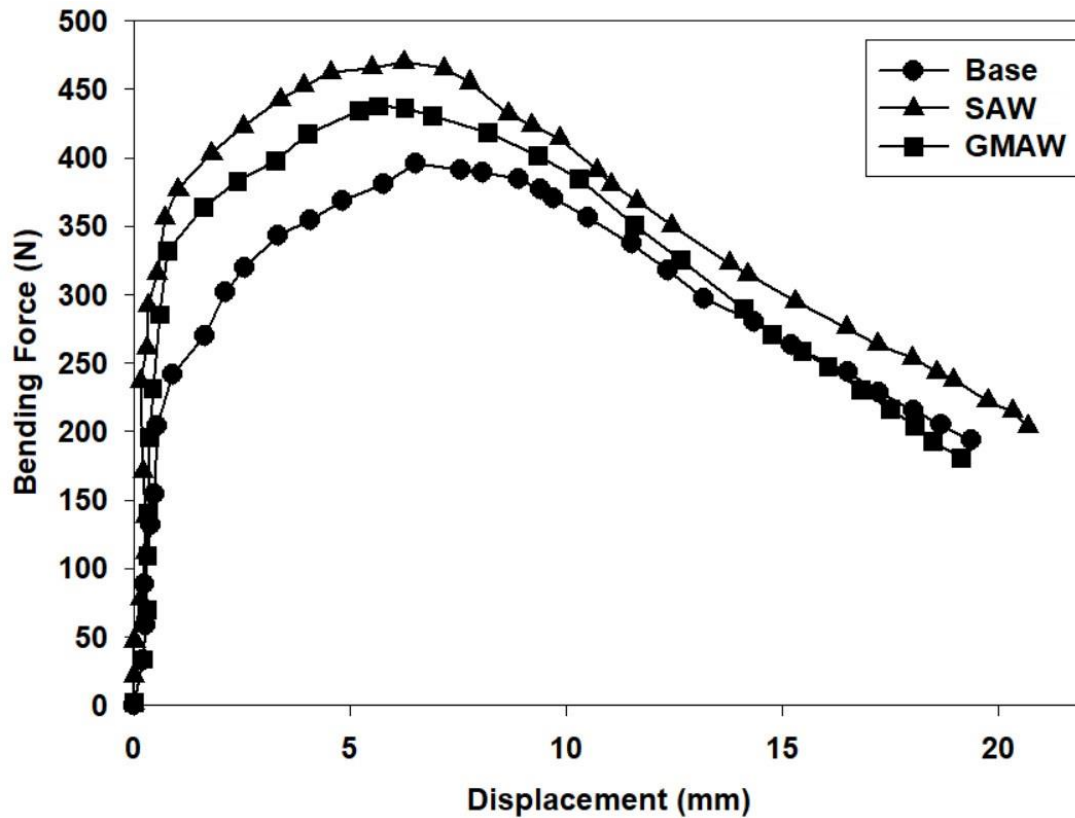


Figure 3. Bending force and displacement curves of base material, GMAWed and SAWed samples.

Table 5. Bending force and displacement values of base material, GMAWed and SAWed samples.

Condition	Bending Force (N)	Displacement at Maximum Bending Force (mm)
Base material	377±9	6,7±0,3
GMAW	448±11	5,6±0,4
SAW	471±13	6,2 ±0,4

4. Conclusions and Recommendations

In this investigation, two types of welding GMAW and SAW were used to joint shipbuilding steel and mechanical properties investigated comparatively. In consequence of the investigations the results summarized below have been achieved.

1-Both welding techniques enhanced the higher hardness value relative to the base material, and the samples joint by SAW had the highest hardness values.

2- It was determined that the strength value increased after both welds compared to the base material, however, the elongation values decreased after both welds.

3- It was determined that the fracture energy increased after both welding methods, and the highest fracture energy was reached in the sample joined with submerged arc welding.

4- After the bending test, the highest bending force was reached in the sample joined by submerged arc welding. On the other hand, it was determined that the highest deflection value was reached in the base material.

As can be seen after the study, it is possible to say that SAW welding is more advantageous in terms of strength and formability. In this sense, it would be advantageous to choose submerged arc welding in conditions where submerged arc welding can be done, such as panel lines during ship construction.

It will be useful in future studies to examine the effect of the changes in the used gas and submerged arc welding parameters on the mechanical properties. Also, examining the mechanical properties of submerged arc and submerged arc welding on different shipbuilding steels will make a significant contribution to the literature and industrial applications.

Acknowledgements

We appreciate Professor Gencaga Purcek from the Karadeniz Technical University's Mechanical Engineering Department for sharing his laboratory with us.

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

- Donizete Borba, T. M., Duarte Flores, W., de Oliveira Turani, L., & Cardoso Junior, R. (2017) "Assessment of the Weldability of EH36 TMCP Shipbuilding Steel Welded by High Heat Input Submerged Arc Welding", *Welding International*, 31(3), 184-195.
- Gook, S., Midik, A., Biegler, M., Gumenyuk, A., & Rethmeier, M. (2022) "Joining 30 mm Thick Shipbuilding Steel Plates EH36 Using a Process Combination of Hybrid Laser Arc Welding and Submerged Arc Welding", *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 6(4), 84.

- Hajian, M., Abdollah-zadeh, A., Rezaei-Nejad, S. S., Assadi, H., Hadavi, S. M. M., Chung, K., & Shokouhimehr, M. (2015) "Microstructure and mechanical properties of friction stir processed AISI 316L stainless steel", *Materials & Design*, 67, 82-94.
- Jokinen, T., Vihervä, T., Riikonen, H., & Kujanpää, V. (2000) "Welding of ship structural steel A36 using a Nd:YAG laser and gas-metal arc welding", *Journal of Laser Applications*, 12(5), 185-188.
- Kim, C.-M., Lee, J.-B., & Choo, W.-Y. (2003) "Characteristics of Single Pass Welds In 50kJ/mm of Heavy Thickness Shipbuilding Steel" Paper presented at the The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference.
- Pamnani, R., Vasudevan, M., Jayakumar, T., & Vasantharaja, P. (2017) "Development of Activated Flux, Optimization of Welding Parameters and Characterization of Weld Joint for DMR-249A Shipbuilding Steel", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70(1), 49-57.
- Pan, Z., Larkin, N., Li, H., Van Duin, S., Shen, C., Lang, D., & Sterjovski, Z. (2013) "Evaluation of tandem gas metal arc welding for low distortion butt-welds in naval shipbuilding", *Australasian Welding Journal*, 58 (2).
- Sekban, D. M. (2021) "Effects of Heat Treatment and Severe Plastic Deformation on Microstructure, Mechanical Properties and Midsection Ultimate Strength of Shipbuilding Steel", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(10), 7805-7816.
- Sekban, D. M., Aktarer, S. M., & Purecek, G. (2019) "Friction Stir Welding of Low-Carbon Shipbuilding Steel Plates: Microstructure, Mechanical Properties, and Corrosion Behavior", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 50(9), 4127-4140.
- Sirisatien, T., Mahabunphachai, S., & Sojiphan, K. (2018) "Effect of submerged arc welding process with one-side one-pass welding technique on distortion behavior of shipbuilding steel plate ASTM A131 grade A.", *Materials Today: Proceedings*, 5(3, Part 2), 9543-9551.
- Turan, E., Koçal, T., & Ünlügençoğlu, K. (2011) "Welding technologies in shipbuilding industry", *Tojsat*, 1(4), 24-30.
- Wang, Z., Gao, J., Zhong, M., Basu, S., Wang, D., Qu, Z., & Wang, C. (2023) "Revealing Charpy Impact Toughness Variations of EH36 Shipbuilding Steel Weld Metals Processed by CaF₂-Al₂O₃-TiO₂ Fluxes under High Heat Input Submerged Arc Welding", *Journal of Materials Engineering and Performance*.
- Wu, Y., Yuan, X., Kaldre, I., Zhong, M., Wang, Z., & Wang, C. (2023) "TiO₂-Assisted Microstructural Variations in the Weld Metal of EH36 Shipbuilding Steel Subject to High Heat Input Submerged Arc Welding",
- Yuan, X., Wu, Y., Zhong, M., Basu, S., Wang, Z., & Wang, C. (2022) "Profiling inclusion characteristics in submerged arc welded metals of EH36 shipbuilding steel treated by CaF₂-TiO₂ fluxes", *Science and Technology of Welding and Joining*, 27(8), 683-690.
- Zhang, J., Coetsee, T., Dong, H., & Wang, C. (2020a) "Element Transfer Behaviors of Fused CaF₂-TiO₂ Fluxes in EH36 Shipbuilding Steel During High Heat Input Submerged Arc Welding", *Metallurgical and Materials Transactions B*, 51(5), 1953-1957.
- Zhang, J., Coetsee, T., Dong, H., & Wang, C. (2020b) "Elucidating the Roles of SiO₂ and MnO upon Decarburization During Submerged Arc Welding: A Thermodynamic Study into EH36 Shipbuilding Steel", *Metallurgical and Materials Transactions B*, 51(4), 1805-1812.
- Zhong, M., Jiang, L., Bai, H.-y., Basu, S., Wang, Z.-j., & Wang, C. (2023) "Simulating molten pool features of shipbuilding steel subjected to submerged arc welding", *Journal of Iron and Steel Research International*.
- Zhong, M., Li, T., Basu, S., Wang, Z., & Wang, C. (2022) "Phosphorus Transfer Behaviors Induced by CaF₂-TiO₂-CaO Fluxes in EH36 Shipbuilding Steel Subject to High Heat Input Submerged Arc Welding", *Metallurgical and Materials Transactions B*, 53(5), 2774-2778.

Farklı Oluk/Kutup Oranlarına Sahip Sıralı Kutuplu Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Analizi

İbrahim AYDIN¹, Onur Özdal MENGİ^{2*}, Serdal ARSLAN³

Öz

Küçük veya büyük güçlü elektrikli araçlarda kullanılan kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarında, en büyük maliyet kalemlerinden biri kullanılan kalıcı mıknatıslardır. Rotor yapısındaki kutuplarda kalıcı mıknatısların ve çelik malzemenin bir arada kullanıldığı sıralı kutuplu rotor yapısı incelenmiştir. Öncelikli olarak, elektrikli bisiklet için önceden tasarımı yapılan 250W giriş gücüne, 200 rpm anma hızına sahip Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru (KMFDAM)'nın bazı parametreleri temel alınarak ANSYS RMXprt programında tasarım oluşturulmuştur. Tasarımda sargı tipi olarak, bakır kayıplarının az olduğu, verimin yüksek ve motor imalatının kolay olduğu konsantrik (kesirli) çift kat sargılı yapı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Farklı oluk/kutup sayılarında motor performans verileri ve vuru momentleri incelenmiştir. Oluşturulan bu modeller, Rmxprt ve Maxwell 2D programı yardımıyla analizi gerçekleştirilmiştir. Bu motorların, farklı sarım sayıları ve farklı kutup yayı oranlarında 4 farklı oluk/kutup modelinin geleneksel ve sıralı kutup yapıları için dikkate alınmıştır. Ayrıca vuru momenti analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda geleneksel ve sıralı kutup yapılarında vuru momenti en küçük olduğu modeller tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fırçasız Doğru Akım Motoru, Sıralı Kutup, Ansys Maxwell, Elektrikli Bisiklet.

Analysis of Consequent-Pole Brushless DC Motors with Different Slot/Pole Ratios

Abstract

One of the biggest cost items in permanent magnet brushless dc current(PMBLDC) motors used in small or large power electric vehicles is permanent magnets used. The consequent-pole rotor structure in which permanent magnets and steel material are used together in the poles of the rotor structure has been examined. First of all, a design was created in the ANSYS RMXprt program based on some parameters of a BLDC with 250W input power and 200 rpm rated speed, which was previously designed for the electric bicycle. As the winding type in the design, analyzes were carried out by using a concentric (fractional) double-coil structure with low copper losses, high efficiency and easy motor manufacturing. Engine performance data and cogging moments were investigated in different slot/pole numbers. These models were analyzed with the help of Rmxprt and Maxwell 2D program. These motors have been considered for conventional and consequent pole structures of 4 different slot/pole models with different winding numbers and different pole arc ratios. In addition, cogging moment analyzes were made. As a result of these analyzes, the models with the smallest cogging moment in conventional and consequent pole were determined.

Keywords: Brushless DC Motor, Consequent Pole, Electric bicycle

¹Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Giresun, Türkiye, ibrahim.aydin@giresun.edu.tr

²Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Giresun, Türkiye, onur.ozdal.mengi@giresun.edu.tr

³Harran Üniversitesi, Organize Sanayi Bölgesi MYO Elektrik Programı, Şanlıurfa, Türkiye, serdalarслан@harran.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0002-1027-5230>

²<https://orcid.org/0000-0001-5669-0766>

³<https://orcid.org/0000-0002-1187-5633>

1. Giriş

Günümüzde halen fosil kaynaklı yakıtların kullanımının devam etmesi ve bu rezervlerinin dünya üzerinde zamanla azalması enerji birim fiyatlarını arttırmaktadır. Bu tür yakıtların kullanımı sera gazı emisyonlarının artmasına ve beraberinde küresel ısınmayla birlikte iklim değişikliklerine neden olmaktadır. Bu durum ülkeleri daha çevreci araçlar üretmeye ve kullanmaya yönlendirmiştir. Gelişen teknolojiyle birlikte dizel ve benzin gibi fosil yakıtı kullanan bu araçların yerini hibrit (benzin-elektrik) ve elektrikli araçlar almaya başlamıştır.

Elektrikli araçlardan olan elektrikli bisikletler, engebeli ve düz gibi çeşitli arazi şartlarından kullanılabilmesi, küçük olması, park sıkıntısının yaşanmaması, kalabalık şehirlerde kolayca hareket ederek trafik sıkışıklığını azaltmaya yardımcı olması gibi avantajları bulunmaktadır. Ayrıca bakım maliyetinin az olması ve sürücünün sağlığını korumaya yardımcı olması gibi birçok faydasından dolayı kullanımı her geçen gün artmakta ve doğa dostu araç pazarındaki payı büyümektedir.

Elektrikli bisikletlerin sürülmesinde elektrik motorları büyük bir öneme sahiptir. Elektrikli bisikletlerde Fırçalı Doğru Akım Motoru veya FDAM kullanılır. Fırçalı Doğru Akım Motorları fiyat olarak FDAM'na göre daha ucuzdur. Ancak FDAM'nun sessiz çalışması, bakım maliyetinin ucuz ve küçük boyutlarda olması gibi avantajlardan dolayı bu motorlar tercih edilir. 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.

Özbey ve ark. dıştan rotorlu fırçasız doğru akım motorunun güç, gerilim, anma hızı, tekerlek çapı, sabit mıknatıs, oluk doluluk oranı vb. parametrelerin aynı olmasına özen göstererek 24/18, 24/20, 36/24, 36/28 ve 36/30 oluk/kutup kombinasyonları değişimlerinin motorda meydana gelen bakır ve demir kayıpları ile verim üzerindeki etkilerini Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanmak suretiyle incelemişlerdir. Benzetim sonuçlarını karşılaştırdıklarında diğer modellere göre, 24/20 oluk kutup oranına sahip modelin veriminin daha yüksek olduğu ve toplam kaybın diğerlerine göre düşük olduğunu göstermişlerdir (Özbay ve ark., 2017).

Analitik modele dayalı olarak 2D parametrik yaklaşım yöntemi kullanılarak elektrikli araçlar için tekerlek içi dıştan rotorlu 6 kW/60V'luk FDAM motor tasarımının Simplorer/Maxwell Co-Simulation Multifizik yaklaşımı ile yapılan analizinde, devir sayısı, sarım alanı ve stator kutup yüksekliği gibi tasarım özellikleri SEY kullanılmak suretiyle motorun performansı incelenmiştir (Uygun ve ark., 2015). Bu yeni tasarımı, Protean Company tarafından tasarlanan ve üretilen ticari bir tekerlekli elektrikli motorla karşılaştırmışlar ve tasarımın tekerlek jantı ile kampanalı fren muhafazası arasındaki muhafazaya

yerleştirilmeye uygun olduğundan dolayı mevcut teknolojilerden farklı olduğunu göstermişlerdir (Uygun & Solmaz, 2015).

Üç fazlı dengeli, 6 kutuplu FDAM'da herhangi bir zıt Elektromotor Kuvveti (EMK) şekli için karşılıklı tork dalgalanmasını azaltmak için DSP yardımı ve Genetik Algoritma kullanarak yeni bir yöntem incelenmiştir (Chen ve ark., 2017). bu yöntemde karmaşık Fourier serisi ayrışımı veya diğer zor analizler olmadan herhangi bir geri EMK'ye uygulanabildiğini, optimum akımların kolaylıkla bulunabildiğini ve bu yönetimin karşılıklı tork dalgalanmasını iyileştirmenin basit ve etkili bir yolu olduğunu göstermişlerdir (Chen ve ark., 2017).

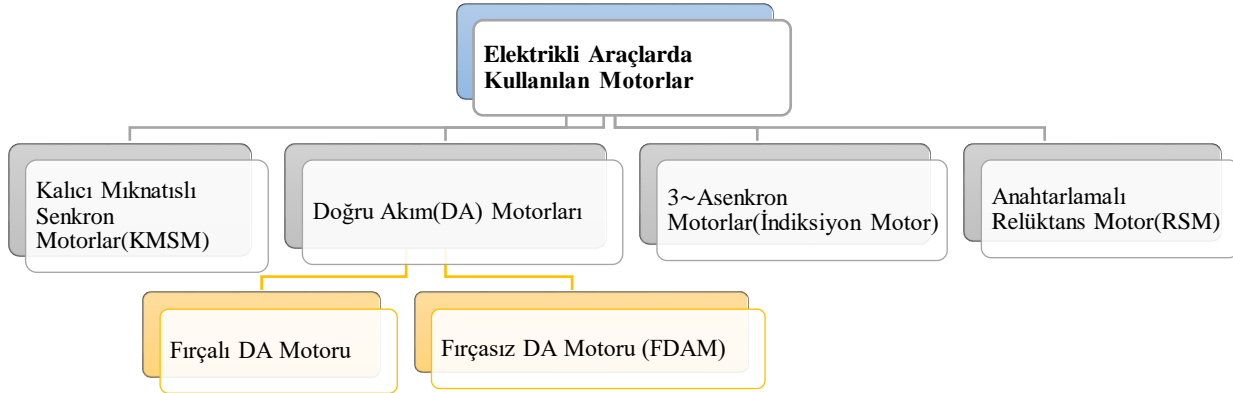
Geleneksel bir FDAM için tasarım parametreleri, manyetik özellikleri, oluk ölçüsü, faz direnci gibi çeşitli analitik hesaplamaları ve performans hesaplamaları dikkate alınarak ANSYS-Maxwell'de parametrik analiz ve optimizasyon gerçekleştirilebilir. Analitik hesaplama, 2D benzetim sonuçları, parametrik analiz, Genetik Algoritma (GA) ve test verilerinin karşılaştırılmasında; GA ile optimizasyon yönetimi uygulandığında gerçek çalışma koşullarındaki verim değerinden % 1,3 daha fazla verim elde edildiği görülmüştür (Tosun, 2021).

Üç fazlı 8 kutup ve 24 oluklu çift sargılı yüzeye monteli kalıcı mıknatıslı (YMKM) motorda 3 farklı mıknatıs şekli kullanmanın tork üzerine etkisi üzerine yapılan çalışmada; iki aşamalı bir mıknatıs kaykısı uygulamayla vurutu torkunun etkili bir şekilde azaltabildiği, sinüs biçimli mıknatısa sahip rotorda en düşük zıt EMK harmonikleri ve en düşük tork dalgalanmasına neden olsa da ortalama torku azalttığını ve mıknatıs kaykısının uygun bir kutup yayı optimizasyonu ile birleştiğinde, mükemmel tork davranışı elde edilebilmektedir(Lin ve ark., 2014).

24 oluk 8 kutuplu sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motoruna getirilen yeni bir yaklaşımla; motorun maliyeti, amaç fonksiyonu ve sınırlılıklar (çap ve paket boyu) altında optimize etmek için analitik çözümü bir GA yöntemi ile birleştirilebilir. Ayrıca bu önerilen GA tekniği ile tepe tırmanma ve doğrusal arama algoritma tekniği arasında karşılaştırma yapılmıştır. GA'nın genellikle daha fazla iterasyon gerektirmesine rağmen, doğrusal arama yöntemiyle elde edilenden daha iyi sonuçlar elde edildiğini, diğer yöntemlere göre kullanılan sabit mıknatıs ağırlığında, motorun maliyetinde, demir ve bakır kayıplarında gözle görülür bir düşüş olduğunu ve verimin yükseldiğini gözlemlenmiştir (Bianchi & Bolognani, 1998; Bianchi & Bolognani, 1997).

Elektrikli araçlarda kullanılmak üzere belirli parametreler ışığında FDAM üzerine ANSY Maxwell ve SEY yönetiyle yapılan analitik, simülasyon ve deneysel çalışma sonucunda, en uygun çalışma değerlerine 22,56 Nm çıkış torkunda, 635,87 d/d hızında ve 1,5 kW çıkış gücünde %87 verime ulaşıldığını, üretilen prototipi elektrikli araca entegre edildiğinde hedeflenen değerler arasında çalıştığını görmüşlerdir(Akar ve ark., 2021).

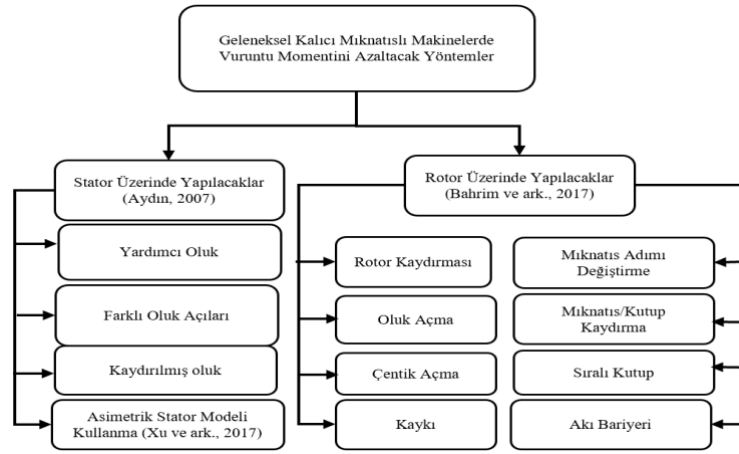
Elektrikli araçlarda ağırlıklı olarak beş temel elektrik tahrik motoru kullanılmakta olup, Şekil 1’de gösterilmektedir(Kaymaz ve ark, 2020).



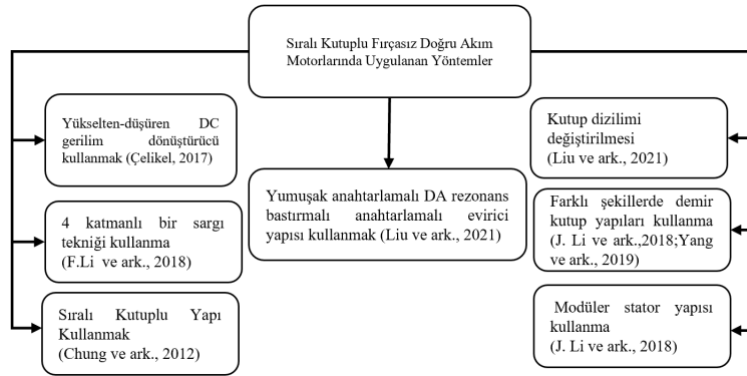
Şekil 1. Elektrikli araçlarda kullanılan motor türleri.

FDAM’ları, sabit mıknatıslı bir rotora sahip ve komütasyon işlemi elektronik olarak gerçekleşen senkron bir motordur. Doğrudan güç kaynağına bağlanarak çalıştırılmazlar. İki veya çok fazlı tipleri bulunsa da yaygın olarak üç fazlı olanları kullanılır. FDAM sargıları; yıldız veya üçgen bağlanabilmektedir. Bu motorların statorunda bulunan oluk sayısı; rotor kutup sayısına, faz sayısına ve sargı şekline (dağıtılmış veya kesirli) bağlı olarak seçilmektedir. FDAM’nun yapısı KMSM olarak da bilinen mıknatıslı Alternatif Akım (AA) motoruna benzemektedir. KMSM’da sargılar sinüzoidal olarak dağılırlar ve indüklenen EMK sinüzoidal biçiminde, FDAM’larında ise stator sargıları trapezoidal biçimde dağılır ve endüklenen emk trapezoidal biçimde olmaktadır (Akın, 2019). Sinüzoidal geri emk’ye sahip motorlar sabit tork elde edecek şekilde kontrol edilebilirken, sinüzoidal olmayan trapezoidal bir zıt emk’ya sahip motorlarda ise invertör boyutlarını küçültür ve aynı güç seviyesi için kayıpları azaltır. Stator faz sargıları DA bir kaynaktan bir mikro-denetleyici üzerinden bir evirici veya güç elektroniği devresi aracılığıyla tetiklenmesiyle çalışır. Evirici içinde bulunan ve kullanılacak olan motorun akım ve gerilim değerlerine göre MOSFET, IGBT veya transistör gibi güç anahtarları kullanılır. Bu anahtarlama elamanları rotor konumuna göre yerleştirilir ve hangi anahtarın konuma bağlı olarak ne zaman açma-kapama yapacağı hall sensörleri tarafından belirlenir. Anahtarların kontrolüyle statora uygulanan gerilim ile akımın yönü ve rotorda dönme hareketi oluşur. Statorda oluşan bu manyetik alan kutupları ile sabit mıknatıslar tarafından rotorda oluşan manyetik alan kutuplarının birbirini itmesi, zıt kutupların birbirini çekmesi sonucu dönme momenti oluşur. Dönme hareketi sonucu konumu değişen rotor sensörler tarafından algılanıp bu veri mikro-denetleyici gönderilir ve bu denetleyici yeni konuma göre hızlı bir şekilde anahtarların konumunu değiştirir ve rotor yine itme ve çekme kuvveti etkisinde kalarak rotorda dönme hareketi meydana gelir (Ulu, 2011). Ancak torktaki dalgalanmanın azaltılması elzemdir. Tork

dalgalanması veya vuruğu momenti, bir motora enerji verildiğinde bu motorun rotorunun dönüşü boyunca meydana gelen düzensiz tork üretimidir. Bu durum meydana gelen elektromanyetik alanlardaki değişimlerden ve rotor ile stator arasındaki etkileşimlerinden kaynaklanır. Geleneksel bir motorda vuruğu torkunda meydana gelen artma veya azalmalar doğrudan tork dalgalanmasını artmasına veya azalmasına neden olmaktadır. Bun nedenle tork dalgalanmasının azaltılmasında seçilecek yollardan biri vuruğu momentinin azaltılmasında kullanılan yöntemlerin kullanılmasıdır. Geleneksel kalıcı mıknatıslı motorlarda vuruğu momentini azaltacak yöntemler Şekil 2’de, Sıralı Kutuplu Kalıcı Mıknatıslı FDAM’unda vuruğu momentini azaltacak yöntemler ise Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Kalıcı mıknatıslı motorlarda uygulanan yöntemler.



Şekil 3. Sıralı kutuplu FDAM uygulanan yöntemler.

FDAM’larından, aynı boyut ve hacimdeki DA ve asenkron makinalarına daha yüksek verimler sağlanabilmekte, daha küçük hacim ve ağırlığa sahip bu motorlardan diğer motorlardaki gibi aynı güç ve moment elde edilebilmektedir.

FDAM’nun diğer motorlarla karşılaştırması Tablo 1’de gösterilmiştir (Uygun, 2012).

Tablo 1. FDAM'nun diğer motorlarla karşılaştırılması.

	Asenkron Motor	Senkron Motor	DA Motoru	FDAM	Anahtarlamalı Relüktans Motor(ARM)
Besleme Şekli	Alternatif Akım	Alternatif Akım	Doğru Akım	Doğru Akım	Doğru Akım
Uyarma Durumu	Uyarma Gerekmez	Doğru Gerilimle Uyarma	Doğru Gerilimde Uyarma	Uyarma Gerekmez	Uyarma Gerekmez
Dönüştürücü	Değişken Hız Uygulaması Gerekir	Değişken Hız Uygulaması Gerekir	Değişken Hız Uygulaması Gerekir	Daima Gerekir	Daima Gerekir
İşletme ve Bakım Masraf	Yok Denebilir	Kısmen Bakım Gerekir	Bakım Gerekir	Yok Denebilir	Yok Denebilir
Motor Maliyeti	Ucuz	Pahalı	Pahalı	Pahalı	Ucuz
Dönüştürücü Maliyeti	Pahalı	Pahalı	Orta	Pahalı	Pahalı
Verim	Orta	Orta	Orta	İyi	İyi
Çalışma Ortamı	Her Ortamda Çalışır	Her Ortamda Çalışır	Patlayıcı Ortamlarda Kullanılmaz	Her Ortamda Çalışır	Her Ortamda Çalışır
Sağlamlık	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi

Bu çalışmada, çeşitli oluk/kutup yapılarına sahip geleneksel ve sıralı kutuplu FDAM modellerinin her biri için parametrik ve analitik çözümlenmeleri yapılarak çıkış parametreleri ve vuruş momenti açısından karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırmalar aynı açısız hız değerlikleri dikkate alınarak farklı kutup yay oranlarında gerçekleştirilmiştir .

2. Materyal ve Metot

2.1. KMFDAM'nun Modellenmesi

KMFDAM'unda rotorun silindirik bir yapıya sahip olması nedeniyle açılı rotor endüktansı yoktur. Bu nedenle üç fazın öz ve karşılıklı endüktansı eşittir. Stator akımları dengeli olacak şekilde sınırlandırılmıştır, tepe gerilimi motorun maksimum sınır gerilimini aşmadığı sürece kaynak sinüzoidal, kare dalga, trapezoidal veya diğer dalga olarak uygulanabilir. KMFDAM'nun elektriksel ve mekanik denklemleri aşağıda verilmiştir(Ramesh Babu ve ark., 2013).

$$V_a = i_a R_s + (L - M) \frac{d}{dt} i_a + e_a \quad (1)$$

$$V_b = i_b R_s + (L - M) \frac{d}{dt} i_b + e_b \quad (2)$$

$$V_c = i_c R_s + (L - M) \frac{d}{dt} i_c + e_c \quad (3)$$

Burada; L faz indüktansını ($L = L_a = L_b = L_c$), M a-b-c fazlarının karşılıklı indüktanslarını, V_a , V_b ve V_c stator faz gerilimlerini, R_s stator faz direncini ($R = R_a = R_b = R_c$), e_a , e_b ve e_c stator zıt EMK'ları, i_a , i_b ve i_c stator faz akımlarını ifade etmektedir (Ramesh Babu ve ark., 2013).

(1), (2) ve (3) denklemleri KMFDAM modelinin aşağıdaki gibi basitleştirilmesine yol açar:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + (L - M) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2. Elektromanyetik Torkun Matematiksel Modeli

İndüklenen toplam elektromanyetik tork denklem (5) ve (9)'da , her faz için tork değeri ise Eşitlik (6),(7) ve (8)'de gösterilmiştir (Kelek ve ark., 2019).

$$T_e = (e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c) / \omega_m \quad (5)$$

$$T_a = K_t \cdot f(\theta) \cdot i_a \quad (6)$$

$$T_b = K_t \cdot f(\theta - 2\pi/3) \cdot i_b \quad (7)$$

$$T_c = K_t \cdot f(\theta + 2\pi/3) \cdot i_c \quad (8)$$

$$T_e = T_a + T_b + T_c \quad (9)$$

Burada; K_t tork sabiti, ω_m mekanik açısal hız, θ elektrik motor açısını ifade etmektedir.

2.3. Vuruntu Momentinin Matematiksel Modeli

Vuruntu momenti sabit mıknatıslardan kaynaklı EMK harmonikleri ile statordaki iletkenlerden kaynaklı manyetik iletkenlik harmoniklerinin birbirini etkilemesinden dolayı ortaya çıkan ve motor performansını olumsuz yönde etkileyen bir parametredir. Özellikle yüksek hız gerektirmeyen çalışmalarda tasarlanan motorlarda çok düşük olması tercih edilmektedir.

Vuruntu momentinin etkisi analitik yöntemlerle veya Sonlu Elemanlar Yöntemiyle tespit edilebilse de rotor pozisyonu değişimiyle kolayca hesaplanabilmesidir. Vuruntu momentinin Fourier serisi ile hesaplaması Eşitlik 10'da gösterilmiştir (Aydın, 2007):

$$T_{cog}(\theta_m) = \sum_{k=1}^{\infty} T_k \sin(k \cdot N_c \cdot \theta_m + \varphi_k) \quad (10)$$

Burada; θ_m rotorun pozisyonunu, φ_k k inci harmoniğin faz açısını, T_k ise k inci harmoniğin genliğini ve N_c rotor kutup sayısını ifade etmektedir.

Vuruntu momenti, oluk ve kutup sayısının EKOK değeriyle doğru orantılıdır ve Eşitlik 11'deki gibi tanımlanabilir:

$$P = \text{EKOK}(N_s, N_p) \quad (11)$$

Burada; N_s rotor kutup sayısı ve N_p stator oluk sayısının ifade etmektedir.

Motorun vuruntu momentinin düşük olması için, P değeri büyük olan oluk/kutup kombinasyonu seçilmelidir.

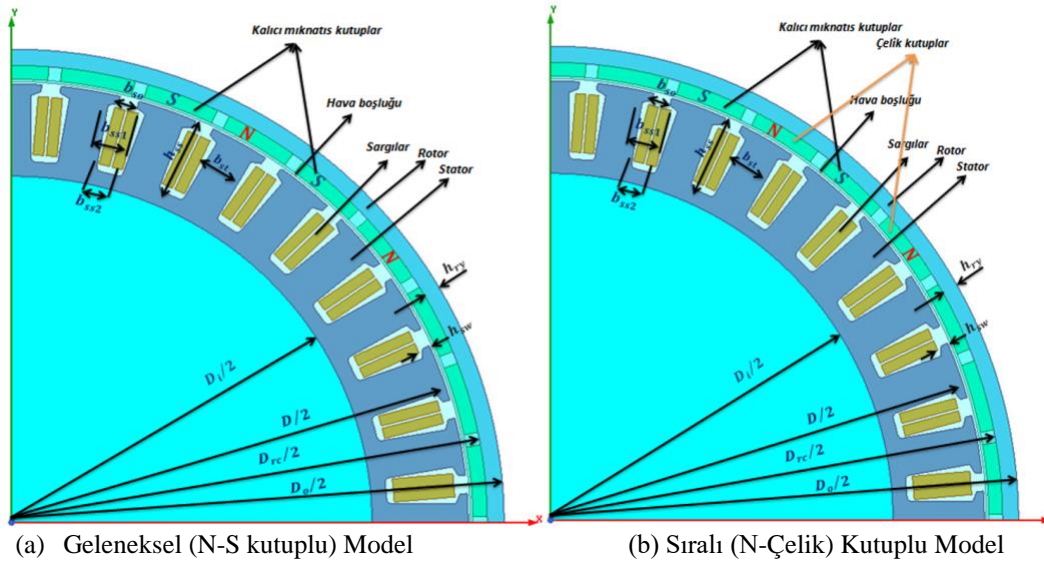
2.4. Ansys Maxwell Yazılımı ile Motorun Modellenmesi ve Analizi

RMxprt paket programı Ansys ana yazılımı içinde yer alan, birçok motor türünü barındıran (Akar ve ark., 2021; Arslan, 2016; Çabuk ve ark., 2019; Ersöz ve ark., 2016; Fenercioğlu & Tarımer, 2019) ve bu motorların tasarımında profesyonel olarak kullanılan, analitik hesaplama tabanlı bir analiz programıdır. Analitik sonuçlar başlı başına uygulamaya yönelik sonuçlar açısından belirli bir hata miktarına sahiptir (Çamcı ve ark., 2022). Bu açıdan motor modeli iki boyutlu veya üç boyutlu elektromanyetik analizi gerçekleştirilmesi önemlidir. ANSYS Maxwell programının asıl faydası; statik veya zamanla değişen elektromanyetik ve elektrik alanları analiz edebilmektir. Modellenecek yapının geometrisi, kullanılacak malzemenin özellikleri, giriş parametreleri, çıktı büyüklükleri bilinmelidir (Çabuk ve ark., 2019). ANSYS Maxwell programı, problemin çözümünde kullanıcı tarafından tanımlanan veya program tarafından uygun ağ oluşturularak, daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilir (Akar ve ark., 2021; Fenercioğlu & Tarımer, 2019). Bu program ile motorun bütün parametreleri RMxprt ile gerçekleştirilen analitik hesaplama süresi kısa olduğundan giriş parametreleri değiştirilerek tasarım üzerinde yüzlerce olasılık çok kısa süre içerisinde denenmekte ve motora ait verilere kısa zamanda ulaşılmaktadır. Ansys RMxprt programı; analitik tasarımlar, parametrik ve optimizasyon çalışmalarının yapılabilmesine imkân sağlar. Ayrıca RMxprt ile Maxwell uyumlu çalışabilmesinden dolayı tasarlanan motorun 2B veya 3B geometrisi otomatik oluşturabilmektedir (Akar ve ark., 2021; Arslan, 2016; Çamcı ve ark., 2022). Böylece modelin SEY analizinin yapılmasına imkân sağlar. Kullanılacak makine ile gerekli parametreler programa girilip çözüm yaptırdıktan sonra, motora ait istenilen çıkış verilerini (kayıplar, moment, tork vb...) (Akar ve ark., 2021) grafiksel ve sayısal olarak görebilmemize imkan sağlar.

Bu çalışmada temel alınan motor parametreleri ışığında, 4 farklı oluk/kutup modelinin her biri farklı kutup yayı oranı aralıkları ve farklı sipir sayıları için ANSYS/RMxprt yazılımına girilerek

motorların analitik modelleri oluşturulmuş ve performans analizleri yapılmıştır. Sonrasında bu modellerin ANSYS/Maxwell 2D yardımıyla 2 boyutlu modeline geçiş yapılarak parametrik ve analitik olarak çözdürülmüş, en uygun vuruntu torkuna sahip modeller tespit edilmiştir. Tespit edilen bu modellerin karşılaştırılmıştır.

36 oluk 34 kutuplu dıştan rotorlu sabit mıknatıslı geleneksel ve sıralı kutuplu FDAM'nun 1/4 kesiti için bazı geometrik parametrelerin gösterimi Şekil 4 (a) ve (b)'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 36 oluk 34 kutuplu Dıştan rotorlu sabit mıknatıslı geleneksel FDAM'nun 1/4 kesiti için bazı geometrik parametrelerin gösterimi(ANSYS Electronics Suite 19.2).

Referans motor olarak elektrikli bisiklet için imal edilen 250W gücünde 36 oluklu, 38 kutuplu modelin parametreleri Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Referans motorun temel, uyarma devresi özellikleri

<u>Özellik</u>	<u>Değer</u>	<u>Özellik</u>	<u>Değer</u>	<u>Özellik</u>	<u>Değer</u>
Motor Tipi	FDAM	Besleme Gerilimi	48 V	Çalışma Sıcaklığı	75 °C
Oluk sayısı	36	Faz Sayısı	3	Mıknatıs Kalınlığı	3 mm
Kutup Sayısı	38	Bağlantı Şekli	Yıldız	Mıknatıs Türü	NdFeB35
Rotor Türü	Dış Rotorlu	Kontrol Türü	DC	Yığılma Faktörü	0,95
Motor Anma Hızı	200 rpm	Motor Uzunluğu	25 mm	Rotor İç Çapı	192 mm
Stator İç Çapı	150 mm	Stator Çeliği	M19_26G	Rotor Dış Çapı	207 mm

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Modellerin ANSYS/RMxprt İle Analizi

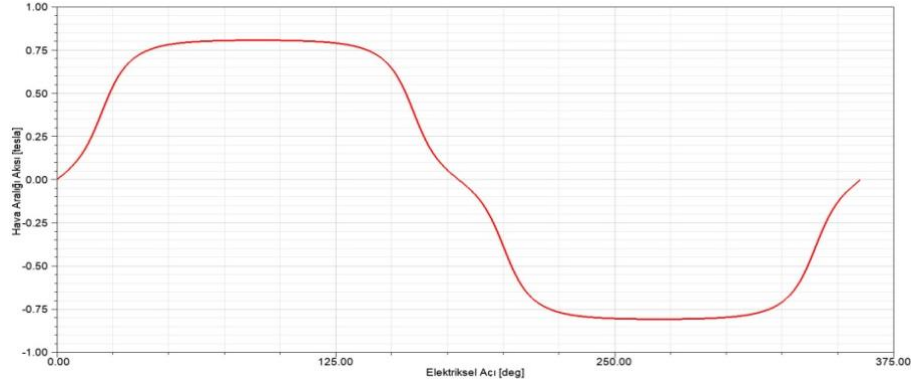
Her bir model için kutup yayı oranı 0,775-0,85 aralığında 0,025 oranında ve sarım sayıları ise 24-30 aralığında değiştirilerek Rmxprt ile yapılan analitik ve parametrik çözüm sonucu alınan veriler Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Farklı sarım ve kutup yayı oranı değerleri için motor tasarım sonuçları.

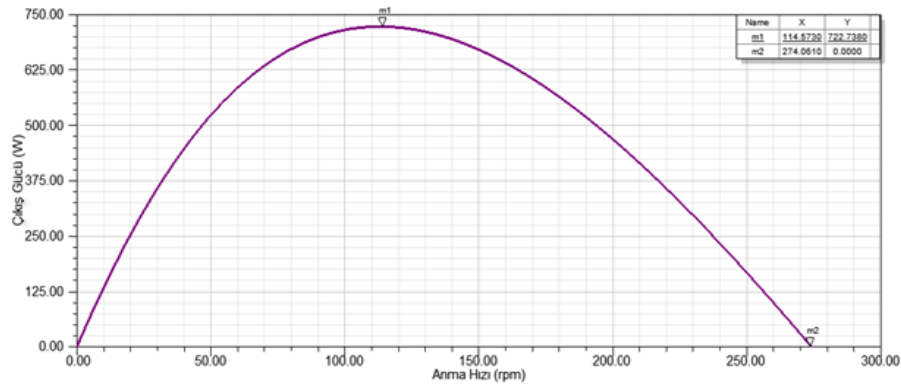
Motor Tasarım Sonuçları													
Kutup Yayı Oranı	Oluk / Kutup (Çift Kat Sarırlı)	36/34			36/38			36/40			36/42		
		24	26	30	24	26	30	24	26	30	24	26	30
0,775	Sarım Sayısı	24	26	30	24	26	30	24	26	30	24	26	30
	Sargı Faktörü	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,945	0,945	0,945	0,933	0,933	0,933
	Endüvi Faz Direnci [Ω]	0,156	0,169	0,244	0,156	0,168	0,243	0,158	0,168	0,243	0,155	0,168	0,243
	Endüktans [mH]	0,448	0,525	0,647	0,483	0,567	0,755	0,492	0,578	0,769	0,501	0,588	0,783
	ke [Vs/rad]	1,977	1,297	1,497	1,203	1,303	1,504	1,196	1,296	1,495	1,178	1,276	1,473
	kt [Nm/A]	1,159	1,255	1,465	1,182	1,28	1,486	1,84	1,282	1,485	1,172	1,27	1,468
	Anma Hız [rpm]	314,952	288,031	240,773	310,657	283,867	236,78	311,045	284,109	236,724	314,14	286,792	238,698
	Çıkış Gücü [W]	250,024	250,118	250,059	250,081	250,044	250,065	249,835	250,017	250,11	250,055	250,024	249,907
	Verim [%]	82,79	82,802	81,24	82,7	82,69	81,05	82,76	82,75	81,04	82,89	82,83	81,043
Toplam Net Ağırlık [kg]	2,625	2,667	2,626	2,52	2,56	2,52	2,513	2,556	2,513	2,508	2,55	2,508	
0,8	Sarım Sayısı	24	26	30	24	26	30	24	26	30	24	26	30
	Sargı Faktörü	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,945	0,945	0,945	0,933	0,933	0,933
	Endüvi Faz Direnci [Ω]	0,244	0,169	0,244	0,156	0,169	0,243	0,155	0,168	0,243	0,155	0,168	0,243
	Endüktans [mH]	0,699	0,525	0,699	0,483	0,566	0,754	0,577	0,677	0,901	0,5	0,587	0,782
	ke [Vs/rad]	1,509	1,308	1,509	1,215	1,316	1,519	1,21	1,311	1,512	1,193	1,292	1,491
	kt [Nm/A]	1,472	1,261	1,472	1,19	1,289	1,499	1,195	1,295	1,5	1,186	1,284	1,485
	Anma Hız [rpm]	312,768	286,061	239,158	307,957	281,426	234,802	307,856	281,223	234,373	310,747	289,728	236,205
	Çıkış Gücü [W]	250,042	250,1	250,064	250,085	250,037	250,047	250,055	250,027	250,173	250,053	250,022	250,066
	Verim [%]	81,188	82,717	81,18	82,6	82,61	81	82,7	82,684	81	82,84	82,796	81,04
Toplam Net Ağırlık [kg]	2,639	2,681	2,634	2,532	2,574	2,532	2,526	2,568	2,526	2,52	2,562	2,52	
0,825	Sarım Sayısı	24	26	30	24	26	30	24	26	30	24	26	30
	Sargı Faktörü	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,945	0,945	0,945	0,933	0,933	0,933
	Endüvi Faz Direnci [Ω]	0,156	0,169	0,244	0,156	0,169	0,243	0,156	0,168	0,243	0,156	0,168	0,243
	Endüktans [mH]	0,446	0,524	0,698	0,482	0,566	0,753	0,491	0,576	0,767	0,5	0,586	0,781
	ke [Vs/rad]	1,214	1,316	1,518	1,223	1,325	1,529	1,221	1,323	1,526	1,205	1,305	1,506
	kt [Nm/A]	1,166	1,264	1,476	1,195	1,295	1,506	1,205	1,305	1,513	1,197	1,296	1,5
	Anma Hız [rpm]	311,142	284,589	237,983	306,058	279,712	233,425	305,279	278,892	232,497	307,789	281,055	234,028
	Çıkış Gücü [W]	250,056	250,079	250,091	250,086	250,059	250,043	250,067	250,033	250,102	250,049	250,016	250,086
	Verim [%]	82,6	82,63	81,13	82,51	82,54	80,95	82,63	82,62	80,97	82,8	82,76	81,02
Toplam Net Ağırlık [kg]	2,652	2,694	2,652	2,544	2,587	2,544	2,538	2,58	2,538	2,532	2,574	2,532	
0,85	Sarım Sayısı	24	26	30	24	26	30	24	26	30	24	26	30
	Sargı Faktörü	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,945	0,945	0,945	0,933	0,933	0,933
	Endüvi Faz Direnci [Ω]	0,156	0,169	0,244	0,156	0,169	0,243	0,155	0,168	0,243	0,155	0,1688	0,243
	Endüktans [mH]	0,446	0,523	0,697	0,481	0,565	0,752	0,49	0,576	0,767	0,499	0,586	0,78
	ke [Vs/rad]	1,219	1,32	1,524	1,23	1,333	1,538	1,23	1,333	1,538	1,216	1,317	1,521
	kt [Nm/A]	1,168	1,266	1,479	1,2	1,3	1,513	1,211	1,312	1,523	1,206	1,307	1,513
	Anma Hız [rpm]	310,204	283,762	237,327	304,414	278,228	232,235	303,128	276,947	230,918	305,233	278,744	232,147
	Çıkış Gücü [W]	250,068	250,057	250,112	250,084	250,078	250,037	250,076	250,035	250,087	250,045	250,01	250,098
	Verim [%]	82,511	82,556	81,078	82,42	82,46	80,9	82,566	82,566	80,94	82,766	82,73	81,012
Toplam Net Ağırlık [kg]	2,665	2,707	2,665	2,558	2,6	2,557	2,55	2,592	2,55	2,544	2,586	2,544	

Tablo 3 genel olarak incelendiğinde; kutup yayı oranı veya sarım sayısı arttıkça anma hızının düştüğü ancak verimde çok yüksek değişimler olmadığı, sabit sarım sayısında kutup yayı artışına bağlı olarak faz direnci değişmemektedir. Ancak 250W çıkış gücü için sarım sayısı artışına bağlı olarak faz direnci ve indüktans artışı beklenen durumdur.

36/34 oluk/kutup oranı, 0,85 kutup yayı oranı ve sarım sayısı 30 olan model için Rmxprt ile alınan grafikler Şekil 5 ile Şekil 8 arasında gösterilmiştir.

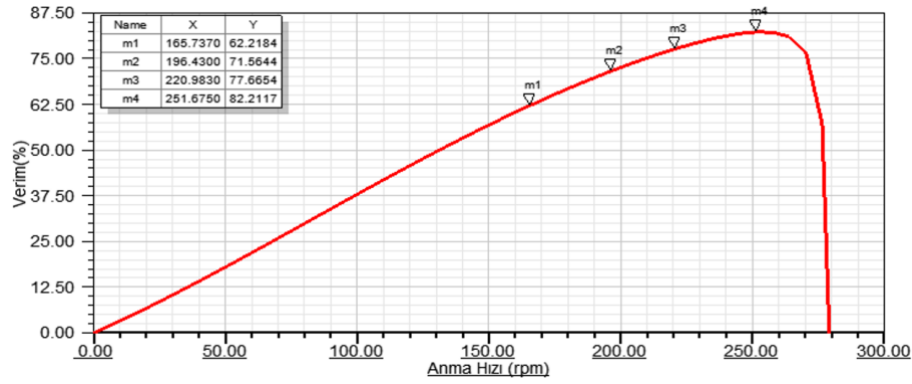


Şekil 5. Elektriksel açıya bağlı olarak hava aralığındaki akı yoğunluğunun değişimi.



Şekil 6. Motor hızına karşılık motorun çıkış gücündeki değişim.

Rotor hızı arttıkça çıkış gücü belli bir değere kadar artmakta, belli bir değerden sonra düşüşe geçmektedir. Anma hızı yaklaşık 114,5 rpm ulaştığında çıkış gücü maksimum değerini almaktadır.



Şekil 7. Motor anma hızına karşılık verimdeki değişim.

Anma hızı arttıkça verim belli bir değere kadar artmaktadır. Maksimum verime yaklaşık 251 rpm değerinde ulaşılmaktadır.

3.2. Geleneksel ve Sıralı Kutuplu Modellerin ANSYS/Maxwell 2D ile Analizi

4 kutup modelinin geleneksel ve sıralı kutuplu modeller için ANSYS Maxwell ile yapılan 2B analiz sonuçları Tablo 3 ile Tablo 7 arasında gösterilmiştir.

Tablo 4. 36/34 oluk/kutup yapısı için analiz sonucu.

	Kutup Yayı Oranı	Faz Akımı (A)	Pcore (W)	Pcu (W)	Tork (Nm)	Açısal Hız (rad/s)	Çıkış (W)	Verim (%)
34 KUTUPLU	GELENEKSEL (NS)							
	0,7	7,530	4,270	41,508	13,086	24,840	325,059	87,655
	0,725	7,257	4,350	38,562	12,786	24,840	317,607	88,097
	0,75	7,021	4,410	36,092	12,492	24,840	310,304	88,455
	0,775	6,875	4,460	34,610	12,318	24,840	305,982	88,677
	0,8	6,842	4,491	34,269	12,157	24,840	304,715	88,727
	0,825	6,818	4,522	34,036	12,246	24,840	304,193	88,751
	0,85	6,844	4,547	34,293	12,276	24,840	304,939	88,702
SIRALI KUTUPLU (N)								
0,7	12,269	3,766	110,203	16,182	24,840	401,972	77,910	
0,725	11,856	3,792	102,904	15,986	24,840	397,106	78,822	
0,75	11,466	3,834	96,251	15,791	24,840	392,241	79,671	
0,775	11,120	3,872	90,535	15,582	24,840	387,059	80,392	
0,8	10,869	3,906	86,490	15,429	24,840	383,270	80,916	
0,825	10,610	3,946	82,415	15,295	24,840	379,923	81,479	
0,85	10,395	3,986	79,112	15,147	24,840	376,248	81,910	

Tablo 4’de kutup yayı oranı arttıkça demir kaybı, giriş ve çıkış gücü ile bakır kaybının azaldığı, çıkış gücü ve çıkış torkunun arttığı görülmektedir. Artış ve azalış açısından yapılan hesaplamalarda, sıralı kutuplu yapıda geleneksel yapıya göre ortalama verimde %10 civarında düşüş yaşansa da; demir kaybının %12 daha düşük, çıkış gücünün %27 ve çıkış torkunun ise %20 daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 5. 36/38 Kutup Oluk yapısı için analiz sonucu.

	Kutup Yayısı Oranı	Faz Akımı (A)	Pcore (W)	Pcu (W)	Tork (Nm)	Açısal Hız (rad/s)	Çıkış (W)	Verim (%)
38 KUTUPLU	GELENEKSEL (NS)							
	0,7	7,780	4,374	44,312	13,422	24,073	323,092	86,905
	0,725	7,424	4,465	40,349	13,026	24,073	313,561	87,495
	0,75	7,042	4,560	36,299	12,875	24,073	309,943	88,353
	0,775	6,868	4,647	34,539	12,380	24,073	298,013	88,379
	0,8	6,698	4,708	32,843	12,188	24,073	293,396	88,653
	0,825	6,565	4,763	31,558	12,054	24,073	290,175	88,875
	0,85	6,499	4,805	30,925	12,000	24,073	288,882	88,993
	SIRALI KUTUPLU (N)							
	0,7	11,5836	4,014	98,220	15,985	24,073	384,812	79,009
0,725	12,0314	3,985	105,980	16,003	24,073	385,240	77,794	
0,75	11,6473	4,014	99,322	15,859	24,073	381,779	78,699	
0,775	11,2973	4,047	93,442	15,693	24,073	377,763	79,487	
0,8	10,9841	4,087	88,333	15,556	24,073	374,470	80,205	
0,825	10,7077	4,118	83,943	15,417	24,073	371,120	80,822	
0,85	10,4727	4,147	80,299	15,309	24,073	368,528	81,357	

Tablo 5’de kutup yayı oranı arttıkça demir kaybı, giriş ve çıkış gücü ile bakır kaybının azaldığı, çıkış gücü ve çıkış torkunun arttığı görülmektedir. Artış ve azalış açısından yapılan hesaplamalarda, sıralı kutuplu yapıda geleneksel yapıya göre ortalama verimde %9,75 civarında düşüş yaşansa da; demir kaybının % 12 daha düşük, çıkış gücünün % 25 ve çıkış torkunun ise %25 daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 6. 36/40 Kutup Oluk yapısı için analiz sonucu.

	Kutup Yayısı Oranı	Faz Akımı (A)	Pcore (W)	Pcu (W)	Tork (Nm)	Açısal Hız (rad/s)	Çıkış (W)	Verim (%)
40 KUTUPLU	GELENEKSEL (NS)							
	0,7	7,678	4,427	43,164	13,408	24,046	322,407	87,137
	0,725	7,307	4,522	39,086	12,977	24,046	312,057	87,739
	0,75	7,017	4,607	36,048	12,607	24,046	303,152	88,175
	0,775	6,739	4,698	33,253	12,255	24,046	294,696	88,591
	0,8	6,509	4,773	31,023	11,961	24,046	287,627	88,932
	0,825	6,335	4,840	29,386	11,736	24,046	282,216	89,184
	0,85	6,222	4,896	28,344	11,588	24,046	278,654	89,342
	SIRALI KUTUPLU (N)							
	0,7	11,857	4,255	102,931	15,731	24,046	378,271	77,921
0,725	11,457	4,269	96,096	15,539	24,046	373,656	78,827	
0,75	11,146	4,287	90,962	15,367	24,046	369,515	79,506	
0,775	10,817	4,308	85,670	15,154	24,046	364,392	80,197	
0,8	10,521	4,330	81,036	14,957	24,046	359,656	80,817	
0,825	10,265	4,342	77,145	14,783	24,046	355,484	81,352	
0,85	10,050	4,353	73,949	14,647	24,046	352,198	81,811	

Tablo 6 ’da kutup yayı oranı arttıkça demir kaybı, giriş ve çıkış gücü ile bakır kaybının azaldığı, çıkış gücü ve çıkış torkunun arttığı görülmektedir. Artış ve azalış açısından yapılan hesaplamalarda, sıralı kutuplu yapıda geleneksel yapıya göre ortalama verimde % 9,47 civarında düşüş yaşansa da; demir kaybının % 8 daha düşük, çıkış gücü ve çıkış torkunun ise %23 daha yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 7. 36/42 Kutup Oluk yapısı için analiz sonucu.

42KUTUPLU	GELENEKSEL (NS)							
	Kutup Yayılı Oranı	Faz Akımı (A)	Pcore (W)	Pcu (W)	Tork (Nm)	Açısal Hız (rad/s)	Çıkış (W)	Verim (%)
	0,7	7,638	4,500	42,712	13,234	24,246	320,869	87,173
	0,725	7,259	4,597	38,577	12,801	24,246	310,376	87,788
	0,75	6,921	4,696	35,065	12,366	24,246	299,834	88,291
	0,775	6,665	4,771	32,525	12,008	24,246	291,141	88,644
	0,8	6,452	4,847	30,480	11,700	24,246	283,686	88,926
	0,825	6,209	4,915	28,227	11,416	24,246	276,785	89,306
	0,85	6,057	4,975	26,858	11,217	24,246	271,976	89,522
	SIRALI KUTUPLU (N)	Kutup Yayılı Oranı	Faz Akımı (A)	Pcore (W)	Pcu (W)	Tork (Nm)	Açısal Hız (rad/s)	Çıkış (W)
0,7		12,614	4,064	116,489	15,737	24,246	381,557	75,991
0,725		12,186	4,091	108,718	15,663	24,246	379,766	77,098
0,75		11,784	4,121	101,669	15,663	24,246	379,766	78,213
0,775		11,464	4,150	96,228	15,467	24,246	375,024	78,886
0,8		11,125	4,185	90,616	15,442	24,246	374,417	79,796
0,825		10,819	4,222	85,701	15,355	24,246	372,307	80,546
0,85		10,710	4,256	83,963	15,288	24,246	370,681	80,776

Tablo 7 'de kutup yayılı oranı arttıkça demir kaybı, giriş ve çıkış gücü ile bakır kaybının azaldığı, çıkış gücü ve çıkış torkunun arttığı görülmektedir. Artış ve azalış açısından yapılan hesaplamalarda, sıralı kutuplu yapıda geleneksel yapıya göre ortalama verimde % 11 civarında düşüş yaşansa da; demir kaybının % 12 daha düşük, çıkış gücü ve çıkış torkunun ise %28 daha yüksek olduğu görülmüştür.

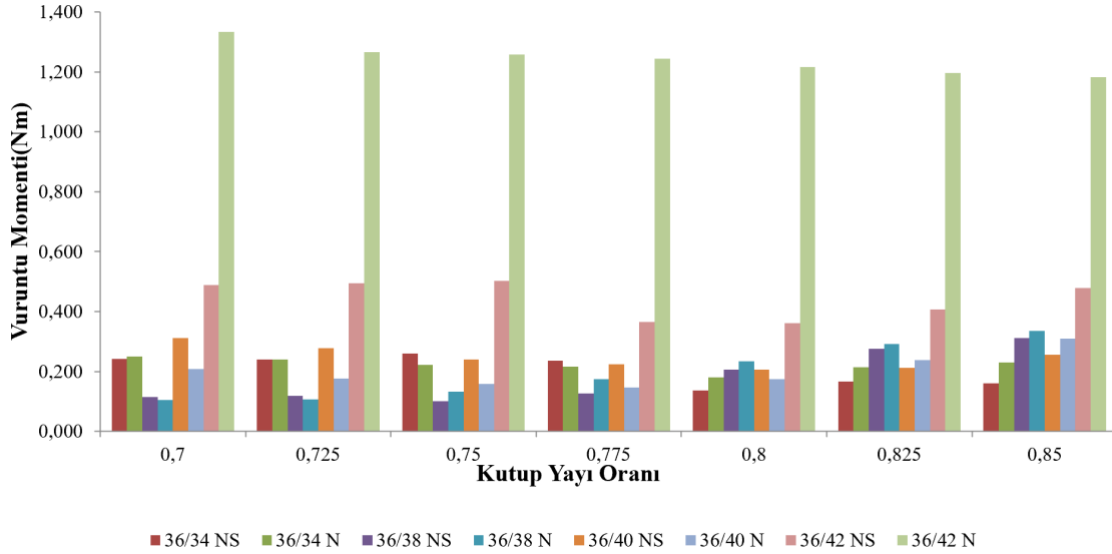
Bu tablolar bir bütün olarak değerlendirildiğinde, geleneksel modelde verim daha yüksek olsa da çıkış gücü ve çıkış torku açısından sıralı kutuplu yapıların daha avantajlı olduğu görülmektedir.

3.3. Seçilen 4 Modelin Vuruntu Momentinin İncelenmesi

4 farklı rotor konfigürasyonun çeşitli kutup yayılı oranlarında hem geleneksel hem de sıralı kutuplu modeller için vuruntu momenti analizi ANSYS/Maxwell 2D ile yapılmış olup, sonuçları Tablo 8'de ve karşılaştırması ise Şekil 5'de gösterilmektedir.

Tablo 8. Farklı kutup yayı oranlarında vuruğu momentleri değeri.

GELENEKSEL (ÇİFT NS)	Kutup Yayı Oranı	EKOK:612	Vuruğu Momenti (Nm)	EKOK:684	Vuruğu Momenti (Nm)	EKOK:360	Vuruğu Momenti (Nm)	EKOK:252	Vuruğu Momenti (Nm)
			0,700		0,2424		0,1153		0,3106
	0,725	0,2394	0,1183	0,2784	0,4952				
	0,750	0,2597	0,1009	0,2390	0,5032				
	0,775	0,2359	0,1258	0,2238	0,3648				
	0,800	0,1357	0,2064	0,2051	0,3617				
	0,825	0,1659	0,2765	0,2115	0,4063				
	0,850	0,1600	0,3111	0,2563	0,4778				
SIRALI KUTUP (TEK N)	Kutup Yayı Oranı	36/34 OLUK/KUTUP MODELİ	Vuruğu Momenti (Nm)	36/38 OLUK/KUTUP MODELİ	Vuruğu Momenti (Nm)	36/40 OLUK/KUTUP MODELİ	Vuruğu Momenti (Nm)	36/42 OLUK/KUTUP MODELİ	Vuruğu Momenti (Nm)
	0,700		0,2495		0,1045		0,2073		1,3333
	0,725		0,2389		0,1058		0,1765		1,2655
	0,750		0,2223		0,1330		0,1579		1,2591
	0,775		0,2164		0,1738		0,1460		1,2450
	0,800		0,1806		0,2333		0,1742		1,2163
	0,825		0,2132		0,2911		0,2372		1,1972
	0,850		0,2298		0,3346		0,3088		1,1828

**Şekil 8.** Vuruğu Momentlerinin Karşılaştırması.

Yukarıdaki şekil ve tablo incelendiğinde; vuruğu momentinin 36/38 oluk/kutup modelinde en düşük olduğu, 36/42 oluk/kutup modelinde ise en büyük olduğu görülmektedir. Vuruğu momentinin Oluk/Kutup sayısının en küçük ortak katıyla ters orantılı olduğundan dolayı 36/42 modelin en küçük ortak katı en küçük olduğundan vuruğu momentinin en büyük değeri almakta, 36/38 modelin ise en küçük ortak katı en büyük olduğundan dolayı vuruğu momentinin en küçük olmaktadır.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada 4 farklı oluk/kutup sayısı kombinasyonlarına sahip dıştan rotorlu geleneksel ve sıralı kutuplu FDAM'ları her biri farklı kutup yayı oranlarında ve farklı sipir sayılarında analitik modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modeller ANSYS Maxwell Rmxprt ve Maxwell 2D programı yardımıyla çözdürülerek verim, çıkış torku, çıkış gücü ve vuruntu momenti gibi çeşitli açılardan incelemeler ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Yapılan benzetim çalışması sonucunda;

- Geleneksel FDAM modeli verim açısından daha avantajlı olsa da sıralı kutuplu modellerin çıkış torku, çıkış gücü açısından daha üstün bir yapıda olduğu,
- Kutup yayı oranı arttıkça hem geleneksel hem de sıralı kutuplu yapılarda demir kaybının ve verimin arttığı, çıkış torku, çıkış gücünün ise azaldığı,
- Vuruntu momenti analizinde, en düşük vuruntu momenti açısından 36 oluk ve 38 kutup sayısına sahip sıralı kutuplu tasarımın ön plana çıktığı görülmüştür.
- Kutup yay oranı arttıkça geleneksel modelle sıralı kutuplu modellerin verimleri arasındaki fark azalmaktadır.

Aynı motor ebatları altında mıknatıs maliyetleri düşünüldüğünde kutup çiftlerinden birinin çelik malzeme olarak kullanılması durumunda motor maliyetini azaltması beklenmektedir. Elde edilen veriler göz önüne alındığında, sıralı kutuplu rotor yapısı kullanmanın hem yüksek çıkış torku hem de yüksek çıkış gücü alınmasında, motorlarda maliyeti arttırmadan vuruntu momentinin kutup yayı oranı değiştirilerek azaltılabileceği görülmüştür. Bu açıdan özellikle mıknatıs maliyetlerindeki artış düşünüldüğünde sıralı kutuplu motor dikkat çekicidir. Geleneksel modele nazaran daha yüksek faz akımı gereksinimi nedeniyle sıralı kutuplu modellerde motorun termal yükleme değeri (Elektriksel Yükleme ve Sargı Akım Yoğunluğu Çarpımı) dikkate alınmalıdır. Ayrıca ilerleyen çalışmalarda Şekil 3'te yer alan yöntemler kullanılarak vuruntu moment değişimi ele alınacaktır.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Bu çalışma birinci yazarın yüksek lisans tez çalışması kapsamında ikinci ve üçüncü yazarın danışmanlığında gerçekleştirilmiştir. 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 University Journal of Sciences and Engineering*. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.889877>
- Akın, F. (2019). *Elektrikli Araçlar İçin Geliştirilen Dış Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motoru Tasarım ve Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- ANSYS Electronics Suite 19.2. Programı
- Arslan, S. (2016). Dalgıç Motorun Analitik, Sayısal, Performans Sonuçlarının Karşılaştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 403-415.
- Aydın, M. (2007). Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Elektrik Motorlarında Vuruntu Moment Minimizasyonu, 12. *Elektrik, Elektronik, Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi ve Fuarı*, 14-18, Kocaeli.
- Bahrim, F. S., Sulaiman, E., Kumar, R., & Jusoh, L. I. (2017, August). New cogging torque reduction methods for permanent magnet machine. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 226, No. 1, p. 012127). Melaka, Malaysia.
- Bianchi, N., & Bolognani, S. (1997). *Brushless dc motor design: an optimisation procedure based on genetic algorithms*.
- Bianchi, N., & Bolognani, S. (1998). Design optimisation of electric motors by genetic algorithms. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 145(5), 475-483.
- Chen, T.-C., Shieh, S. H., & Ren, T.-J. (2017). Torque ripple reduction of brushless DC motor using genetic algorithm. *Proceedings of the 4th international conference on control, dynamic systems, and robotics, Toronto, ON, Canada*, 21-23.
- Chung, S.-U., Kim, J.-M., Koo, D.-H., Woo, B.-C., Hong, D.-K., & Lee, J.-Y. (2012). *Fractional slot concentrated winding permanent magnet synchronous machine with consequent pole rotor for low speed direct drive*. *IEEE transactions on magnetics*, 48(11), 2965-2968.
- Çabuk, A. S., Sağlam, S., & Üstün, Ö. (2019). *Investigation on efficiency of in-wheel BLDC motors for different winding structures*. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(4), 1975-1985.
- Çamcı, H., Mengi, O. Ö., & Arslan, S. (2022). *Çok Amaçlı Genetik Algoritma Yöntemi Kullanılarak Enine Laminasyonlu Senkron Relüktans Motor Optimizasyonu*. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(2), 841-852.
- Çelikel, R. (2017). Yüksek hızlı fırçasız doğru akım motorlarında moment dalgalanmalarını azaltan bir yöntem. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(3), 485-493.
- Ersöz, M., Öner, Y., & Bingöl, O. (2016). *Akı bariyerli TLA tipi senkron relüktans motor tasarımı ve optimizasyonu*. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(4), 941-950
- Fenercioğlu, A., Tarımer, İ. (2007). *Solution processes of a magnetic system's magneto static analysis with Maxwell 3D field simulator*. *Selçuk University Journal of Technical-Online*, ISSN 1302/6178, Vol. 6, No. 3, pp. 221-240, 2007
- Kaymaz, H., & demir, M. F. (2020). Elektrikli Otomobiller için Çekiş Motor Tip Seçimi. *International Periodical of Recent Technologies in Applied Engineering*, 2(1), 35-41.
- Kelek, M. M., Çelik, İ., Fidan, U., & Oğuz, Y. (2019). *The Simulation of mathematical model of outer rotor BLDC motor*. *Simulation*, 2687, 5527.
- Li, F., Wang, K., Li, J., & Zhang, H. J. (2018). Suppression of even-order harmonics and torque ripple in outer rotor consequent-pole PM machine by multilayer winding. *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(11), 1-5.

- Lin, H., Wang, D., Liu, D., & Chen, J. (2014). Influence of magnet shape on torque behavior in surface-mounted permanent magnet motors. *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 44-47. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2014.7013448>
- Liu, S., Yao, X., & Shen, Y. (2021). A Method to Reduce Torque Ripple of Brushless DC Motor. *Journal of Physics: Conference Series*, 1754(1), 012150.
- Mehmet, A. K. A. R., Mustafa, E. K. E. R., & Fazilet, A. K. I. N. (2021). BLDC motor design and application for light electric vehicle. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(2), 326-336.
- Özbay, H., Közkurt, C., Dalcalı, A., & Tektaş, M. (2017). Geleceğin ulaşım tercihi: Elektrikli araçlar. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 3(1), 34-50.
- Ramesh Babu, P., Ramprasath, S., & Paranthagan, B. (2013). Modeling and dynamic simulation of permanent magnet brushless DC motor (PMBLDCM) drives. *Communications in Computer and Information Science*, 296 CCIS. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35864-7_86
- Tosun, Ö. (2021). *Fırçasız Doğru Akım Motorunun Tasarım Çalışması İle Motor Parametrelerinin İyileştirilmesine Katkılar*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ulu, B. (2011). *Fırçasız doğru akım motor (BLDC) hız kontrolü*. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Uygun, D. (2012). 5-Fazlı U-Tipi Segmental Rotorlu Bipolar Uyarımlı 10/8 Anahtarlama Relüktans Motorun Tasarımı Ve Uygulaması, ". *Gazi Üniversitesi*.
- Uygun, D., & Solmaz, S. (2015). Design and dynamic study of a 6 kW external rotor permanent magnet Brushless DC motor for electric drivetrains. *2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, 87-92.
- Xu, M., Liu, G., Zhao, W., & Aamir, N., Minimization of torque ripple in ferrite-assisted synchronous reluctance motors by using asymmetric stator, *AIP Advances*, 8(5), 056606, 2017.
- Yang, H., Zhu, Z.-Q., Lin, H., Li, H., & Lyu, S. (2019). Analysis of consequent-pole flux reversal permanent magnet machine with biased flux modulation theory. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(3), 2107-2121.

Lactarius deliciosus Biyokütlesi ile Sulu Çözeltilerden Oksitetrasiklin Giderimi

Aslı GÖÇENOĞLU SARIKAYA^{1*}, Bilgen OSMAN², Elif TÜMAY ÖZER³

Öz

Artan nüfus ve gelişen teknolojiyle birlikte Dünya genelinde tedavi amaçlı antibiyotik kullanımı oldukça fazladır. Buna bağlı olarak vücutta metabolize olmadan atılan antibiyotik kalıntıları atık sulara karışmakta ve ekolojik olarak büyük bir çevre sorunu haline gelmektedir. Bu çalışmada tetrasiklin grubu antibiyotiklerden biri olan oksitetrasiklinin (OTC) yenilebilir bir mantar türü olan *Lactarius deliciosus*'tan elde edilen biyokütle ile sulu çözeltilerden giderimi araştırılmıştır. Yapısal ve morfolojik olarak karakterize edilen biyokütlenin OTC gideriminde optimum koşullar belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre sulu çözeltilerden OTC giderimi için optimum pH değeri 7.0 bulunurken en yüksek biyosorpsiyon kapasitesi 7 °C'de 300 mg/L başlangıç OTC derişimi için 286.639±2.248 mg/g bulunmuştur. Biyosorpsiyon prosesinin doğasının aydınlatılabilmesi için biyosorpsiyon izotermi ve biyosorpsiyon kinetiği gibi bazı fizikokimyasal parametreler de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre biyosorpsiyonun Freundlich izoterm modeline ve yalancı-ikinci dereceden kinetik modele uyumlu olduğu gözlenmiştir. Ayrıca biyosorbentin tekrar kullanımı da araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre *L. deliciosus* mantarından elde edilen biyokütlenin sulu çözeltilerden OTC gideriminde etkili bir biyosorbent olabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Lactarius deliciosus*, Oksitetrasiklin, Biyosorpsiyon

Removal of Oxytetracycline from Aqueous Solutions by *Lactarius deliciosus* Biomass

Abstract

With the increasing population and developing technology, the use of antibiotics for therapeutic purposes is quite high worldwide. Accordingly, antibiotic residues, which are excreted without being metabolized in the body, are mixed into wastewater and become a major ecological problem. In this study, the removal of oxytetracycline (OTC), one of the tetracycline group antibiotics, from aqueous solutions was investigated with biomass obtained from *Lactarius deliciosus*, an edible mushroom species. The optimum conditions for OTC removal of the biomass characterized structurally and morphologically were determined. According to the obtained data, the optimum pH value for OTC removal from aqueous solutions was found to be 7.0 and the highest biosorption capacity was found to be 286.639±2.248 mg/g for an initial OTC concentration of 300 mg/L at 7 °C. In order to elucidate the nature of the biosorption process, some physicochemical parameters such as biosorption isotherm and biosorption kinetics were also investigated. According to the results obtained, it was observed that biosorption was in accordance with Freundlich isotherm model and pseudo-second-order kinetic model. In addition, the reuse of the biosorbent was also investigated. According to the results obtained, biomass obtained from *L. deliciosus* mushroom is considered to be an effective biosorbent for OTC removal from aqueous solutions.

Keywords: *Lactarius deliciosus*, Oxytetracycline, Biosorption

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Kimya Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi, Bursa, Türkiye, agocenoglu@uludag.edu.tr

²Bursa Uludağ Üniversitesi, Kimya Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi, Bursa, Türkiye, bilgeno@uludag.edu.tr

³Bursa Uludağ Üniversitesi, Kimya Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi, Bursa, Türkiye, etumay@uludag.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0002-7161-7003>

²<https://orcid.org/0000-0001-8406-149X>

³<https://orcid.org/0000-0002-5225-0146>

1. Giriş

Farmasötik, gıda uygulamaları ve veterinerlik alanında oldukça yaygın kullanım alanı bulan antibiyotiklerin kentsel sularda, tarımsal topraklarda, yüzey sularında, yeraltı sularında ve atıksularda artan derişimleri önemli çevre sorunlarına yol açmaktadır (Martinez-Olivas ve ark., 2020; Rakshit ve ark., 2014). Kirleticiler sınıfında yer alan antibiyotiklerin birçoğu vücutta metabolize olamadıkları için aktif formda kalmaktadır (Ruhi ve ark., 2016; Barbooti ve ark., 2014). Tetrasiklin (TC) sınıfına ait antibiyotikler, hem insan hem de hayvan hastalıklarının önlenmesinde yaygın kullanım alanına sahip etkili antibakteriyel maddelerdir (Kulshrestha ve ark., 2004; Rakshit ve ark., 2014). Finlav tarafından 1949 yılında *Streptomyces rimosus* kültüründen elde edilen oksitetrasiklinler (OTC) hayvanlarda ve insanlarda çeşitli enfeksiyonların tedavisinde en çok kullanılan tetrasiklin sınıfında yer alan antibiyotiklerdir. OTC'nin düşük derişimleri hem insanlar hem de sucul ekosistem üzerinde zararlı ve toksik etkilere yol açmaktadır (Fu ve ark., 2016). Bu nedenle çevresel sulardan uzaklaştırılmaları oldukça önemlidir.

Günümüzde atık sulardan TC sınıfına ait antibiyotiklerin uzaklaştırılmasında fotokatalitik degradasyon, koagülasyon, elektrokimyasal işlem, filtrasyon, iyon değişimi, ozonlama, sedimentasyon ve sorpsiyon gibi birçok farklı yöntem kullanılmaktadır (Pan ve ark., 2015; Göçenoğlu Sarıkaya ve Osman, 2021). Diğer yöntemlere kıyasla ucuz, yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip, etkinliğinin yüksek, işlem süresinin kısa ve çevre dostu olması nedeniyle sorpsiyon yöntemi son yıllarda tetrasiklin sınıfı antibiyotiklerin uzaklaştırılmasında oldukça yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır (Alvarez-Torrellas ve ark., 2016; Zhang ve ark., 2020).

Biyosorpsiyon, kirleticilerin biyolojik kökenli sorbente (biyokütle) bağlanarak uzaklaştırıldığı basit, ekonomik ve çevre dostu bir süreçtir. Biyosorbent olarak kullanılan biyokütlenin canlı ya da ölü olması durumuna göre işlem aktif ya da pasif olarak tanımlanmaktadır. Ölü biyokütlenin kullanıldığı durumlarda kirleticiler metabolizmadan bağımsız olarak iyonik, fiziksel veya kimyasal mekanizma yoluyla biyokütleyle bağlanmaktadır. Biyoakümülyasyon, biyodegradasyon ya da biyotransformasyon işlemlerinin gerçekleştiği metabolizmaya bağımlı sorpsiyon işleminde kullanılan canlı hücreler çevre koşullarından olumsuz etkilenebilmektedir. Bu nedenle herhangi bir bakım gerektirmeyen, tekrar kullanıma olanak sağlayan ve etkinlik kaybı olmadan uzun süre saklanabilen biyokütlelerin kullanımı önemli bir avantaja sahiptir (Torres, 2020). Bitki kaynaklı malzemeler (Franco ve ark., 2020; Medhi ve ark., 2020; Wang ve Huang, 2020), çamur (Taki ve ark., 2019; Kulkarni ve ark., 2019), tarımsal-endüstriyel atık malzemeler (Carvalho ve ark., 2020), biyopolimerler (Zhang ve ark., 2020) ve çeşitli mikroorganizma (bakteri, mantar, alg, maya) türleri birçok kirletici türüne karşı biyosorbent olarak kullanım alanı bulmaktadır. Mantarların, hücre duvarlarında çeşitli fonksiyonel gruplar içermeleri nedeniyle biyosorbent olarak kullanımları oldukça

uygundur. Kolay temin edilebilmeleri, yüksek verimle büyük ölçekte yetiştirilme kolaylığı ve ucuz olmaları gibi birçok avantaja sahiptir (El-Naggar ve ark., 2018). Özellikle mantarların kullanıldığı pasif biyosorpsiyon çalışmalarında atık sulardan çeşitli toksik bileşiklerin ya da ağır metallerin gideriminde oldukça fazla çalışma mevcuttur (Paria ve ark., 2022). 2023 yılında yapılan bir çalışmada *Cladosporium* sp. NRCA8 biyokütlesi Pb^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} ve Mn^{2+} gideriminde kullanılabilirliği araştırılmış ve yüzde giderimin % 43.25-%91.72 aralığında olduğu rapor edilmiştir (El-Gendy ve ark., 2023). Singh ve Dwivedi tarafından yapılan bir başka çalışmada *Aspergillus niger* biyokütlesi ile Congo Red boyar maddesinin biyosorpsiyonu çalışılmış ve 4 g/L biyokütlenin kullanıldığı proseste boyar maddenin 72 saatte % 86.84 oranında giderildiği bildirilmiştir (Singh ve Dwivedi, 2022). Fungal biyokütlelerin kullanıldığı bir başka çalışmada bleomisin ve vinkristin ilaçlarının gideriminde beş farklı mantar (*Fomes fomentarius*, *Hypholoma fasciculare*, *Phyllotopsis nidulans*, *Pleurotus ostreatus*, *Trametes versicolor*) kullanılmış ve elde edilen sonuçlara göre bleomisin için %en yüksek giderim % 38 (*Fomes fomentarius*) oranında bulunurken, vinkristin için % 17 (*Trametes versicolor*) bulunmuştur (Jureczko ve Przystas, 2021).

Bu çalışmada Russulaceae ailesinden yenilebilir yabani bir mantar türü olan *Lactarius deliciosus*'tan elde edilen biyokütlenin sulu çözeltilerden OTC gideriminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Biyosorbent miktarı, ortam pH'ı, başlangıç OTC derişimi, sıcaklık ve sürenin optimize edilmesinin ardından kinetik ve izoterm parametreleri hesaplanmış, biyosorbentin karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

Oksitetrasiklin (OTC) Sigma (St. Louis, USA), HCl (% 37) ve NaOH (\geq % 98) Merck (Darmstadt, Germany) firmasından temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan diğer kimyasallar analitik derecededir. Stok OTC çözeltisi 500 mg/L olarak hazırlanmış, çalışmalarda kullanılacak farklı derişimlerdeki çözeltiler hazırlanan stok çözeltiden ultra saf su ile (ELGA PURELAB Flex-3, UK) seyreltilerek hazırlanmıştır. pH ayarlamaları için 0.1 N HCl ve 0.1 N NaOH çözeltileri kullanılmıştır. Stok OTC çözeltisi her çalışmada taze hazırlanmış, diğer çözeltiler ise 7 günlük periyotlar halinde hazırlanarak +4 °C'de muhafaza edilmiştir.

Biyosorbent olarak kullanılan *L. deliciosus* yerel üreticiden (Karen Organik Mantar, Türkiye) temin edilmiştir. Mantarın tür tanımlanması Ege Üniversitesi Biyoloji Bölümü tarafından gerçekleştirilmiştir.

2.2. Biyosorbentin Hazırlanması ve Karakterizasyonu

Biyosorbentin hazırlanması aşamasında *L. deliciosus* ilk önce destile su ile 3 defa yıkanmış, daha sonra 353K sıcaklıkta etüvde kurutulmuştur. Kurutulan biyokütle homojenizatörde (IKA Ultra Turrax) parçalandıktan sonra eleklerden (Retsch Gmb & Co., KG, Haan, Germany) geçirilerek farklı boyutlarda (212-710 µm) elde edilmiştir. Ön denemelerden elde edilen verilere göre 300-425 µm boyut aralığındaki biyokütlelerin daha etkin sonuç vermesi nedeniyle (veriler verilmemiştir) daha sonraki biyosorpsiyon çalışmalarında kullanılmak üzere 300-425 µm boyut aralığındaki biyokütleler cam kavanozlarda muhafaza edilmiştir.

Biyosorbentin fonksiyonel gruplarının belirlenebilmesi ve kimyasal yapısının aydınlatılabilmesi için biyosorpsiyon öncesi ve biyosorpsiyon sonrası Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrometresi ile FTIR analizi gerçekleştirilmiştir (Perkin Elmer, Spectrum 100, USA). Biyosorbentin morfolojik özelliğinin belirlenmesi için biyosorpsiyon öncesi ve biyosorpsiyon sonrası taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile SEM görüntüleri alınmıştır (ZEISS EVO 40, Carl Zeiss AG, Germany).

2.3. Biyosorpsiyon Çalışmaları

Biyosorpsiyon çalışmaları 100 mL'lik erlenlerde 50 mL çalışma hacminde gerçekleştirilmiştir. Kesikli çalışma sisteminde ilk önce uygun biyosorbent miktarı (0.01-0.1 g) belirlenerek, pH değeri (3.0-8.0), başlangıç OTC derişimi (30-300 mg/L), ortam sıcaklığı (7-25 °C) ve biyosorpsiyon süresi (2-120 dakika) optimize edilmiştir. Deneysel çalışmalar 3 kez tekrarlanmıştır. Biyosorpsiyon kapasitesi (q_e) Denklem 1'e göre hesaplanmıştır (Göçenoğlu Sarıkaya, 2022):

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (1)$$

Denklemden C_0 değeri başlangıç OTC derişimini (mg/L), C_e değeri denge halindeki OTC derişimini (mg/L), V çözeltinin toplam hacmini (mL), m ise kullanılan biyokütle miktarını (g) vermektedir. Toplanan örnekler filtreden geçirildikten sonra renk ölçümü spektrofotometre (Shimadzu-2100 UV-vis spectrophotometer) ile gerçekleştirilmiştir (λ_{max} : 276 nm).

2.4. Desorpsiyon ve Tekrar Kullanım

Biyosorbentin tekrar kullanımının aydınlatılabilmesi için desorpsiyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Desorpsiyon ajanı olarak 0.1 N HCl, 0.1 N NaOH ve 0.1 N HNO₃ kullanılmıştır. Desorpsiyon verimi Denklem 2'ye göre hesaplanmıştır (Göçenoğlu Sarıkaya ve Osman, 2021):

$$\text{Desorpsiyon oranı} = \frac{Q_d}{Q_b} \times 100 \quad (2)$$

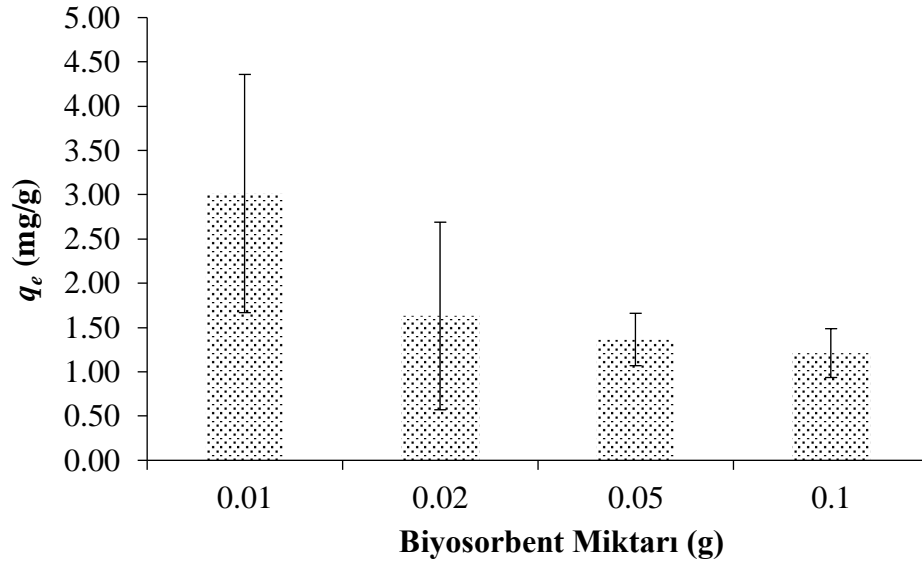
Denklemden C_d desorpsiyon ortamındaki OTC derişimini (mg/L), C_b ise biyosorbent tarafından biyosorbe edilen OTC derişimini (mg/L) vermektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Biyosorpsiyon çalışmaları

3.1.1. Biyosorbent miktarının biyosorpsiyon üzerine etkisi

Biyosorbent miktarının OTC biyosorpsiyonu üzerine etkisinin incelenmesi için 0.01, 0.02, 0.05 ve 0.1 g *L. deliciosus* biyokütlesi kullanılmıştır. Toplam hacim 50 mL başlangıç OTC derişimi 20 mg/L olacak şekilde kesikli sistemde oda sıcaklığında 250 rpm karıştırma hızında 2 saat süreyle biyosorpsiyon gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 1'de gösterilmiştir. Biyosorbent miktarının artmasıyla biyosorpsiyon kapasitesinde azalma gözlenmiştir, bunun nedeni biyosorbent yüzeyinde bulunan bağlanmadan sorumlu aktif bölgelerin yeterli doygunluğa ulaşamaması şeklinde yorumlanabilir (Göçenoğlu Sarıkaya, 2022). Elde edilen verilere göre, en yüksek biyosorpsiyon kapasitesi (q_e) 0.01 g biyosorbentin kullanıldığı koşullar olarak belirlenmiştir (3.01±1.35 mg/g). Biyosorbent miktarı olarak 0.02 g biyokütlenin kullanıldığı koşulda q_e 1.63±1.06 mg/g bulunurken, 0.05 g ve 0.1 g biyosorbentin kullanıldığı koşullarda q_e değerleri sırasıyla 1.36±0.30 mg/g ve 1.21±0.28 mg/g olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre daha sonraki biyosorpsiyon çalışmalarında biyosorpsiyon kapasitesinin en yüksek gözleendiği 0.01 g biyosorbent miktarı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 2023 yılında yapılan bir çalışmada, mezogözenekli yapıya sahip lignin içerikli karbon ile OTC gideriminde, biyosorbent miktarı arttıkça q_e değerinin ters orantılı olarak düştüğü rapor edilmiştir (Zhou ve ark., 2023).

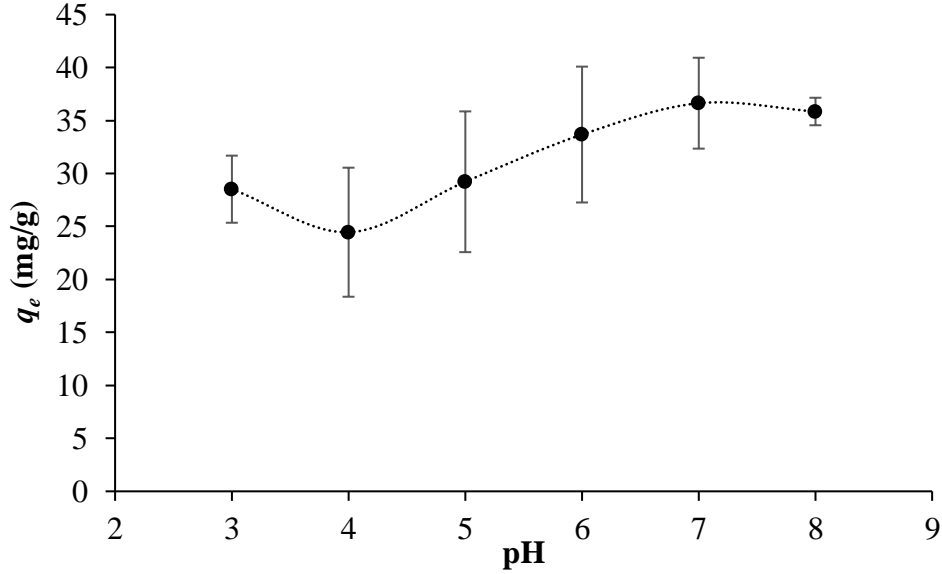


Şekil 1. Biyosorbent miktarının biyosorpsiyon üzerine etkisi

3.1.2. Ortam pH değerinin biyosorpsiyon üzerine etkisi

Biyosorpsiyon prosesinde en önemli parametrelerden birisi ortamın pH değeridir. Ortamın pH değeri hem kullanılan biyosorbentin üzerinde bulunan fonksiyonel grupların, hem de ortamdan uzaklaştırılması istenen iyonların yükünü değiştirmektedir. Fungal kaynaklı biyosorbentlerde hücre yüzeyinde etkileşimin olduğu fonksiyonel gruplar olan amino, karboksil ve hidroksil grupları ortam pH değerine bağlı olarak iyonlaşabilmektedir (Anayurt ve ark., 2009, Nagy ve ark., 2013). Amfoterik bir yapısı olan OTC’de asit/baz-aktif fenolik hidroksil ve amin gruplarının varlığı nedeniyle OTC’nin farklı çözelti pH’larında farklı iyonik türleri bulunmaktadır. OTC molekülü, çözelti pH’ına bağlı olarak üç asit ayrışma sabitine (pK_a : 3.57; 7.49 ve 9.44) sahiptir (Sassman ve Lee, 2005). En uygun pH değerinin bulunabilmesi için biyosorpsiyon çalışmaları pH 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0 ve 8.0 değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma koşulları toplam çözelti hacmi 50 mL olacak şekilde 100 mL’lik erlenlerde başlangıç OTC, derişimi 100 mg/L, biyosorbent miktarı 0.01 g, 25 °C’de 250 rpm karıştırma hızında 2 saat olarak ayarlanmıştır. Elde edilen veriler Şekil 2’de gösterilmiştir. OTC için en yüksek biyosorpsiyon kapasitesi (q_e) pH 7.0’de 36.637 ± 4.290 mg/g bulunmuştur. Artan pH değerine bağlı olarak q_e değeri artmış, pH 7’de maksimum biyosorpsiyon kapasitesine ulaşmış, pH 8.0’de ise çok büyük bir fark gözlenmemiştir. Elde edilen verilere göre OTC ile biyosorbent arasında gerçekleşen sorpsiyon mekanizmasının yüzey kompleksleşmesi, OTC molekülleri ve biyosorbentin yüzeyindeki -OH grupları arasında van der Waals kuvvetleri çekimi ve H-bağı gibi fiziksel mekanizmaların biyosorpsiyonda etkin olabileceği düşünülmektedir. Benzer şekilde OTC’nin hidroksiapatit üzerine adsorpsiyonu çalışmasında asidik pH’larda q_e değerinin düşük çıktığı, pH 7-8 aralığında ise en yüksek q_e değerinin elde edildiği rapor edilmiştir (Harja ve Ciobanu, 2018). 2019 yılında yapılan bir başka çalışmada ise, kaolinit üzerine OTC biyosorpsiyonunda en yüksek

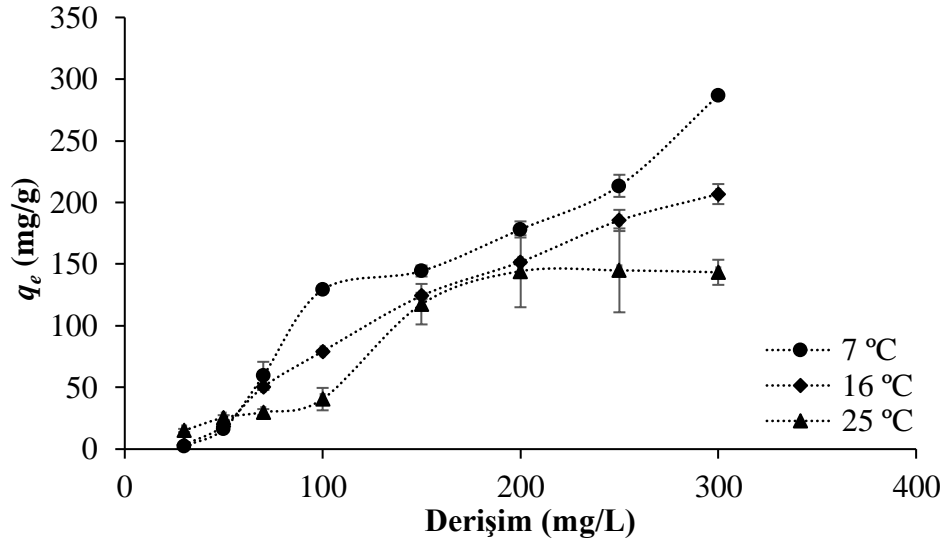
biyosorpsiyon kapasitesinin OTC'nin zwitteriyon formundaki pH aralığında olduğu rapor edilmiştir (Song ve ark., 2019).



Şekil 2. pH değerinin biyosorpsiyon üzerine etkisi

3.1.3. Başlangıç OTC derişiminin ve ortam sıcaklığının biyosorpsiyon üzerine etkisi

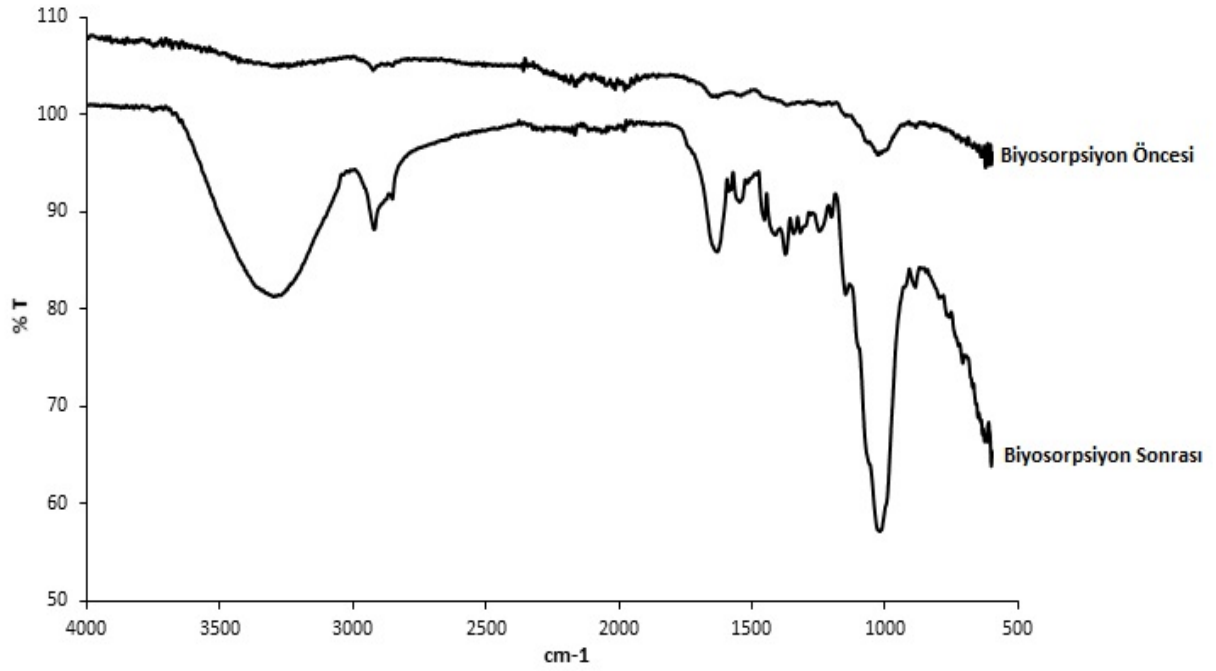
Biyosorpsiyon üzerine başlangıç OTC derişiminin etkisinin araştırılması için 30-300 mg/L derişim aralığında çalışılmıştır. Biyosorpsiyon koşulları 0.01 g biyosorbent miktarı, toplam çalışma hacmi 50 mL, 250 rpm karıştırma hızı ve 2 saatlik biyosorpsiyon süresi olarak ayarlanmıştır. Biyosorpsiyon sıcaklığı olarak 7, 16 ve 25 °C'de biyosorpsiyon prosesi gerçekleştirilmiştir. Daha yüksek sıcaklıklarda OTC'nin biyosorpsiyon miktarındaki azalma, biyosorbent üzerine OTC'nin sorpsiyon mekanizmasının ekzotermik olduğunu göstermektedir (Yeşilova ve ark., 2018; Göçenoğlu Sarıkaya ve Osman, 2021). Elde edilen veriler Şekil 3'te gösterilmiştir. Elde edilen verilere göre 30 mg/L başlangıç OTC derişimi için q_e değerleri 7 °C'de 2.431 ± 1.178 mg/g iken, 16 ve 25 °C için sırasıyla 3.476 ± 0.391 mg/g ve 15.111 ± 1.317 mg/g bulunmuştur. Düşük başlangıç OTC derişimi için sıcaklığın artmasıyla q_e değerinde artış gözlenirse de, derişimin artmasına bağlı olarak biyosorpsiyon mekanizmasının ekzotermik olduğu gözlenmiştir. Örneğin 100 mg/L başlangıç OTC derişimi için 25 °C'de maksimum biyosorplama kapasitesi 40.563 ± 9.089 mg/g, 16 °C'de 79.246 ± 0.934 mg/g, 7 °C'de ise 129.204 ± 0.407 mg/g bulunmuştur. Yüksek OTC derişimlerinde sulu çözeltideki OTC iyonları ile biyosorbentin fonksiyonel grupları arasındaki temas olasılığının artmasından dolayı biyosorbentin q_e değerinde de artış gözlenmektedir. 300 mg/L OTC için 7, 16 ve 25 °C'de q_e değeri sırasıyla 286.639 ± 2.248 mg/g, 206.792 ± 2.775 mg/g ve 143.360 ± 10.176 mg/g olarak bulunmuştur. Sıcaklığın artmasıyla q_e değerinde azalma gözlenmektedir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre OTC biyosorpsiyon mekanizmasının ekzotermik karakterde olduğu söylenebilir.



Şekil 3. Başlangıç OTC derişiminin ve sıcaklığın biyosorpsiyon üzerine etkisi

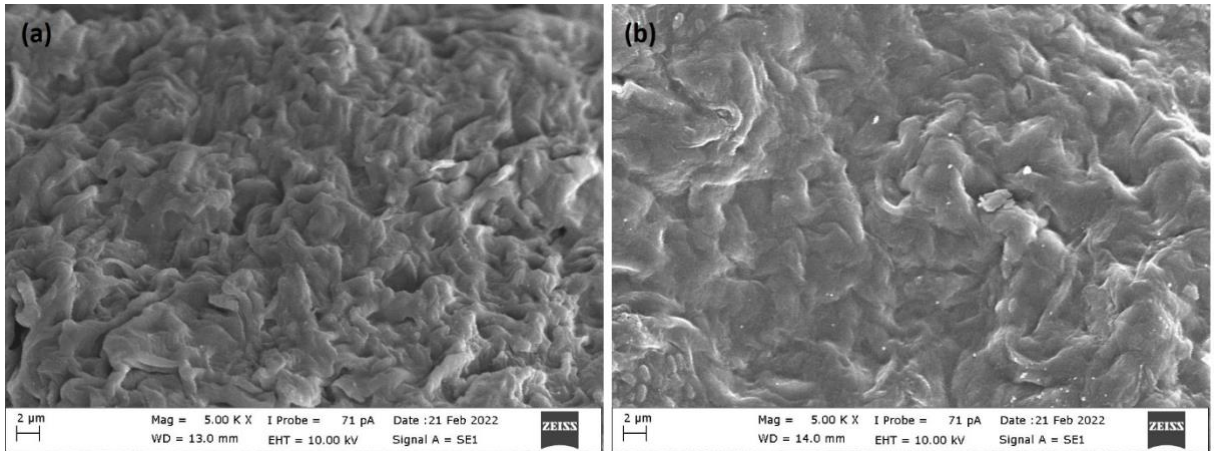
3.2. Biyosorbentin Karakterizasyonu

Biyosorbentin biyosorpsiyon öncesinde ve sonrasında FTIR spektrumu alınarak, biyosorpsiyon için etkili olan fonksiyonel gruplar incelenmiş ve aydınlatılmaya çalışılmıştır. Şekil 4'te biyosorbente ait biyosorpsiyon öncesi ve biyosorpsiyon sonrası FTIR spektrumları verilmiştir. Elde edilen verilere göre $3270-3280\text{ cm}^{-1}$ aralığında yer alan bantlar bağlanmış -OH ve -NH gerilme titreşimlerini, 2917 cm^{-1} 'de görülen bantlar ise C-H gerilmesini göstermektedir. 1371 cm^{-1} ve 1029 cm^{-1} 'de gözlenen pikler ise sırasıyla -COO gerilmesi, -C-O- ve -C-N- gruplarını göstermektedir. 1547 cm^{-1} 'de gözlenen pik N-H bozulmasını gösterirken 1631 cm^{-1} 'de gözlenen pik ise karboksilat (Göçenoğlu ve Erden 2020; Bayramoğlu ve ark., 2009; Bayramoğlu ve Arica, 2008) ya da birincil aminleri (Puchana-Rosero ve ark. 2017) göstermektedir. Elde edilen FTIR spektrum sonuçlarına göre, karboksil, hidroksil ve amin gibi radikal grupların varlığı, membran bileşenlerinin ve mikrobiyal hücre duvarının OTC'nin biyosorpsiyonunda önemli bir rol oynadığının kanıtıdır. OTC biyosorpsiyonundan sonra elde edilen spektrum, farklı yoğunluk ve formlarda benzer tepe noktalarının varlığını (Kirova ve ark., 2021) ve OTC ile etkileşimin olduğu fonksiyonel gruplara ait bantların pozisyonlarında değişiklikler olduğunu (Puchana-Rosero ve ark. 2017) ortaya koymaktadır. Biyosorpsiyon sonrası absorpsiyon bantlarında güçlü kaymaların olmaması ve tepe noktalarında yoğunluk artışı da biyosorbente OTC'nin bağlandığının bir kanıtı olarak düşünülebilir (Akar ve ark., 2009).



Şekil 4. Biyosorbentin biyosorpsiyon öncesi ve sonrası FTIR spektrumları

Biyosorbentin yüzey morfolojisinin belirlenebilmesi için biyosorpsiyon öncesi ve sonrasında biyosorbentin SEM görüntüleri alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre biyosorbentin yüzey alanının oldukça geniş ve çok sayıda boşluğa sahip sağlam bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir, bu da biyosorpsiyonun daha kolay olabileceğinin bir göstergesidir (Nagy ve ark., 2013). Şekil 5'te görüldüğü gibi biyosorpsiyon öncesi gözenekli ve daha pürüzlü olan yüzey, biyosorpsiyondan sonra OTC ile etkileşime geçerek daha homojen ve pürüzsüz bir hale gelmiştir. Bu da sorbatın biyosorbentin aktif bölgelerine bağlanarak yapısını değiştirdiğinin bir göstergesidir (Isik ve ark., 2021).



Şekil 5. Biyosorbentin biyosorpsiyon öncesi (a) ve sonrası (b) SEM görüntüsü

3.3. Biyosorpsiyon İzotermi

L. deliciosus biyokütlesi ve OTC iyonları arasındaki etkileşim mekanizmasının aydınlatılabilmesi için Langmuir (Langmuir, 1918), Freundlich (Freundlich, 1906) ve Dubinin-Radushkevich (D-R) (Dubinin ve Radushkevich, 1947) izoterm modelleri kullanılmıştır. Langmuir izoterm modeli tek tabakalı ve sınırlı bir biyosorpsiyon alanına sahipken (Langmuir, 1918) Freundlich izoterm modeli ise heterojen bir yüzey alanında farklı sorpsiyon enerjilerine sahip olan bağlanma olaylarını göstermektedir (Freundlich, 1906). D-R izoterm modelinde ise heterojen yüzeylerde gerçekleşen biyosorpsiyon olayının aydınlatılmasında biyosorbentün gözenekli yapıları da dikkate alınmaktadır (Dubinin ve Radushkevich, 1947). Langmuir izotermi Denklem 3'e göre hesaplanmıştır:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_L K_L} + \frac{C_e}{Q_L} \quad (3)$$

Denklemdaki C_e (mg/L), q_e (mg/g), Q_L ve K_L değerleri sırasıyla OTC biyosorpsiyonundan sonra çözültide bulunan OTC derişimi, biyosorbe olan OTC miktarı, en yüksek biyosorpsiyon kapasitesi ve Langmuir sabitidir. Q_L ve K_L değerleri C_e 'ye karşı çizilen C_e/q_e grafik denkleminden hesaplanmıştır. Langmuir sabiti kullanılarak biyosorbentün sorbat için uygunluğunu belirlemek amacıyla Hall ayırma faktörü (R_L , boyutsuz) (Denklem 4) hesaplanabilir (Hall ve ark., 1966).

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_o} \quad (4)$$

Denklemdaki K_L Langmuir sabiti, C_o (mg/L) ise en yüksek başlangıç OTC derişimidir. Freundlich izotermi Denklem 5'e göre hesaplanmıştır:

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (5)$$

Denklemden yer alan K_F (mg/L) ve n değerleri sırasıyla biyosorpsiyon kapasitesini ve Freundlich sabitini vermektedir. K_F ve n değerleri, $\ln q_e$ 'ye karşı çizilen $\ln C_e$ grafiğinden elde edilen verilere göre hesaplanmıştır.

D-R izotermi Denklem 6'ya göre hesaplanmıştır:

$$\ln Q_e = \ln Q_{D-R} - \beta \varepsilon^2 \quad (6)$$

Denklemden yer alan Q_e (mg/g), Q_{D-R} (mg/g), β (mol²/J²) ve \mathcal{E} (J/mol) değerleri sırasıyla biyosorbe olan OTC miktarını, en yüksek biyosorpsiyon kapasitesini, D-R sabitini, Polanyi potansiyelini vermektedir. \mathcal{E} değeri Denklem 7’de verilen denklem yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon = RT \ln \left(1 + \frac{1}{C_e} \right) \quad (7)$$

Denklemden yer alan R (J/mol K), T (K) ve C_e (mg/L) değerleri sırasıyla evrensel gaz sabitini, biyosorbentin denge durumundaki derişimini ve sıcaklığı vermektedir. Ortalama biyosorpsiyon enerjisinin (E_{fe} , kJ/mol) hesaplanmasıyla biyosorpsiyon prosesinin kimyasal ($8 \text{ kJ/mol} < E_{fe} < 16 \text{ kJ/mol}$) ya da fiziksel ($E_{fe} < 8 \text{ kJ/mol}$) özellikte olduğu belirlenmektedir (Denklem 8).

$$E_{fe} = \frac{1}{\sqrt{-2\beta}} \quad (8)$$

İzoterm modellerine ait parametreler Tablo 1’de gösterilmektedir. R_L değerinin 0 ile 1 arasında olması, biyosorpsiyon işleminin uygun olduğunu göstermektedir (Hall ve ark., 1966). Bu çalışmada R_L değerleri 7.129×10^{-6} ile 1.549×10^{-5} aralığında çıktığı için OTC’nin biyosorbent üzerine biyosorpsiyonunun elverişli olduğunu göstermektedir. Tek tabakalı ve sınırlı bir biyosorpsiyon alanı sunan Langmuir izoterm modelinde R^2 değerleri sıcaklığın artmasıyla artmakta ve yüksek sıcaklıklarda biyosorpsiyon mekanizmasının Langmuir izoterm modeline uyumlu olduğu sonucuna varılabilir fakat hesaplanan Q değerleri ile deneysel q_e değerleri kıyaslandığında, biyosorbentin biyosorpsiyon kapasiteleri her üç sıcaklıkta da birbirinden oldukça farklı çıkmakta ve Langmuir izoterm modeline uygun olmadığı görülmektedir. Freundlich izoterm modelinde ise heterojen yüzeyler için çok tabakalı bir izoterm modeli önerilmektedir. n değeri 1’den küçük olduğunda biyosorbentin heterojen yüzeylerinin eklenen sorbatlara zayıf serbest enerjiler tarafından bağlandığını ve böylece sorpsiyonun esas olarak fiziksel sorpsiyon tarafından yönetildiğini göstermektedir (Dror ve ark., 2010; Jia ve ark., 2013). Elde edilen verilere göre OTC biyosorpsiyonunun sıcaklığın artmasına bağlı olarak Freundlich izoterm modeline daha uygun olduğu belirlenmiştir. D-R izotermine göre 8 kJ/mol değerinin altındaki E_{fe} değerleri fiziksel sorpsiyonun olduğunu (Mostafapous ve ark., 2022) ve yüksek R^2 değerlerinin enerji dağılımının ve biyosorbentin yüzey

özelliklerinin sorpsiyonda önemli bir rol oynadığını göstermektedir (Mirizadeh ve ark., 2023). Ayrıca D-R izotermde hesaplanan E_{fe} değerlerine göre biyosorpsiyonun fiziksel özellikte olduğunu ve bağlanmanın heterojen yüzeylerde gerçekleştiğini göstermektedir. Mirizadeh ve arkadaşları tarafından 2023 yılında yapılan bir çalışmada ham hurma atığı üzerine tetrasiklin sorpsiyonu için elde edilen verilere göre (E_{fe} : 0.247 kJ/mol) biyosorpsiyonun heterojen yüzeylerde fiziksel sorpsiyon şeklinde olduğu bildirilmiştir (Mirizadeh ve ark., 2023). 2023 yılında yapılan bir başka çalışmada ise biyokömür ile OTC'nin adsorpsiyon mekanizmasının Freundlich izoterm modeline daha uygun olduğu rapor edilmiştir (Wei ve ark., 2023).

Tablo 1. İzoterm modellerine ait parametreler

	Sıcaklık		
	280K	289K	298K
q_e (deneysel) (mg/g)	129.036	82.748	41.456
Langmuir İzoterm Modeli			
$K_L \times 10^2$ (L/mg)	255.4	529.875	58.80
Q (mg/g)	1.958	1.179	3.092
R^2	0.653	0.849	0.936
R_L	1.549×10^{-5}	7.129×10^{-6}	6.871×10^{-5}
Freundlich İzoterm Modeli			
K_F (L/mg)	0.022	0.032	0.31
n	0.562	0.605	0.872
R^2	0.798	0.874	0.937
Dubin-Radushkevich İzoterm Modeli			
Q_{D-R} (mg/g)	215.638	157.480	94.977
K_{D-R} (mol ² /J ²)	0.7×10^{-3}	0.6×10^{-3}	0.3×10^{-3}
E_{fe} (kJ/mol)	0.0267	0.0288	0.0408
R^2	0.978	0.961	0.631

3.4. Biyosorpsiyon Kinetiği

Biyosorpsiyon kinetiğinin aydınlatılabilmesi için yalancı-birinci derece ve yalancı-ikinci derece kinetik modellerinden yararlanılmıştır. Yalancı-birinci derece kinetik model Lagergren'in birinci derece hız denkleminde belirlenmektedir (Lagergren, 1898) (Denklemler 9).

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (9)$$

Denklemlerde yer alan q_e (mg/g), q_t (mg/g), k_1 (1/dk) ve t (dk) değerleri sırasıyla biyosorbent tarafından denge durumunda biyosorbe edilen OTC miktarını, herhangi bir t anında biyosorbent

tarafından biyosorbe edilen OTC miktarını, yalancı-birinci dereceden hız sabitini ve zamanı vermektedir. $\ln(q_e - q_t)$ 'ye karşı t grafiğinden k_1 ve q_e değerleri hesaplanmaktadır.

Bazı durumlarda yalancı-birinci dereceden kinetik model tüm biyosorpsiyon kinetiğinin hesaplanmasında yetersiz kaldığı için yalancı-ikinci dereceden kinetik modele ihtiyaç duyulmaktadır (Ho ve McKay, 1999). (Denklem 10).

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (10)$$

Denklemden yer alan q_e (mg/g), q_t (mg/g), k_2 (g/mg dk) ve t (dk) değerleri sırasıyla biyosorbent tarafından denge durumunda biyosorbe edilen OTC miktarını, herhangi bir t anında biyosorbent tarafından biyosorbe edilen OTC miktarını, yalancı-ikinci dereceden hız sabitini ve zamanı vermektedir. t/q_t 'ye karşı t grafiğinden k_2 ve q_e değerleri hesaplanmaktadır.

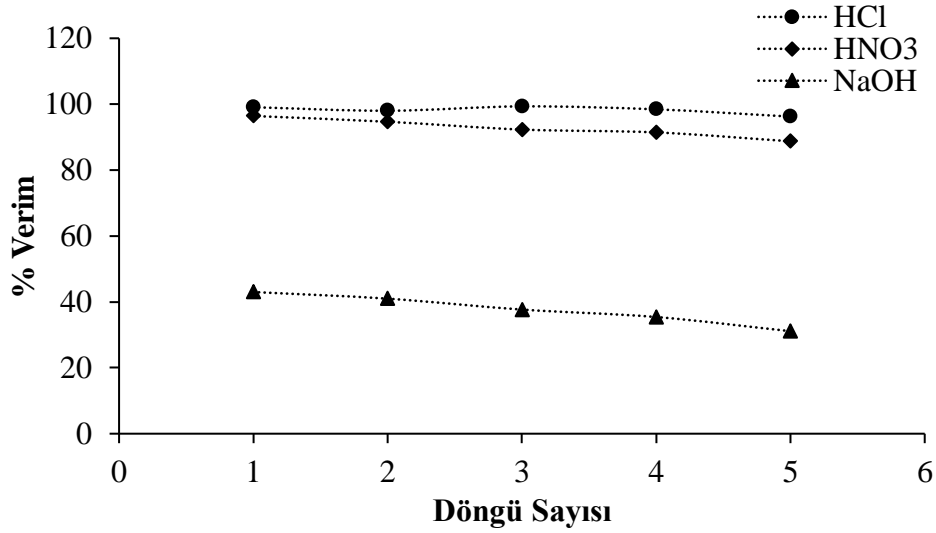
OTC için biyosorpsiyon kinetiğinin her üç sıcaklık değeri için yalancı-ikinci dereceden kinetik modele uyumlu olduğu gözlenmiştir (Tablo 2). Deneysel biyosorpsiyon kapasiteleri ile hesaplanan biyosorpsiyon kapasiteleri yalancı-ikinci derece kinetik modelde birbirine yakın çıkmıştır. 2013 yılında OTC'nin sorpsiyonu için mısır samanından türetilen biyokömür biyosorbent olarak kullanılmış ve elde edilen sonuçlara göre biyosorpsiyon kinetiğinin yalancı-ikinci derece kinetik modele daha uyumlu olduğu rapor edilmiştir (Jia ve ark., 2013). Kirova ve arkadaşları (2021) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise tetrasiklinin sulu çözeltilerden gideriminde *Streptomyces fradiae* biyokütlesi kullanılmış ve elde edilen verilere göre biyosorpsiyon kinetiğinin yalancı-ikinci derece kinetik modele daha uyumlu çıktığı rapor edilmiştir (Kirova ve ark., 2021). Yalancı-ikinci derece kinetik modelin en büyük avantajı deneysel kinetik verilerin tamamını tanımlamada oldukça doğru sonuçlar vermesidir (Erşan, 2016). Mirizadeh ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada ponza taşı üzerine tetrasiklin sorpsiyonu için yalancı-ikinci dereceden kinetik modele uyumlu olduğu ve sorpsiyonun sorbentin belirli bölgelerinde kompleksleşme reaksiyonu şeklinde gerçekleştiği rapor edilmiştir (Mirizadeh ve ark., 2023). OTC biyosorpsiyonunun yalancı-ikinci derece kinetik modele uyumlu olması, OTC biyosorpsiyonunun muhtemelen belirli biyosorpsiyon bölgelerinde yüzey kompleksleşme reaksiyonları (Güler ve Sarioglu, 2014), OTC ve biyokütle arasında elektronların paylaşılmasını veya değişimini gösteren kemisorpsiyon veya kimyasal etkileşimler tarafından kontrol edildiğini öne sürmektedir (Ho ve McKay, 1999; Mirizadeh ve ark., 2023).

Tablo 2. Biyosorpsiyon kinetiklerine ait parametreler

	Sıcaklık		
	280K	289K	298K
q_e (deneysel) (mg/g)	129.036	82.748	41.456
Yalancı-Birinci Derece			
$k_1 \times 10^2$	7.185	8.383	7.047
q_e (mg/g)	172.743	142.791	49.238
R^2	0.892	0.940	0.958
Yalancı-İkinci Derece			
$k_2 \times 10^3$	0.309	0.342	0.951
q_e (mg/g)	156.250	107.527	51.020
R^2	0.976	0.938	0.908

3.5. Desorpsiyon ve Tekrar Kullanım

Biyosorpsiyon çalışmalarında kullanılan biyosorbentin tekrar kullanımını prosesin ekonomik olabilmesi için oldukça önemlidir. Bu yüzden 0.1 N HCl, 0.1 N NaOH ve 0.1 N HNO₃ gibi farklı rejenerasyon ajanları kullanılarak desorpsiyon işlemleri gerçekleştirilmiştir (Wan ve ark., 2010; Wang ve ark., 2021). Biyosorpsiyon-desorpsiyon işlemi 5 defa arka arkaya tekrarlanmış ve desorpsiyon verimi hesaplanmıştır. Desorpsiyon ajanı olarak 0.1 N HCl kullanıldığında % verim ilk döngüde % 99.079 beşinci döngüde ise % 96.235 olarak bulunmuştur. 0.1 N HNO₃ için ilk döngüdeki verim % 96.417 beşinci döngüde ise % 88.742'dir. 0.1 N NaOH'm kullanıldığı işlemde ise ilk döngüde % 42.989 beşinci döngüde ise % 31.106 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre en etkili desorpsiyon ajanının 0.1 N HCl olduğu gözlenmiştir (Şekil 6). Yapılan literatür araştırmalarına göre mantarlardan elde edilen biyokütlerin özellikle ağır metal ve boyar madde gideriminde biyosorbent olarak kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur. Kullanılan biyokütlenin hücre yüzeyinde bulunan fonksiyonel grupların özelliklerine göre biyosorpsiyon-desorpsiyon mekanizması değişkenlik göstermektedir. İncelenen literatürde fungal biyokütlerle ile tetrasiklin grubu antibiyotiklerin giderimi ya da desorpsiyonuna ait herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır fakat benzer özelliklere sahip farklı fungal biyokütlerle boyar madde giderimi ve desorpsiyon çalışmaları yapılmıştır. Sulu çözeltilerden Remazol Marine Blue boyar maddesinin gideriminde *L. salmonicolor* biyokütlesinin kullanıldığı biyosorpsiyon çalışmasında desorpsiyon ajanı olarak 0.1 N HCl ve 0.1 N HNO₃'in kullanıldığı ve desorpsiyon veriminin sırasıyla % 72.38 ve % 94.46 olarak rapor edilmiştir (Göçenoğlu Sarıkaya, 2022). Sulu çözeltilerden Direct Blue 2 boyar maddesinin gideriminde *Agaricus campestris*'ten elde edilen biyokütle kullanıldığı biyosorpsiyon çalışmasında desorpsiyon ajanı olarak 0.1 N HCl ve 0.1 N NaOH kullanılmış ve en yüksek desorpsiyon verimi 0.1 N HCl için % 97.35 olarak rapor edilmiştir (Göçenoğlu Sarıkaya ve Erden, 2020).



Şekil 6. OTC'nin desorpsiyon verimi

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada yenilebilir yabani bir mantar türü olan *L. deliciosus*'tan hazırlanan biyosorbent ile sulu çözeltilerden OTC giderimi çalışılmıştır. Biyosorbentin fonksiyonel gruplarının ve morfolojik özelliğinin belirlenebilmesi için biyosorpsiyon öncesi ve biyosorpsiyon sonrası FTIR analizi gerçekleştirilmiştir ve SEM görüntüleri alınmıştır. Biyosorpsiyon koşullarının belirlenebilmesi için farklı parametrelerin optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve elde edilen verilere göre en yüksek biyosorpsiyon kapasitesi 7 °C'de 300 mg/L başlangıç OTC derişimi için pH 7'de 286.639 ± 2.248 mg/g bulunmuştur. Biyosorpsiyonun doğasının aydınlatılabilmesi için elde edilen deneysel verilerin yardımıyla kinetik ve izoterm parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre prosesin heterojen yüzeylerde çok tabakalı adsorpsiyon modeli olan Freundlich izoterm modeline ve yalancı-ikinci dereceden kinetik modele uyumlu olduğu gözlenmiştir. Desorpsiyon çalışmalarına göre en iyi desorpsiyon ajanının 0.1 N HCl olduğu ve aynı biyosorbentin tekrar tekrar kullanılabilceği gösterilmiştir. Sonuç olarak *L. deliciosus* mantarından elde edilen biyokütlenin ilk defa antibiyotik gideriminde etkinliği çalışılarak iyi bir biyosorbent olabileceği rapor edilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma BUÜ BAP birimi tarafından FHIZ-2021-590 no'lu proje tarafından desteklenmiştir. Mantarların temini için Karen Organik Mantar (Hakkı Gövercin ve Zühal Karnak) 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

- Akar, T., Tosun, İ., Kaynak, Z., Kavas, E., Incirkus, G., Akar, S. T. (2009). Assessment of the biosorption characteristics of a macro-fungus for the decolorization of Acid Red 44 (AR44) dye. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1-3), 865-871.
- Alvarez-Torrellas, S., Rodriguez, A., Ovejero, G., Garcia, J. (2016). Comparative adsorption performance of ibuprofen and tetracycline from aqueous solution by carbonaceous materials. *Chemical Engineering Journal*, 283, 936-947.
- Anayurt, R. A., Sari, A., Tuzen, M. (2009). Equilibrium, thermodynamic and kinetic studies on biosorption of Pb(II) and Cd(II) from aqueous solution by macrofungus (*Lactarius scrobiculatus*) biomass. *Chemical Engineering Journal*, 151(1-3), 255-261.
- Barbooti, M. M., Su, H., Punamiya, P., Sarkar, D. (2014). Oxytetracycline sorption onto Iraqi montmorillonite. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11, 69-76.
- Bayramoğlu, G., ve Arica, M. Y. (2008). Removal of heavy mercury (II), cadmium (II) and zinc (II) metal ions by live and heat inactivated *Lentinus edodes* pellets. *Chemical Engineering Journal*, 143, 133– 140.
- Bayramoğlu, G., Gursel, I., Tunali, Y., Arica, M. Y. (2009). Biosorption of phenol and 2-chlorophenol by *Funalia trogii* pellets. *Bioresource Technology*, 100, 2685-2691.
- Carvalho Costa, A. W. M., Guerhardt, F., Ribeiro Junior, S. E. R., Canovas, G., Vanale, R. M., de Freitas Coelho, D., Ehrhardt, D. D., Rosa, J. M., Basile Tambourgi, E., Curvelo Santana, J. C. (2020). Biosorption of Cr(VI) using coconut fibers from agro-industrial waste magnetized using magnetite nanoparticles. *Environmental Technology*, 1–12.
- Dror, A., Oran, P., Igal, G., Mamane, H. (2010). Sorption of sulfonamides and tetracyclines to montmorillonite clay. *Water, Air and Soil Pollution*, 209, 439-450.
- Dubin, M. M., ve Radushkevich, L. V. (1947). The equation of the characteristic curve of activated charcoal. *Proceeding of the Academy of Sciences, Physical Chemistry Section*, 55, 331.
- El-Gendy, M. M. A. A., Abdel-Moniem, S. M., Ammar, N. S., El-Bondkly, A. M. A. (2023). Bioremoval of heavy metal from aqueous solution using dead biomass of indigenous fungi derived from fertilizer industry effluents: isotherm models evaluation and batch optimization. *BioMetals*, 186, <https://doi.org/10.1007/s10534-023-00520-x>.
- El-Naggar, N. E. -A., Hamouda, R. A., Mousa, I. E., Abdel-Hamid, M. S., Rabei, N. H. (2018). Biosorption optimization, characterization, immobilization and application of *Gelidium amansii* biomass for complete Pb²⁺ removal from aqueous solutions. *Science and Reports*, 8, 1-19.
- Erşan, M. (2016). Removal of tetracycline using new biocomposites from aqueous solutions. *Desalination and Water Treatment*, 57 (21), 9982-9992.

- Franco, D. S. P., Georgin, J., Drumm, F. C., Netto, M. S., Allasia, D., Oliveira, M. L. S., Dotto, G. L. (2020). Araticum (*Annona crassiflora*) seed powder (ASP) for the treatment of colored effluents by biosorption. *Environmental Science and Pollution Research International*, 27, 11184–11194.
- Freundlich, H. (1906). Over the adsorption in solution. *The Journal of Physical Chemistry*, 57, 385.
- Fu, B., Ge, C., Yue, L., Luo, J., Feng, D., Deng, H., Yu, H. (2016). Characterization of biochar derived from pineapple peel waste and its application for sorption of oxytetracycline from aqueous solution. *Bioresources*, 11(4), 9017-9035.
- Göçenoğlu Sarıkaya, A. (2022). Remazol Marine Blue tekstil boyasının *Lactarius salmonicolor* biyokütlesi ile biyosorpsiyonu: Kinetik, izotermal ve termodinamik parametreler. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(2), 1121-1138.
- Göçenoğlu Sarıkaya, A., ve Osman, B. (2021). Tetracycline adsorption via dye-attached polymeric microbeads. *Cumhuriyet Science Journal*, 42(3), 638-648.
- Göçenoğlu Sarıkaya, A. ve Erden, E. (2020). Direct Blue 2 tekstil boyar maddesinin *Agaricus campestris* biyokütlesi tarafından biyosorpsiyonu: Kinetik, izotermal ve termodinamik çalışmalar. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(1), 258-273.
- Guler, U. A. ve Sarioglu, M. (2014). Removal of tetracycline from wastewater using pumice stone: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12, 79.
- Hall, K. R., Eagleton, L. C., Acrivos, A., Vermeulen, T. (1966). Pore- and solid diffusion kinetics in fixed-bed adsorption under constant-pattern conditions. *Industrial Engineering and Chemical Fundamentals*, 5, 212-223.
- Harja, M. ve Ciobanu, G. (2018). Studies on adsorption of oxytetracycline from aqueous solutions onto hydroxyapatite. *Science of the Total Environment*, 628-629, 36-43.
- Ho, Y. S. ve McKay, G. (1999). Pseudo-second-order model for sorption processes. *Process Biochemistry*, 34, 451.
- Isik, B., Ugraskan, V., Cankurtaran O. (2021). Effective biosorption of methylene blue dye from aqueous solution using wild macrofungus (*Lactarius piperatus*). *Separation Science and Technology*, 57(6), 854-871.
- Jia, M., Wang, F., Bian, Y., Jin, X., Song, Y., Kengara, F. O., Xu, R., Jiang, X. (2013). Effects of pH and metal ions on oxytetracycline sorption to maize-straw-derived biochar. *Bioresource Technology*, 136, 87-93.
- Jureczko, M. ve Przystas, W. (2021). Removal of two cytostatic drugs: bleomycin and vincristine by White-rot fungi-a sorption study. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 19, 651-662.
- Kirova, G., Velkova, Z., Stoytcheva, M., Gochev, V. (2021). Tetracycline removal from model aqueous solutions by pretreated waste *Streptomyces fradiae* biomass. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, 35 (1), 953-963.
- Kulkarni, R. M., Vidya Shetty, K., Srinikethan, G. (2019). Kinetic and equilibrium modeling of biosorption of nickel (II) and cadmium (II) on brewery sludge. *Water Science and Technology*, 79, 888–894.
- Kulshrestha, P., Giese, R. F., Aga, D. S. (2004). Investigating the molecular interactions of oxytetracycline in clay and organic matter: insights on factors affecting its mobility in soil. *Environmental Science and Technology*, 38, 4097–4105.
- Lagergren S. (1898). Zur theorie der sogenannten adsorption gel oster stoffe. Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens. *Handlingar*, 25, 1.
- Langmuir I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of American Chemical Society*, 40, 1361-1403.
- Martinez-Olivas, A., Torres-Perez, J., Balderas-Hernandez, P., Reyes-Lopez, S. Y. (2020). Oxytetracycline sorption onto synthesized materials from hydroxyapatite and aluminosilicates. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231, 264.
- Medhi, H., Chowdhury, P. R., Baruah, P. D., Bhattacharyya, K. G. (2020). Kinetics of Aqueous Cu(II) Biosorption onto *Thevetia peruviana* Leaf Powder. *ACS Omega*, 5, 13489–13502.
- Mirzadeh, S., Arni, S. Al., Elwaheidi, M., Salih, A. A. M., Converti, A., Casazza, A. A. (2023). Adsorption of tetracycline and ciprofloxacin from aqueous solution on raw date palm waste. *Chemical Engineering and Technology*, doi.org/10.1002/ceat.202300193.
- Mostafapour, F. K., Yilmaz, M., Mahvi, A. H., Younesi, A., Ganji, F., Balarak, D. (2022). Adsorptive removal of tetracycline from aqueous solution by surfactant-modified zeolite: equilibrium, kinetics and thermodynamics. *Desalination and Water Treatment*, 247, 216-228.

- Nagy, B., Szilagyı, B., Majdik, C., Katona, G., Indolean, C., Maicaneanu, A. (2013). Cd (II) and Zn (II) biosorption on *Lactarius piperatus* macrofungus: equilibrium isotherm and kinetic studies. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(4), 1158-1170.
- Özüdoğru, Y. ve Merdivan, M. (2017). Metilen mavisinin modifiye edilmiş *Cystoseira barbata* (stackhouse) *c. agardh* kullanılarak biyosorpsiyonu. *Trakya University Journal of natural Sciences*, 18 (2), 81-87.
- Pan, X. D., Wu, P. G., Jiang, W., Ma, B. J. (2015). Determination of chloramphenicol, thiamphenicol, and florfenicol in fish muscle by matrix solid-phase dispersion extraction (MSPD) and ultra-high pressure liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Food Control*, 52, 34–38.
- Paria, K., Pyne, S., Chakraborty, S. K. (2022). Optimization of heavy metal (lead) remedial activities of fungi *Aspergillus penicillioides* (F12) through extra cellular polymeric substances. *Chemosphere*, 286(3), 131874.
- Puchana-Rosero, M. J., Lima, E. C., Ortiz-Monsalve, S., Mella, B., da Costa, D., Poll, E., Gutterres, M. (2017). Fungal biomass as biosorbent for the removal of Acid Blue 161 dye in aqueous solution. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 4200-4209.
- Rakshit, S., Sarkar, D., Punamiya, P., Datta, R. (2014). Kinetics of oxytetracycline sorption on magnetite nanoparticles. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11, 1207-1214.
- Ruhı, A., Acuña, V., Barceló, D., Huerta, B., Mor, J. R., Rodríguez-Mozaz, S., Sabater, S. (2016). Bioaccumulation and trophic magnification of pharmaceuticals and endocrine disruptors in a Mediterranean river food web. *Science of the Total Environment*, 540, 250–259.
- Sassman, S. A. ve Lee, L. S. (2005). Sorption of three tetracyclines by several soils: assessing the role of pH and cation exchange. *Environmental Science and Technology*, 39(19), 7452-7459.
- Singh, G. ve Dwivedi, S. K. (2022). Mechanistic, adsorption kinetics and confirmatory study of Congo red dye removal by native fungus *Aspergillus niger*. *Biomass Conversion and Biorefinery*, <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03369-1>.
- Song, Y., Sackey, E. A., Wang, H., Wang, H. (2019). Adsorption of oxytetracycline on kaolinite. *PLoS ONE*, 14(11), e0225335.
- Taki, K., Gogoi, A., Mazumder, P., Bhattacharya, S. S., Kumar, M. (2019). Efficacy of vermitechnology integration with Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) and activated sludge for metal stabilization: A compliance study on fractionation and biosorption. *Journal of Environmental Managment*, 236, 603–612.
- Torres, E. (2020). Biosorption: A review of the latest advances. *Processes*, 8(12), 1584.
- Wan, Y., Bao, Y., Zhou, Q. (2010). Simultaneous adsorption and desorption of cadmium and tetracycline on cinnamon soil. *Chemosphere*, 80(7), 807-812.
- Wang, Y., ve Huang, K. (2020). Biosorption of tungstate onto garlic peel loaded with Fe(III), Ce(III), and Ti(IV). *Environmental Science and Pollution Research International*, 27, 33692–33702.
- Wang, Z., Muhammad, Y., Tang, R., Lu, C., Yu, S., Song, R., Tong, Z., Han, B., Zhang, H. (2021). Dually organic modified bentonite with enhanced adsorption and desorption of tetracycline and ciprofloxacin. *Separation and Purification Technology*, 274, 119059.
- Wei, Z., Hou, C., Gao, Z., Wang, L., Yang, C., Li, Y., Liu, K., Sun, Y. (2023). Preparation of biochar with developed mesoporous structure from poplar leaf activated by KHCO₃ and its efficient adsorption of oxytetracycline hydrochloride. *Molecules*, 28(7), 3188.
- Yeşilova, E., Osman, B., Kara, A., Tümay Özer, E. (2018). Molecularly imprinted particle embedded composite cryogel for selective tetracycline adsorption. *Separation and Purification Technology*, 200, 155-163.
- Zhang, J., Wang, P., Zhang, Z., Xiang, P., Xia, S. (2020). Biosorption Characteristics of Hg(II) from Aqueous Solution by the Biopolymer from Waste Activated Sludge. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17, 1488.
- Zhang, L., Yao, L., Ye, L., Long, B., Dai, Y., Ding, Y. (2020). Benzimidazole-based hyper-cross-linked polymers for effective adsorption of chlortetracycline from aqueous solution. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6), 2020, 104562.
- Zhou, H., Jiao, G., Li, X., Gao, C., Zhang, Y., Hashan, D., Liu, J., She, D. (2023). High capacity adsorption of oxytetracycline by lignin-based carbon with mesoporous structure: adsorption behavior and mechanism. *International Journal of Biological Macromolecules*, 234, 123689.

Bir Kalina Çevriminin Termodinamik ve Ekonomik Açından Değerlendirilmesi

Osman KARA^{1*}, Önder KAŞKA²

Öz

Günümüzde, ülkelerin en önemli dikkat ettiği konulardan bir tanesi enerjidir ve sürekli gelişen teknolojilerle enerji tüketimi de hızla artış göstermektedir. Bu taleplerin karşılanması için fosil kaynak esaslı farklı güç teknolojilerinin kullanımı yaygınlaşmıştır. Fosil kaynakların, tükenecek olması, çevreye zarar vermesi gibi farklı problemler, bu tür teknolojilerin daha verimli çalıştırılmasına yönelik araştırmaların artmasına neden olmuştur. Orta ve düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarında Kalina çevrimiyle (KC) elektrik üretimi önemli teknolojilerdendir. Kalina çevrimini oluşturan ekipmanlar, türbin, seperatör, pompa, buharlaştırıcı, kondenser, karışım odası, kısma valfi ve ısı değiştiricileridir. Bu çalışmada, ele alınan çevrimin detaylı termodinamik analizlerini yapabilmek için bir model oluşturulmuş ve Mühendislik Denklem Çözücüsü (EES) programı kullanılarak sistemde bulunan tüm noktaların özellikleri analitik olarak hesaplanmıştır. Sistemin türbin giriş basıncı, kondenser çıkış sıcaklığı, pompa ve türbinin izentropik verimlerine bağlı olarak sistem performansı enerji ve ekonomik açıdan analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kalina çevrimi, Amonyak su karışımı, Atık ısı geri kazanımı.

Thermodynamic and Economic Evaluation of a Kalina Cycle

Abstract

Nowadays, one of the most important issues that countries pay attention to is energy, and energy consumption is increasing rapidly with constantly developing technologies. In order to meet these energy demands, the use of different fossil resource-based power technologies has become widespread. Additional problems such as the depletion of fossil resources and damage to the environment have led to increased research on the more efficient operation of such technologies. Electricity generation by the Kalina cycle (KC) in medium- and low-temperature heat sources is one of the important technologies. The equipment of the Kalina cycle is a turbine, separator, pump, evaporator, condenser, mixing chamber, throttling valve, and heat exchangers. In this study, a model was created in order to make detailed thermodynamic analyses of the cycle in question, and the properties of all points in the system were calculated analytically using the Engineering Equation Solver (EES) program. The system performance is analyzed in terms of energy and economy depending on the turbine inlet pressure, condenser outlet temperature, and isentropic efficiency of the pump and turbine.

Keywords: Kalina cycle, Ammonia water mixture, Waste heat recovery.

¹Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü ve Mühendislik Fakültesi, Osmaniye, Türkiye, osmankara@osmaniye.edu.tr

²Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü ve Mühendislik Fakültesi, Osmaniye, Türkiye, onderkaska@osmaniye.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0003-1501-677X>

²<https://orcid.org/0000-0002-7284-2093>

1. Giriş

Termodinamik güç çevrimlerinde Carnot döngüsü, ısı kayıplarının olmadığı ve ikisi izotermal ve ikisi adyabatik olmak üzere dört tersinir süreçten oluşan mümkün olan en verimli termal döngüdür. Bu çevrimler arasında Rankine döngüsü çalışma akışkanı olarak suyu kullanan, Carnot döngüsüne en yakın gerçek çevrimdir ve dünya çapında elektrik enerjisi üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Zhang ve ark., 2012). İnsanoğlu için temel ihtiyaçlarının karşılanmasında enerji üretimi, hem nüfus artışı hem de artan sanayileşme için önemlidir (Fertelli, 2022). Elektrik enerji üretiminde, konvansiyonel enerji kaynaklarının tüketimi günümüzde çok yaygındır. Birincil (konvansiyonel) enerji kaynaklarının tükenmesi ve sera etkisi gibi dezavantajı ile yenilenebilir enerji kaynaklarının temiz, sürdürülebilir gibi avantajlarından dolayı gün geçtikçe daha fazla talep olmaktadır (Wang ve ark., 2015; Yaniktepe ve ark., 2021). Güneş enerjisi, jeotermal, biyokütle ve endüstriyel atık ısı gibi çok büyük miktarlarda yenilenebilir enerji kaynakları bulunmaktadır. Bu kaynaklardan elde edilen orta sıcaklıktaki ısı, geleneksel Rankine yöntemleriyle verimli bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürülemez. Bu nedenle, buhar Rankine çevrimi ilkesini uygulayan, ancak düşük kaynama noktalı organik çalışma sıvıları kullanan Organik Rankine Çevrimi (ORC), daha düşük sıcaklıktaki ısı kaynaklarından ısıyı geri kazanmak için kullanılabilir (Zhang ve ark., 2012).

1980'lerin başında Kalina, çalışma sıvısı olarak bir amonyak-su karışımı kullanan yeni bir termodinamik güç çevrimi önerdi (Kalina, 1983). KC, çeşitli yeni termodinamik çevrimlerde, 1800'lerin ortalarında Rankine çevriminin ortaya çıkışından bu yana termik santral tasarımındaki önemli gelişmedir ve Organik Rankine Çevrimine karşı iddialı bir rakip olarak kabul edilmiştir. Rankine çevrimi ile kıyaslandığında, her iki çevrim benzer ekipmanlara sahiptir. Ancak KC, amonyak-su karışımının fraksiyonuna sahiptir. Bu nedenle KC'nin termodinamik performansı, amonyak-su karışımının fraksiyonundan ve çevrimin çalışma parametrelerinden etkilenmektedir (Zhang ve ark., 2012).

Kalina çevriminin performansı ve avantajları, KC'nin farklı konfigürasyonları, amonyak-su karışımının fraksiyonları ve çalışma parametreleri gibi birçok farklı çalışmaları ile incelenmiştir. Birinci yasa etkinliğine göre, sistemdeki tüm cihazlar arasında, döngüyü etkileyebilecek anahtar parametreler: ayırıcı sıcaklığı (Marston, 1990), türbin giriş basıncı (Marston, 1990) Madhawa ve ark., 2007), türbin giriş sıcaklığı (Zhang ve ark., 2008) ve türbin çıkış basıncı (Zhang ve ark., 2008; Kim ve ark., 2020)'dir. Ayrıca, türbin çıkış basıncı sabit tutulduğunda, amonyak kütle oranı arttırıldığında sistem verimi artmaktadır. Kütle oranı sabit tutulup ise türbinden çıkış basıncını düşürülerek sistem verimini artmaktadır (Usvika ve ark., 2009). Arslan (2010), Simav jeotermal sahasından elektrik üretiminde, KCS-34 sistemi için, eksergoekonomik analiz etmişlerdir. %90'lık bir amonyak kütle fraksiyonu ile optimum sistem tasarımı için enerji ve ekserji verimliliği sırasıyla %14.9'luk, %36.2

olarak hesaplamışlardır. Seçkin (2023) güç ve soğutma üretimi için iki yenilikçi termodinamik çevrimden (Kalina Çevrimi ve Ejektörlü Soğutma Çevrimi) oluşan kombine bir çevrimin termodinamik analizini ele almıştır. Kalina Çevriminin türbin basınç ve sıcaklıklarının sistemin çıktı parametreleri üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Türbin basıncının artırılması (2500 kPa-4000 kPa) ile enerji (10%) ve ekserji verimi (70%) artışı bulmuştur.

Koç ve Yağlı (2020), atık ısıdan enerji geri kazanımı için kombine ısı-güç çevrimi adına bir metod olan KC'nin birinci ve ikinci kanun termodinamik analizini yapmışlar. Sonuçta, maksimum ekserji yıkımının buharlaştırıcıda görüldüğünü, KC enerji verimi ve ekserji verimlerinin sırasıyla yaklaşık %12 ve %27 olarak bulmuşlardır. Bir tanker gemisindeki gerçek bir ısı-güç kombine çevriminde mevcut durumda bulunan egzoz gazındaki atık ısı enerjisinin geri kazanımını tasarlanan bir KC açısından değerlendirilmiştir. KC ile atık ısıdan dönüştürülebilir enerji miktarı Rankine çevrimli sisteme nazaran %30 daha fazla olduğunu hesaplamışlardır. Ayrıca, yakıttan yaklaşık 610 ton/yıl tasarruf sağlanabileceği ve enerji verimliliğinde %4.8 lik bir iyileştirmenin olduğu da belirtmişlerdir (Yücel ve ar., 2021). Sentürk (2020), jeotermal enerjiyle çalışan KC'nin optimum tasarım parametrelerinin belirlenmesi için termodinamik ve ekonomik açıdan incelemiştir. Çalışmada, sistemdeki toplam ekserji yıkımı en fazla evaporatörde olduğu, KC'nin enerji ve ekserji verimliliği ise sırasıyla % 13.04 ve % 51.81 olarak hesaplamıştır. Arslan ve ark. (2006) Kütahya-Simav jeotermal sahasında kaynağın sıcaklık ve debi değerleri kullanılarak, Kalina ve Binary güç santrali dizaynlarını ele almışlardır. Sistem verimlerini; KC için % 19.8, R134 akışkanlı binary çevrim için %12.9, HCFC-124 akışkanlı binary çevrim için % 10.6 olarak hesaplamışlardır. Sentürk (2021), jeotermal enerji ile çalışan KC'ni çok aşamalı bir yapay sinir ağı (ANN) analizi kullanılarak optimize edilmiştir. KC çevrimini, farklı türbin giriş basıncı, evaporatördeki jeotermal su çıkış sıcaklığı, kondenser basıncı ve amonyak kütle oranı için tasarlanmıştır. Sonuçlarda, optimum KC modeli için net bugünkü değer (NPV), enerji ve ekserji verimleri sırasıyla 113.0732 M\$, %6.7285 ve %46.8701 olarak hesaplamıştır. Yüksel ve Öztürk (2020) jeotermal enerji destekli çok fonksiyonlu bir enerji üretim sisteminin termodinamik analizi incelemişlerdir. Jeotermal enerji kullanılarak elektrik, hidrojen, sıcak su, ısıtma ve soğutma üreten bir tesis önermişler ve her bir bileşen için kütle, enerji, entropi ve ekserji denge denklemleri belirlemişlerdir. Sonuçta, çalışma şartlarına göre, KC, ORC, sistemin hidrojen üretiminin, soğutma sisteminin ve entegre sisteminin ekserji verimleri sırasıyla, %22.73, %26.35, %37.56, %13.93 ve %34.18 olarak hesaplamışlardır. Ayrıca, Yılmaz (2023), düşük sıcaklıkla çalışan jeotermal enerjili bir Kalina çevriminde hidrojen ve güç üretimi değerlendirmiştir. Ele alınan tesisin, enerji ve ekserji verimliliği, net güç miktarı ve hidrojen oranı sırasıyla, %7.94, %37.64, 100.5 kW ve 0.0001191 kgs⁻¹ olarak hesaplanmıştır.

Wang ve ark. (2013), amonyak-suyunun değişken sıcaklıktaki buharlaşma özelliğini kullanması ile güneş enerjisiyle çalışan bir KC'yi incelemişlerdir. Kararlı durum koşulları altında güneş enerjili

KC simüle etmek için bir matematiksel model geliştirip ve genetik algoritma aracılığıyla sistem verimliliğini optimize etmişlerdir. Sonuçlarda, net güç çıkışı ve modifiye edilmiş sistem verimliliğini maksimize etmek için verilen koşullar altında optimum bir türbin giriş basıncı olduğunu göstermişlerdir, ayrıca belirtilen performans özellikleri, türbin giriş sıcaklığındaki değişikliğe karşı daha az etkilenmektedir. Optimize edilmiş modifiye edilmiş sistem verimliliğini, %8.54 olarak bulmuşlardır. Jeannot ve ark. (2021) sistemin giriş ısısı olarak güneş enerjisinin kullanıldığı PTC'li bir KC'nin performansını incelemiştir. Türbin giriş basıncının ve türbin giriş amonyak konsantrasyonunun çevrim verimliliği üzerindeki etkilerini parametrik analizini yapmışlardır. Türbin çıkış basıncının çevrim verimliliği üzerinde önemli bir etkisi olduğu göstermişlerdir. Ayrıca, 140 bar türbin giriş basıncında ve 0.8 türbin giriş amonyak konsantrasyonunda maksimum verimi %33 olarak hesaplamışlardır. Ashouri ve ark.(2015), küçük ölçekli bir PTC, bir yardımcı ısıtıcı ve bir termal depolama tankına sahip döngüyü KC'ye bağlanmış ve sistemin hem termodinamik hem de ekonomik performansını incelemiştir. Ayrıca, sistemi, yakıtla çalışan bir KC ile karşılaştırılmışlardır. KC, toplam ekserji yıkımının küçük bir kısmından sorumlu olduğunu saptamışlardır, dolayısıyla güneş kolektörlerine daha fazla yatırım yapılmaktadır. Ekonomik analizde, solar KC'nin seviyelendirilmiş elektrik maliyetinin 0.4274 \$/kWh iken, yakıtla çalışan çevrimde 0.3113 \$/kWh olarak hesaplamışlardır.

Bu çalışmada, ele alınan bir KC çevrimi modellenmiş ve EES programına aktarılmıştır. Elektrik üretimi için KC, türbin giriş basıncı, kondenser çıkış sıcaklığı, pompa ve türbinin izentropik verimlerinin değişimleri termodinamik ve ekonomik açıdan analiz edilmiştir.

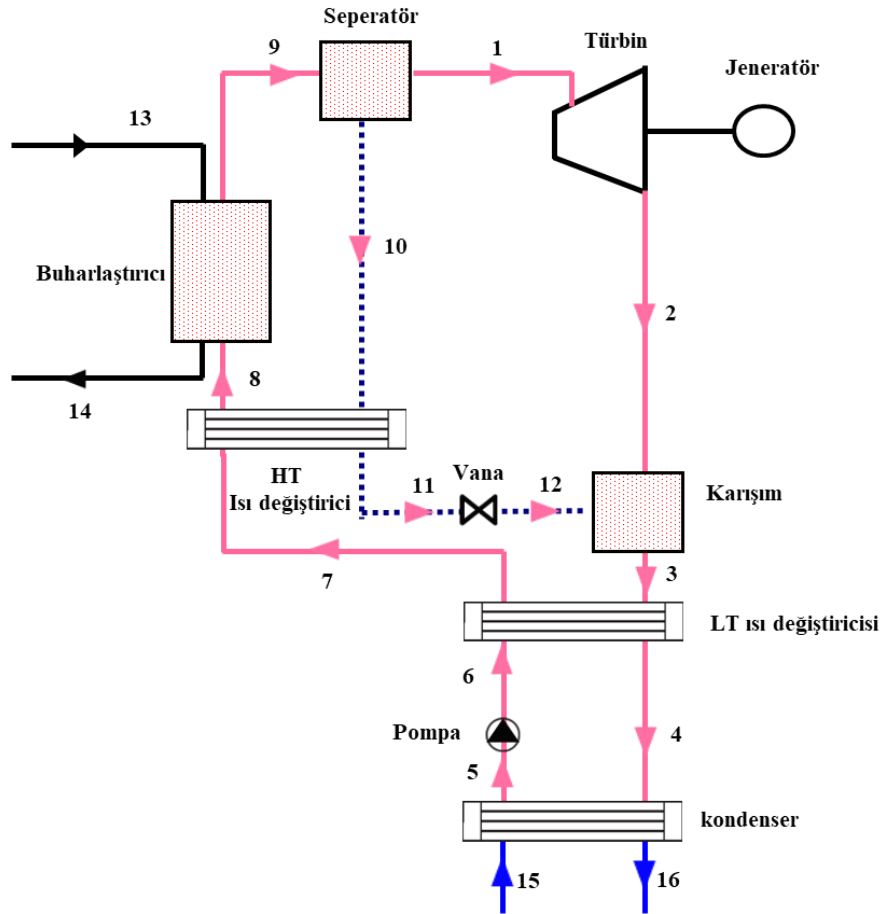
2. Materyal ve Metot

Bu bölümde çalışmanın birinci kısımda sistem tanıtımı ve ikinci bölümde sistemin detaylı analizinin yapılabilmesi için gereken kütle, enerji ve ekonomik eşitlikler verilmiştir.

2.1. Sistem Tanıtımı

Şekil 1'de çalışma kapsamında bir KC sisteminin genel görünüşü verilmiştir. Sistemi oluşturan ekipmanlar sırasıyla; buharlaştırıcı, kondenser, kısılma vanası, pompa, yüksek sıcaklıklı ısı değiştiricileri (HT) ve düşük sıcaklıklı ısı değiştiricileri (LT), karıştırıcı, seperatör ve türbin-jeneratörden oluşmaktadır. Isı transfer akışkanı (13 noktası), buhar türbinini çalıştırmak için amonyak-su karışımına faydalı ısı vermek üzere buharlaştırıcıya girer. Amonyak-su karışımı kısmen buharlaştırılır (8-9 noktası), ve seperatöre girer. Seperatörün üst kısmından neredeyse saf fazında olan amonyak gazı (zengin amonyak buharı) çıkarak güç sağlamak için türbine (1 noktası) geçer. Seperatör

tabanından neredeyse saf su (sıvı amonyak su karışımı) çıkar (10 noktası) ve enerjisi HT ısı değiştiricisinde kullanılarak (11 noktası) geri kazanılır. Daha sonra enerjisini bırakan akışkan, türbinin çıkış akışıyla karıştırılacak basıncına azaltmak için bir kısma valfi yardımıyla (12 noktası) kısılır. Karışık akış (3 noktası) enerjisinin geri kazanılması için LT geri kazanım cihazına girer. Daha sonra iki fazlı akışkan (4 noktası) su soğutmalı kondenserde yoğuşturulur. Son olarak, temel çözelti, çevrimi tamamlamak için buharlaştırıcıya pompa yardımıyla pompalanır.



Şekil 1. Kalina Çevrimin (KCS11) akış diyagramı (Fallah ve ark., 2016)

2.2. Modelleme ve Enerji-Ekonomi Analizi

Sistem, kinetik ve potansiyel enerjide değişiklik olmayan, izole elemanlardan oluşan açık bir sistem olarak kabul edilmiştir. Sistemde borularda basınç kaybı olmadığı, sistemde akışkan kaçağı gerçekleşmediği ve türbin, pompa kayıplarının izentropik verimler aracılığıyla hesaplanmıştır. Kondenser çıkışında, amonyak-su karışımının doymuş sıvı halinde olduğu ve seperatör çıkışında zengin ve zayıf amonyak-su karışımlarının sırasıyla doymuş buhar ve doymuş sıvı olduğu varsayılmıştır (Fallah ve ark., 2016; Seckin, 2018). Sistemin modellenmesi ve hesaplanmasından EES

programı kullanılmıştır. Amonyak-su karışımının özellikleri için programın kütüphanesinden faydalanılmıştır. Sistemin ekipmanlarına ait kütle korunumu aşağıdaki verilmiştir (Moran ve ark., 2010).

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (1)$$

Denklem (1)'de, ekipmanlara giriş ve çıkışında ki kütleli debi miktarı sırasıyla \dot{m}_{in} ve \dot{m}_{out} şeklinde gösterilmektedir. Denklem (2), enerji dengesini ifade etmektedir.

$$\dot{Q} + \dot{W} = \sum \dot{m}_{out} h_{out} - \sum \dot{m}_{in} h_{in} \quad (2)$$

Denklem (2)'de \dot{Q} kontrol hacminde ısı transfer miktarını (kW), \dot{W} net iş miktarını (kW), h_{in} , ve h_{out} kontrol hacmine giren ve çıkan akışkanın entalpisini (kJ/kg) olarak ifade etmektedir. Tablo 1'de enerji eşitlikleri gösterilmektedir.

Tablo 1. KA için ekipmanların enerji eşitlikleri

Denklem	Ekipman	Enerji Denklikleri
3	Buharlaştırıcı	$\dot{Q}_e = \dot{m}_8(h_9 - h_8) = \dot{m}_{13}(h_{13} - h_{14})$
4	Türbin	$\dot{W}_t = \dot{m}_1(h_1 - h_2)$, $\eta_t = (h_1 - h_2)/(h_1 - h_{2s})$
5	Kondenser	$\dot{Q}_c = \dot{m}_4(h_4 - h_5) = \dot{m}_{15}(h_{16} - h_{15})$
6	Pompa	$\dot{W}_p = \dot{m}_5(h_6 - h_5)$, $\eta_p = (h_{6s} - h_5)/(h_6 - h_5)$
7	LT Isı değiştiricisi	$(h_3 - h_4) = (h_7 - h_6)$
8	HT Isı değiştiricisi	$\dot{m}_7(h_8 - h_7) = \dot{m}_{10}(h_{10} - h_{11})$
9	Seperator	$\dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_{10} h_{10}$, $\dot{m}_9 X_9 = \dot{m}_1 X_1 + \dot{m}_{10} X_{10}$
10	Kısılma vana	$h_{11} = h_{12}$
11	Karışım odası	$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_{12} h_{12} = \dot{m}_3 h_3$

Tablo (1)'de, konsantrasyon (x), amonyağın amonyak-su karışımındaki kütleli debi miktarının (\dot{m}_{NH_3}), Kalina döngüsündeki amonyak-su karışımının kütleli debi miktarına oranıdır.

Sistemin performansı için elde edilen net iş miktarı (\dot{W}_{net}) ve verimi (η_1) sırasıyla Denklem (10) ve (11)'de hesaplanmaktadır.

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_t - \dot{W}_p \quad (12)$$

$$\eta_1 = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_e} \quad (13)$$

Ekonomik açıdan değerlendirilebilmesi için, KC'de kullanılan her ekipmanın maliyet denklemlerinin kullanılması gerekmektedir. Bu kapsamda, denklikler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. KA için ekipmanların maliyetleri (Sayyaadi ve ark., 2020)

Ekipman	Maliyet	Referans
Evaporatör	$Z = 1397 (A_E)^{0.89}$	(Mosaffa ve ark., 2017)
Türbin	$Z = 4405 (W_t)^{0.7}$	(Mahmoudi ve ark., 2016)
Kondenser	$Z = 1397 (A_C)^{0.89}$	(Mosaffa ve ark., 2017)
Pompa	$Z = 1120 (W_p)^{0.8}$	(Özahi ve Tozlu, 2020)
LT	$Z = 2681 (A_{LTR})^{0.59}$	(Mahmoudi ve ark., 2016)
HT	$Z = 2681 (A_{HTR})^{0.59}$	(Mahmoudi ve ark., 2016)

Tablo 2’de verilen ekipmanların ısı eşanjörleri için ısı transfer yüzey alanlarının aşağıda verilen eşitlikle belirlenir (Moran ve ark., 2010).

$$A_i = \frac{\dot{Q}_i}{U_{LMTD}} \quad (14)$$

Denklemden, U toplam ısı transfer katsayısını göstermektedir. Ekipmanlar için kabul edilen U değerleri, evaporatör için 0.125, kondenser 0.5, LT ısı değiştiricisi 0.2, HT ısı değiştiricisi 0.6’dır (Sayyaadi ve ark., 2020; Mosaffa ve ark., 2017). Ayrıca, LMTD, logaritmik ortalama sıcaklık farkı anlamına gelmekte olup aşağıda verilen eşitlikle hesaplanır (Moran ve ark., 2010):

$$LMTD = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}}\right)} \quad (15)$$

Eşitlikte, ΔT_{max} ve ΔT_{min} , seçilen ısı eşanjöründeki giriş ve çıkış buharı arasındaki maksimum ve minimum sıcaklık farklarını ifade etmektedir.

Her bileşenin ekipman maliyetleri hesaplandıktan sonra, KC ‘nın toplam yatırım maliyeti aşağıdaki eşitlikle bulunur;

$$Z_{mlyt} = Z_t + Z_p + Z_E + Z_K + Z_{LT} + Z_{HT} \quad (16)$$

KA için ekipmanların ve toplam maliyetleri hesaplandıktan sonra, sermaye geri kazanım maliyeti (CRF) şu eşitlikle hesaplanır (Sayyaadi ve ark., 2020; Mosaffa ve ark., 2017);

$$CRF = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (17)$$

Denklemden, faiz oranı (i , 10%), sistem ömrü (N , 20 yıl) olarak kabul edilmiştir (Sayyaadi ve ark., 2020; Mosaffa ve ark., 2017). KC'den üretilen elektriğin birim maliyeti ($\$/kWh$) (Sayyaadi ve ark., 2020) aşağıda verilen denklem ile bulunur.

$$C_{\text{unit}} = \frac{\text{CRF } Z_{\text{mlyt}+\emptyset}}{W_{\text{net}} n} \quad (18)$$

Denklemden, n yıllık çalışma süresi (8000 saat), \emptyset bakım faktörü (1.06) ifade etmektedir.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, ilk olarak ele alınan KC'yi Fallah ve ark.(2016) tarafından yapılan çalışma ile doğrulanmıştır. Fallah ve ark. (2016), tarafından düşük sıcaklıkta geliştirilmiş jeotermal sistem için KC'nin gelişmiş ekserji analizi incelerken, üç farklı çalışma durumları için incelemiştir. Bu çalışmada, gerçek durum için yapılan kabuller KC modeline uygulanmıştır. Sistemin modellenmesinde kullanılan gerekli veriler Tablo 3'de verilmiştir. Ele alınan çalışmanın doğruluğu, literatürde Fallah ve ark. (2016), tarafından yapılan düşük sıcaklıkta uygulanan KC sistemi ile mevcut çalışma kıyaslanmış ve sonuçlar Tablo 4'de gösterilmiştir. Analiz için türbin, ve pompanın izentropik ve mekanik verimleri verilmelidir. Literatürdeki farklı çalışmalarda izentropik türbin verimi 0.90 (Little ve Garimella, 2011), 0.80 (Liu ve ark., 2013), 0.70 (Shu ve ark., 2013), iken ve pompa izentropik verimleri 0.90 (Little ve Garimella, 2011), 0.85 (Peris ve ark., 2013) 0.75 (Liu ve ark., 2013) şeklinde olduğu görülmektedir.

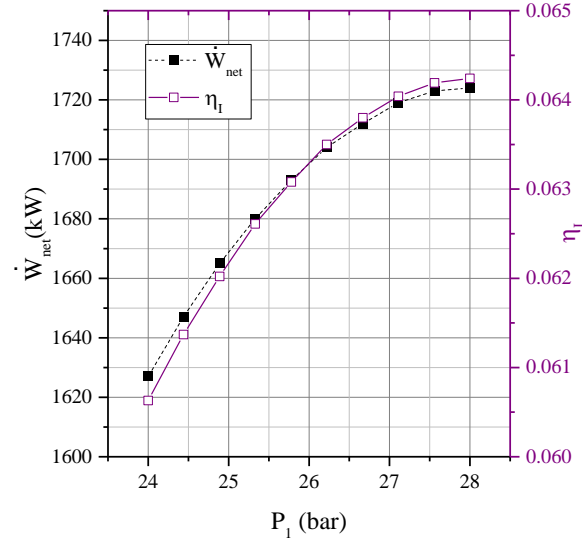
Tablo 3. Sistemin modellenmesinde kullanılan kabuller (Fallah ve ark., 2016; Rodríguez ve ark., 2013)

Ekipmanlar	Kabuller	Ekipman	Kabuller
Buharlaştırıcı	$\Delta T_{\text{min}} = 10$, $\Delta P = 2\%$	Türbin izentropik verimi	$\eta_t = 85\%$
Türbin	$\eta_t = 0.85$	Pompa izentropik verimi	$\eta_p = 80\%$
Kondenser	$\Delta T_{\text{min}} = 10$, $\Delta P = 1\%$	Konsentrasyon	$x_9 = 84\%$
Pompa	$\eta_p = 0.80$	Türbin giriş basıncı	$P_1 = 25$ bar
LT Isı değiştiricisi	$\Delta T_{\text{min}} = 10$, $\Delta P = 2\%$	Kondenser çıkış basıncı	$P_5 = 12$ bar
HT Isı değiştiricisi	$\Delta T_{\text{min}} = 10$, $\Delta P = 3\%$	Kondenser çıkış sıcaklığı	$T_5 = 310.15$ K
Jeneratör	$\eta_g = 0.97$		

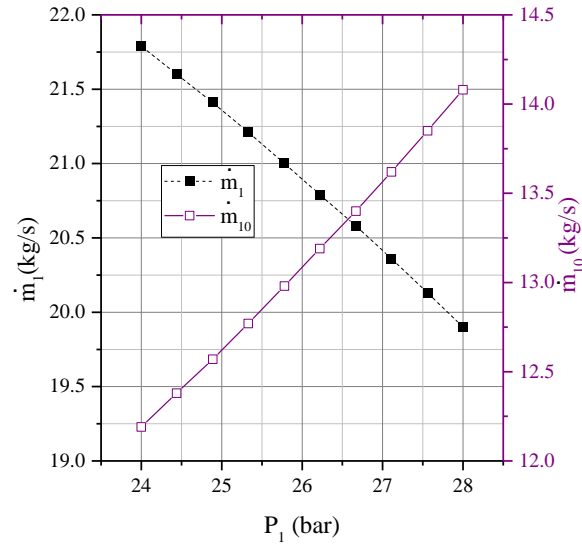
Tablo 4. Mevcut sistemin ve Fallah ve ark. (2016) tarafından yapılan çalışma ile kıyaslanması

	Akışkan	Mevcut çalışma T (°C)	(Fallah ve ark., 2016) T (°C)	Mevcut çalışma m (kg/s)	(Fallah ve ark., 2016) m (kg/s)	Mevcut Çalışma x	(Fallah ve ark., 2016) x
1	Nh ₃ H ₂ O	89.85	90.00	21.36	21.39	0.99	0.99
2	Nh ₃ H ₂ O	52.45	52.60	21.36	21.39	0.99	0.99
3	Nh ₃ H ₂ O	58.05	57.80	33.98	33.98	0.84	0.84
4	Nh ₃ H ₂ O	53.95	53.70	33.98	33.99	0.84	0.84
5	Nh ₃ H ₂ O	36.95	37.00	33.98	33.10	0.84	0.84
6	Nh ₃ H ₂ O	37.45	37.40	33.98	33.10	0.84	0.84
7	Nh ₃ H ₂ O	48.05	47.80	33.98	33.10	0.84	0.84
8	Nh ₃ H ₂ O	58.75	59.30	33.98	33.10	0.84	0.84
9	Nh ₃ H ₂ O	89.85	90.00	33.98	33.10	0.84	0.84
10	Nh ₃ H ₂ O	89.85	90.00	12.62	12.58	0.5862	0.5852
11	Nh ₃ H ₂ O	60.65	57.80	12.62	12.58	0.5862	0.5852
12	Nh ₃ H ₂ O	59.55	57.80	12.62	12.58	0.5862	0.5852
13	Su	100	100	200			
14	Su	68	68	200			
15	Su	25	25	601.4			
16	Su	35	35	601.4			
Net elektrik üretimi		Mevcut Çalışma; 1669 (kW)		Fallah ve ark., 2016; 1672 (kW)			
Termal verim		Mevcut Çalışma; 0.06219		Fallah ve ark., 2016; 0.06241			

Bu çalışma kapsamında yapılan ikinci kısımda, türbin giriş basıncının değişimi ile sistemin W_{net} ve η_1 değişimleri incelenmiştir. Türbin giriş basıncının 24-28 bar aralığında değişimi Şekil 2'de gösterilmektedir. Şekil 2'de, KC çevrimin η_1 'si artan türbin giriş basıncı ile artmaktadır. P_1 arttıkça, P_2 sabit olduğu için aradaki entalpi farkı (h_1-h_2) artmaktadır. Bu da \dot{W}_{net} ve η_1 artmasına neden olmaktadır. Şekil 3'de P_1 basıncının artması ile sistemdeki karışımın kütleli debi değişimini göstermektedir. Sistemin toplam kütleli debisi (\dot{m}_9) 33.98 kg/s kabul edilmiş olup (Fallah et al., 2016), P_1 basıncının artması ile seperatörden türbine giden kütleli debi miktarının (\dot{m}_1) azaldığı, m_{10} 'un ise arttığı görülmüştür. Seçkin (2018), türbin giriş basıncının artmasına bağlı benzer trendleri elde etmiştir.

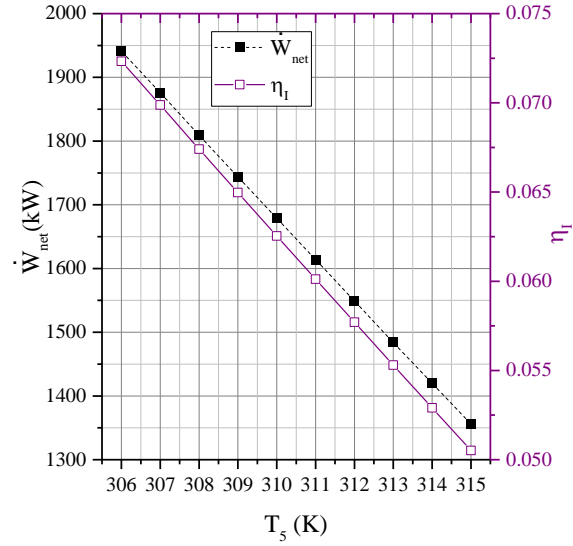


Şekil 2. Türbin giriş basıncının değişiminin \dot{W}_{net} ve η_I 'e etkisi



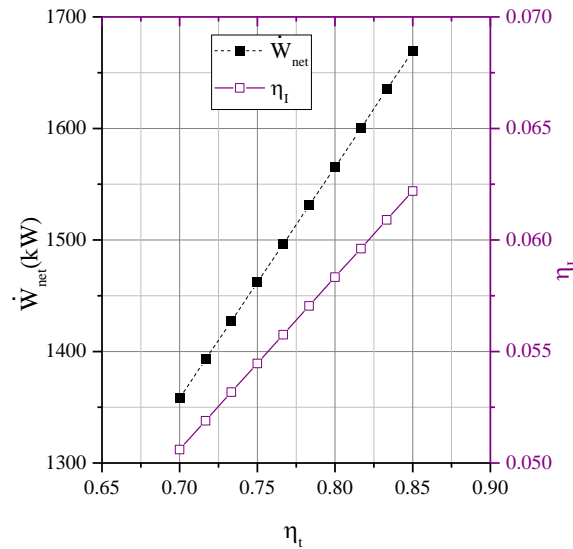
Şekil 3. Türbin giriş basıncının değişiminin \dot{m}_1 ve \dot{m}_{10} 'a etkisi

Çalışmanın bir diğer kısmında, Şekil 4'de kondenser sıcaklığının değişimi ile net elde edilen iş ve sistemin termal verimi gösterilmektedir. Kondenser sıcaklığının yükselmesi sistemin kondenser basıncını artırmakta, bu da türbin çıkışında basınç değeri artmasından dolayı, türbinden elde edilen iş miktarı azalmaktadır. Böylece, sabit enerji girdisi için elde edilen iş miktarının azalması sistemin termal verimi düşürdüğü görülmektedir.

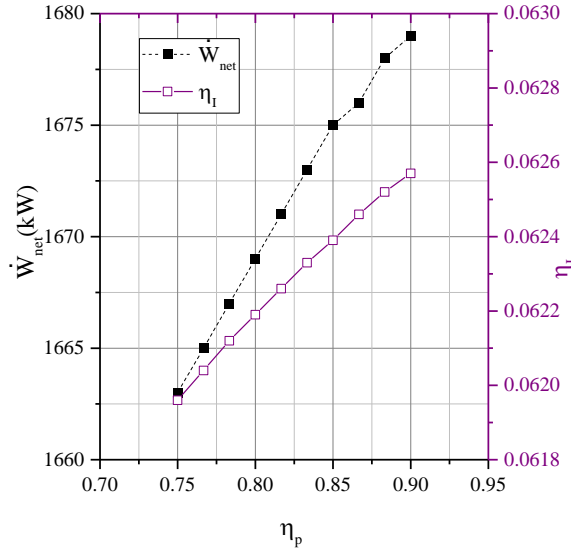


Şekil 4. Kondenser çıkış sıcaklığının \dot{W}_{net} ve η_t etkisi

Çalışmada, türbinin ve pompanın izentropik verim değişiminin çevrim üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 5’de türbinin izentropik verim değişiminin, Şekil 6’da pompanın izentropik verim değişiminin çevrimdeki \dot{W}_{net} ve η_t üzerindeki etkisi incelenmiştir. Türbin ve pompa için izentropik verim değişimi sırasıyla 0.7-0.85, 0.75-0.90 olarak ele alınmıştır. Türbin veriminin yaklaşık %21 artış miktarında, yaklaşık %23 artış hesaplanmışken, Pompanın %20 verim artışında, %0.96 artış gerçekleşmiştir.



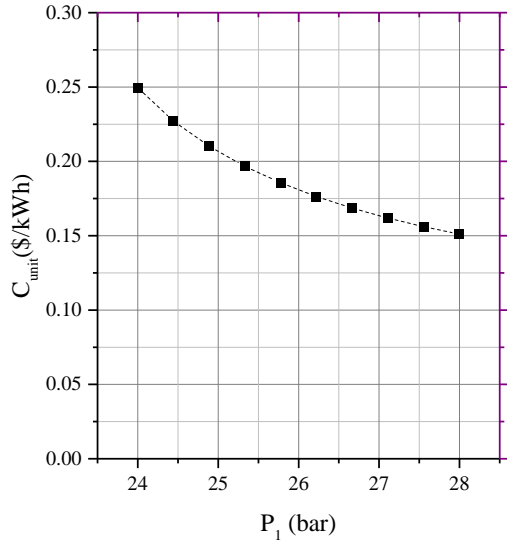
Şekil 5. Türbin izentropik veriminin \dot{W}_{net} ve η_t 'e etkisi



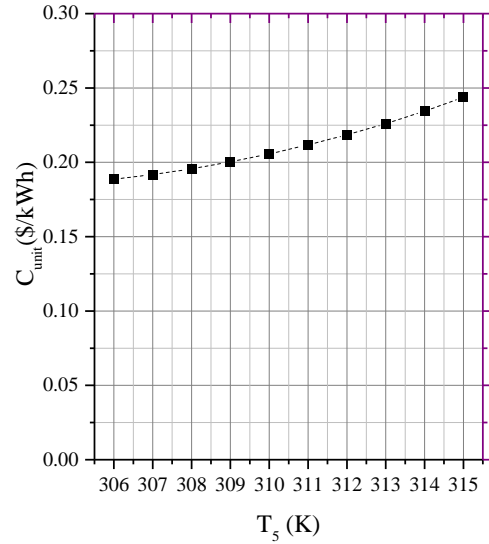
Şekil 6. Pompa izentropik veriminin \dot{W}_{net} ve η_I 'e etkisi

Çalışmanın son kısmında, üretilen elektrik enerjisinin birim maliyeti hesaplanmıştır. Şekil 7 (a)'da sistemin türbin giriş basıncının, Şekil 7 (b)'de sistemin kondenser çıkış sıcaklığının, Şekil 7 (c)'de çevrimin türbin izentropik veriminin, Şekil 7 (d)'de çevrimin pompa izentropik verimin artırılması ile birim maliyetin değişimi gösterilmiştir. Çalışmada yapılan kabuller ile, sistemden elde edilen elektrik üretim birim maliyeti en düşük değerleri sırasıyla, türbin giriş basıncın 28 bar değerinde iken, kondenser sıcaklığının 306 K olduğu görülmektedir. Ayrıca, türbin izentropik verimin, pompanın izentropik verimine göre birim enerji maliyetine etkisi daha fazla olduğu görülmektedir. Bu kısımda, pompanın enerji tüketiminin türbin elektrik üretimi yanında kıyaslandığında çok düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

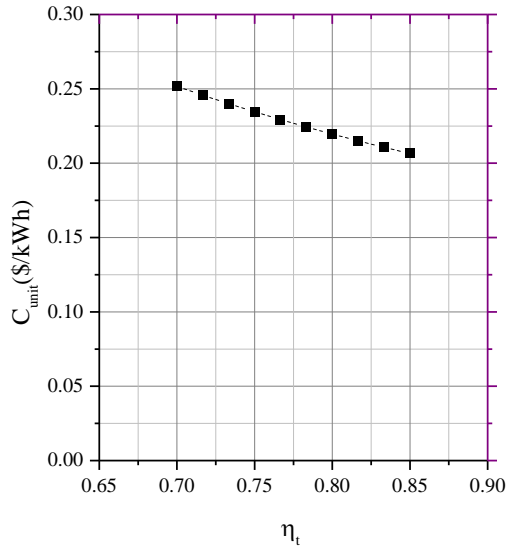
Bu kapsamda, literatürde birim enerji maliyeti de benzer trend oluşmuştur. Sistemde kullanılan çalışma akışkanlarının termodinamik davranışı ve çalışma parametreleri ekonomik sonuçlar için oldukça önemli bilgiler sunmaktadır. Sayyadi ve ark. (2020) Kalina çevrimine sahip bir elektrik üretim tesisi için elektrik satış fiyatı sistem ömrü 20 yıl olan bir çevrim için 0.25 \$/kWh'den büyük olması gerektiğini hesaplamışlardır.



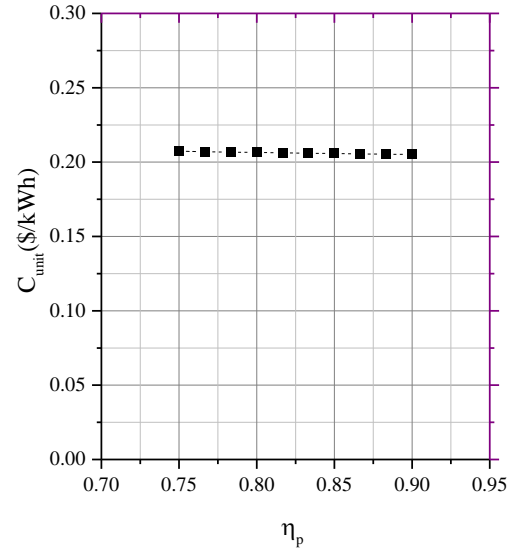
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 7. Çevrimin birim enerji başına düşen maliyeti

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, bir sıcak su ısı kaynağı ile güç sağlamak için bir Kalina çevrimi araştırılmıştır. Sistem, EES programında termodinamik ve ekonomik olarak analiz edilmiştir. Çalışmada, çevrimi etkileyen en önemli parametrelerden türbin giriş basıncı, kondenser çıkış sıcaklığı, türbin ve pompanın izentropik etkisi incelenmiştir. Türbin giriş basıncı 24-28 bar'a artırıldığında, sistem \dot{W}_{net} miktarında 1627 kW'dan 17245 kW değerine ve η_1 'si 0.060 'dan 0.064 artmıştır. Kondenser çıkış sıcaklığı 306 K' den 315 K'ne artırıldığında, \dot{W}_{net} miktarında 1941 kW'den 1356 kW ve η_1 'si

0.072'den 0.050 değerine azalmıştır. Türbin izentropik verimin 0.7-0.85 değerine artırıldığında, 1358 kW'dan 1669 kW' a yükselmiştir. Pompa izentropik verimin 0.75-0.9 değerine artırıldığında, 1663 kW'dan 1679 kW' a artışı hesaplanmıştır. Çalışmada türbin basıncının ve kondenser çıkış sıcaklığının etkisinin birim elektrik başına düşen maliyet hesaplanmıştır, sistem elektrik maliyetinin yaklaşık 0.20 \$/kWh değerinden başlayıp, 0.24 \$/kWh değerine kadar değiştiği bulunmuştur. Atık ısı kaynakları ve yenilenebilir enerji kaynaklarından KC ile elektrik enerjisi üretiminin sağlanması, konvansiyonel enerji kaynaklarına olan bağımlılıktan uzaklaşmada en önemli yöntemlerden bir tanesidir. Bu tür teknolojilerin kullanılmasıyla, çevresel açıdan da pek çok avantaj kazanılması mümkün olacaktır.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar




- Arslan, Oguz. (2010). Exergoeconomic evaluation of electricity generation by the medium temperature geothermal resources, using a Kalina cycle: Simav case study. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(9), 1866–1873.
- Arslan, Oğuz, Köse, R., Alakuş, B., & Özgür, M. A. (2006). Examining of Power Generation Potential in Simav Geothermal Field. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, (012), 57–67.
- Ashouri, M., Vandani, A. M. K., Mehrpooya, M., Ahmadi, M. H., & Abdollahpour, A. (2015). Techno-economic assessment of a Kalina cycle driven by a parabolic Trough solar collector. *Energy Conversion and Management*, 105, 1328–1339.
- Fallah, M., Mahmoudi, S. M. S., Yari, M., & Ghiasi, R. A. (2016). Advanced exergy analysis of the Kalina cycle applied for low temperature enhanced geothermal system. *Energy Conversion and Management*, 108, 190–201.
- Fertelli, A. (2022). Electric tariffs and thermal energy storage systems for buildings. *European Mechanical Science*, 6(4), 257–262.
- Jeannot, I., Rahman, M. M., Saat, A., Faizal, H. M., & Wahid, M. A. (2021). Thermodynamic Evaluation of a Solar Based Kalina Cycle.
- Kalina, A. I. (1983). Combined cycle and waste heat recovery power systems based on a novel thermodynamic energy cycle utilizing low-temperature heat for power generation. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* (Vol. 79368, p. V001T02A003). American Society of Mechanical Engineers.

- Kim, K. H., Ko, H. J., & Han, C. H. (2020). Exergy Analysis of Kalina and Kalina Flash Cycles Driven by Renewable Energy. *Applied Sciences*, 10(5), 1813.
- Koç, Y., & Yağlı, H. (2020). Isı-güç kombine sistemlerinde kullanılan kalina çevriminin enerji ve ekserji analizi. *Politeknik Dergisi*.
- Little, A. B., & Garimella, S. (2011). Comparative assessment of alternative cycles for waste heat recovery and upgrade. *Energy*, 36(7), 4492–4504. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.069>
- Liu, C., He, C., Gao, H., Xie, H., Li, Y., Wu, S., & Xu, J. (2013). The environmental impact of organic Rankine cycle for waste heat recovery through life-cycle assessment. *Energy*, 56, 144–154. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.045>
- Madhawa Hettiarachchi, H. D., Golubovic, M., Worek, W. M., & Ikegami, Y. (2007). The performance of the Kalina cycle system 11 (KCS-11) with low-temperature heat sources.
- Mahmoudi, S. M. S., Pourreza, A., Akbari, A. D., & Yari, M. (2016). Exergoeconomic evaluation and optimization of a novel combined augmented Kalina cycle/gas turbine-modular helium reactor. *Applied Thermal Engineering*, 109, 109–120. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.011>
- Marston, C. H. (1990). Parametric analysis of the Kalina cycle.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2010). *Fundamentals of engineering thermodynamics*. John Wiley & Sons.
- Mosaffa, A. H., Hasani Mokarram, N., & Garousi Farshi, L. (2017). Thermoeconomic analysis of a new combination of ammonia/water power generation cycle with GT-MHR cycle and LNG cryogenic exergy. *Applied Thermal Engineering*, 124, 1343–1353. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.126>
- Özahi, E., & Tozlu, A. (2020). Optimization of an adapted Kalina cycle to an actual municipal solid waste power plant by using NSGA-II method. *Renewable Energy*, 149, 1146–1156. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.102>
- Peris, B., Navarro-Esbrí, J., & Molés, F. (2013). Bottoming organic Rankine cycle configurations to increase Internal Combustion Engines power output from cooling water waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 61(2), 364–371. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.08.016>
- Rodríguez, C. E. C., Palacio, J. C. E., Venturini, O. J., Lora, E. E. S., Cobas, V. M., Dos Santos, D. M., ... Gialluca, V. (2013). Exergetic and economic comparison of ORC and Kalina cycle for low temperature enhanced geothermal system in Brazil. *Applied Thermal Engineering*, 52(1), 109–119.
- Sayyaadi, H., Khosravanifard, Y., & Sohani, A. (2020). Solutions for thermal energy exploitation from the exhaust of an industrial gas turbine using optimized bottoming cycles. *Energy Conversion and Management*, 207(October 2019), 112523. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112523>
- Seckin, C. (2018). Thermodynamic analysis of a combined power/refrigeration cycle: Combination of Kalina cycle and ejector refrigeration cycle. *Energy Conversion and Management*, 157(August 2017), 631–643. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.047>
- Seckin, C. (2023). Energy and Exergy Analysis of an Innovative Power/Refrigeration Cycle: Kalina Cycle and Ejector Refrigeration Cycle. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 35(2), 193–202.
- Sentürk Acar, M. (2021). Multi-stage artificial neural network structure-based optimization of geothermal energy powered Kalina cycle. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 145(3), 829–849.
- Sentürk, M. (2020). Thermodynamic and economic analysis of geothermal energy powered kalina cycle. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 40(2), 335–347.
- Shu, G., Liu, L., Tian, H., Wei, H., & Xu, X. (2013). Performance comparison and working fluid analysis of subcritical and transcritical dual-loop organic Rankine cycle (DORC) used in engine waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, 74, 35–43. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.04.037>
- Usvika, R., Rifaldi, M., & Noor, A. (2009). Energy and exergy analysis of kalina cycle system (KCS) 34 with mass fraction ammonia-water mixture variation. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23(7), 1871–1876.
- Wang, J., Yan, Z., Zhou, E., & Dai, Y. (2013). Parametric analysis and optimization of a Kalina cycle driven by solar energy. *Applied Thermal Engineering*, 50(1), 408–415.
- Wang, Y., Liu, Q., Lei, J., & Jin, H. (2015). Performance analysis of a parabolic trough solar collector with non-uniform solar flux conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 82, 236–249.
- Yaniktepe, B., Osman, K., & Parlak, T. K. (2021). Enerji tüketimi ve ekonomik büyüme ilişkisi: Türkiye.

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 4(3), 452–465.

- Yılmaz, F. (2023). Modeling of the Thermodynamic and Environmental Impact Assessment of a Geothermal Energy-Based Power and Hydrogen Generation Plant. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 11(2), 654–668.
- Yücel, E., Doğanay, B., Gökalp, F., Baycık, N., & Durmuşoğlu, Y. (2021). Integration of the Kalina Cycle in a Tanker Ship and Analysis of its Effect on Energy Efficiency. *SeaTific*, 1(1), 26–35.
- Yüksel, Y. E., & Öztürk, M. (2020). Jeotermal enerji destekli çok fonksiyonlu enerji üretim sisteminin termodinamik analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 113–121.
- Zhang, X., He, M., & Zhang, Y. (2012). A review of research on the Kalina cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5309–5318.
- Zhang, Y., He, M., Jia, Z., & Liu, X. (2008). First law-based thermodynamic analysis on Kalina cycle. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 2(2), 145–151.

Şehir İçi Raylı Sistem Araçlarında Verimli Dinamik Sürüş Tekniği Modellemesi ve Sürekli Zaman Karınca Kolonisi Algoritması (ACOR) ile Optimizasyonu

Ramazan GÜNGÜNEŞ^{1*}, Volkan ATEŞ², Ertuğrul ÇAM³

Öz

Nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu şehirlerde raylı sistem (RS) taşımacılığına olan talep sürekli artmaktadır. Artan taleple birlikte bu sistemlerde enerjinin verimli bir şekilde yönetilmesi neredeyse zorunlu hale gelmiştir. Verimli enerji yönetimi hem karbon emisyonlarını hem de işletme maliyetlerini azaltacaktır. Rejeneratif frenleme (RF) ile enerji üretme kabiliyetine sahip RS araçlarda, üretilen RF enerjisinin sisteme en uygun şekilde entegre edilmesi enerji verimliliğine katkı sağlamaktadır. Bu amaçla, bu çalışma RF enerjisi ile desteklenen enerji verimli dinamik sürüş tekniği (EVDST) modelini kullanarak raylı sistemlerde enerjinin verimli bir şekilde yönetilmesini amaçlamaktadır. Modelin optimum tasarımı, RS araçları için yatay kurplu bir hat boyunca boşta çalışma için en uygun hız profillerini ve başlangıç konumlarını seçmeyi ve maksimum enerji verimliliği elde etmeyi amaçlamaktadır. Önerilen model, minimum yolculuk süresi (MYS), minimum çekiş enerjisi tüketimi (MÇET) ve maksimum rejeneratif frenleme enerjisi üretimi (MRFEÜ) gibi tek amaçlı fonksiyonların optimizasyonunu içermektedir. Ayrıca, önerilen model MÇET/MRFEÜ, MÇET/MYS, MRFEÜ/MYS ve MÇET/MRFEÜ/MYS gibi çok amaçlı fonksiyonların optimizasyonunu da kapsamaktadır. Tek amaçlı ve çok amaçlı fonksiyonlar, operasyonel kısıtlamaları ve optimum çalışma bölgelerini keşfetmek için senaryo tabanlı bir şekilde Sürekli Zaman Karınca Kolonisi Optimizasyon Algoritması (ACOR) kullanılarak optimize edilmiştir. Çalışma sonucunda MRFEÜ/MÇET oranında %53,459'luk bir verimlilik elde edilmiştir. Önerilen senaryo tabanlı modelde MÇET için %32,832'lik bir oran elde edilirken, MRFEÜ için %80,060'lık bir oran elde edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma ile literatürdeki sürüş modellerine alternatif olarak kurp yapısının sistem dinamiğine etkisi artırılmış ve daha gerçekçi bir sürüş modeli geliştirilmesi sağlanmıştır. Ayrıca kullanılan yapay zeka optimizasyon tekniği ile literatüre sürüş modeli geliştirilmesi noktasında farklı bir bakış açısı sunarak katkıda bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Sürekli Zaman Karınca Kolonisi Algoritması, Enerji Verimli Sürüş Tekniği, Rejeneratif Frenleme Enerjisi, Doğa Esinli Optimizasyon, Raylı Sistem Enerji Verimliliği, Raylı Sistem Dinamik Sürüş Tekniği

Efficient Dynamic Driving Technique Modeling in Urban Rail Vehicles and Optimization with Continuous Time Ant Colony Algorithm (ACOR)

Abstract

The demand for rail systems (RS) transportation is constantly increasing in cities with high population density. Along with the growing demand, the efficient management of energy in these systems has become almost mandatory. Efficient energy management will reduce both carbon emissions and operational costs. In RS vehicles equipped with regenerative braking (RB) energy generation capability, the optimal integration of the produced RB energy into the system contributes to energy efficiency. For this purpose, this study aims to efficiently manage energy in RS using the energy-efficient dynamic driving technique (EEDDT) model supported by RB energy. The optimal design of the model aims to select the most suitable speed profiles and starting positions for coasting running along a horizontally curved track for RS vehicles, achieving maximum energy efficiency. The proposed model includes the optimization of single-objective functions such as minimum travel time (MTT), minimum traction energy consumption (MTEC), and maximum regenerative braking energy production (MRBEP). Additionally, the proposed model also encompasses the optimization of multi-objective functions such as MTEC/MRBEP, MTEC/MTT, MRBEP/MTT, and MTEC/MRBEP/MTT. The single-objective and multi-objective functions were optimized using the Continuous Time Ant Colony Optimization Algorithm (ACOR) in a scenario-based manner to explore the operational constraints and optimum working regions. As a result of the study, an efficiency of 53.459% was achieved in the MRBEP/MTEC ratio. For the proposed scenario-based model, a ratio of 32.832% was obtained for MTEC, and a ratio of 80.060% was achieved for MRBEP. As an alternative to the driving models in the literature, the effect of the curve structure on the system dynamics has been increased and a more realistic driving model has been developed. In addition, with the artificial intelligence optimization technique used, it has contributed to literature by offering a different perspective on driving model development.

Keywords: Continuous Time Ant Colony Algorithm, Energy Efficient Driving Technique, Regenerative Braking Energy, Nature Inspired Optimization, Rail System Energy Efficiency, Rail System Dynamic Driving Technique

¹Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Yahşihan/Kırıkkale, ramazangunes@kku.edu.tr

²Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Tarsus/Mersin, volkanates@tarsus.edu.tr

³Samsun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İlkadım/Samsun, ertugrul.cam@samsun.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0001-6722-7275>

²<https://orcid.org/0000-0002-2349-0140>

³<https://orcid.org/0000-0001-6491-9225>

1. Giriş

Dünya genelinde ulaştırma sektörü, üretilen enerjinin yaklaşık %28'ini tüketmektedir (Rodrigue ve ark., 2012). Bu nedenle, ulaşım sektöründe enerjinin verimli bir şekilde yönetilmesi çok önemlidir. Tüketilen enerjinin yönetilmesi amacı ile farklı çözüm yöntemleri araştırılıp denenmektedir. Bu çözüm yöntemlerinden biri olarak şehir içi toplu ulaşım araç kapasitesinin ve kullanım oranının artırılması ele alınabilir. Şehir içi toplu taşıma sistemlerindeki kapasite artışı sonucunda trafik yoğunluğu, fosil yakıt kullanımı ve karbon emisyonu da düşecektir. Buna karşılık tüketilen enerjinin yönetilmesi gerekliliği daha da önem kazanacaktır.

Yapılan araştırmalarda otomobillerin RS araçlarına oranla yolcu/km başına daha fazla enerji tükettiği görülmüştür (Morea ve ark., 2021). RS taşımacılığı, toplu taşıma sistemleri içerisinde, daha fazla yolcu taşıma kapasitesi ve birim yolcu başına daha uygun maliyetlere sahip olması nedeni ile en popüler ulaşım sistemlerinden biridir (ERRAC, 2017).

Ulaşım talebindeki artış ile birlikte RS araç sayısı ve kapasitesinde de sürekli bir artış olacaktır. Bu durum ise, raylı sistemlerde enerji verimliliğini ve enerji yönetimini önemli bir konu haline getirmektedir. RS taşımacılığında enerji tüketiminin minimize edilmesi amacı ile uygulanan yöntemlerden biri, aracın düşük hızlarda hareket ettirilmesidir. Bu yöntem her ne kadar tüketilen enerji miktarını düşürse de yolculuk süresinin artmasına sebep olur. Yolculuk süresinin artması yolculuk konforu açısından istenmeyen bir durumdur.

RS işletmesinde işletme verimliliğinin artırılması için önerilen bir başka yöntem ise, RF enerjisinin kullanılmasıdır. RF durumunda motorlar, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek jeneratör modunda çalışır. RF ile kazanılan enerji, aracın yerleşik yüklerini beslemek için kullanılabilir. Daha fazla RF enerjisi üretilmesi durumunda üretilen fazla enerji üçüncü raydan bir başka aracın tepe yükünü düşürmek için sisteme verilebilir. Yoğun ulaşımına sahip kısa mesafeli güzergâhlarda ve eğimli yapıya sahip uzun mesafeli güzergâhlarda, hızlanma-frenleme döngüleri sıklıkla tekrarlanır. Bu tekrarlanma sonucunda önemli miktarda RF ile kazanılan yenilenebilir bir enerji ortaya çıkar (Khodaparastan ve ark., 2019).

Literatürde yapılan çalışmalarda, raylı sistemlerde RF enerjisinin yaklaşık %40'a varan bir kısmının geri kazanılabileceği de belirtilmiştir (Bae ve ark., 2007). RF enerjisinden maksimum seviyede faydalanmak için aracın sefer aralıklarının optimize edilmesi de son derece önemlidir. Sefer aralıklarının optimal planlanmadığı bir durumda, kullanılmayan RF enerjisi yakılarak ısı enerjine dönüştürülmektedir. Oluşan ısı tünel ve istasyonlarda bulunan havalandırma ve soğutma sistemlerinin daha fazla enerji tüketmesine sebep olmaktadır (González-Gil ve ark., 2014). Bu durum sefer planlamalarının ve rejeneratif enerjinin verimli bir şekilde yönetilememesinden kaynaklanmaktadır. RF enerji verimliliğini artıran bir başka yöntem, RS araç hız eğrilerinin ve hareket sürelerinin

belirlendiği hız profili optimizasyon (HPO) yöntemidir (Fernández ve ark., 2019). Yöntem önceden belirlenmiş bir yolculuk süresi içerisinde optimum enerji tüketimi ile gerçekleştirilen sürüş tekniği olarak özetlenmektedir (Fernández ve ark., 2019). Raylı sistemlerde HPO ve enerji verimliliği 1960'lı yıllardan itibaren dünya genelinde araştırılan bir konudur (Corlu ve ark., 2020; Feng ve ark., 2018; Huang ve ark., 2018; Luan ve ark., 2018; Siefert & Li, 2021; Su ve ark., 2013, 2019). RS aracı belirlenen zamanda başlangıç konumundaki istasyondan hareket etmeli ve belirlenen zamanlarda varış istasyonundaki konumunda durmalıdır. Zira aracın durduğu yerin peron girişinden maksimum 15 cm hata ile örtüşmesi gerekir (Xing ve ark., 2023). Bu sebeple HPO yöntemi aracın istasyondan kalkış, hedef istasyona varış ve istasyonda bekleme sürelerinin sürüş öncesinde belirlenmesinde önemli bir yere sahiptir. Yöntem aynı zamanda yolculuk esnasında RS araç sürücüsüne çeşitli önermeler getiren ve enerji verimliliğine katkı sağlayan Sürücü Yardımcı Sistemlerin (SYS) geliştirilmesine de zemin oluşturmaktadır (Zhang ve ark., 2019).

Raylı sistemlerde enerji verimliliğine yönelik ilk çalışmalar, 1985 yılında Asnis ve arkadaşları ile başlamıştır (Asnis ve ark., 1985). Gordon ve Lehler yaptıkları çalışmada RS araçlarının koordineli bir şekilde çalışmasının RF enerjisi üzerindeki etkisini araştırmışlardır (Gordon & Lehrer, 1998). Yang ve arkadaşları, aynı istasyon üzerindeki zıt yönlü raylı sistem araçları yerine, aynı yönlü araçlar üzerinde çalışmalar yapmıştır. Çalışmada araçların hızlanma ve frenleme zamanlarının örtüşme durumlarını incelemiştir. (X. Yang ve ark., 2013). Yang ve arkadaşları gerçekleştirdikleri bir başka çalışmada değişken yolcu sayısına bağlı gecikme sürelerini ve toplam yolculuk sürelerini ele almışlardır. Çalışmada Genetik Algoritma (GA) ile zaman çizelgeleme tabloları oluşturulmuş ve yolculuk süresindeki azalmalar ele alınmıştır (L. Yang ve ark., 2008).

Çalışmamız, RS taşımacılığında EVDST modeli üzerine odaklanmaktadır. Minimum çekiş enerjisi tüketimi (MÇET), maksimum rejeneratif frenleme enerjisi üretimi (MRFEÜ) ve minimum yolculuk süresi (MYS) kısıtlamaları dahilinde RS araçlarının hız/konum eğrilerinin optimizasyonu amaçlanmaktadır. Yatay kurptan oluşan bir hatta, hız/konum ve boşta gitme aralıkları belirlenmiştir.

Çalışmamız gerçek sistemlere daha yakın olması açısından yolcu sayısına bağlı dinamik ağırlık, hıza bağlı sürtünme, pozitif eğim ve yatay bir kurp varlığında ele alınmıştır. Bu kapsamda sürüş hızı, kurp giriş hızı ve RF enerji oluşumunu destekleyecek boşta gitme konum aralıklarının optimal seçimi ACOR algoritması ile belirlenmiştir. Belirlenen bu durum ve limit seçimlerinin optimizasyonu sonucu EVDST modeli geliştirilmiştir. Çalışmaya ilave edilen yatay kurp dinamik sürüş tekniği durum sayısının artırılmasına katkı sağlamaktadır. Kurp varlığı aynı zamanda RF enerjisi oluşumunu destekleyecek boşta gitmeye başlama noktalarının belirlenmesinde de etkilidir. Gerçek sistemlere daha yakın dinamik hesaplamalarının kullanılması ve yolcu sayısına bağlı dinamik ağırlık değişiminin etkisi modele ayırt edici bir özellik kazandırmaktadır. Çalışmamız bu kapsamda değerlendirildiğinde, birden fazla limit sınırlamasının ve özellikle değişken yatay kurp hızlarının

etkisinin ele alındığı yeni bir EVDST özelliği taşımaktadır. Model raylı sistem aracının genel hareket evrelerini kapsayan, kurp öncesi 46 ve kurp sonrası 42 farklı senaryodan oluşmaktadır. Bu senaryo kombinasyonları sonucu toplamda 1932 senaryo tabanlı sürüş tekniği gerçekleştirilmiştir. Belirlenen aralıklar için amaç fonksiyonları tek kararlı ve çok kararlı olarak oluşturulmuştur. Tek kararlı amaç fonksiyonları MYS, MÇET ve MRFEÜ, çok kararlı amaç fonksiyonları MÇET/MYS, MRFEÜ/MYS, MÇET/MRFEÜ ve MÇET/MRFEÜ/MYS karşılaştırmalarından oluşmaktadır.

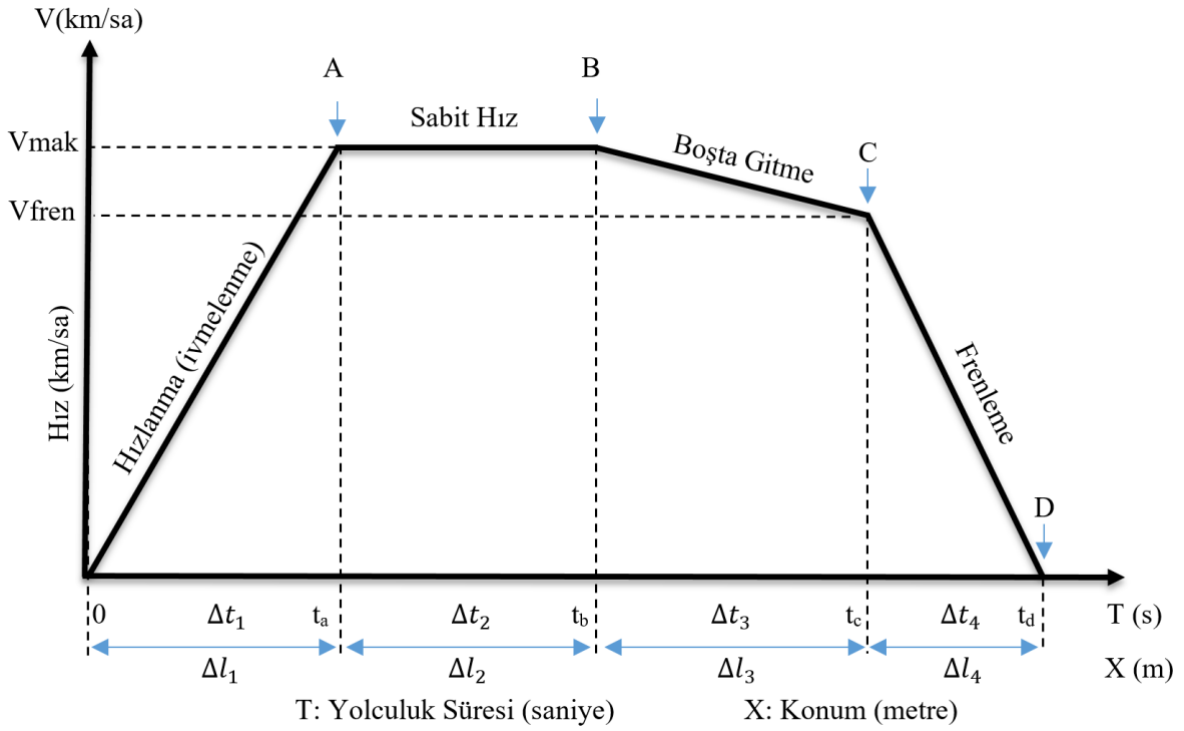
Amaç fonksiyonlarının optimal değerleri ve pareto optimal çalışma sınır koşulları ACOR ile optimize edilmiştir. Önerilen EVDST modeli ile raylı sistemlerde hız/konum kararlılığı, enerji verimli yolculuk seferlerinin oluşturulması, yolculuk süresinin öncesinden tespit edilmesi, kısıtlanan yolculuk süresindeki en verimli sürüş tekniğinin belirlenmesi ve RS aracının varış istasyonunda minimum hata ile durması da sağlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

RS aracı sürüş teknikleri üzerine yapılan çalışmalarda, aracın hız ve yolculuk süresi kısıtlamaları ile başlangıç istasyonundan varış istasyonuna ulaştırılması hedeflenmektedir. Şehir içi RS aracı olan tramvaylar genelde 1.1 m/s^2 gibi bir ivme ve ortalama 20 km/h ile 30 km/h arasında değişen işletme hızlarında kullanılırlar. Güvenli duruş mesafesi ya da kurp bölgesi gibi yavaşlaması gereken bölgelere yaklaştıklarında ise genelde 1.3 m/s^2 gibi bir ivme ile hızlarını azaltmaya başlarlar (Khodaparastan ve ark., 2019). Hızlanma-yavaşlama döngüsü ile birlikte RF yeteneğine sahip araçlar yolculuk sırasında RF enerjisi üretebilir (Scheepmaker ve ark., 2017).

Üretilen bu enerji optimal sürüş teknikleri ile desteklenerek daha verimli hale getirilebilir. Bir RS aracının hareket evreleri genel olarak Şekil-1'de görüldüğü gibidir. Hızlanma evresinde yüksek miktarda enerji tüketilir. Seyir evresinde hızlanma evresinden daha düşük bir enerji tüketimi gerçekleşir. Boşta gitme evresinde RF yeteneğine sahip araçlarda enerji üretilir. Frenleme evresinde enerji tüketimi gerçekleşmez (Chen ve ark., 2005). Bu evreler çerçevesinde farklı sürüş teknikleri ile verim artırılabilir (Scheepmaker ve ark., 2017).



Şekil 1. Raylı sistem aracı hız profili (Scheepmaker ve ark., 2017)

Şekil-1’de görüldüğü gibi RS aracı 0-A arasında “a” ivmesi ile Δt_1 süresince hızlanır. A-B arasında V_{\max} hızında Δt_2 süresince seyrine devam eder. B-C arasında Δt_3 süresince boşta gider. C-D arasında Δt_4 süresince mekanik frenleme yaparak durur. Başlangıç konumundan itibaren hedef istasyona kadar hareket $\Delta t_{\text{toplam}}(X) = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4$ süresinde tamamlanır.

Elektrikli bir raylı sistem aracı, harekete başladığı ilk andan itibaren çekiş gücü için enerji talep etmeye başlar. Talep edilen bu enerji ile birlikte hızlanarak kazandığı kinetik enerjiyi, yuvarlanma direnci, aerodinamik sürtünme ve fren sistemi gibi karşı kuvvetlerin üstesinden gelmek için tekrardan kullanır (Guo ve ark., 2017). Talep edilen enerjinin verimli bir şekilde kullanılması için yuvarlanma direnci, maksimum seyir hızı, frenleme hızı ve yol eğimi gibi değişkenlerin analiz edilmesi gerekmektedir (Bae ve ark., 2007; Scheepmaker ve ark., 2017).

Bu kapsamda yapılan çalışmada, aracın EVDST modeli geliştirilirken, literatürde en çok kullanılan parametreler seçilmiştir. Modelde kullanılan araç teknik özellikleri Tablo-1’de, dinamik sürüş tekniği tanım ve değerleri Tablo-2’de verilmiştir.

Tablo-1: Raylı sistem aracı teknik özellikleri

RS Araç Teknik Özellikleri	Değer	RS Araç Teknik Özellikleri	Değer
Koltuk Kapasitesi	50 Adet	Boş RS Araç Ağırlığı	45.452 kg
Ayakta Yolcu Kapasitesi (8 Kişi/m ²)	240 Yolcu	Tam Kapasite (70kg/yolcu)	65.752 kg
Toplam Yolcu Kapasitesi	290 Yolcu	Hızlanma İvmesi	1.2 m/s ²
Maksimum Hız	70 km/sa	Frenleme İvmesi	2.8 m/s ²
Ortalama İşletme Hızı	25 km/sa	RS Araç Çekiş Gücü	544 kW

Tablo-2. Dinamik sürüş tekniği tanımları ve değerleri

Model Tanımlamaları	Açıklama	Değer aralıkları	
		Maksimum	Minimum
V_{mak_1}	Kurp öncesi maksimum seyir hızı	70 km/h	15 km/h
V_{mak_2}	Kurp sonrası maksimum seyir hızı	70 km/h	15 km/h
V_{fren_1}	Kurp öncesi güvenli duruş frenleme hızı	15 km/h	
V_{fren_2}	Kurp sonrası güvenli duruş frenleme hızı	15 km/h	
R_{kurp}	Kurp çapı	270 m	
k_c giriş	Kurp giriş mesafesi	137 m	
k_c çıkış	Kurp çıkış mesafesi	237 m	
$k_{istasyon}$	İstasyon mesafesi	660 m	
s	Yüzde eğim	4.046	
a_h	Hızlanma ivmesi	1 m/s ²	1.2 m/s ²
a_g	Geçiş hızı hızlanma ivmesi	1 m/s ²	1.2 m/s ²
a_f	Frenleme ivmesi	1 m/s ²	1.4 m/s ²

2.2. Metot

Aşağıda, bu çalışmada kullanılan ve karşılaştırma amaçlı olarak sunulan farklı metotlar sırasıyla açıklanmıştır. Ancak öncesinde önerilen EVDST modelinin oluşturulmasına temel teşkil eden raylı sistem hareket dinamik hesaplamaları verilmiştir.

2.2.1. Raylı Sistem Aracı Hareket Dinamikleri Hesaplamaları

Bir RS aracının enerji verimliliğinin araştırılmasında, aracın hareketini sağlayan ve hareketine karşı koyan kuvvetlerin doğru modellenmesi önemlidir.

Aracın hareket denklemi Newton'un ikinci yasasından faydalanılarak elde edilebilir. Bu hesaplama göre net kuvvet Denklem-1'de verildiği şekliyle yazılabilir.

$$\sum F = Z - W = M \cdot a = M \frac{dv}{dt} \quad (N) \quad (1)$$

Denklem-1'de, " $\sum F$ " (N) araca etki eden net kuvvet, " M " (kg) aracın kütlesi, " a " (m/s²) hızlanma ivmesi, " Z " (N) aracı hızlandıran çekim kuvveti, " W " (N), aracın hareketini zorlaştıran direnimsel kuvvettir.

Aracın iç mekanizmasında sabit olmayan yapılar bulunmaktadır. Bu yapılar nedeniyle, sabit halden pozitif ivme ile hızlanma hareketine geçen aracın kütlesi artarak değişir. Kütle artışı, " ξ " şeklinde gösterilen bir katsayı ile belirtilir. Bu ifadeye göre yeni kütle, " $(1 + \xi) \cdot M$ " olur. Burada, $(1 + \xi)$ kütle artış katsayısıdır. Raylı sistem hareket hesaplamalarında birim ağırlık başına çekim ve direnimsel kuvvetleri kullanıldığından kütle " M " yerine ağırlık " G " kullanılmıştır. Direnimsel kuvvetleri her evrede araç hareketinde etkilidir. Çekim kuvveti ise, aracın ilk hareket, hızlanma ve sabit hızla yol alma evrelerinde etkili olmaktadır. Aracın hız düşürmeye gerek duyduğu anlarda çekim kuvveti

uygulanmamaktadır. Fren evresinde duruş için fren direnimi uygulanır. Fren direnimi Denklem-2'de verildiği şekli ile yazılabilir.

$$w_b = (\alpha\beta/\gamma)\mu_b \text{ (N/kN)} \quad (2)$$

Denklem-2'de " w_b " (N/kN) fren direnimi, $\alpha \cong 0.70$, $\beta \cong 0.80 - 0.90$ ve $\gamma \cong 0.80 - 0.85$ olmak üzere; aracın fren türüne ve fren elemanlarına bağlı katsayılarıdır. " μ_b " tekerlek ile fren pabucu arasındaki sürtünme direnidir. Araca ait hareket hesaplarında, aracın birim ağırlığı başına çekim " z " (N/kN), ve birim ağırlığı başına direnimsel kuvveti " w " (N/kN) kullanılır. Direnimsel kuvvetleri " w_0 " seyir direnimi ve " w_h " hat direnimsel kuvvetlerinin toplamından oluşmaktadır. Gerekli dönüşümler yapılarak birim ağırlık türünden kuvvet hesaplaması Denklem-3'te verildiği şekliyle yazılabilir.

$$z - w = \frac{1}{\rho} \frac{dv}{dt} \text{ (N/kN)} \quad (3)$$

Denklem-3 te verilen $\frac{1}{\rho} = (1 + \xi) \frac{1000}{g}$ ifadesi dönüşüm işlemini göstermektedir.

Denklem-3'te " $z - w$ " (N/kN), aracın birim ağırlığı başına etkiyen net kuvvettir.

Aracın demeraj evresinde belirli bir ilk hızdan, son hıza ulaşması için geçen süre ve bu süre sonunda aldığı yol sırası ile Denklem-4 ve Denklem-5'te görüldüğü şekliyle yazılabilir.

$$\Delta t_d = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta V}{3.6(z - w)} \text{ (s)}, t_d = \sum \Delta t_d \quad (4)$$

$$\Delta l_d = \Delta t \frac{V_0}{3.6} \text{ (m)}, l_d = \sum \Delta l_d \quad (5)$$

Demeraj evresinden sonra araç, sabit hız ile yoluna devam ettiği rejim hızına geçmektedir. Rejim hızında çekim kuvveti, direnimsel kuvvetlerinin toplamına eşittir.

RS aracının bir başka evresi frenlemeye hazırlık veya frenleme evresidir. Frenleme evresinde çekim kuvveti yoktur. Frenleme evresi için direnimsel kuvveti Denklem-6'da verilmiştir.

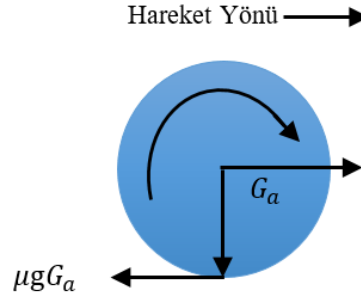
$$-w - w_b = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta v}{\Delta t} \text{ (N/kN)} \quad (6)$$

Araç hareketi, çekici taşıtın yürütücü dingiline bağlı tekerleklerin yuvarlanmaya başlaması ile gerçekleştirir. Bir tekerleğin patinaj yapmadan hareket etmesi için, bir kuvvet çifti gereklidir. Bu kuvvetlerden biri tekerleğin dingil milinde etkinken, diğeri tekerleğin raya temas noktasında etkindir.

Kuvvetlerin zıt yönde uygulanması ile araç harekete başlar. Tekerleğin dingil mili seviyesinde etkin olan kuvvet, çekici araç motorundan dingil miline aktarılan kuvvettir. Tekerleğin raya temas noktasında etkin olan kuvvet, tekerlek ile ray arasındaki sürtünme (aderans) kuvvetidir. Sürtünme katsayısı, Denklem-7’de verildiği şekliyle hıza bağlı olarak hesaplanabilir.

$$\mu = 160 + [750/(V + 44)] \text{ (N/kN)} \quad (7)$$

Sürtünme ağırlığı G_a (ton- f) olan bir yürütücü tekerleğin hareketiyle ilgili olarak şekil-2’deki koşullar geçerlidir.



Şekil 2. Çekici taşıtın yürütücü tekerleğinde kuvvet çiftinin oluşumu (çekim ve sürtünme kuvveti)

Şekil-2’deki kuvvetlerle ilgili olarak aşağıdaki eşitsizlikler yazılabilir.

$Z_a < W < \mu g G_a, (V = 0)$; Hareket gerçekleşmez
$W < Z_a < \mu g G_a, (V > 0)$; Yuvarlanma hareketi
$W < \mu g G_a < Z_a$; Patinajlayarak ilerleme
$\mu g G_a < W < Z_a$; Yerde patinajlama

Eşitsizliklerde bulunan " Z_a " aderans çekim kuvveti (N), " G_a " aderans ağırlığı (ton-f), " $\mu g G_a$ " sürtünme kuvveti (N) olarak verilmiştir. Seyir direnimi genel olarak açık hava ve düzlükteki direnim olarak tanımlanabilmektedir. Seyir direniminin genel ifadesi Denklem-8’de verildiği şekliyle yazılabilir.

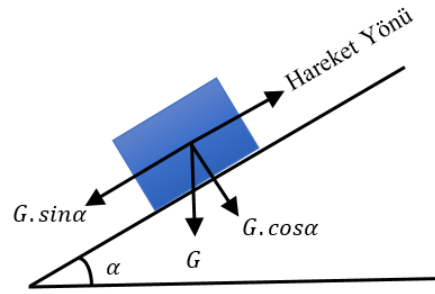
$$w_0 = a + bV^2 \text{ (N/kN)} \quad (8)$$

Seyir direniminde, a ve b sabitler, "V" ise demiryolu aracının km/h cinsinden hızıdır. Hat direnimi, demiryolu hattının geometrik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Hat direnimleri; karp

direnimi (w_r), tünel direnimi (w_t) ve eğim direniminden (w_s ya da s) oluşur. Kurp direnimi Denklem-9'da görülmektedir.

$$w_r = 700/R \text{ (N/kN)} \quad (9)$$

Tünel direniminin aldığı değerler, 0.5- 6 N/kN arasında değişebilir. Şekil- 3'te görüldüğü gibi eğim direnimi, katar ağırlığının yuvarlanma yüzeyine paralel bileşeninden oluşur ve rampa çıkış yönünde etkisini gösterir. Bu bileşen iniş yönünde çekim kuvvetine ya da aracın hareketine katkı sağlar. Eğim direnimi hesabı $W_s = G \cdot \sin\alpha$ şeklinde verilmiştir.



Şekil 3. Eğim direnimi

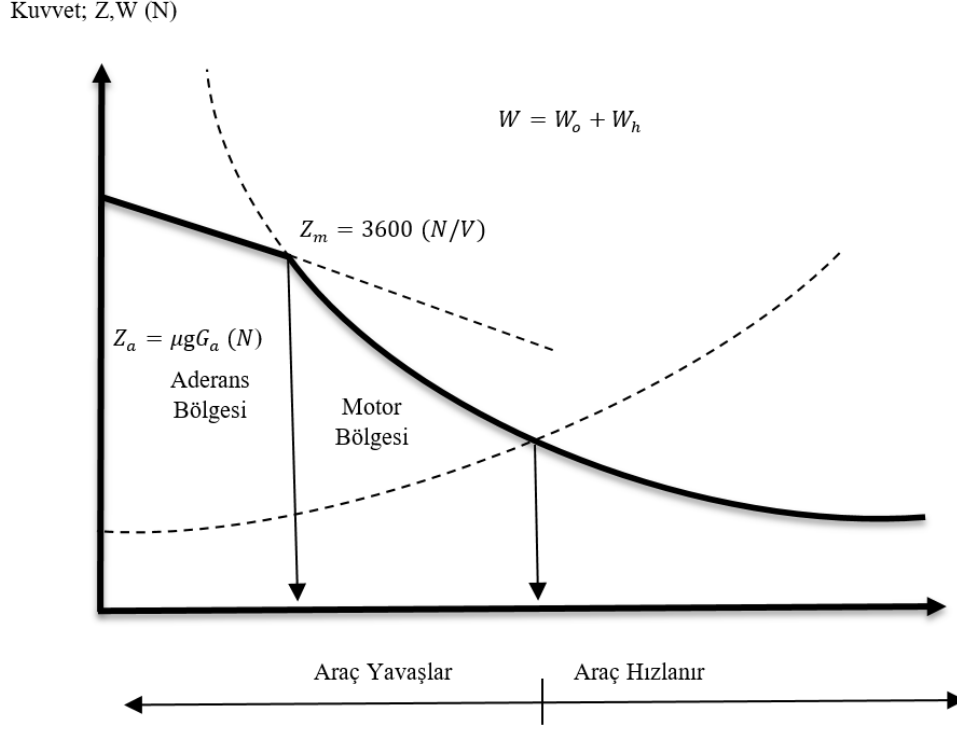
Demiryollarında boyuna eğim çok küçük olduğundan, $\sin\alpha \cong \tan\alpha$ olur. Böylece eğim direnimi Denklem-10'da görüldüğü şekliyle yazılabilir.

$$w_s = W_s/G = G \tan\alpha / G = s = \tan\alpha \quad (10)$$

Çekim hesaplarında, rampa çıkışta araç hareketi zorlaştığı için eğim direniminin işareti pozitif, inişte ise araç hareketi kolaylaştığı için negatif alınır. Bu hesaplamalar ile araca etkiyen net direnim kuvveti Denklem-11'de gösterilmiştir.

$$w = w_0 + w_r + w_t \pm s \text{ (N/kN)} \quad (11)$$

Aderans ağırlığı ve gücü belirli bir lokomotif için elde edilen çekim kuvveti ifadeleri (Z_a ve Z_m), hızın bir fonksiyonu olarak Şekil-4'te görülmektedir. Bu grafikten hız ve çekim kuvvetine ilişkin bazı sınır değerleri de elde edilebilir.



Şekil 4. Çekim kuvvetleri (Z_a ve Z_m) toplam direnim (W) ve (V) ilişki grafiği

Denklem-12 ve Denklem-13'te, V_t geçiş hızı olup $Z_a = Z_m$ eşitliğinden elde edilir.

$$Z = Z_a = \mu g G_a (N) \quad ; V \leq V_t \text{ (Aderans bölgesi ise)} \quad (12)$$

$$Z = Z_m = (3600P)/V (N) \quad ; V \geq V_t \text{ (Motor bölgesi ise)} \quad (13)$$

Raylı sistem aracına uygulanan kuvvetler doğrultusunda enerji ve güç ifadeleri Denklem-14, Denklem-15 ve Denklem-16'da verilmektedir.

$$\text{İş (enerji): } E = Z_m l \text{ (Joule = Nm)} \quad (14)$$

$$\text{Güç: } P = E/t \text{ (Watt = Nm/s)} \quad (15)$$

$$P = (Z_m l)/t = Z_m v^{m/s} = Z_m V^{\text{km/sa}}/3.6 \quad (16)$$

Genel hareket denkleminde tüketilen enerji ve üretilen RF enerjisi Denklem-17 ve Denklem-18'de verildiği şekli ile yazılabilir.

$$E_{tük_{i+1}}(l) = Z_{i+1} * \Delta l_i \quad (17)$$

$$E_{rej_{i+1}}(l) = W_{i+1} * \Delta l_i \quad (18)$$

Toplam hat boyunca tüketilen toplam enerji, üretilen toplam RF enerjisi ve toplam yolculuk süresi sırası ile Denklem-19, Denklem-20 ve Denklem-21’de verildiği şekliyle yazılabilir.

$$E_{tük_{toplam}}(X) = \sum_{i=1}^{iterasyon} (E_{tük_i} + (Z_{i+1} * \Delta l_i)) \quad (19)$$

$$E_{rej_{toplam}}(X) = \sum_{i=1}^{iterasyon} (E_{rej_i} + (W_{i+1} * \Delta l_i)) \quad (20)$$

$$\Delta t_{toplam}(X) = \sum_{i=1}^{iterasyon} (\Delta t_i + \Delta t_{i+1}) \quad (21)$$

Tek kararlı amaç fonksiyonları sırası ile Denklem-22, Denklem-23 ve Denklem-24, çok kararlı amaç fonksiyonları sırası ile Denklem-25, Denklem-26, Denklem-27 ve Denklem-28’de verilmiştir.

$$OF1 = \min \left(\sum_{n=1}^{iterasyon} E_{tük_n}(X) \right) \quad (22)$$

$$OF2 = \max \left(\sum_{n=1}^{iterasyon} E_{rej_n}(X) \right) \quad (23)$$

$$OF3 = \min \left(\sum_{n=1}^{iterasyon} \Delta t_n(X) \right) \quad (24)$$

$$OF4 = \min \left(\sum_{n=1}^{it} \sqrt{(OF1 - E_{tük_n}(X))^2 + (OF3 - \Delta t_n(X))^2} \right) \quad (25)$$

$$OF5 = \min \left(\sum_{n=1}^{it} \sqrt{(OF2 - E_{rej_n}(X))^2 + (OF3 - \Delta t_n(X))^2} \right) \quad (26)$$

$$OF6 = \min \left(\sum_{n=1}^{it} \sqrt{(OF1 - E_{tük_n}(X))^2 + (OF2 - E_{rej_n}(X))^2} \right) \quad (27)$$

$$OF7 = \min \left(\sum_{n=1}^{it} \sqrt{(OF1 - E_{tük_n}(X))^2 + (OF2 - E_{rej_n}(X))^2 + (OF3 - \Delta t_n(X))^2} \right) \quad (28)$$

2.3. Optimizasyon Kriterlerinin Seçimi

Matematiksel modeli net bir şekilde ortaya konamayan ya da en uygun çözümün bulunması için geçen sürenin çok fazla olduğu problemler, zor optimizasyon problemleri olarak sınıflandırabilir

(Mohamed ve ark., 2020). Bu durumlarda, son yıllarda literatürde çokça karşılaşılan stokastik tabanlı meta-heuristic (sezgisel) yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada da problemin birden fazla boyutu olması ve çeşitli avantajları nedeniyle sezgisel yöntemlerden biri olan ACOR kullanılmıştır.

2.3.1. Sürekli Zaman Karınca Kolonisi Algoritması (Acor-Ant Colony Optimization Algorithm For Continuous Optimization)

Karınca kolonisi algoritması 1990'lı yılların başlarında Dorigo tarafından karmaşık mühendislik problemlerine çözüm üretmek için geliştirilmiştir (Dorigo, 1992; Dorigo ve ark., 1996). Literatür incelendiğinde ACO'nun ilk olarak gezgin satıcı problemine uygulandığı görülmektedir (Dorigo & Gambardella, 1997). ACO yöntemi temel anlamda karıncaların hedef odaklı hareketlerini yön bulmak ve görece haberleşmek için kullandıkları feromon maddesinin yoğunluğu üzerinden modellemektedir (Liu ve ark., 2022). Genel olarak ACO algoritmasında 3 ana adım bulunmaktadır. Bunlar; Karınca Temelli Çözüm Yapısı, Feromon Güncelleme Mekanizması ve Yerel Arama Stratejisidir. ACO genel yaklaşımı aşağıda gösterildiği şekliyle açıklanabilir.

While (Tekrar Limiti Aşılmadı)

Çözüm Yapısını Oluştur,
Aday Çözüm Uygunluk Değerini Hesapla,
Feromon Güncellemesi Yap,
Yerel Arama Stratejisi Uygula,

End

Çözüm Yapısı (Ant Based Construction)

Çalışmaya başlamadan önce m adet karınca ile sonlu sayıda uygun çözüm uzayı oluşturulur. Bir çözüm adayının yapısı, boş bir çözüm uzayı üzerinde rastgele şekilde biçimlenir. Çözüm adaylarının başarıları yine çözüm yapısına uygun şekilde belirlenmiş olan uygunluk fonksiyonu ile ölçülür.

$$w_j = \frac{1}{\sigma NP \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\text{rank}(j)-1)^2}{2\sigma^2 NP^2}} \quad (29)$$

Her bir çözümün seçim ihtimali hesaplanan ağırlık ya da uygunluk değerine göre belirlenmektedir. Bu formülde rank(j) mevcut çözümün en iyi çözüme göre sırasını, NP çözüm

sayısını, σ ise önem değerini vermektedir. Çözümün seçim olasılığı p_j Denklem-30'da verildiği şekli ile hesaplanır ve mevcut çözüm ağırlığının tüm çözümlerin ağırlıkları toplamına oranıdır.

$$p_j = \frac{w_j}{\sum_{i=1}^{NP} w_i} \quad (30)$$

Çözümler seçilirken karıncaların ürettiği değişken değerleri Gauss dağılımı kullanılarak belirlenir. Bu formülde, d çözüm boyutunu ifade eder.

$$g(x^d, \mu^d, \delta^d) = \frac{1}{\delta^d \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x^d - \mu^d)^2}{2(\delta^d)^2}} \quad (31)$$

Yeni aday çözümler Denklem-32'de verildiği şekli ile üretilir. Bu Denklemden ξ katsayısı yakınsama katsayısıdır. Bu katsayının büyük seçilmesi en iyi çözüme gidişi yavaşlatırken çözüm hassasiyetini artırır.

$$\delta^d = \xi \sum_{NP}^{i=1} \frac{|x_i^d - x_j^d|}{NP - 1} \quad (32)$$

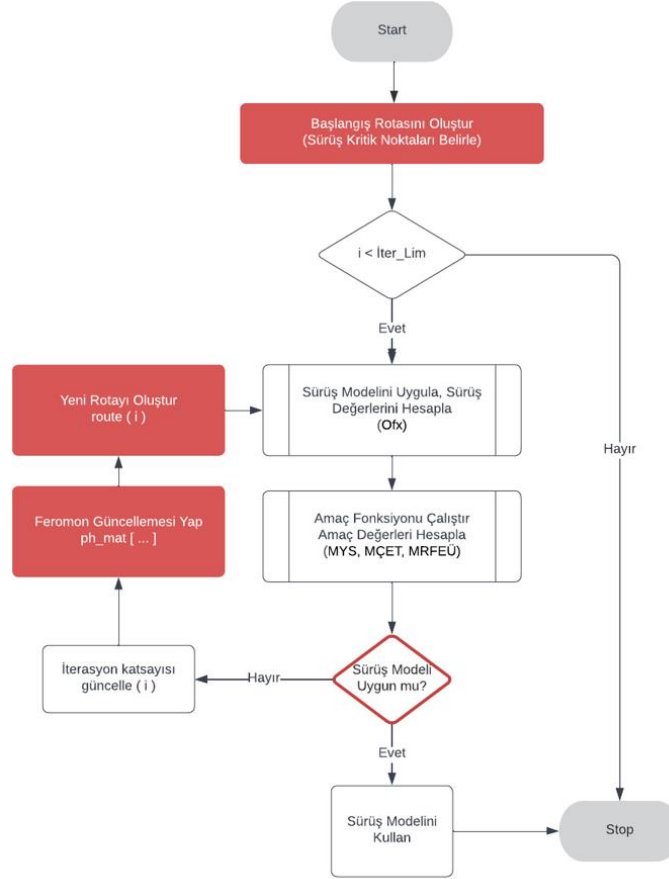
Genel Arama Stratejisi (Pheromone Update)

Feromon güncellemesinin amacı, iyi çözümlerle ilişkili feromon değerlerini artırmak ve kötü çözümlerle ilişkili olanları azaltmaktır. Bu genellikle feromon buharlaşması yoluyla tüm feromon değerlerini azaltarak ve seçilen bir dizi iyi çözümle ilişkili feromon seviyelerini artırarak gerçekleştirilir. Feromon buharlaşması, arama uzayında yeni alanların keşfedilmesini destekleyen faydalı bir unutma biçimi uygular.

Yerel Arama Stratejisi (Daemon Action)

Çözümler oluşturulduktan sonra ve feromon değerleri güncellenmeden önce, genellikle probleme özel bazı eylemler gerekebilir. Bunlar genellikle daemon eylemleri olarak adlandırılır ve tek karıncalar tarafından gerçekleştirilemeyen probleme özel ve/veya merkezi eylemleri uygulamak için kullanılabilir. En çok kullanılan daemon eylemi, inşa edilen çözümlere yerel arama uygulanmasından oluşur: yerel olarak optimize edilmiş çözümler daha sonra hangi feromon değerlerinin güncelleneceğine karar vermek için kullanılır.

Mühendislik problemlerini sürekli zamanda çözüm sunan ACO_R ACO'dan konsept olarak çok da farklı değildir (Socha & Dorigo, 2008; Wu ve ark., 2019). İki yaklaşım arasındaki temel fark ACO_R 'da ayrık olasılık dağılım yerine sürekli olasılık yoğunluk fonksiyonun (OYF) kullanılmasıdır. Yeni yaklaşımda kullanılan OYF Gauss fonksiyonu kullanılarak geliştirilmiştir. Geliştirilen modele ait ACOR akış diyagramı Şekil-5'te gösterilmiştir.

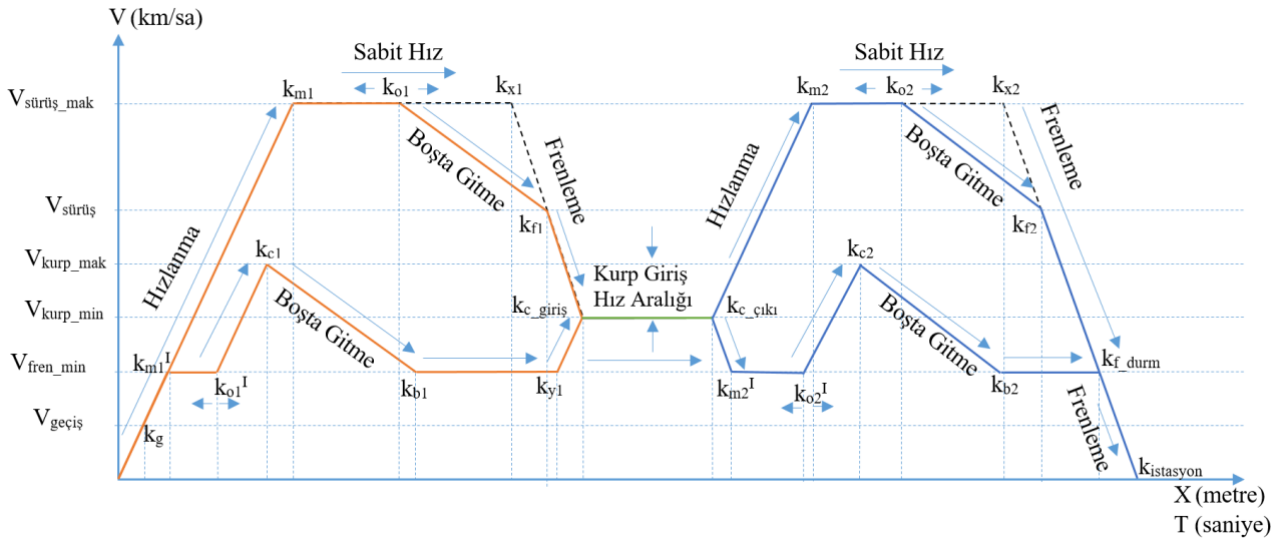


Şekil 5. Geliştirilen modele ait ACOR akış diyagramı

3. Simülasyon, Tartışma ve Sonuçlar

3.1. Simülasyon

Çalışmada kullanılan RS aracı Tablo-1 de teknik özellikleri verilen bir tramvay olarak belirlenmiştir. Her bir senaryo, RS aracının hareketini ele alan ve Şekil-6'da görülen aşamalardan oluşmaktadır. Bu kapsamda sürüş dinamiği hız profilleri, hızlanma, sabit hızda gitme, RF enerji oluşumu için boşa gitme ve frenleme evrelerinden oluşmaktadır.



Şekil 6. Enerji verimli dinamik sürüş tekniği modeli

Modelde maksimum sürüş hızı ve boşta gitmeye başlama noktalarının seçimi öncelikli olarak ele alınmaktadır. Önerilen modelde sürüş dinamiği seçimi için $V_{sürüş}$, V_{kurp} , ve $V_{frenleme}$ hız limit değerlerinin karşılaştırılması yapılmaktadır. Hız limit değerleri karşılaştırması sonucunda hangi senaryonun seçileceği tespit edilmektedir. Bu karşılaştırma kurp öncesi 6 ve kurp sonrası 6 farklı senaryo durumuna uygun olarak Tablo-3'te verilmiştir. Kurp öncesi ve kurp sonrası farklı senaryoların oluşması ile birlikte sürüş tekniği sayısı artırılmakta ve mümkün olan en verimli senaryonun seçilmesi sağlanmaktadır. Aynı zamanda rejeneratif frenleme enerjisi oluşumu destekleyecek boşta gitmeye başlama noktalarının oluşumuna ve optimizasyon aralığı seçimine de katkı sağlamaktadır.

Tablo-3. Hız limit değerler karşılaştırmalarına göre senaryo seçimi

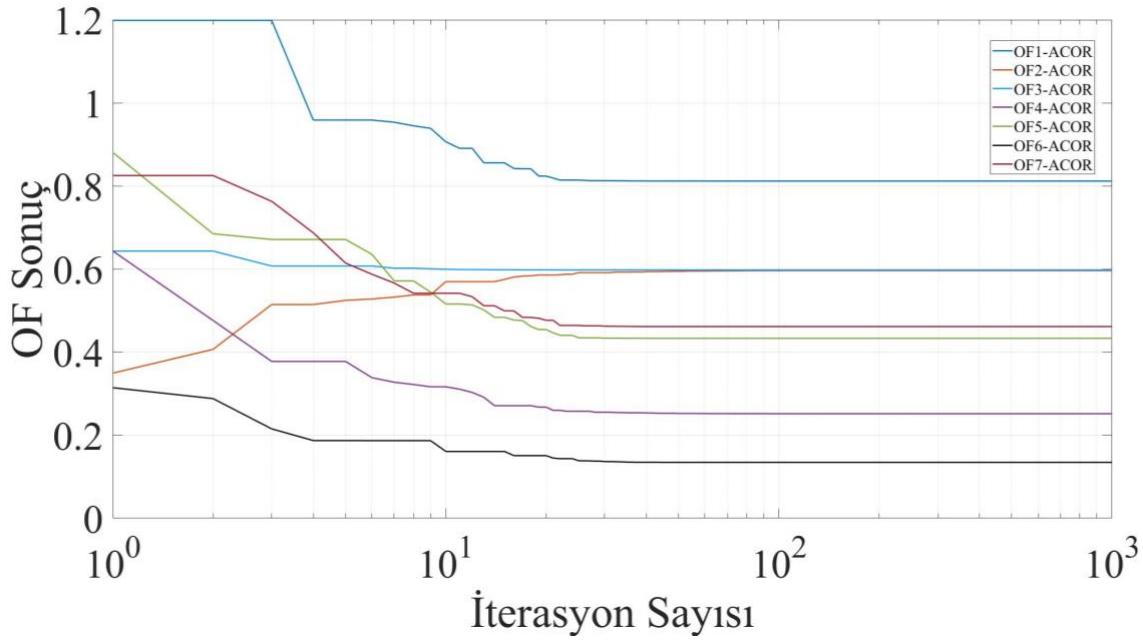
Senaryo	Kurp Öncesi	Kurp Sonrası
Sürüş Tekniği Senaryosu-1	$V_{sürüş} > V_{kurp}$ $V_{kurp} > V_{fren}$	$V_{sürüş} > V_{kurp}$ $V_{kurp} > V_{fren}$
Sürüş Tekniği Senaryosu-2	$V_{sürüş} > V_{kurp}$ $V_{kurp} = V_{fren}$	$V_{sürüş} > V_{kurp}$ $V_{kurp} = V_{fren}$
Sürüş Tekniği Senaryosu-3	$V_{sürüş} = V_{kurp}$ $V_{kurp} > V_{fren}$	$V_{sürüş} = V_{kurp}$ $V_{kurp} > V_{fren}$
Sürüş Tekniği Senaryosu-4	$V_{sürüş} = V_{kurp}$ $V_{kurp} = V_{fren}$	$V_{sürüş} = V_{kurp}$ $V_{kurp} = V_{fren}$
Sürüş Tekniği Senaryosu-5	$V_{sürüş} < V_{kurp}$ $V_{sürüş} > V_{fren}$	$V_{sürüş} < V_{kurp}$ $V_{sürüş} > V_{fren}$
Sürüş Tekniği Senaryosu-6	$V_{sürüş} < V_{kurp}$ $V_{kurp} = V_{fren}$	$V_{sürüş} < V_{kurp}$ $V_{sürüş} = V_{fren}$

Önerilen modelde optimizasyon algoritması öncelikli olarak araç sürüş özellikleri, değişken hız ve yolcu sayısı limitlerini belirlemektedir. Bu limitler dâhilinde belirlenen istasyon mesafesinin en kısa süre ve en uzun sürede tamamlanacağı durumlar tespit edilmektedir. Şekil-6'da belirtilen k_{m1} ,

$k_{m1}, k_{x1}, k_{y1}, k_{m2}, k_{m2'}, k_{x2}$ ve k_{f_durma} noktaları bu durumları göstermektedir. Bu durumlar aynı zamanda belirlenen hat için hız/konum bilgisini ve sürelerini de tespit etmektedir. Şekil-6'da yer alan k_o , RF enerjisinin oluşumunu sağlayacak boşta gitme başlangıç konumunu göstermektedir. k_o konum tespiti optimizasyon algoritmaları ile gerçekleştirilmektedir. Tablo-3 te belirtilen kurp öncesi sürüş tekniği senaryolarında $V_{sürüş}$ hızının V_{fren} hızından büyük olduğu her olasılık için hızlanma, sabit hızda gitme ve boşta gitme durumlarının gerçekleşmesi istenmektedir. Boşta gitme sonucunda düşülen hızın V_{kurp} hızından büyük olması durumunda V_{kurp} 'a kadar mekanik frenleme, küçük olması durumunda ise V_{kurp} 'a kadar hızlanma gerçekleşmektedir. V_{fren}, V_{kurp} ve $V_{sürüş}$ hızları birbirine eşitse RF enerji oluşumu öncelikli olduğu için V_{kurp} hızına kadar araç hızlanır. Hızlanma sonunda RF enerjisi oluşturmak için boşta gitme durumu gerçekleştirilir. Bu sayede hem kurp bölgesine güvenli bir şekilde girilmekte hem de RF enerjisi oluşumu desteklenmektedir.

Modelde kurp sonrası olası bir frenleme durumu da eklenmiştir. Kurp çıkışında mekanik frenleme gerçekleşmesi ile birlikte optimizasyon algoritması ile belirlenen k_{o2} ' noktasına kadar sabit hızda gitme gerçekleşir. Sonrasında tekrar güvenli duruşun sağlanacağı kurp hızına kadar hızlanma ve boşta gitme olayı ile devam edilir. Boşta gitmenin sonlandığı konum k_{b2} gibi bir noktada ise güvenli frenlemenin başlayacağı k_{f_durma} konumuna kadar sabit hızda gitme gerçekleşir. Modelde k_o konumu, k_m ve k_x konumları arasında herhangi bir yerde olabilir. Bu sayede istenilen amaç fonksiyonu kapsamında en uygun sürüş tekniği gerçekleştirilmiş olur. Modelde hem $V_{sürüş}, V_{kurp}, V_{fren}$ hız değerleri ile birlikte, $k_{o1}=k_{m1}, k_{o1}>k_{m1}\&k_{o1}<k_{x1}$ ve $k_{m1}=k_{x1}$ koşul karşılaştırılmaları da yapılmaktadır. Bu karşılaştırmalar neticesinde kurp öncesi 46, kurp sonrası 42 olasılıklı sürüş tekniği oluşmaktadır. Bu olasılık durumlarının kombinasyonu sonucunda toplamda 1932 farklı sürüş tekniği gerçekleştirilmektedir.

En uygun çözümün görece birden fazla olduğu ve şartların değişkenliğine uygun olarak bir davranış ya da tepkinin belirlenmesinde pareto yönteminin mühendislik problemlerine uygulanması oldukça yaygındır (Certa ve ark., 2011). Çalışmada da bu durum göz önünde bulundurulmuş, ACOR ile pareto optimal sınır değerleri oluşturulmuştur. Bu sınır değerler kullanılarak etkili operasyon bölgesinin tespitinde yine aynı algoritma kullanılarak pareto frontier belirlenmesi amaçlanmıştır. Modelde tek kararlı amaç fonksiyonları ACOR ile optimize edilmiştir. Belirlenen amaç fonksiyonlarına ait amaç fonksiyonu/iterasyon sayısı karşılaştırması Şekil-7'de, iterasyonlar sonucunda elde edilen değerler Tablo-4'te verilmiştir.



Şekil 7. Optimizasyon algoritması iterasyon sayısı / OF Sonuç değerleri

Tablo-4. Tek Kararlı ve Çok Kararlı Amaç Fonksiyonu Sürüş Teknikleri Sonuç Değerleri

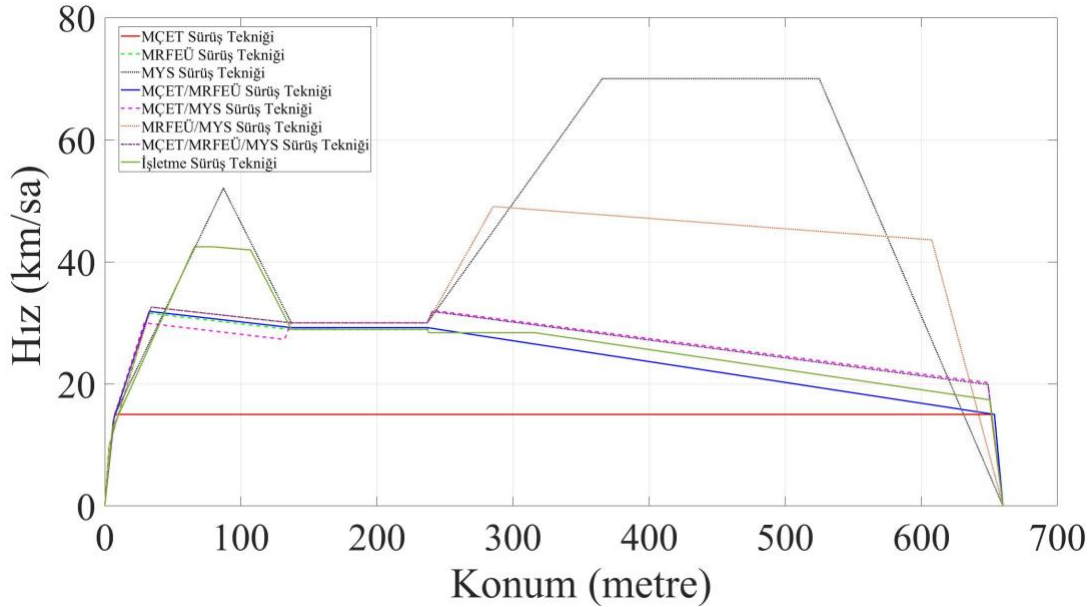
Sürüş Teknikleri	Çekiş Enerji Tük. (kWh)	Rejeneratif Frenleme Enerji Üretimi (kWh)	Yolculuk Süresi (s)	Peron Duruş Mesafesi (m)	Ort. Sürüş Hızı (km/sa)	Üretim Tük. Verimi (%)
İşletme Sürüşü	1.660	0.331	96.636	660.000	24.588	19.914
OF1(MÇET)	0.812	1.585E ⁻⁰⁵	162.220	659.993	14.647	0.002
OF2(MRFEÜ)	1.115	0.596	103.108	660.020	23.044	53.459
OF3(MYS)	3.263	5.801E ⁻⁰⁵	59.768	660.000	39.754	0.002
OF4(MÇET/MRFEÜ)	1.004	0.434	102.882	660.011	23.095	43.233
OF5(MÇET/MYS)	1.087	0.404	93.190	660.000	25.496	37.191
OF6(MRFEÜ/MYS)	1.806	0.503	69.479	660.056	34.200	27.863
OF7(MÇET/MRFEÜ/MYS)	1.076	0.408	92.564	659.997	25.669	37.893

Raylı sistemlerde tek kararlı amaç fonksiyonları ile ele alınan durumlar verimlilik karşılaştırmalarında yeterli olmamaktadır. Zira yalnız başına MÇET veya MRFEÜ amacı taşıyan kısıtlı yolculuk sürelerine sahip bir raylı sistem işletmesi yapılamamaktadır. Bu amaçla önerilen model üzerinde tek kararlı amaç fonksiyonları ile birlikte çok kararlı amaç fonksiyonlarının da optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çok kararlı amaç fonksiyonlarının ACOR ile gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları Tablo-4'te karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

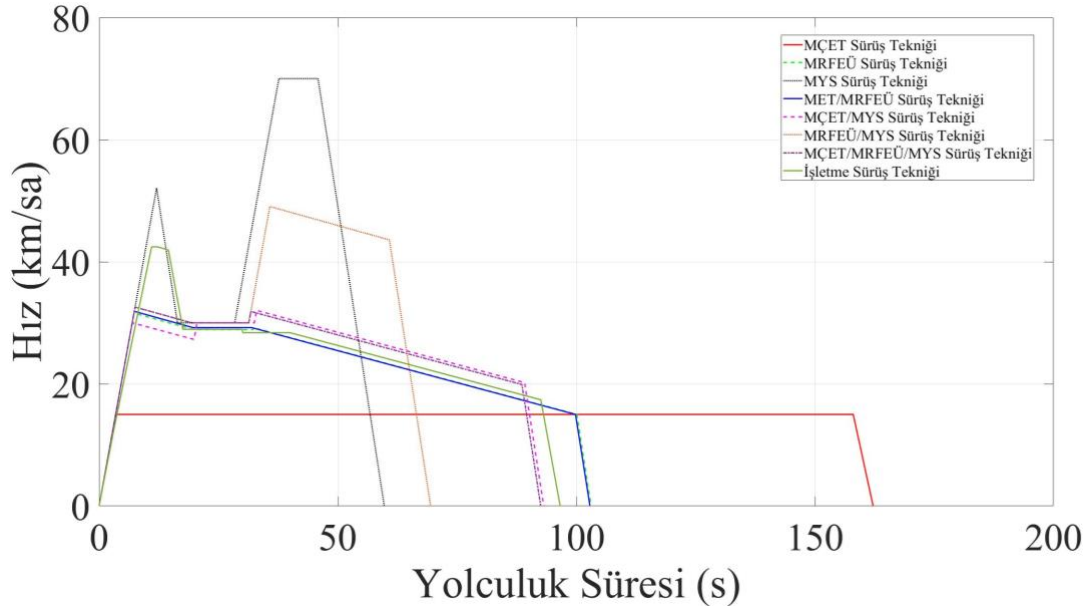
Tablo-4'te elde edilen değerler, tek kararlı ve çok kararlı amaç fonksiyonlarının MÇET, MRFEÜ ve MYS kapsamında, belirlenen kısıt değerlerine uygun olarak, sürüşlerin başarılı bir şekilde

tamamlandığını göstermektedir. Bu kapsamda peron duruş aralığı literatürde belirtilen yaklaşık 15 cm içerisinde kalmaktadır. MÇET beklendiği gibi yolculuk süresinin en uzun olduğu durumdur. MYS sonucunda en hızlı sürüşün gerçekleştiği dolayısı ile en yüksek tüketimin olduğu görülmektedir.

Mevcut senaryo içerisinde RS aracı işletme sürüş tekniği ile 660 metrelik bir hattı ortalama 24.588 km/sa hız ile 96.363 saniyede tamamlamaktadır. Bu sürüş sonucunda 1.660 kWh çekiş enerjisi kullanmakta ve 0.331 kWh RF enerjisi üretmektedir. Üretilen RF enerji ve tüketilen çekiş enerjisi oranı sonucunda yaklaşık %19.914 lük bir verim elde edilmektedir. İşletme sürüş rejiminde elde edilen bu sonuçların iyileştirilmesi amacı ile gerçekleştirilen EVDST modeli sonucunda yaklaşık 7 saniyelik bir gecikme ile mevcut hat üzerinde %53.459 luk verim elde edilmiştir. Bu sonuç yalnızca MRFEÜ/MÇET ile de sınırlı kalmamaktadır. İşletme sürüş tekniği ile gerçekleştirilen yolculuk sonucunda 1.660 kWh lik çekiş enerji tüketimi 1.115 kWh'e düşürülmüş, 0.331 kWh'lik RF enerji üretimi ise 0.596 kWh'e yükseltilmiştir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde %32.832 oranında bir enerji tüketim verimine ve %80.060 oranında bir RF enerjisi üretim verimine ulaşılmıştır. Önerilen EVDST modeli kapsamında uygulanan OF5, OF6 ve OF7 amaç fonksiyonları ile elde edilen sonuç değerleri, mevcut işletme sürüş tekniği yolculuk süresi içerisinde kalınarak verimli bir sürüşün gerçekleştirildiğini göstermektedir. Tablo-4'te de verilen sonuçlar ile OF4, OF5, OF6 ve OF7 amaç fonksiyonları kapsamında belirlenen kısıtlara uygun verimli sürüşlerin gerçekleştirilebileceği de görülmektedir.

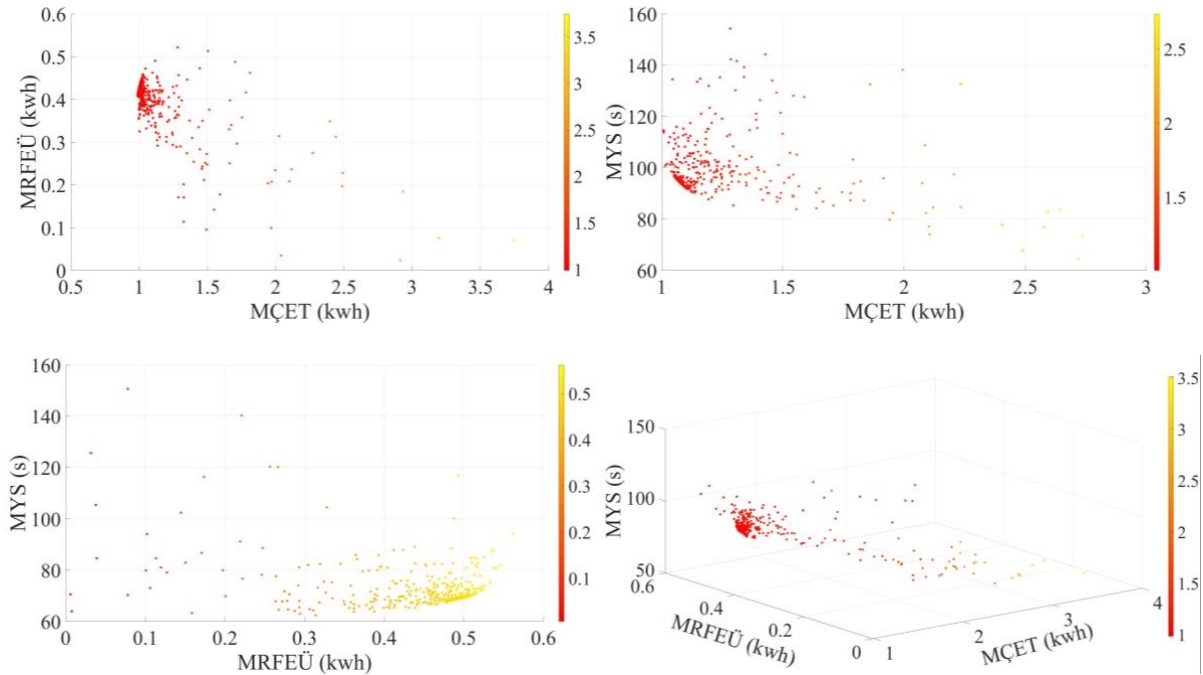


Şekil 8. Dinamik sürüş tekniği hız/konum grafiği



Şekil 9. Dinamik sürüş tekniği hız/seyahat süresi grafiği

Şekil-8 ve Şekil-9 incelendiğinde, Tablo-4’te verilen tüm amaç fonksiyonlarına uygun sürüş tekniklerinin, belirtilen Hız/Konum ve Hız/Yolculuk süresi profillerine uygun olarak, sürüşlerini verimli bir şekilde tamamladığı görülmektedir. Bu sonuçlar önerilen modelde, araç ve yol teknik özelliklerine uygun olarak farklı sürüş tekniklerinin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini kanıtlamaktadır. Şekil-10, verilen MÇET, MRFEÜ ve MYS kısıt değerleri kapsamında çok kararlı amaç fonksiyonlarına ait pareto frontier çalışma sınır değerlerini ve verimli çalışma bölgelerini göstermektedir.



Şekil 10. Pareto frontier sınır değerleri ve verimli çalışma bölgeleri

Şekil-10'da görüldüğü üzere çok kararlı amaç fonksiyonlarının ACOR ile optimizasyonun sonucunda arama uzayı çok kısa sürelerde lokal optimum değere yakınsamaktadır. Aynı zamanda Şekil-10, Şekil-7'de görülen iterasyon sonuçları ve Tablo-4'te verilen değerler ile birlikte yorumlandığında geliştirilen model üzerinde her bir amaç fonksiyonu için uygulanan ACOR'un optimizasyon işlemini başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği görülmektedir.

3.2. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışmada şehir içi toplu taşıma sistemlerinde yoğun bir şekilde kullanılan elektrikli raylı sistem araçlarının, enerji verimli dinamik sürüş tekniği üzerine yeni bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen senaryo tabanlı model için Tablo 1'de verilen kapasite değerlerine uygun bir araç ve Tablo-2'de verilen kısıt değerlerine sahip bir güzergâh seçilmiştir. Önerilen modelde yolcu sayısına bağlı dinamik ağırlık, hıza bağlı sürtünme, pozitif eğim, değişken kurp giriş hızı ve değişken boşta gitme noktaları için optimizasyon seçim aralıkları oluşturulmuştur. Çalışmaya dahil edilen yatay kurp, hem dinamik sürüş tekniği sayısının artırılmasında hem de RF enerjisi oluşumunu destekleyerek modele ayırt edici bir özellik katmaktadır. Aynı zamanda yolcu sayısına bağlı dinamik ağırlık değişiminin etkisi ve hıza bağlı sürtünme etkisi de göz önünde bulundurulmuştur.

Geliştirilen modelde, RS aracına ait veriler, raylı sistem aracı dinamik sürüş denklemleri ve raylı sistem hareket evreleri kullanılarak senaryo tabanlı 1932 farklı dinamik sürüş tekniği test edilmiştir. Elde edilen amaç fonksiyonları tek kararlı ve çok kararlı olmak üzere, ACOR ile optimize edilmiş ve optimal pareto çalışma sınır koşulları belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

- Verimli yolculuk seferlerin oluşturulması, yolculuk süresinin öncesinden tespit edilmesi ve seferler arasında yaşanan gecikmelerin önlenmesi ile birlikte sefer planlamasındaki başarımın artırılabilceği gösterilmiştir.
- 660 metre istasyon arası mesafe için istasyon duruş mesafe hatasının 5 cm den daha az olduğu görülmüştür. Bu başarı oranı literatürde verilen 15 santimetrelik peron duruş aralığının çok altındadır.
- Rejeneratif frenleme enerjisi üretimi/çekiş enerjisi tüketimi oranında %58.08'lik bir iyileştirme sağlanmıştır. Enerji verimliliği bakımından literatürde farklı sürüş ve istasyonlar arası mesafeleri için enerji verimi yönünden yaklaşık %40 düzeyinde bir iyileştirme olduğu görülmektedir. Bu oran ile çalışma sonucu elde edilen %53.459 iyileştirme oranı karşılaştırıldığında modelin başarılı olduğu görülmektedir.

- Çekiş enerjisi tüketimi ve RF enerjisi üretimi bakımından ele alındığında, %32.832 oranında bir enerji tüketim verimine ve %80.060 oranında bir RF enerjisi üretim verimine ulaşılmıştır.

Geliştirilen senaryo tabanlı sürüş rejimleri ile test edilen EVDST modeli, yolculuk sürelerinin önceden belirlenmesi, verimli sürüş dinamiklerinin oluşturulması ve yolculuk sürelerinin planlanması ile birlikte raylı sistemlerde enerji verimliliğinin artırılması ve optimum sürüş planlarının yapılmasına da katkıda bulunmaktadır.

Teşekkür

Bu makale Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD'nda gerçekleştirilen Doktora tezinden türetilmiştir.

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

- Asnis, I. A., Dmitruk, A. V., & Osmolovskii, N. P. (1985). Solution of the problem of the energetically optimal control of the motion of a train by the maximum principle. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 25(6), 37–44.
- Bae, C., Jang, D., Kim, Y., Chang, S., & Mok, J. (2007). Calculation of regenerative energy in DC 1500V electric railway substations. *2007 7th International Conference on Power Electronics*, 801–805.
- Certa, A., Galante, G., Lupo, T., & Passannanti, G. (2011). Determination of Pareto frontier in multi-objective maintenance optimization. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(7), 861–867.
- Chen, J.-F., Lin, R.-L., & Liu, Y.-C. (2005). Optimization of an MRT train schedule: reducing maximum traction power by using genetic algorithms. *IEEE Transactions on power systems*, 20(3), 1366–1372.
- Corlu, C. G., de la Torre, R., Serrano-Hernandez, A., Juan, A. A., & Faulin, J. (2020). Optimizing energy consumption in transportation: Literature review, insights, and research opportunities. *Energies*, 13(5), 1115.
- Dorigo, M. (1992). Optimization, learning and natural algorithms. *Ph. D. Thesis, Politecnico di Milano*.

- Dorigo, M., & Gambardella, L. M. (1997). Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 1(1), 53–66.
- Dorigo, M., Maniezzo, V., & Colorni, A. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26(1), 29–41.
- ERRAC. (2017). Rail 2050 Vision. *Uic*, 27.
- Feng, J., Ye, Z., Wang, C., Xu, M., & Labi, S. (2018). An integrated optimization model for energy saving in metro operations. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(8), 3059–3069.
- Fernández, P. M., Sanchís, I. V., Yepes, V., & Franco, R. I. (2019). A review of modelling and optimisation methods applied to railways energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 222, 153–162.
- González-Gil, A., Palacin, R., Batty, P., & Powell, J. P. (2014). A systems approach to reduce urban rail energy consumption. *Energy Conversion and Management*, 80, 509–524.
- Gordon, S. P., & Lehrer, D. G. (1998). Coordinated train control and energy management control strategies. *Proceedings of the 1998 ASME/IEEE Joint Railroad Conference*, 165–176.
- Guo, J., Dong, H., Sheng, W., TU, C., & YE, M. (2017). Research of the influence of braking conditions on regenerative braking energy recovery for electric vehicles. *Proceedings of the International conference on Energy, Ecology and Environment (ICEEE), Stockholm, Sweden*, 26–29.
- Huang, Y., Yang, L., Tang, T., Gao, Z., Cao, F., & Li, K. (2018). Train speed profile optimization with on-board energy storage devices: A dynamic programming based approach. *Computers & Industrial Engineering*, 126, 149–164.
- Khodaparastan, M., Mohamed, A. A., & Brandauer, W. (2019). Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(8), 2831–2847.
- Liu, J., Anavatti, S., Garratt, M., & Abbass, H. A. (2022). Multi-operator continuous ant colony optimisation for real world problems. *Swarm and Evolutionary Computation*, 69, 100984.
- Luan, X., Wang, Y., De Schutter, B., Meng, L., Lodewijks, G., & Corman, F. (2018). Integration of real-time traffic management and train control for rail networks-part 1: Optimization problems and solution approaches. *Transportation Research Part B: Methodological*, 115, 41–71.
- Mohamed, A., Awad, S., Mohamed, A. A., Alkhalaf, S., Mohamed, M., Senjyu, T., & El-din, A. B. (2020). Nature-inspired algorithms for feed-forward neural network classifiers: A survey of one decade of research. *Ain Shams Engineering Journal*, xxx. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.01.007>
- Morea, D., Elia, S., Boccaletti, C., & Buonadonna, P. (2021). Improvement of Energy Savings in Electric Railways Using Coasting Technique. *Energies*, 14(23), 8120.
- Rodrigue, J.-P., Comtois, C., & Slack, B. (2012). *The geography of transport systems*. Langara College.
- Scheepmaker, G. M., Goverde, R. M. P., & Kroon, L. G. (2017). Review of energy-efficient train control and timetabling. *European Journal of Operational Research*, 257(2), 355–376. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.09.044>
- Siefert, J., & Li, P. Y. (2021). Optimal control of the energy-saving hybrid hydraulic-electric architecture (HHEA) for off-highway mobile machines. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 30(5), 2018–2029.
- Socha, K., & Dorigo, M. (2008). Ant colony optimization for continuous domains. *European journal of operational research*, 185(3), 1155–1173.
- Su, S., Li, X., Tang, T., & Gao, Z. (2013). A subway train timetable optimization approach based on energy-efficient operation strategy. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(2), 883–893.
- Su, S., Wang, X., Cao, Y., & Yin, J. (2019). An energy-efficient train operation approach by integrating the metro timetabling and eco-driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(10), 4252–4268.
- Wu, Y., Ma, W., Miao, Q., & Wang, S. (2019). Multimodal continuous ant colony optimization for multisensor remote sensing image registration with local search. *Swarm and Evolutionary Computation*, 47, 89–95.
- Xing, Z., Zhang, Z., Guo, J., Qin, Y., & Jia, L. (2023). Rail train operation energy-saving optimization based on improved brute-force search. *Applied Energy*, 330(PA), 120345. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120345>
- Yang, L., Li, K., & Gao, Z. (2008). Train timetable problem on a single-line railway with fuzzy passenger demand. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, 17(3), 617–629.
- Yang, X., Ning, B., Li, X., Tang, T., & Song, X. (2013). A Subway Timetable Optimization Model for Maximizing the Utilization of Recovery Energy. *ASME/IEEE Joint Rail Conference*, 55300, V001T07A002.
- Zhang, H., Jia, L., Wang, L., & Xu, X. (2019). Energy consumption optimization of train operation for railway

systems: Algorithm development and real-world case study. *Journal of Cleaner Production*, 214, 1024–1037.

Çoruh Deltası (Gürcistan) Kıyı Aşınım ve Birikim Hızlarının DSAS Kullanılarak Analizi

M.Murat KALE^{1*}, Şevval KOÇ²

Öz

Sınır aşan bir akarsu olan Çoruh Nehri XIX. yüzyıldan günümüze uzanan süreçte büyük antropojenik müdahaleler ile karşı karşıya kalmıştır. Antropojen faaliyetler nedeniyle artan baskı delta kıyı çizgisinde değişime neden olmuş ve olmaya devam etmektedir. Baskı sadece morfolojiyi değiştirmemekte, aynı zamanda bölgedeki şehirleşmenin gelişim sürecinde de dikkate alınması gereken bir unsur olma özelliği taşır. Karadeniz'in güney doğusundaki önemli turizm merkezi olan Batum şehri, Çoruh Deltası üzerinde yer alır. Delta kıyısı boyunca gelişim gösteren Batum, kıyı erozyonundan doğrudan etkilenmektedir. Bu bağlamda şehre ait farklı fonksiyonlara sahip alanlar kıyı çizgisi değişiminin baskısı ile karşı karşıyadır. Bu çalışmada, Çoruh Deltası kıyı erozyonunun Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri yardımıyla belirlenerek aşınım ve birikim hızlarının (m/yıl) hesaplanması ve analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede şehrin karşı karşıya olduğu risk net bir şekilde ortaya çıkacaktır. Çalışmada 1984, 2000 ve 2020 yıllarına ait Landsat uydu görüntüleri kullanılmıştır. Uydu görüntülerinden itibaren NDWI (Normalized Difference Water Index) kullanılarak kıyı çizgileri üretilmiştir. Kıyı çizgisindeki değişim DSAS (Digital Shoreline Analysis System) kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma sahasının I. grup olarak sınıflandırılan kesiminde aşınımın egemen olduğu ve aşınım hızının 2,37 m/yıl olduğu tespit edilmiştir. II. grup olarak sınıflandırılan kesiminde ise kıyı çizgisi ilerlemesi ve gerilemesinin bir arada gerçekleştiği belirlenmiştir. II. grupta aşınım hızının en yüksek 2,90 m/yıl, birikim hızının ise en yüksek 2,41 m/yıl olarak gerçekleştiği hesaplanmıştır. Çalışma bulguları özellikle Gonio plajının yer aldığı bölge ile Batum Uluslararası Havalimanı'nın kıyı erozyonuna bağlı olarak deniz ilerlemesi sorunuyla karşı karşıya olduğu savını desteklemektedir.

Anahtar Kelimeler: Kıyı çizgisi, Aşınım ve birikim, NDWI, DSAS.

Analysis of Coastal Erosion and Deposition Rates in the Çoruh Delta (Georgia) using DSAS

Abstract

As a transboundary river, the Çoruh River has faced major anthropogenic interventions from the nineteenth century to the present day. Increasing pressure due to anthropogenic activities has caused and continues to cause changes in the delta shoreline. Pressure does not only change the morphology, but has also become a factor to be taken into account in the development process of urbanization in the region. Batumi, one of the important centres in the south-east of the Black Sea, is located on the Çoruh delta. Developing along the delta coast, Batumi is directly affected by coastal erosion. In this context, areas of the city with different functions are under the pressure of shoreline change. This study aims to calculate and analyze the erosion and deposition rates (m/year) by revealing the shoreline change in the Çoruh Delta with the help of Remote Sensing and Geographic Information Systems. In this way, the risk facing the city will be clearly revealed. Landsat satellite images from 1984, 2000, and 2020 were used in the study. From the satellite images, shorelines were created by NDWI (Normalized Difference Water Index) analysis. The change in the shoreline was investigated using DSAS (Digital Shoreline Analysis System). In the part of the study area classified as group I, it was determined that the erosion rate was 2.37 m/year. In the part of classified as group II, it was determined that shoreline advancement and retreat occurred together. It was calculated that the highest erosion rate was 2.90 m/year and the highest accumulation rate was 2.41 m/year in group II. The results of the study support the assertion that especially the area where Gonio beach is located and Batumi International Airport are facing the problem of sea advancement due to coastal erosion.

Keywords: Shoreline, Erosion and deposition, NDWI, DSAS.

¹Çankırı Karatekin Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Coğrafya Bölümü, Çankırı, Türkiye, mmuratkale@gmail.com

²Çankırı Karatekin Üniversitesi, Coğrafya Bölümü, Çankırı, Türkiye, swl_65@hotmail.com

¹<https://orcid.org/0000-0001-6975-7069>

²<https://orcid.org/0000-0002-1896-1438>

1. Giriş

Jeomorfolojik bir birim olan kıyı, morfodinamik etken ve süreçler ile şekillenmektedir (Turoğlu, 2019). Ekosistemin önemli bir parçası olan bu jeomorfolojik birim, doğal süreçlerin yanı sıra antropojen kökenli aktivitelerin de etkisinde kalmakta ve kıyı çizgisinde kısa süreli, uzun süreli veya epizodik değişimler ortaya çıkmaktadır (Gibeaut ve ark., 2001). Uluslararası Jeoloji Bilimleri Birliği'nin "Coğrafi Belirleyici" olarak tanımladığı kıyı çizgisi (Kılar ve Çiçek, 2018; Liu, 2004), en yalın haliyle yatay yönde gelişmiş ve genişliği hava şartlarına göre değişen kara ile su kütlesi arasındaki sınır olarak tanımlanmakta olup kara ve su ortamlarının temel ayırt edicisi konumundadır (Erinç, 2001).

Akarsu yükünün sucul ortamda birikmesi sırasında kıyının dalga, akıntı, gel-git gibi dış kuvvetler tarafından şekillendirilmesiyle oluşan kıyı ovası olarak tanımlanan delta (İnandık, 1971; Hoşgören, 2013) aynı zamanda kıyı çizgisi ilerlemesinin gerçekleştiği bir sahada akarsu ağzında biriken sediman kütesidir (İncedayı, 2015). Alçak kıyılar oluşturan deltaların evrimi, kıyı çizgisi değişimi ile etkileşim halindedir. Bir başka ifadeyle deltalar kıyı dinamiklerindeki değişime oldukça hassastır. Doğal ve antropojen etkilere karşı son derece duyarlı olan delta ve delta kıyı çizgisi birçok etkenin kontrolünde gelişen oldukça karmaşık sistemlerdir (Eraslan, 2019). Doğal ortam özellikleri delta evrimi ve kıyı çizgisi değişimi üzerinde belirleyicidir. Bununla birlikte herhangi bir deltanın gelişim gösterdiği sahada akarsuyun sediman bütçesini etkileyen her türlü beşeri faaliyet delta evriminde söz sahibi olan antropojen sürecin ögesidir (Avcı, 2017; Turoğlu, 2019). Bu bağlamda gerek suyun enerjisi ve miktarı gerekse taşıdığı sediman yükü üzerinde değişikliğe neden olan her türlü faaliyet aynı zamanda delta gelişimi ve kıyı çizgisi değişimi üzerinde de belirleyicidir (Brandt, 2000; Karasu, 2016; Miliman, 1980; Rio ve ark., 2013).

Dünya genelinde, farklı havzalarda gerek doğal süreçler gerekse antropojen aktivitelere bağlı olarak delta kıyı çizgisi değişmekte olup kıyı çizgisi değişimindeki eğilim güncel ve önemli araştırma konularının başında gelmektedir. Özellikle içinde bulunduğumuz dönemde Uzaktan Algılama (UA) ve Coğrafi Bilgi Sistemlerinde (CBS) kaydedilen hızlı ilerlemeler ile birlikte kıyı çizgisindeki değişime ait büyüklük ve hız sayısal analiz yöntemleri kullanılarak yaygın bir biçimde araştırılmaktadır (Tağıl ve Cürebal, 2005; Kuleli ve ark., 2011; Louati ve ark., 2015; Ataol ve ark., 2019; Kale ve ark., 2019; Bougherira ve ark., 2020; Muskananfolo ve Febrianto, 2020; Ayalke ve ark., 2023).

Delta gelişiminde oldukça önemli bir yere sahip olan akarsu yükü, havza alanının birden fazla ülke toprağında olması halinde paydaş ülkelerin su kaynaklarına yönelik geliştirdikleri proje ve uygulamaların tesiri altında kalmaktadır. Dış politikada önemli bir yere sahip olan sınır aşan sular; bir ülkenin sınırları içerisinde kaynağını alarak başka bir ülke ile sınır oluşturan veya birden fazla

ülke toprağından geçerek alıcı ortama dökülen sular olarak tanımlanmaktadır (Erdağ, 2015; Köle, 2017). Kıyıların oluşum ve gelişim süreçleri dikkate alındığında, bazı kıyıların özellikle sınır aşan sular tarafından taşınan materyal ile yakından ilişkili olduğu anlaşılır.

Bu çalışmaya konu olan Çoruh Deltası, Çoruh Nehri tarafından taşınan sediman yükünün akarsu ağzında birikmesine bağlı olarak Karadeniz çanağının güneydoğusunda gelişim gösterir (Şekil 1). Delta Gürcistan'ın Acara Özerk bölgesinin başkenti olan Batum'a ev sahipliği yapmaktadır. Çoruh Deltası üzerinde kurulup gelişen Batum şehri, bölgede önemli bir turizm merkezi konumundadır (Tanıl, 2015). Şehrin Dünya'ya açılan kapısı konumundaki uluslararası havalimanı, kıyı çizgisinin hemen gerisinde kıyıya dik konumdadır. Şehrin arıtma tesisi ve kıyı çizgisi arasında yaklaşık 100 m mesafe bulunmaktadır. Turizm tesislerinin çok büyük bir kısmı deltanın kuzeybatı aksında havalimanı ve liman arasındaki kıyı çizgisinin hemen gerisinde yer almaktadır. Şehre ait yapılaşma faaliyetlerinin tümü güncel olarak delta sahası üzerindedir.



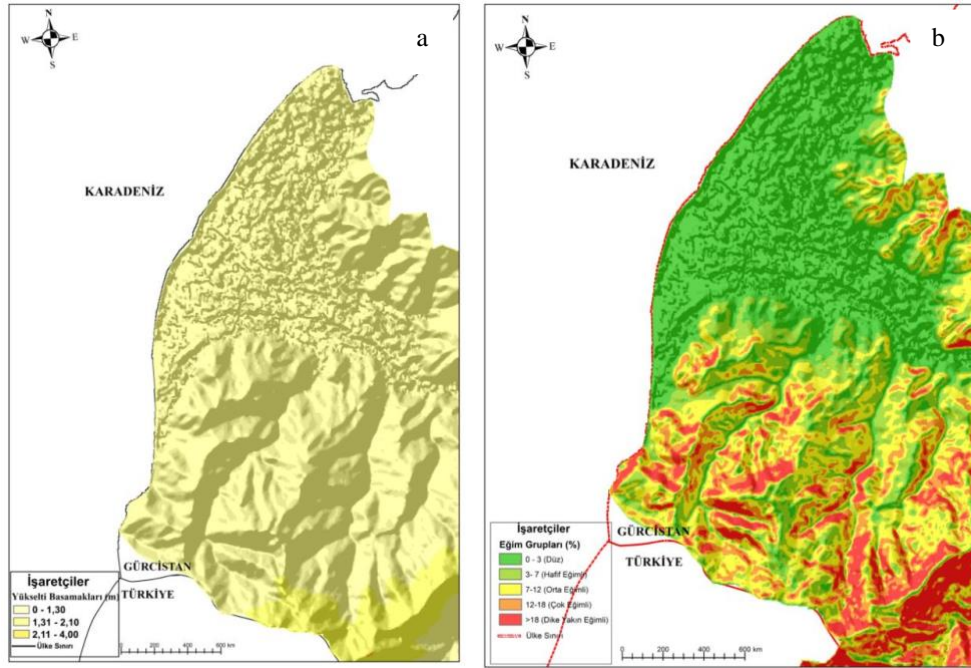
Şekil 1. Çalışma sahasına ait yer bulduru haritası.

Batum'da uzun dönem yıllık ortalama sıcaklık değeri 13,36°C olup ağustos ayı 22,10°C ortalama sıcaklık ile en sıcak ay, ocak ayı 5°C ortalama sıcaklık ile en soğuk aydır (Koç, 2023). Batum'un yıllık ortalama yağış miktarı 2.137 mm'dir. Eylül ayı 257 mm yağış ile en yağışlı ay olurken, mayıs ayı 107 mm ile en kurak aydır. Batum genellikle önemli miktarda kar almaz ve yıl boyunca karla kaplı gün sayısı son derece azdır (Koç, 2023). Batum'da hâkim rüzgâr, denizden karaya doğru batı ve kuzeybatı yönlerinden sokulur (Giardino ve ark., 2015). Çoruh Deltası açıklarında meydana gelen yüzey akıntısı ve dalgalar batı ile kuzeybatı yönlerinden gelen rüzgârlarla karakterizedir (Giardino ve ark., 2015). Dalga ve yüzey akıntılarının ana seyri, deltanın batı ve güneybatı kesimlerinden kıyıya paralel bir hat boyunca kuzeye doğrudur.

Çoruh Deltası sediman bütçesine en büyük katkıyı sağlayan akarsu aynı zamanda sınır aşan akarsu, akışa geçen suyun toplandığı havza ise sınır aşan akarsu havzası statüsündedir. Türkiye ve

Gürcistan topraklarında hareket eden akarsu 431 km ana kol uzunluğuna sahip olup, bunun 410 km'si Türkiye, 21 km'si ise Gürcistan topraklarındadır (Acar, 2017; Süme ve Türüt, 2018). Akarsuya Türkiye topraklarından katılan en önemli yan kollar; Tortum Çayı, Oltu Çayı ve Berta Çayı (Bulanık Suyu)'dır. Gürcistan topraklarından akarsuya katılan en önemli yan kol ise Adzharis (Acharistskali) Çayı'dır.

Akarsuyun Türkiye sınırları dâhilindeki beslenme sahasında yükselti ve eğim değerleri, mansap ülkeye oranla daha fazladır. Buna karşın deltanın gelişim gösterdiği sahanın yükseltisi akarsuyun akış yukarısı ve çevresine kıyasla daha az olup (Şekil 1 ve Şekil 2a), eğim değerleri %0-3 (düz) eğim aralığındadır (Şekil 2b). Büyük oranda Türkiye topraklarından beslenen akarsu, morfolojinin tesiriyle oldukça yüksek düzeyde enerjiye sahiptir. Çoruh Nehri 6,3 milyar m³ akış hacmi (Sucu ve Dinç, 2008) ve sahip olduğu yüksek düzeydeki enerji ile büyük miktarda aşındırma faaliyeti gerçekleştirmekte olup antropojen müdahaleler öncesinde Karadeniz'e yılda 7,5 ile 8,1 milyon ton aralığında sediman taşınımı gerçekleştirmiştir (Algan ve ark., 2000; Hay, 1994).



Şekil 2. Çalışma sahasına ait yükselti ve eğim haritası.

Çoruh Nehri tarafından taşınan karasal çökellerin birikim ürünü olan Çoruh Deltası'nın oluşum ve evrimi, Çoruh Havzası'nın bugünkü görünümünü kazanma süreci ile yakından ilişkilidir (Bilashvili, 2007). Güncel olarak Çoruh Deltası iki su altı kanyonu arasında görece sığ bir sahada gelişim göstermektedir (Jipa ve ark., 2020). Akarsuyun denize döküldüğü yerde Çoruh; liman açıklarında ise Batum su altı kanyonları bulunmaktadır (Çoban ve ark., 2020). Deniz seviyesi değişimleri bölge morfolojisinin şekillenmesinde belirleyici bir role sahip olmuştur. Kuvaterner'de

Karadeniz'in boğazlar marifetiyle Akdeniz'e bağlanması sonucunda gerçekleşen deniz seviyesi değişimi, Batum ve yakın çevresinde tarihsel süreçte var olan akarsu yataklarının deniz seviyesinin altında kalmasına ve su altı kanyonlarına dönüşmesine neden olmuştur (Bilashvili, 2007; Pepping, 2012).

Doğal süreçlerin delta evrimi üzerindeki etkisinin yanı sıra, Çoruh Deltası ve kıyı çizgisi XIX. yüzyıldan günümüze ulaşan süreçte yoğun bir şekilde antropojen faaliyetlerin baskısı altında kalmıştır.

Tarihsel süreçte Çoruh Nehri günümüzden farklı şekilde, Karadeniz'e birden fazla kol halinde deşarj olmuştur. Ana kol, bugünkü nehir ağzının yaklaşık 3-4 km kuzeyinden Karadeniz'e dökülmüş; daha küçük olan güney kol ise günümüz nehir ağzı ile hemen hemen aynı yerden denize dökülmüştür (Pepping, 2012). XIX. yüzyıl boyunca kıyı sistemi üzerinde antropojenik iki büyük müdahale gerçekleşmiştir. Müdahalelerden ilki akarsuyun kuzey kolunun kapatılması (muhtemel bir taşkın sonrası akımın güneydeki kola yöneldiği dönemde) olurken diğeri ise Batum Burnu'na liman yapım çalışmalarının başlatılması olmuştur. Ana akarsu yatağının kapatılması ile Çoruh Nehri tarafından taşınan sediman yükü doğrudan su altı kanyonuna deşarj olmaya başlamıştır (Bilashvili, 2007; Çoban ve ark., 2020). Bölgenin en önemli uluslararası limanları arasında yer alan Batum Limanı ise Batum su altı kanyonu önüne inşa edilmiştir. Limanla beraber inşa edilen dalgakıran, su altı kanyonuna taşınan sedimanın doğal akışını keserek dalgakıran önünde birikimine neden olmuştur (Pepping, 2012). Özellikle akarsu kuzey kolunun kapatılması, akarsu tarafından taşınan sediman yükünün Çoruh Kanyonu'na deşarj olmasına neden olarak kıyı sisteminin sediman bütçesini olumsuz yönde etkilemektedir. XX. yüzyıla gelindiğinde ise akarsuyun sahip olduğu yüksek miktardaki hidroelektrik potansiyelden yararlanma projeleri memba ülkede gündeme gelmiş, mansap ülkede ise akarsu madenciliği çalışmaları hız kazanmıştır. Batum ve yakın çevresinde turizm faaliyetlerine bağlı olarak artan inşaat çalışmaları için gerekli olan ham madde 1975-2007 yılları arasında neredeyse tümüyle Çoruh Nehri'nden temin edilmiştir (Koç, 2023). 2007 yılı itibariyle büyük oranda durdurulan madencilik faaliyeti içinde bulunduğumuz dönemde kısmen de olsa akarsuyun yukarı çığırlarında devam etmektedir (Koç, 2023). 1975-2007 dönemi boyunca sediman madenciliğine bağlı olarak artan bir hacimle sediman alımı gerçekleştirilmiş olup, sadece 1989 yılında yataktan alınan sediman miktarı 1,9 milyon ton olarak kayıtlara geçmiştir (Pepping, 2012). 2005 yılına gelindiğinde Çoruh Nehri hidroelektrik potansiyelinden yararlanma çalışmaları kapsamında ilk büyük su yapısı olan Muratlı Barajı ve Hidroelektrik Santrali (HES) devreye alınmıştır. Güncel olarak memba ülkede, rezervuar hacmi 75 milyon m³ ve üzerinde 8 büyük baraj ve HES (Ayvalı, Arkun, Artvin, Borçka, Deriner, Güllübağ, Muratlı, Yusufeli) akarsu ve yan kolları üzerinde yer almaktadır. Mansap ülke, elektrik enerjisi üretimi temel amacı ile Çoruh Nehri üzerinde iki büyük su yapısı inşa etmiştir. Bunlardan biri Türkiye sınırına yaklaşık 2,5 km uzaklıkta yer alan Kirnati Barajı ve HES'i diğeri ise Adzharis Çayı

ile Çoruh Nehri'nin birleşim noktasının 1,5 km akış aşağısında yer alan Khelvachauri Baraj ve HES'idir.

Çoruh Deltası, akarsuyun kuzey kolunun kapatıldığı ve kanyona deşarjının tetiklendiği andan itibaren büyük kıyı erozyonu problemi ile karşı karşıya kalmıştır (Bilashvili, 2007; Çoban ve ark., 2020; Pepping, 2012). 1880 ve 1913 yılları arasında akarsuyun kuzey kolunun olduğu sahada 6 m/yıl ile 8 m/yıl aralığında değişen hızlarda erozyon gerçekleştiği belirlenmiştir (Pepping, 2012). 1913 ve 1983 yılları arasındaki dönemde ise erozyonun, kıyı sisteminde kısmen denge konumuna ulaşılması ve erozyona karşı devreye alınan bir takım projelere bağlı olarak azaldığı saptanmıştır (Pepping, 2012). Çoban ve ark., (2020), deltadaki alansal kayıpları araştırdıkları çalışmalarında 1984 ve 2019 yılları arasında akarsu ağzının sağ ve solunda yer alan her iki sahilde alansal kayıpların egemen olduğu, liman bölgesine yaklaştıkça alansal artışın hakim olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışma bulguları akarsu ağzı ile Türkiye sınırı arasında kalan kesimde 52 ha kayıp, akarsu ağzı ile liman arasında kalan kesimde ise 11 ha kayıp gerçekleştiğini göstermektedir (Çoban ve ark., 2020). Söz konusu çalışmada alansal olarak değişim ortaya koyulmuş fakat aşınım ve birikim hızları ortaya çıkartılmamıştır.

Bu çalışmada Çoruh Deltası kıyı şeridindeki aşınım ve birikim hızlarının (m/yıl) Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri kullanılarak hesaplanması ve analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede kıyı çizgisindeki güncel değişim hızı saptanarak, değişim eğilimi belirlenecek ve Batum şehrinde kıyı erozyonuna bağlı deniz ilerlemesi ile karşı karşıya kalan alanların güncel durumu tespit edilecektir.

2. Materyal ve Metot

Çoruh Deltası kıyı şeridindeki aşınım ve birikim hızlarının (m/yıl) hesaplanması ve analiz edilmesinin amaçlandığı bu çalışmanın temel veri seti uydu görüntülerinden itibaren üretilen kıyı çizgileridir. Veri setinin üretilmesi ve çalışma genelinde kullanılan harita ve altlıkların hazırlanması için ArcGIS 10.5 programı ve ilgili modülleri kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan uydu görüntülerine ait temel bilgiler Tablo 1'de verilmiştir. Belirlenen kriterler dâhilinde ulaşılabilen en eski ve en yeni tarihli uydu görüntüleri sırasıyla 1984 ve 2020 yıllarına ait olup söz konusu tarihler bu çalışmanın alt ve üst sınırını oluşturmaktadır. Temel veri setinin üretilmesinde doğru sonuçlar elde edebilmek için temel kriter olarak çözünürlük ve bulutluluk oranları ile tarihlerine dikkat edilmiştir. Görüntüler, Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırma Kurumu (USGS: The United States Geological Survey) veri tabanından ücretsiz olarak temin edilmiştir. Bu çalışmada, çözünürlük farkları kökenli hesaplama hatalarının önüne geçebilmek için eş çözünürlüklü görüntüler tercih edilmiş ve kullanılmıştır. Mevsimsel değişimin ortaya çıkartacağı

farklılıkların önüne geçebilmek için ise aynı mevsime ait görüntüler seçilmiş ve olabildiğince görüntü tarihlerinin gün ve ay ölçeğinde birbirlerine yakın olmasına dikkat edilmiştir. Bulut kütleleri, uydu görüntülerinde konumlandıkları yerler itibarıyla kıyı çizgisinin hatalı saptanmasına neden olabilmektedir (Kalkan ve ark., 2019). Söz konusu hatayı bertaraf edebilmek için bulutluluk oranı düşük görüntüler tercih edilmiş ve özellikle kıyı çizgileri üzerinde bulut kütlelerinin olmamasına özen gösterilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan uydu görüntülerine ait temel bilgiler.

Tarih	Uydu görüntüsü	Kullanılan bandlar	Çözünürlük (m)	Projeksiyon	Dosya türü	Bulutluluk oranı (%)
26.10.1984	Landsat 4-5TM	Band-2 Band-4	30X30	WGS1984 UTM ZONE37	GEOTIFF	<10
06.10.2000	Landsat 4-5TM	Band-2 Band-4	30X30	WGS1984 UTM ZONE37	GEOTIFF	<10
04.11.2020	Landsat 7 ETM	Band-2 Band-4	30X30	WGS1984 UTM ZONE37	GEOTIFF	<10

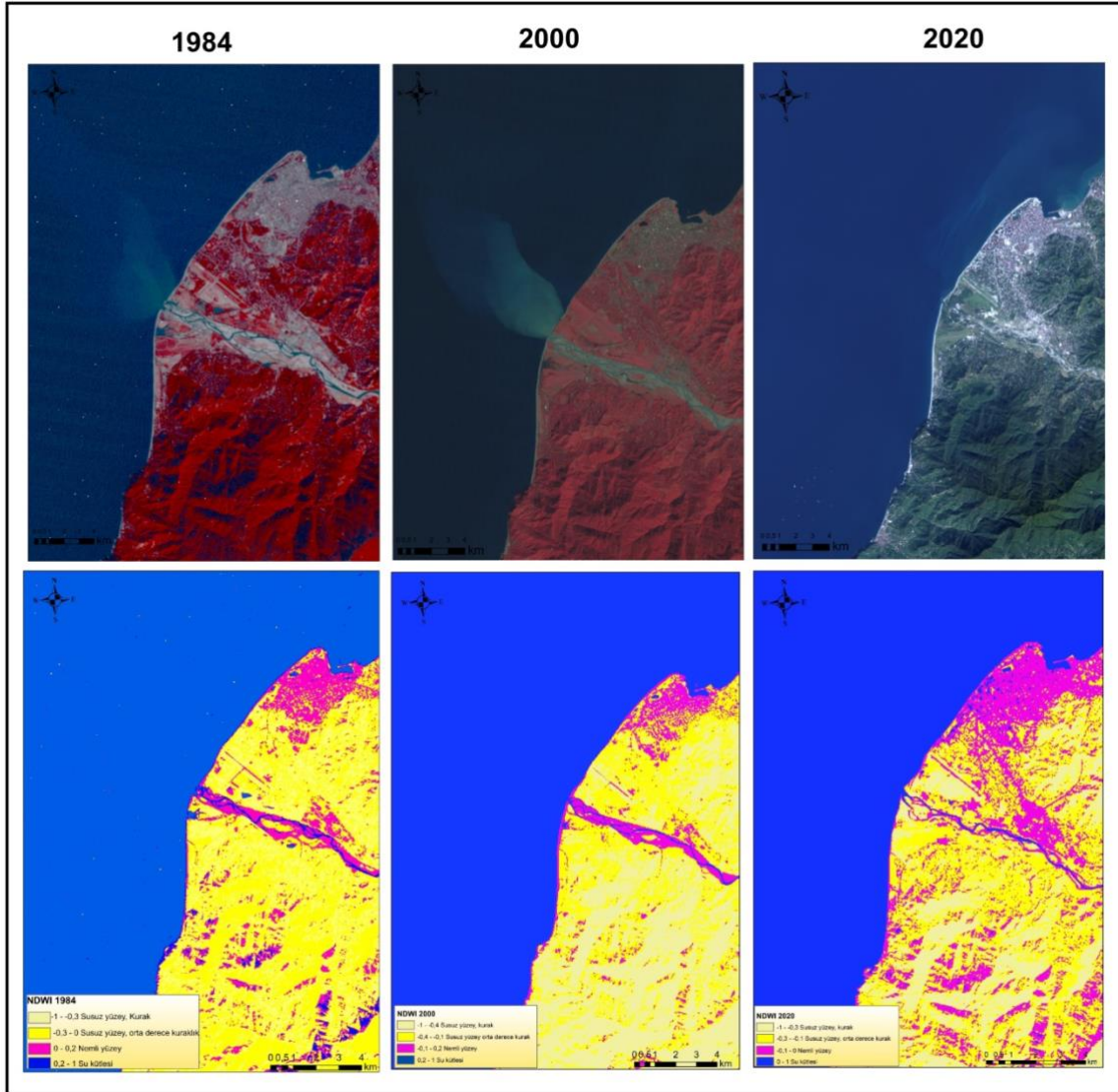
Çalışmada kullanılmasına karar verilen uydu görüntüleri doğrudan (ham olarak) kullanılmamıştır. Görüntüler ilk olarak ön işleme tabi tutulmuştur. Uydu görüntüsündeki atmosfer etkileri ve yansıma kökenli hatalarının önüne geçilmesi temel amaçları ile radyometrik düzeltme işlemi gerçekleştirilmiştir. Eş zamanlı olarak sistematik ve sistematik olmayan geometrik hataların önüne geçilmesi için ise geometrik düzeltmeler tamamlanmıştır. Bu çalışmada uydu görüntülerindeki radyometrik düzeltmeler Erdas Imagine yazılımı ilgili modülleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada kullanılan kıyı çizgileri, Normalleştirilmiş Fark Su İndeksi (NDWI: Normalized Difference Water Index) yöntemi kullanılarak düzeltmeleri gerçekleştirilmiş uydu görüntüleri üzerinden üretilmiştir. McFeeters tarafından 1996 yılında geliştirilen NDWI analizi, uydu görüntülerinden itibaren su kütlelerini kara kütlelerinden ayırt etmek için kullanılan yöntemlerden biridir (Kaplan ve ark., 2020; Kshetri, 2018). Yöntemde su yüzeylerini ortaya çıkarmak için farklı band kombinasyonları kullanılmaktadır. NDWI indeksi denklem (1) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (1)$$

Denklemden, NDWI; Normalleştirilmiş Fark Su İndeksi olmak üzere NIR; yakın kızılötesi ve Green; yeşil bandı ifade etmektedir. Eşitlikte yakın kızılötesi suyun reflektansını en üst seviyeye çıkartırken, yeşil band yansımayı en alt düzeye indirgemektedir (McFeeters, 1996). Elde edilen analiz sonuçları +1 ve -1 arasında değerler almakta olup, değerlerin 1'e yaklaşması uydu görüntüsündeki su kütlelerinin varlığını kuvvetlendirmektedir (Demiroğlu ve Ernst, 2022; McFeeters, 1996). Analiz

sonucunda sahada yer alan toprak, çıplak kaya yüzeyi veya bitki örtüsü ile kaplı alanlar ise sıfır ya da sıfırın altında değerler almaktadır (McFeeters, 1996). Çalışmada kullanılmasına karar verilen uydu görüntüleri ile birlikte NDWI analizi ile elde edilen kara ve su kütlesi ayırımı gösteren haritalar Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3.Çalışmada kullanılan uydu görüntüleri ve NDWI analiz sonuçları.

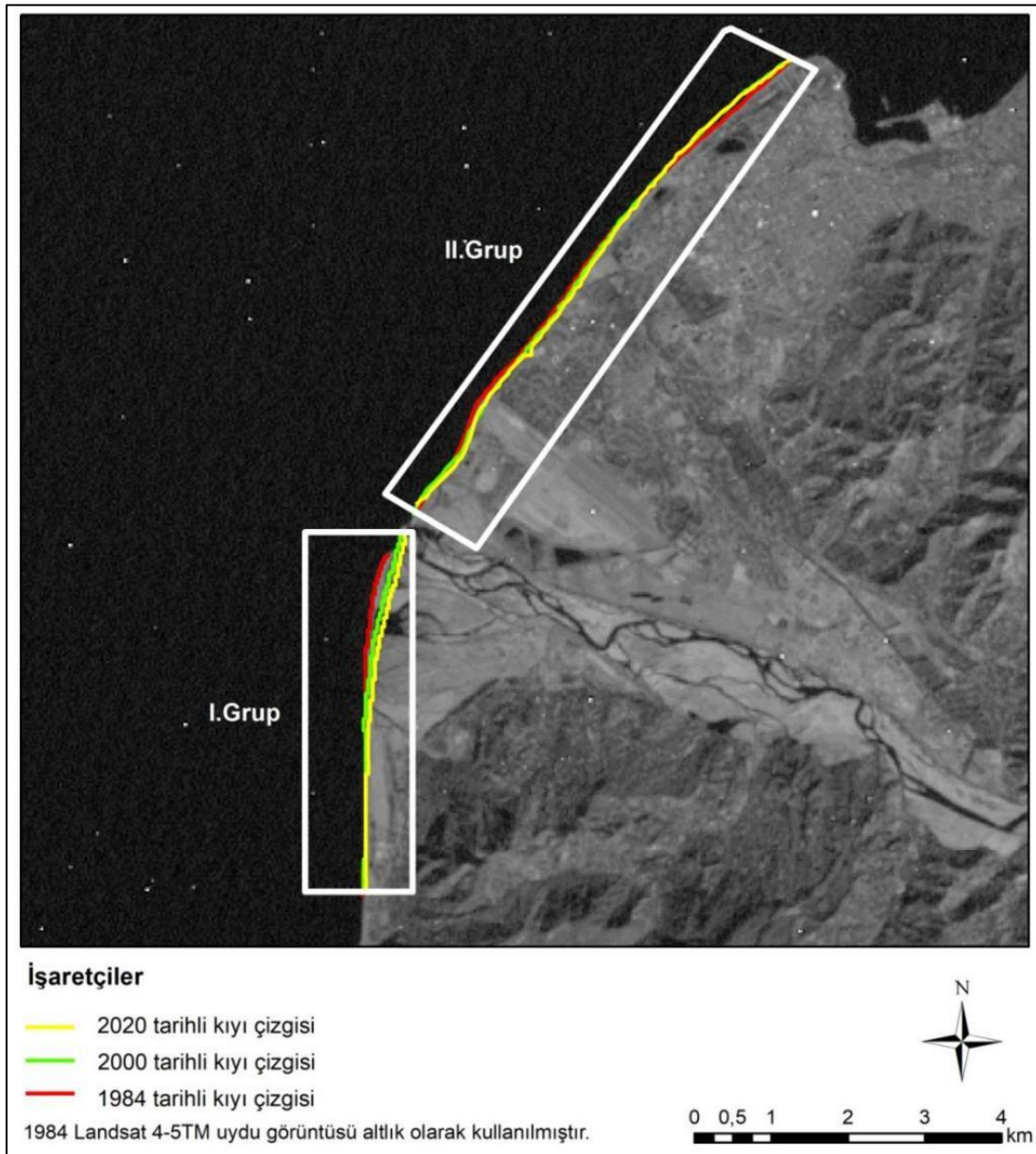
Bu çalışmada; 1984, 2000 ve 2020 yıllarına ait 13 km uzunluğundaki kıyı şeridindeki aşınım ve birikim hızları (m/yıl) araştırılmıştır. Kıyı şeridinin 5,10 km'lik kısmı akış yönüne göre akarsu ağzının sol sahilinde yer alırken, 7,90 km'lik kısmı akarsu ağzının sağ sahilinde yer almaktadır. Aşınım ve birikim hızlarının belirlenmesi için USGS tarafından geliştirilmiş olan Dijital Kıyı Çizgisi Analiz Sistemi (DSAS: Digital Shoreline Analysis System) kullanılarak gerekli hesaplama ve analizler gerçekleştirilmiştir.

DSAS, kıyı çizgilerindeki değişim oranı ve hızını hesaplanması için kullanılabilen, ArcGIS programının eklentisi olarak çalışan bir yazılımdır (Aktaş ve Bahadır, 2022; Himmelstoss ve ark., 2018; Oyedotun, 2014; Thieler ve ark., 2017). Referans bir veriden itibaren kıyı çizgilerini analiz edebilme özeliğine sahip DSAS eklentisinde yer alan farklı hesaplama araçları kıyı çizgisi değişimlerinin detaylı olarak hesaplanmasını sağlamaktadır (Erdem ve ark., 2018; Kale ve ark., 2019). Çalışmada kullanılan DSAS V5.0 eklentisi, DSAS'ın 5.sürümü olup USGS'dan temin edilmiştir. Çalışma dönemi başı ile sonu arasındaki değişimi hesaplamak için Net Kıyı Çizgisi Değişimi (NSM: Net Shoreline Movement), erozyon hızını saptamak için Doğrusal Regresyon Oranı (LRR: Linear Regression Rate) ve LRR'nin sınanması için ise R-Kare (LR2: R- squared) istatistiğinden faydalanılmıştır. NSM değeri iki farklı tarihe ait kıyı çizgisi kullanılarak hesaplanmaktadır. Mesafe cinsinden çıktılar sağlayan NSM sonucu elde edilen değer uzunluk birimi cinsinden ifade edilmektedir (Akdeniz, 2021; Himmelstoss ve ark., 2018; Thieler ve ark., 2017). LRR, bir profil hattı boyunca tüm kıyı çizgilerinin zamana göre değişimini hesaplamaktadır. LRR istatistiği, kıyı çizgilerini kesen doğrusal bir hat boyunca, her bir kesişim noktasından itibaren en küçük kareler yöntemiyle oluşturulan regresyon doğrusu üzerinden belirlenmektedir. LRR'nin en büyük avantajları tüm kıyı çizgileriyle hesaplama yapılabilir olması ve hesaplamaların kabul görmüş istatistiksel kavramlara dayalı olması şeklinde gruplandırılabilir (Ciritci, 2020; Crowell ve ark., 1997; Himmelstoss ve ark., 2018; Thieler ve ark., 2017). Kullanılan araçlar arasında yer alan LR2 istatistiği 1,0 ile 0,0 arasında değişkenlik göstererek, kıyı noktaları arasındaki doğrusal ilişkiyi yansıtmaktadır. Bu çalışmada LR2 %95 güven aralığında hesaplanmıştır. LR2 değerinin bire yakınsaması doğruluk oranının yüksek olduğunun bir göstergesi olarak kabul edilmektedir (Ataol ve ark., 2019; Himmelstoss ve ark., 2018; Kale ve ark., 2019; Thieler ve ark., 2017).

DSAS aracında hesaplamaların gerçekleştirilmesi için öncelikli olarak bir referans hattı gerekmektedir. Söz konusu referans hattı baseline olarak adlandırılmaktadır. DSAS, çizilen referans hattından itibaren kıyı çizgilerini kesen doğrusal hatlar boyunca hesaplama ve analizleri gerçekleştirmektedir. Referans hattına dik olacak şekilde kıyı çizgilerini kesen doğruya transect denilmektedir. Kıyı çizgisi değişikliğinin hesaplanmasında referans hattı iki şekilde oluşturulabilir. Bunlardan birincisi; referans hattının kara ortamında üretilip kıyı çizgisi değişiminin hesaplanmasıdır. Bir diğeri ise deniz ortamında üretilen bir referans hattı ile kıyı çizgisi değişiminin hesaplanmasıdır (Himmelstoss ve ark., 2018; Thieler ve ark., 2017). Bu çalışmada, kıyı çizgisi değişimi analiz edilirken referans hattı üretimi kara ortamında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, referans hattını kesen dik hatların uzunluğu 800 m ve hatlar arası mesafe 50 m olarak belirlenmiştir. Hesaplama ve analizler akarsu ağzının sağ ve solunda yer alan kıyı çizgileri için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular

Çoruh Deltası kıyı çizgisinde aşınım ve birikim hızlarının (m/yıl) araştırıldığı bu çalışmada, hesaplama ve analizler akarsuyun denize döküldüğü nokta referans alınarak iki grup altında gerçekleştirilmiştir. I. grup, akarsu ağzının solunda kalan ve akarsu ağzından Türkiye sınırına doğru uzanan kıyı çizgilerinden oluşmaktadır. II. grup ise akarsu ağzının sağında kalan ve akarsu ağzından Batum Limanı'na doğru uzanan kıyı çizgilerinden oluşmaktadır (Şekil 4). Her iki grup içinde 1984-2020 yılları arası 37 yıllık dönemi kapsayan üç farklı kıyı çizgisi dikkate alınarak hesaplama ve analizler gerçekleştirilmiştir.

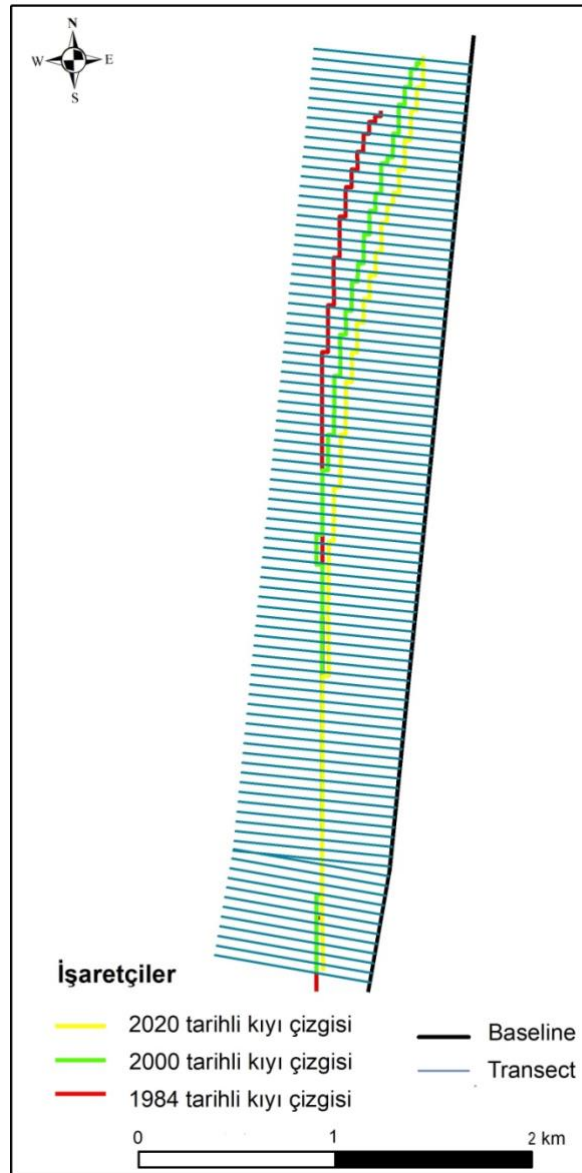


Şekil 4. NDWI analiziyle elde edilen kıyı çizgileri ve grupları.

Çalışma sahasının I.grubu için oluşturulan referans hattı ve transectler Şekil 5'te, DSAS modülü kullanılarak gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda elde edilen NSM, LRR ve LR2 değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo2. I. grup için NSM, LRR ve LR2 değerleri.

	%95 güven aralığında		
	NSM	LRR	LR2
En yüksek	0,00	0,00	1,00
En düşük	-242,68	-6,67	0,00
Ortalama	-85,81	-2,37	0,71

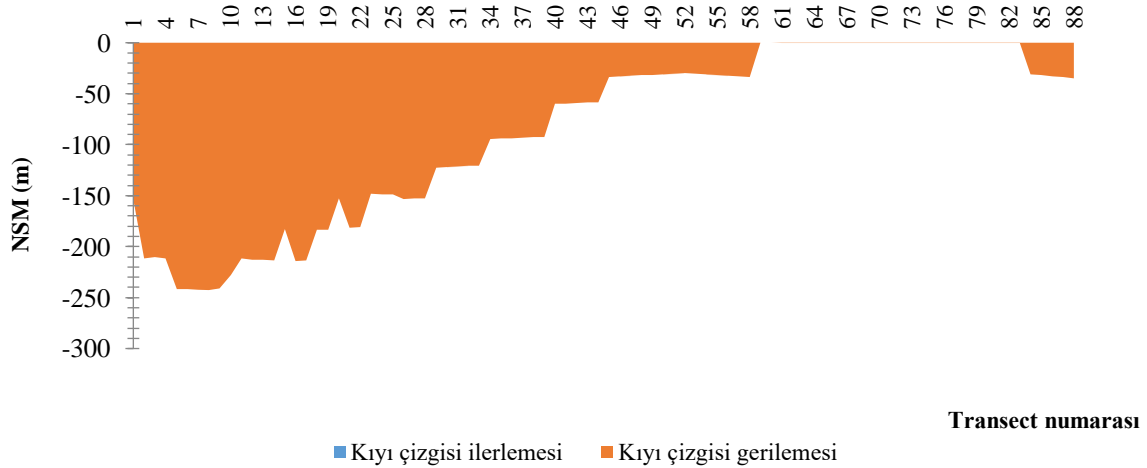


Şekil 5. I. grup için baseline ve transectler.

Akarsuyun denize döküldüğü noktadan, Türkiye sınırına doğru uzanan yaklaşık 5,10 km uzunluğundaki I. grupta 50 m aralıklarla 95 transect çizilerek hesaplama ve analizler

gerçekleştirilmiştir. Her iki kıyı çizgisini de (1984 ve 2020) kesen 88 transecte ait NSM değerleri dikkate alındığında 1984-2020 döneminde kıyı çizgisinde en yüksek 0,00 m, en düşük -242,68 m ve ortalama -85,81 m değişim gerçekleştiği belirlenmiştir.

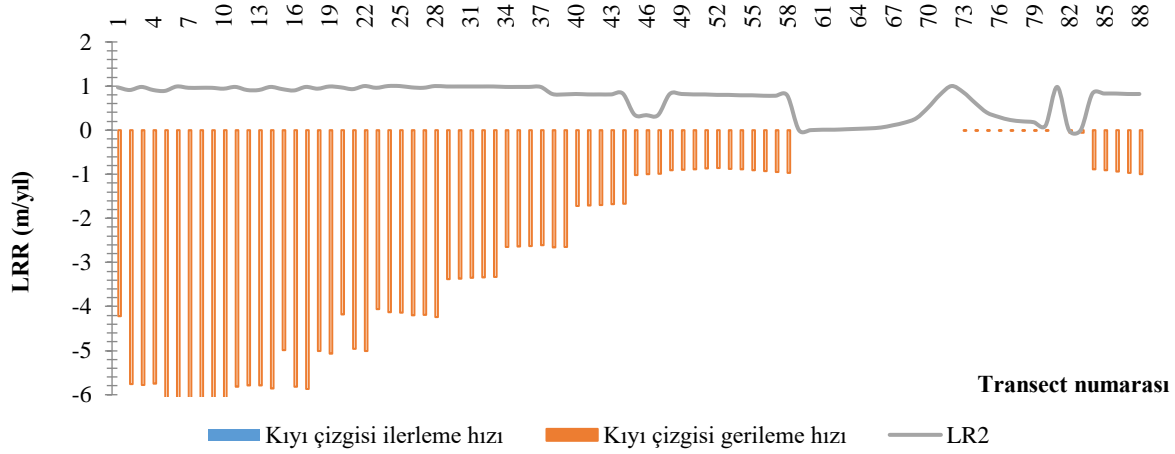
37 yıllık çalışma dönemi sonunda, I.grup olarak sınıflandırılan bölgede net kıyı çizgisi değişiminin negatif değerlikli olduğu belirlenmiştir. NSM, I. grupta hesaplamaların yapıldığı hiçbir noktada pozitif değer almamıştır. Bu durum 1984 yılından 2020 yılına gelindiğinde sahada aşımın baskın olduğunu ve beraberinde kıyı çizgisi ilerlemesinin gerçekleşmediğini göstermektedir. I. grupta egemen olan negatif değerlik, çalışma sahasının bu kesiminde erozyonun egemen olduğunu ve ağırlıklı olarak denizin kara yönünde ilerlediğini göstermektedir. I.grupta kaydedilen kıyı çizgisi değişimi mekânsal farklılıklar göstermekle birlikte ortalama olarak -85,74 m düzeyinde gerçekleşmiştir. NSM değerleri dikkate alınarak kıyı şeridinde meydana gelen değişim ve miktarları (m) Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'da 1 numaralı transect akarsu ağzına en yakın konumdaki transect'i gösterirken, 88 numaralı transect akarsu ağzına en uzak konumdaki transect'i ifade etmektedir. Çalışma bulguları akarsu ağzına yaklaştıkça kıyı çizgisinde gerçekleşen gerilemenin arttığını göstermektedir (Şekil 6). En yüksek miktardaki gerileme akarsu ağzına 200 m uzaklıkta gerçekleşmiş olup, akarsu ağzından Türkiye sınırına doğru ilerleyen kıyı hattı boyunca kıyı çizgisi gerilemesinin yer yer sifira yakınsadığı tespit edilmiştir.



Şekil 6. I. grup için kıyı çizgisi değişimi.

I. grup için 50 m transect aralığında LRR değeri en yüksek 0,00 m/yıl, en düşük -6,67 m/yıl ve ortalama -2,37 m/yıl olarak hesaplanmıştır. Çalışma bulguları Çoruh Deltası kıyı şeridinin I. grup olarak sınıflandırılan kısmında 37 yıllık çalışma dönemi boyunca aşınma hızının 2,37 m/yıl olduğunu ve akarsuyun ağız kısmında erozyon hızının çok daha baskın olduğunu işaret etmektedir. Elde edilen LR2 (0,71) değerinin 1'e yakınsaması hesaplamalar sonucunda elde edilen aşınım hızının doğruluğunun bir göstergesi olarak yorumlanmaktadır. 50 m transect aralıklarına göre akarsu

ağzından Türkiye sınırına doğru uzanan kıyı çizgisi boyunca hesaplanan birikim ve aşınım hızları (m/yıl) Şekil 7’de verilmiştir. I. grupta kıyı çizgisi gerileme hızlı değişkenlik göstermekle birlikte akarsu ağzından uzaklaştıkça azalmaktadır. Deltanın bu kısmında erozyon hızı, Türkiye sınırına yakın olan kısma oranla bariz şekilde fazladır. NSM değerinin en yüksek düzeyde hesaplandığı kıyı şeridinde -6,67 m/yıl hıza ulaşan aşınım tespit edilmiştir (Şekil 7).

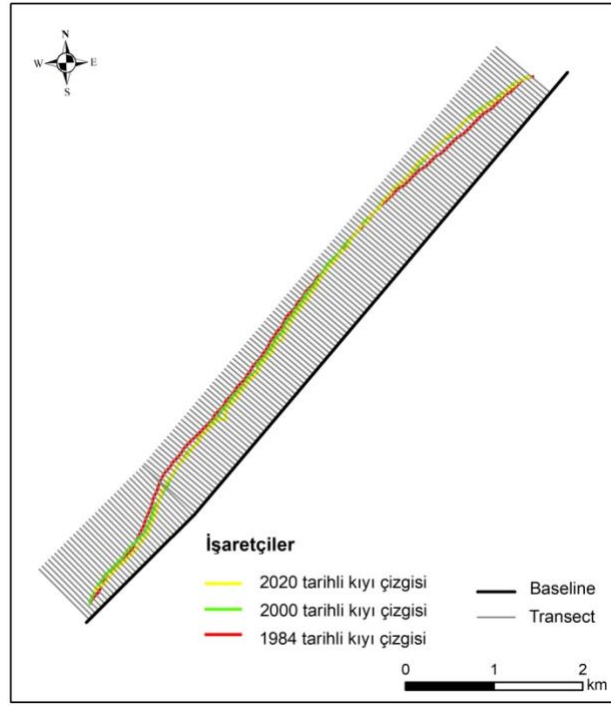


Şekil 7. I. grup için kıyı çizgisi ilerleme ve gerileme hızları.

Çalışma sahasının II. grubu için oluşturulan referans hattı ve transectler Şekil 8’de, DSAS modülü kullanılarak gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda elde edilen NSM, LRR ve LR2 değerleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. II. grup için NSM, LRR ve LR2 değerleri.

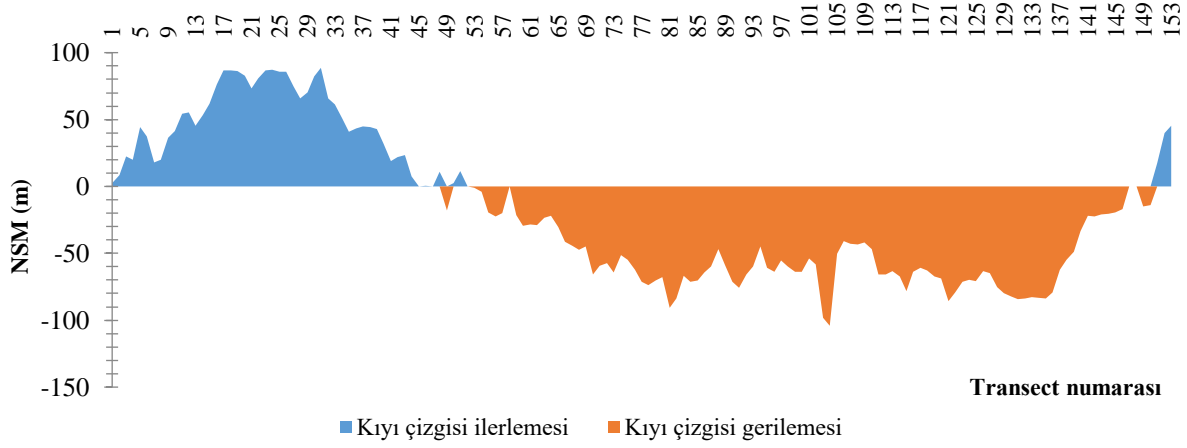
	%95 güven aralığında		
	NSM	LRR	LR2
En yüksek	88,63	2,41	1,00
En düşük	-104,16	-2,90	0,00
Ortalama	-18,49	-0,53	0,72



Şekil 8. II. grup için baseline ve transectler.

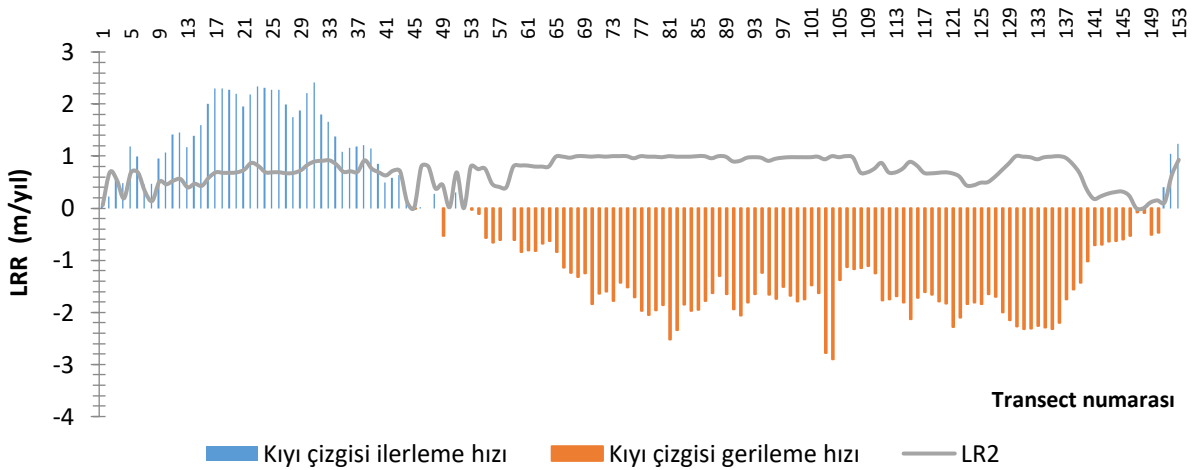
Akarsuyun denize döküldüğü noktadan, Batum Limanı'na doğru uzanan yaklaşık 7,90 km uzunluğundaki II. grup için 50 m aralıklarla 156 transect çizilerek hesaplama ve analizler yapılmıştır. Her iki kıyı çizgisini de (1984 ve 2020) kesen 153 transecte ait NSM değerleri dikkate alındığında 1984-2020 döneminde kıyı çizgisinde en yüksek 88,63 m, en düşük -104,16 m ve ortalama -18,49 m değişim gerçekleştiği belirlenmiştir.

Çalışma dönemi sonunda II. grup için NSM değerlerinin hem pozitif hem de negatif değerliğe sahip olduğu görülmüştür. Bu durum kıyı çizgisinde ilerleme ve gerileme hareketlerinin bir arada gerçekleştiğini göstermektedir. NSM değerleri dikkate alınarak kıyı çizgisinde meydana gelen değişim ve değişim miktarları (m) Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 9'da 153 numaralı transect akarsu ağzına en yakın konumdaki transect'i gösterirken 1 numaralı transect ise limana en yakın konumdaki transect'i göstermektedir. Kıyı çizgisinin özellikle limana yakın kısımda ve görece akarsu ağzına yakın olan kısımda ilerlediği saptanmıştır. Buna karşın söz konusu iki kuşağın arasında kalan sahil kesiminde ise baskın bir kıyı çizgisi gerilemesi olduğu tespit edilmiştir (Şekil 9). II. grup genelinde kıyı çizgisi gerilemesinin baskın olduğu ve gerilemenin ortalama olarak 18,49 m düzeyinde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 9. II. grup için kıyı çizgisi değişimi.

II. grup için 50 m transect aralığında LRR değeri en yüksek 2,41 m/yıl, en düşük -2,90 m/yıl ve ortalama -0,53 m/yıl olarak hesaplanmıştır. LRR değerlerine bağlı çalışma bulguları II. grupta 37 yıllık çalışma dönemi boyunca ortalama 0,53 m/yıl hızında erozyon gerçekleştiğini ve özellikle güncel olarak otellerin yer aldığı kıyı şeridinde aşımın baskın olduğunu işaret etmektedir. 50 m transect aralıklarına göre Çoruh Nehri'nin denize döküldüğü noktadan Batum Limanı'na doğru uzanan kıyı boyunca hesaplanan birikim ve aşınım hızları (m/yıl) Şekil 10'da verilmiştir. II. grup için birikim ve aşınım hızları değişkenlik göstermekle birlikte limana yaklaştıkça birikim hızı bariz şekilde artmaktadır. Batum Liman'ına oldukça yakın, dalgakıranın güneybatısında kalan aksta, kıyı şeridinde 2,41 m/yıl hızına ulaşan birikim gerçekleştiği tespit edilmiştir. Buna karşın özellikle turizm tesislerinin yoğunlaştığı ve plajın yer aldığı aksta ise 2,90 m/yıl hızına ulaşan gerileme gerçekleştiği saptanmıştır. Çalışma bulgularına göre II. grup için aşınım hızı birikim hızından daha baskın olup ortalama 0,53 m/yıl hızında kıyı çizgisi gerilemesi gerçekleşmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. II. grup için kıyı çizgisi ilerleme ve gerileme hızları.

4. Sonuç

Çoruh Deltası kıyı çizgisinin DSAS yardımıyla analiz edilerek, sahadaki aşınım ve birikim hızlarının (m/yıl) hesaplandığı bu çalışmada aynı zamanda Batum şehrinde kıyı erozyonuna bağlı deniz ilerlemesi sorunsalı ile karşı karşıya kalan alanlardaki güncel durum tespit edilmiştir.

Çalışma bulguları akarsu ağzı ile Türkiye sınırı arasında kalan kıyı şeridinde, erozyonun baskın olduğunu, bu kesimde birikim gerçekleşmediğini göstermektedir. Gerileme akarsu ağzından, Türkiye sınırına doğru uzanan kıyı boyunca şiddetini azaltarak devam etmiştir. Kıyı çizgisinde ortalama 85,81 m gerileme gerçekleştiği ve 2,37 m/yıl hızla gerileme yaşandığı hesaplanmıştır. Akarsu ağzı ve Batum Limanı arasında kalan kıyı şeridinde ise aşınım ve birikimin bir arada gerçekleştiği tespit edilmiştir. Akarsu ağzı yakınlarında görece birikim, arıtma tesisi-havalimanı-plaj bölgesinde aşınımın ve liman bölgesine yaklaştıkça tekrar birikimin egemen olduğu saptanmıştır. Net kıyı çizgisi değişiminin akarsu ağzı yakınlarında ortalama 10,52 m, plaj bölgesinde ortalama -55,63 m ve liman bölgesine yaklaştıkça ortalama 44,67 m düzeyinde olduğu hesaplanmıştır. Söz konusu sahalardaki kıyı çizgisi değişim hızları sırasıyla; ortalama 0,22 m/yıl, -1,53 m/yıl ve 1,19 m/yıl olarak hesaplanmıştır.

Çalışma bulguları Batum şehrinin kıyı çizgisine yakın farklı bölgeleri için kıyı erozyonu riskinin güncel bir problem olduğunu göstermektedir. Akarsu ağzının sol sahilinde turizm tesislerinin hızla arttığı Gonio plajı kıyı erozyonuna maruz sahaların başında gelmektedir. Söz konusu sahadaki doğal plaj tehlike altındadır. Akarsu ağzının akış yönüne göre sağ sahilinde ise gerek turizm gerekse ulaşım ve altyapı tesisleri kıyı erozyonuna bağlı olarak gelişen kıyı çizgisi gerilemesi tehlikesi ile karşı karşıyadır. Özellikle konaklama ve turizm tesislerinin yer aldığı Lech & Marya Kachinsky Bulvarı önünde kalan rekreasyon alanı kıyı erozyonuna bağlı olarak gelişen deniz ilerlemesi riski ile karşı karşıya kalan sahaların başında gelmektedir. Şehre ait arıtma tesisi ve uluslararası havalimanı ise deniz ilerlemesine bağlı çevre sorunları ile karşı karşıya kalma potansiyeli en yüksek yerlerin başında gelmektedir. Liman bölgesindeki dalgakıranın hemen gerisinde yer alan aks ise görece birikimin gerçekleştiği saha olarak benzer riskleri taşımamaktadır.

5. Tartışma ve Öneriler

Doğal sistemin şekillendirdiği ve oldukça dinamik bir yapıya sahip olan kıyıları farklı etkenlerin kontrolünde zaman içerisinde değişim göstermektedir. Buna karşın antropojen müdahaleler doğal süreç üzerinde tahribata sebep olarak farklı çevre sorunlarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu çalışmaya konu olan kıyı, sınır aşan bir akarsu tarafından taşınan materyalden beslenen deltada yer almaktadır. Mamba ve mansap ülkelerin su kaynaklarından yararlanmak için farklı projeler geliştirdiği Çoruh Nehri ve biriktirme yapısı olan Çoruh Deltası büyük ölçekte antropojen baskı ile

karşı karşıyadır. Güncel olarak antropojen baskının temel kaynakları ise büyük rezervuar hacmine sahip hidroelektrik santraller ile akarsu madenciliği olarak iki grup altında toplanabilir. Her iki faaliyet de akarsu sediman bütçesini olumsuz yönde etkilemektedir (Jaoshvili, 2002; Pepping, 2012).

Çoban ve ark., (2020) Çoruh Deltası'nda gerçekleşen alansal değişimleri UA ve CBS destekli olarak hesaplamışlardır. Söz konusu çalışmada akarsu ağzı ile Türkiye sınırı arasında kalan kesimde 52 ha alansal kayıp, havalimanı ve plaj bölgesinde 24 ha alansal kayıp ve limana yakın olan kesimde ise 13 ha alansal artış gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Bu çalışma bulguları arasında yer alan net kıyı çizgisi değişim miktarları ve kıyı çizgisi değişim hızları Çoban ve ark., (2020) tarafından elde edilen alansal değişim bulguları ile uyum göstermektedir.

Çoruh Nehri güncel olarak su altı kanyonu açıklarından denize dökülmektedir (Jaoshvili, 2002). Giardino ve ark. (2015), Batum açıklarındaki egemen akıntı yönünün batı-kuzey doğrultusunda kıyıya paralel biçimde olduğunu açıklamıştır. Bu durum, akarsu ağzı ile Türkiye sınırı arasında kalan kıyı şeridinde akıntı kökenli aşındırma faaliyetlerinin hâkim olacağını düşündürmektedir. Bu çalışma sonucunda elde edilen ortalama 2,37 m/yıl düzeyindeki aşınım hızı söz konusu savı desteklemektedir.

Pepping, (2012), Batum şehrinin gelişimine bağlı olarak akarsuyun kuzey kolunun kapatılması sonrasında, 1880 ve 1913 yılları arasında, akarsuyun kuzey kolunun olduğu sahada 6 m/yıl ile 8 m/yıl aralığında değişen hızlarda erozyon gerçekleştiğini ifade etmiştir. Bu çalışma bulguları 2,90 m/yıl hızına ulaşan kıyı çizgisi gerileme hızı ile aşınımın devam ettiğini göstermektedir. 1880-1913 dönemine oranla erozyon hızındaki azalmanın yatağın kapatılması sonrasında zaman içerisinde oluşan denge durumu ve devreye alınan koruma projeleri kökenli olduğu düşünülmektedir.

1982 ile 1986 yılları arasında 30 milyon m³ malzemenin erozyona uğradığı Batum'da, deniz ilerlemesinin önüne geçilmesi amacıyla sahil şeridinde bir takım projeler hayata geçirilerek kıyı şeridi koruma altına alınmaya çalışılmıştır. Buna karşın bu çalışmaya ait bulgular kıyı aşınım hızının sahada bir kaç nokta dışında oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Arıtma tesisinden itibaren, havalimanı ile turizm tesislerinin yer aldığı kıyı şeridi, kıyı erozyonu ve ortaya çıkartacağı problemler ile yüz yüzedir. Bu bağlamda, paydaş ülkelerin bir arada olduğu projeler geliştirilerek aşağı ve yukarı kıyıdaş ülkelerin çıkarlarını gözeten, makul ve akılcıl çözümlerin ivedi olarak hayata geçirilmesi önerilmektedir. Bu kapsamda gerçekleştirilebilecek çözümler arasında yer alan kıyıya dik mahmuzlar yardımıyla, akıntının bölgeden sediman taşımalarının engellemesi yöntemi daha önce denenmiş olup; Zenkovich (1987) söz konusu yöntemin kıyının yukarı kesimlerindeki gelişimi olumsuz yönde etkilediğini ifade ederek başarısızlıkla sonuçlandığını açıklamıştır. Güncel olarak tartışılan yöntemlerden bir diğeri ise yarı antropojen bir döngü oluşturulması fikridir (Dı Leo ve ark., 2011). Yöntem liman bölgesinde biriken sedimanın, oluşturulacak döngü marifetiyle (antropojen süreç) aşınımın yüksek olduğu sahalara geri taşınması ve akıntı marifetiyle tekrar liman bölgesine ulaşması (doğal süreç) temeline dayanmaktadır.

Barajlar, sediman madenciliği ve su altı morfolojisine bağlı olarak Batum şehrinin gelişim gösterdiği kıyı şeridi büyük bir baskı altındadır. Bu çalışma bulguları; aşınımın farklı hızlarda bölgede egemen olduğu ve şehrin farklı bölgelerini tehdit ettiğini göstermesi açısından önem taşımaktadır. Çoruh Nehri'nin su altı kanyonuna deşarj olduğu gerçeği dikkate alındığında, deltanın gelişimi için (hakim rüzgar - akıntı yönünde değişiklik olmadığı ve deniz seviyesi değişimi gerçekleşmediği varsayımıyla) akarsu tarafından taşınan sediman yükü ile kanyonun denge seviyesine gelmesi, akabinde delta gelişiminin devam etmesi öngörülebilir. Buna karşın sediman yükünün sıfırlanması ise denge profiline ulaşamayacağı savının ortaya çıkmasına neden olacaktır. Küresel iklim değişikliğine bağlı olarak gerçekleşmesi olası deniz seviyesi değişimleri de dikkate alındığı takdirde, çalışma sahasındaki durumun çok daha karmaşık hale geleceği öngörülmektedir. Bu bağlamda açıklanan değişkenlerin bir arada değerlendirildiği kapsamlı modeller geliştirilerek olası senaryolara bağlı olarak kıyı modellemelerinin yapılması sonraki araştırmacılara önerilir.

Kökeninden bağımsız olarak kıyı erozyonunun devam etmesi ve gerekli önlemlerin ivedilikle alınmaması halinde Batum şehri büyük çevre problemleriyle yüzleşmek zorunda kalacaktır. Bu bağlamda kıyı erozyonunun kıyı şeridi ve dolayısıyla şehir üzerindeki negatif yönlü olumsuz etkisini bertaraf etmek için delta kıyısı boyunca gerekli mühendislik çalışmalarının ivedi olarak hayata geçirilmesi gerektiği 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

- Acar, E. (2017). Artvin ilinin hidroelektrik santraller bakımından değerlendirilmesi. *Karadeniz Araştırmaları*, 14 (56), 185-199.
- Akdeniz, H.B. (2021). Kıyı Çizgisi Zamansal Değişiminin İncelenmesi ve Kıyı Yönetim Sisteminin Geliştirilmesi. Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Konya.

- Aktaş, C. ve Bahadır, M. (2022). Çam Burnu (Ordu) ile Gül Burnu (Giresun) arası kıyı çizgisinin zamansal değişimi ve kıyı kullanımı. *International Journal of Geography and Geography Education*, (45), 320-348. doi: 10.32003/igge.1016311
- Algan, O., Gazioğlu, C., Yücel, Z., Çağatay, N. ve Gönençgil, B. (2000). *Sediment at Freshwater Discharges of the Anatolian River into the Black Sea*. Black Workshop Sea Fluxes Report No. 145. UNESCO: Paris.
- Ataol, M., Kale, M.M., and Tekkanat, İ.S. (2019). Assessment of the changes in shoreline using Digital Shoreline Analysis System: a case study of Kızılırmak Delta in northern Turkey from 1951 to 2017. *Environmental Earth Sciences*, 78, doi: 10.1007/s12665-019-8591-7
- Avcı, S. (2017). Kıyı alanların kullanımında beşeri faktörler, *Yasal ve Bilimsel Boyutları ile Kıyı içinde* (117-146). İstanbul: Jeomorfoloji Derneği Yayını.
- Ayalke, Z. G., Şişman, A., and Akpınar, K. (2023). Shoreline extraction and analyzing the effect of coastal structures on shoreline changing with remote sensing and geographic information system: Case of Samsun, Turkey. *Regional Studies in Marine Science*, 61. doi: 10.1016/j.rsma.2023.102883
- Bilashvili, K.. (2007). dynamics of the deltaic canyon area of the Rv. Chorokhi, Georgia. Vasilios Lykousis,, Dimitris Sakellariou and Jacques Locat (eds). In *Submarine Mass Movements and Their Consequences*. Dordrecht: Springer.
- Bougherira, A., Ghodbani, T., and Kouti, A. (2020). Contemporary geomorphic evolution of Falcon Cape sandy coastline (Oran, Algeria): geographical information system (GIS) - based approach. *Arab J Geosci*. 13(18):1–16.
- Brandt. S.A. (2000). Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, 40. 375–401.
- Ciritçi, D. (2020). İzmit Körfezi Kıyı Değişiminin Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Uzaktan Algılama Yöntemleriyle Otomatik Belirlenmesi. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Sivas.
- Çoban, H., Koç, Ş. ve Kale, M.M. (2020). Çoruh Deltası (Gürcistan/Batum) kıyı çizgisi değişimi (1984 – 2019). *International Journal of Geography and Geography Education*, (42), 589-601. doi:10.32003/igge.741573
- Crowell, M., Douglas, B. C., and Leatherman, S. P., (1997), On forecasting future U.S. shoreline positions— A test of algorithms: *Journal of Coastal Research*, 13(4), 1245-1255.
- Demiroğlu, İ. ve Ernst F.B., (2022). Uzaktan algılama teknikleri kullanılarak Zerne Barajının alansal, hacimsel ve kıyı değişimlerinin zamana bağlı analizi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*. 7(1): 15-26.
- Di Leo, M., Giardino, A., Bragantini, G., Devroeg, H., and Tonnon, P. K., (2015). Batumi coastal protection: Facing decreasing river discharges of Gravel and Canyons Traps. In Proceedings of the 36 th IAHR World Congress.
- Eraslan, S. (2019). Kızılırmak Deltası Ekolojik Risk Değerlendirmesi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Samsun.
- Erdağ, R. (2015). Türkiye'nin sınıraşan sular sorunu. *Yalova Sosyal Bilimler Dergisi*, 5 (9), 27-52. doi: 10.17828/yasbed.52053
- Erdem, F., Derinpınar, M.A., Nasırzadehdızajı, R., Oya, S., Şeker, D.Z., ve Bayram, B. (2018). rastgele orman yöntemi kullanılarak kıyı çizgisi çıkarımı İstanbul örneği. *Geomatik*, 3 (2), 100-107. doi: 10.29128/geomatik.362179
- Erinç, S. (2001). *Jeomorfoloji II*. İstanbul: Der Yayınevi.
- Giardino, A., Di Leo, M., Bragantini, G., De Vroeg, H., Tonnon, P. K., Huisman, B., and De Bel, M. (2015). An integrated sediment management scheme for the coastal area of Batumi (Georgia). In *Proceedings of the medcoast conference*, (pp. 703-714). Varna: Mediterranean Coastal Foundation.
- Gibeaut, J.C., Hepner, T., Waldinger, R., Andrews, J., Gutierrez, R., Tremblay, T.A., Smyth, R., and Xu, L. (2001). Changes in Gulf Shoreline Position, Mustang, and North Padre Islands, Texas. A Report of the Texas Coastal Coordination Council Pursuant to National Oceanic and Atmospheric Administration Award No. A97OZ0179, GLO Contract Number 00- 002R, The University of Texas at Austin Austin, Texas.
- Hay, B.J. (1994). Sediment and water discharge rates of Turkish Black Sea rivers before and after hydropower dam construction. *Environmental Geology*, 23 (4), 276-283.
- Hoşgören, Y. (2013). *Jeomorfolojinin Ana Çizgileri I*. İstanbul: Çantay Kitapevi.
- Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G., Farris, A.S., (2018). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report 2018–1179, <https://doi.org/10.3133/ofr20181179>.
- İnandık, H. (1971). *Deniz ve Kıyı Coğrafyası*. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Yayınları.

- İncedayı, N. (2015). Kocasu Çayı Deltası ve Yakın Çevresinin Ekolojik Açından Değerlendirilmesi. İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yayınlanmamış Doktora Tezi, İstanbul.
- Jaoshvili, S. (2002). The Rivers of the Black Sea. Khomerski, I., Gigineishvili, G. Kordzadze, A. (eds) Technical Report No. 71. Copenhagen: European Environmental Agency.
- Jipa, D.C., Panin, N., Olariu, C., and Pop, C. (2020). Black Sea submarine valleys—patterns, systems, networks. *GeoEcoMarina*, 26.
- Kale, M.M., Ataol, M., and Tekkanat, I.S. (2019). Assessment of shoreline alterations using a Digital Shoreline Analysis System: a case study of changes in the Yeşilirmak Delta in northern Turkey from 1953 to 2017. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191, doi:10.1007/s10661-019-7535-8
- Kalkan, K., Maktav, D., and Bayram, B. (2019). Shoreline extraction from cloud removed Landsat 8 Image. Aslan, Z., Dökmen, F., Feoli, F., Siddiqi, A., E. (eds.) Case Study Lake Ercek, Turkey. In *Mathematical Modeling of Real World Problems*, (37-54). New York:: Nova Science.
- Kaplan, G., Avdan, U., Yigit Avdan, Z., and Jovanovska, T. (2020). Monitoring shared international waters with remote sensing data. *Resilience Jurnal*, 4(1), 77-88
- Karasu, S. (2016). Dünyada ve Türkiye’de yapay kıyı beslemesi. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. doi:20.10.16984/saufenbilder.02100.
- Kılar, Ç. ve Çiçek, İ. (2018). Göksu Deltası kıyı çizgisi değişiminin DSAS aracı ile belirlenmesi. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 16(1), 89-104. doi: 10.1501/Cogbil_0000000192
- Koç, Ş. (2023). Çoruh Deltası (Batum) Kıyı Çizgisi Değişikliğinin DSAS Kullanılarak Analizi, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Çankırı.
- Köle, M. M. (2017). 1965-2016 dönemi Türkiye sınıraşan sular politikası. *Marmara Coğrafya Dergisi*, (35), 122-133.
- Kshetri, T. (2018). NDVI, NDBI & NDWI calculation using landsat 7, 8. *GeoWorld*, 2, 32-34.
- Kuleli, T., Güneroğlu, A., Karşlı, F., and Dihkan, M. (2011). Automatic detection of shoreline change on coastal Ramsar wetlands of Turkey. *Ocean Eng.* 38(10):1141-1149.
- Louati, M., Saïdi, H., and Zargouni, F. (2015). Shoreline change assessment using remote sensing and GIS techniques: a case study of the Medjerda delta coast, Tunisia. *Arab J Geosci* 8:4239-4255.
- Liu, H. (2004). Automated extraction of coastline from satellite imagery by integrating Canny edge detection and locally adaptive thresholding methods, *International Journal of Remote Sensing*, 25(5), 937–958.
- McFeeters, S.K. (1996). The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432.
- Miliman, J.D. (1980). Transfer of river-borne particulate material to the oceans. In: *River Inputs to Ocean Systems*. In J. M.Martin, J. D. Burton, & D. Eisma (Eds.). SCORLJNEP UNESCO. Review and workshop (pp. 5-12). Rome: FAO.
- Muskananfolo, M. R., and Febrianto, S. (2020). Spatio-temporal analysis of shoreline change along the coast of Sayung Demak, Indonesia using Digital Shoreline Analysis System. *Reg Stud Mar Sci* 34:101060.
- Oyedotun, T.D.T. (2014). Shoreline geometry: DSAS as a tool for Historical Trend Analysis. *Geomorphological Techniques*, 2,1-12.
- Pepping, C. (2012). Feasibility study of an artificial sandy beach at Batumi, Georgia. Delft University of Technology. Master thesis, <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A55caae9c0-3175-4d24-9793-d9aaaa86ca7a>.
- Rio, L.D., Gracia, J.F., and Benavente, J. (2013). Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain. *Geomorphology*, 196, 252-266. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.07.027.
- Sucu, S., Dinç, T. (2008). Çoruh havzası projeleri. TMMOB II. Ulusal Su Politikaları Kongresi, 20–22 Mart. Ankara
- Süme, V. ve Türüt, R. (2018). Artvin sınırları içinde, çoruh nehri ana kolu üzerinde bulunan barajların hidroelektrik potansiyeli ve çevresel etkileri. *Türk Hidrolik Dergisi*, 2(1), 13-18.
- Tağıl, Ş., ve Cürebal, İ. (2005). Altınova (Balıkesir) Sahilinde Kıyı Çizgisi Değişimini Belirlemede Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 15(2), 51–68.
- Tanı, G. (2015). Batum’da turizmin gelişimi ve bölge gelişimine katkısı. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 16(1), 91-107.
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A, Zichichi, J.L., and Ergul, A. (2017). The digital shoreline analysis system (DSAS) version 4.0 an ArcGIS extension for calculating shoreline change, Open-File Report. US Geological Survey Report No. 2008- 1278: <http://woodshole.er.usgs.gov/projectpages/dsas/version4/>
- Turoğlu, H. (2019). Yapay kıyıların jeomorfolojik tanımlaması: Diliskelesi kıyıları örneği (Kocaeli, Türkiye). *Coğrafya Dergisi*, 39, 11–27. doi:10.26650/JGEOG2019-0015

Zenkovich, V. P., and Schwartz, M. (1987). Protecting the Black Sea-Georgian S.S.R. gravel coast. *Journal of Coastal Research*. 3: 201–9.

Investigation of Fluid Flow Through the Ureteral Canal with A Porous Media Approach in the Ureteral Stone Reduction Process

Merdin DANIŞMAZ^{1*} 

Abstract

This study includes the examination of the stone removal process by computational fluid dynamics analysis in the kidney and ureteral canal, which is modeled as the fluid evacuation channel for the urine flow. SolidWorks 2020 R2 commercial software was used for three-dimensional modeling and Flow Simulation plugin for flow simulation analysis. The kidney with the size of 12x6x6cm and in addition to this, the ureteral canal with the largest internal diameter of 20 mm (at the kidney outlet) and the smallest diameter of 5 mm (at the canal outlet) were modeled. Pressure distribution in the presence of flow was determined in case of stone stuck in the middle part of the ureteral canal. To identify the partially occluded region allowing flow, the kidney stone region was defined as a porous medium for analysis. Four different conditions (between 0.90 and 0.99) for permeability in this region were included in the analysis to represent stone size and structure. The change in pressure-velocity distribution and its effect in the kidney area were seen at 5 different entry speeds. The effect of different permeability conditions on the pressure difference was shown graphically. The findings showed the presence of high pressure (peak 1850 mmH₂O) throughout the flow volume at narrow passages and low permeability conditions, as expected. At 90% permeability, the maximum local velocity in the blockage zone was found to be 4.5 m/s and this value tends to decrease with increasing permeability. It was predicted that the pressure-velocity relationship along the flow can provide information on treatment and intervention, depending on the stone and canal structure whose properties are predetermined. It was concluded that a preliminary idea could be formed about the extent of pain due to high pressure, especially for the stone dropping process, which does not cause complete obstruction in the canal and is defined as a porous medium in this analysis.

Keywords: Kidney and ureteral stones, Flow in the ureteral canal, Kidney stone removal, CFD

Böbrek Taşı Düşürme İşleminde Üretral Kanal İçindeki Akışkan Akışının Gözenekli Ortam Yaklaşımı ile İncelenmesi

Öz

Bu çalışmada, idrar akışında akışkan tahliye kanalı olarak modellenen böbrek ve üreter kanaldaki taş düşürme işleminin hesaplamalı akışkanlar dinamiğiyle (HAD) analizi ile irdelemesini yapıldı. Üç boyutlu modelleme için SolidWorks 2020 R2 ticari yazılımı ve akış simülasyon analizi için Flow Simulation eklentisi kullanıldı. 12x6x6cm boyutlarında böbrek ve buna ek olarak en büyük iç çapı 20 mm (böbrek çıkışında) ve en küçük çapı 5 mm (kanal çıkışında) olan üreter kanalı modellendi. Üreter kanalının orta kısmına taş sıkışması halinde akışın varlığında basınç dağılımı belirlendi. Akışa izin veren kısmen tıkalı bölgeyi belirlemek için, böbrek taşı bölgesi analiz için gözenekli bir ortam olarak tanımlandı. Bu bölgedeki geçirgenlik için dört farklı koşul (0.90 ile 0.99 arasında) taş boyutunu ve yapısını temsil etmek üzere analize dahil edildi. Basınç-hız dağılımındaki değişim ve bunun böbrek bölgesindeki etkisi 5 farklı giriş hızı için belirlendi. Farklı geçirgenlik koşullarının basınç farkına etkisi grafiksel olarak gösterildi. Bulgular, beklendiği gibi dar geçişlerde ve düşük geçirgenlik koşullarında akış hacmi boyunca yüksek basıncın (pik değer 1850 mmH₂O) varlığını gösterdi. %90 geçirgenlik oranında tıkanma bölgesinde maksimum lokal hız 4.5 m/s olarak bulundu ve geçirgenlik artışıyla birlikte bu değer azalma eğilimindedir. Akış boyunca basınç-hız ilişkisinin, özellikleri önceden belirlenmiş olan taş ve kanal yapısına bağlı olarak tedavi ve müdahale hakkında bilgi verebileceği öngörüldü. Özellikle kanalda tam tıkanmaya neden olmayan ve bu analizde gözenekli bir ortam olarak tanımlanan taş düşürme işlemi için yüksek basınca bağlı ağrının boyutu hakkında fikir oluşturulabileceği kanısına varıldı.

Anahtar Kelimeler: Böbrek ve üreter taşı, Üretral kanalda akış, Böbrek taşı düşürme, HAD

¹Kırşehir Ahi Evran University, Mechanical Engineering Department, Kırşehir, Türkiye, m.danismaz@ahievran.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0003-2077-9237>

1. Introduction

The human body is equipped with channels and vessels and works like a multifunctional mechanical installation. Much flow research in mechanical engineering deals with flow through constricted pipes and its application to various human body circulatory systems. It is useful to model these systems and analyze them with computerized calculations. CFD models have been applied to the circulatory system in a variety of ways, including flow effects in vasoconstriction and variable types of blood flow. In the vein wall over the years, smoking, cholesterol, etc. Mechanical examination of arterial disturbances caused by plaques that develop due to factors are included in these studies. CFD analysis has even been evaluated in fluid mechanics in the respiratory system and digestive system in relation to flow simulation and analysis. For example, a study by Caruso et al. performed a computational fluid dynamics comparison between different outlet graft anastomosis locations of the left ventricular assist device in a patient-specific aortic model (Caruso et al., 2015). Singla et al. presented a new approach in the diagnosis of urinary tract obstruction using HAD analysis (Singla et al., 2008). In the study, various hypothetical models were created in the Gambit program, in which flow physics was evaluated according to changing geometries and conditions. These models showed short segments of contraction and possible effects of occlusion. Flow analysis was performed by comparing velocity, static pressure, dynamic pressure, total pressure, and wall shear stress contours with the results predicted by flow theory with Fluent software. Another study (Carniel, 2021) aimed to demonstrate the potential of computational bioengineering in the field of lower urinary tract pathophysiology. It has been stated that engineering methods allow the investigation of urine flow in healthy and pathological conditions and analysis of urethral obstruction through artificial urine effects. Computational models of the bladder and urethra have been developed and investigated lower urinary tract physiology in health and disease. As a result of the study, it is stated that bioengineering methods will allow to expand and deepen the knowledge about lower urinary tract functionality. In more detail, it is concluded that modeling techniques provide information that contributes to explaining the occurrence of pathological conditions and will allow for the design and optimization of clinical-surgical procedures and devices. Numerical analysis of deformation and flow in the proximal region of the urethra was studied by research group (Mackiewicz, 2020). As a result of the study, a geometric and numerical model of the urethra was developed based on histological photographs. The urethra was tested in a flat deformation condition. Stress and stress fields of the Cauchy tensor were investigated. A methodology for testing the dynamics of urine flow in the highly deformable urethra was proposed.

Urinary tract obstruction is a common clinical problem involving narrowing of the ureters or urethra. Current diagnostic methods are costly, and urologists are constantly looking for new,

inexpensive, non-invasive measures to diagnose obstruction. Stones that do not obstruct the kidney canal (ureter) do not cause any symptoms or signs, with the exception of hematuria (Resnick, 2004). This form of flow can be thought of as the natural flow of urine. However, if the stone blocks the ureteral area, the pain is localized to the kidney. One of the main causes of pain is the formation of high pressure in the kidney region as a result of the obstruction of the ureteral canal, which we will describe as the flow channel. As the stone moves down the ureter, the pain moves down and towards the front of the body. In this case, the pressure areas change, and the stone moves through the channel without removing the obstruction. Stones less than 5 mm in diameter have a high chance of passing through the ureter; Those 5-7 mm have an average chance of expulsion (50%), and those larger than 7 mm almost always require urological intervention (Coe & Worcester, 2005).

2. Materials and Methods

The stone dropping process is schematically given in Figure 1. The shapes of kidney stones are mostly not smooth-surfaced. The urine flow continues partially thanks to the cavities and protrusions on the surface of the stone that block the channel due to its dimensions.

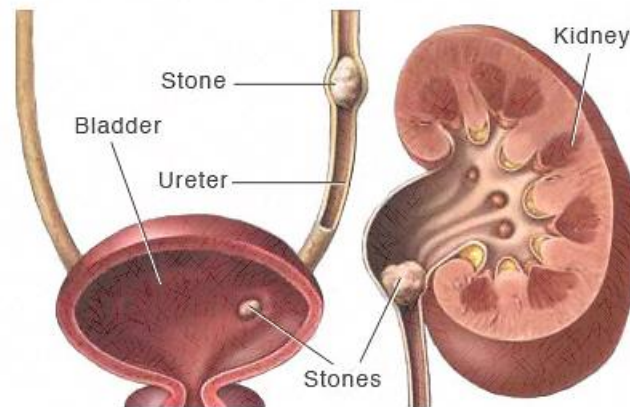


Figure 1. Stone reduction/dropping process (schematic) (Mayo, 2023)

The ureteral canal has the ability to stretch. Considering this situation, it differs from the standard channel flow. In many engineering applications, the channel geometry is designed as rigid and the deformation of the fluid pressure on the surfaces can be tolerated by the right material selection. The effects that cause shape change are not within the scope of this subject. Although kidney and ureteral stones do not have a definite shape, the number of stone removal processes in which there is a flow is quite large. In this study, the ureteral canal was considered as an elliptical and rigid canal. An example ureteral stone is given in Figure 2. For this process, how much of the flow is allowed to pass is more important than the shape of the stone. It is possible to model a porous environment by determining a stone region that blocks the channel and does not move. Thus, the

porosity conditions will give an idea about the pressure changes in the kidney and canal region. This study includes exactly such a flow analysis. What makes the study useful is that computational fluid dynamics (CFD) is one of the rare studies that helps diagnostic applications of flow in the urinary system. (Constante-Amores et al., 2023)



Figure 2. Ureteral stone (Allen, 2023)

2.1. Modeling and Assumptions

In the stone removal process, kidney, ureteral canal, and stone form the basic elements of modeling. First, a 3D control volume model was created. Figure 3a and Figure 3b show the kidney-ureter modeling and the occluded stone region, respectively. The overall dimensions of the kidney were determined as 60x120x30mm. Just at the exit of the kidney, the ureteral canal begins with a 30 mm circular section. In the first quarter of the total canal length, the cross-section diameter changes rapidly and decreases to 10 mm. Subsequent section narrowing changes linearly and the ureteral outlet section diameter decreases to 5 mm. Due to the nature of the stone, the zone where the kidney stone is stuck can be considered as a porous media that completely covers a certain volume of the ureteral canal. In the analysis, this zone was selected in the middle section to see the flow inlet and outlet effects together. The inlet section represents the velocity inlet, and the outlet section represents the pressure outlet. With this determined velocity input, fluid flow is provided in the negative y direction. This model was then simulated in Flow Simulation. Only the fluid pressure and velocity relationship were considered in the modeling of the stone dropping process.

The effect of varying the distance between different constriction sections along the channel was initially observed by considering several different distance situations. However, the effect of permeability in the occlusion zone was observed to be more effective, and the occlusion zone model was fixed at an average narrowing section. In mildly and severely constricted models, the effect of constriction intensity is related to stone size and shows similar flow behavior. The channel section is designed as elliptical. Both narrowing depth and width are taken into account. The permeability of

the porous media characterizing the clogging was tested with random values from 0.01 to 0.99. The highest permeability condition represents the flow without complete obstruction.

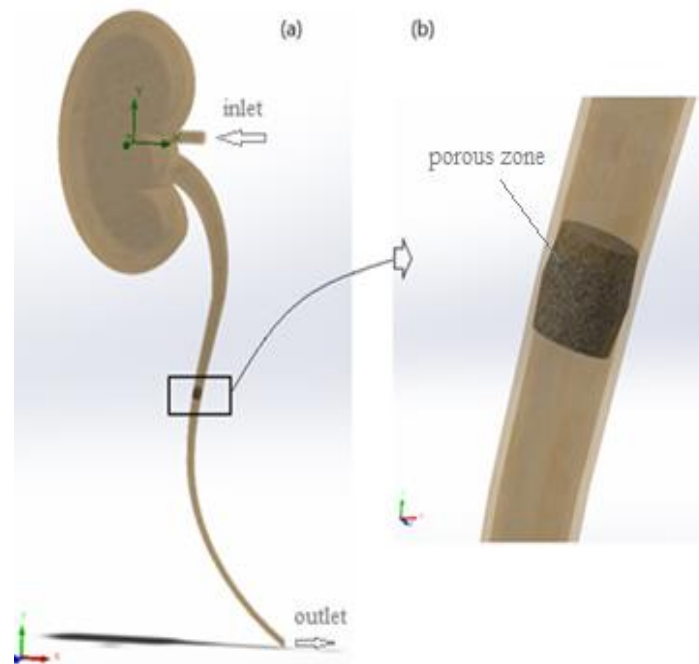


Figure 3. Modeling of ureteral occlusion a) Kidney and ureter b) Blockage zone

It should be noted that many factors, from body functions to the characteristics of the disease, must be considered in detail in order to model the process as a whole. Continuous and incompressible flow conditions are some of the assumptions in this basic approach.

2.2. Governing Equations

The hypothetical ureteral canal model presented the narrowing segments of the urinary tract and possible geometric representations of stone-induced obstruction. In this model, more emphasis has been placed on evaluating the physics and dynamics of flow based on variable geometries and boundary conditions. The Reynolds number for all simulated models was changed and simulated again using the appropriate flow solver. Flow behaviors were compared for Reynolds values between 120 and 1205. Input velocities were calculated using Equation 1, respectively, at values ranging from 0.101 to 1 m/s. The Reynolds number (Re) defined in Equation 1 is used to determine whether the flow is laminar (usually $Re < 2300$ for internal flow), turbulent internal flow for $Re > 4000$, or transitive flow for intermediate values. Since Re is only an approximation, the determination of turbulence depends on other factors such as geometric complexity.

$$Re = \frac{u_m D_h}{\vartheta} = \frac{\rho u_m D_h}{\mu} \quad (1)$$

Here, ρ is the urine density. During the stone removal process, this value will also change depending on the blood content (1002-1035 kg/m³). In this analysis, the density was chosen as 1017 kg/m³. In a study by a team (Inman et al., 2013), estimates of urinary kinematic viscosity as a function of moderate sunstroke state and temperature in a variety of common clinical conditions were used for treatment planning for bladder diseases. In conclusion, they stated that the kinematic viscosity of urine is always higher (about 10% higher) than pure water in the range of 20–42°C. The kinematic viscosity of urine decreases with increasing temperature, and its specific gravity is not a substitute for the kinematic viscosity of urine. In this study, the kinematic viscosity of urine was taken as 0.83x10⁻⁶ m²/s for a density of 1017 kg/m³ and a temperature of 37 °C.

Each flow model has been developed as porous media to be applied more precisely for stone flow that remains blocked in the human urinary tract.

This flow pattern represents the flow of the fluid filled into a tank in a narrowing section through a channel. Pressure and velocity distributions conform to the Bernoulli flow principle given in Equation 2, which is based on the pressure-velocity relationship (Stelmashuk & Tugolukov, 2020)).

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = constant \quad (2)$$

The urine used in modeling is a Newtonian fluid in which there is a simple, linear relationship between shear stress and velocity gradient. Viscous, incompressible Newtonian fluids are governed by the Navier-Stokes equations. In these equations, u_i ($i = 1,2,3$) the three components of velocity, f_i fundamental forces (such as gravity), p pressure, and μ the constant viscosity of the fluid (Ravi et al., 2022). Since the viscosity and density of the working fluid were treated as a constant, such equations could be applied as follows:

Continuity equation:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

Momentum equation:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (4)$$

Energy equation:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j C_p T - k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (5)$$

The standard k-epsilon (k-w) model was used to evaluate turbulent flow. This model is suitable for turbulent flows where molecular viscosity is unimportant. The solvent was chosen because it is one of the most practical and essential solvents for engineering goals and CFD applications.

3. Findings and Discussion

3.1. Mesh independence test

In flow analysis, it is necessary to detect that the solver obtains values independent of the number of cells. To ensure consistency in models, it is important to perform a grid independence test for all 3D situations as the finer grid structure provides greater accuracy. Such a test reduces the network range to such a point that further reduction of the range minimizes time and memory consumption. In addition, analysis outputs will emerge that have a negligible effect on the result of the simulation. In order to maintain the accuracy of the flow and the sensitivity of the porous environment conditions, smaller cellular fragmentation was also performed for the stone and its region, thanks to local grating. This situation is given in Figures 4.a and 4.b. Flow Simulation plugin of SolidWorks software was used for drawing and analysis (SolidWorks, 2020).

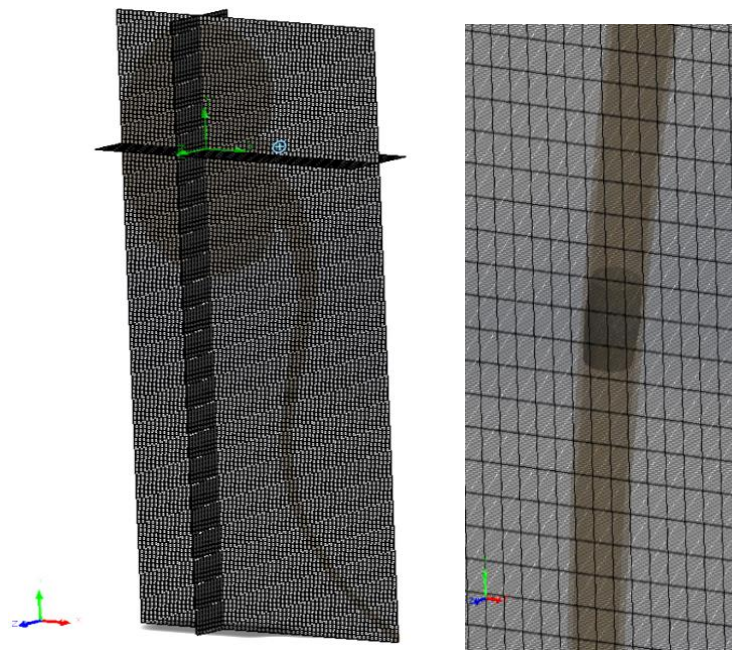


Figure 4. Finite volume model a) Global mesh b) Local mesh

In this model, a 5th-tier tetrahedral network structure is used. Mesh spacings of 2, 3, 4, 5 and 6 were tested for ureteric outlet pressure in laminar flow at average velocity and finally a 5th stage finite volume modeling was found to be suitable for all cases. The total number of elements obtained in this mesh stage was 178,625. The number of nodes is 196,354. It was determined that the effect of the next stratification on the result was not much. This stage was chosen considering the memory-time savings. This assessment is given in Figure 5.

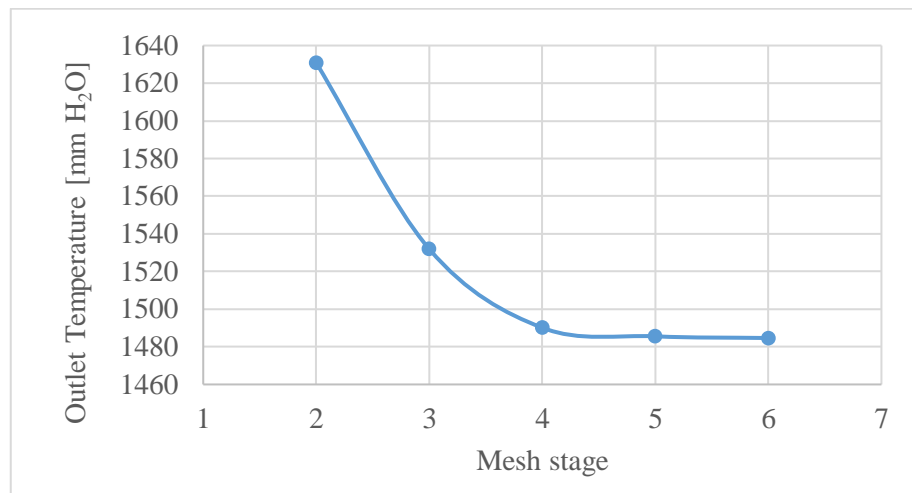


Figure 5. Mesh independence test

3.2. Velocity and Pressure Contours

In the designed model, fluid dynamics is evaluated in terms of velocity, static pressure, dynamic pressure, and differential pressure. Depending on the number of cells in the modeling, the criteria for convergence of the results vary. At the specified analysis settings, the program outputs were obtained after 325 iterations.

As it is understood from the literature, one of the main causes of pain in the kidney region is the formation of high-pressure areas due to obstruction. Contrary to pressure, low or zero fluid velocities occur in these regions due to insufficient flow. These regions are given in Figure 6a and Figure 6b for pressure and velocity, respectively. The blue contours represent the minimum (zero) values, while the red contours represent the maximum velocity values. The trend shows a steady increase in urine velocity across the ureter from the entrance to the exit of the occlusion zone due to the natural narrowing of the diameter. Drinking water or consuming fluids causes an increase in the amount of fluid in the kidney. The increase in pain with the effect of high pressure also forces the ureteral stone to move towards the exit. At what pressure and how much the stone will move is not

determined as a result of this analysis. However, it helps to put forward healthy ideas about diagnosis and treatment.

Streamlines and contour plots show decreased urine output in response to larger contraction magnitudes. It can be seen from the flow trajectory lines given in Figure 7 that the total flow in the congested region has decreased significantly. The values given here are the calculation results at 10% permeability (almost non-occlusion) where good permeability is achieved.

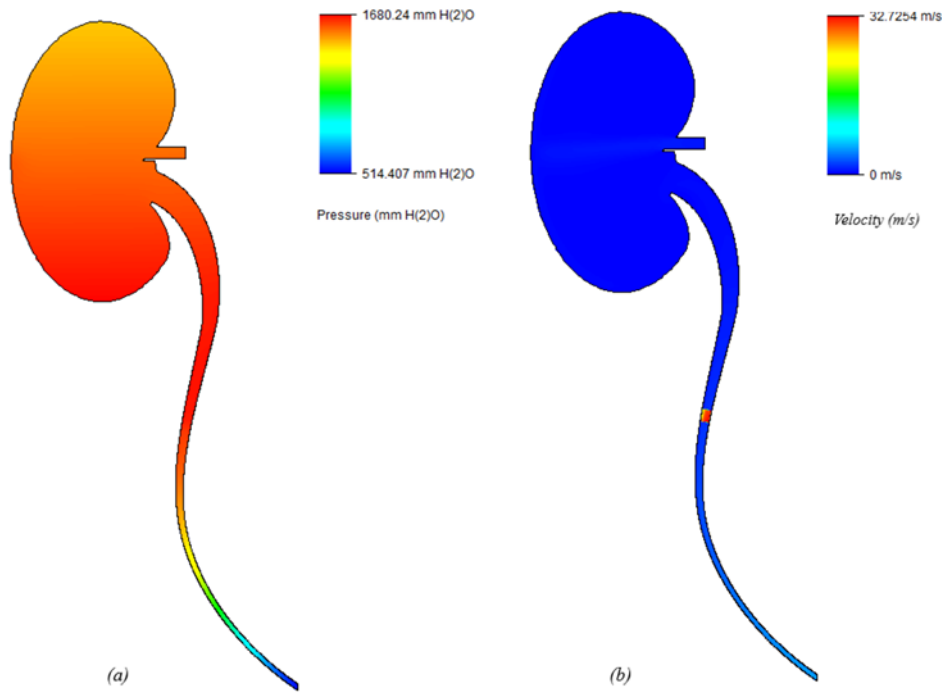


Figure 6. a) Pressure and b) Velocity Contours

Figure 7.a shows that the pressure begins to increase in the lower regions of the kidney model. It is clear that at higher flow inlet rates a high-pressure environment will be created throughout the entire kidney. Figure 7b shows the pattern in which low velocities occur as opposed to pressure. Although the velocity is relatively higher in porous media, it will not significantly affect the continuity of the flow.

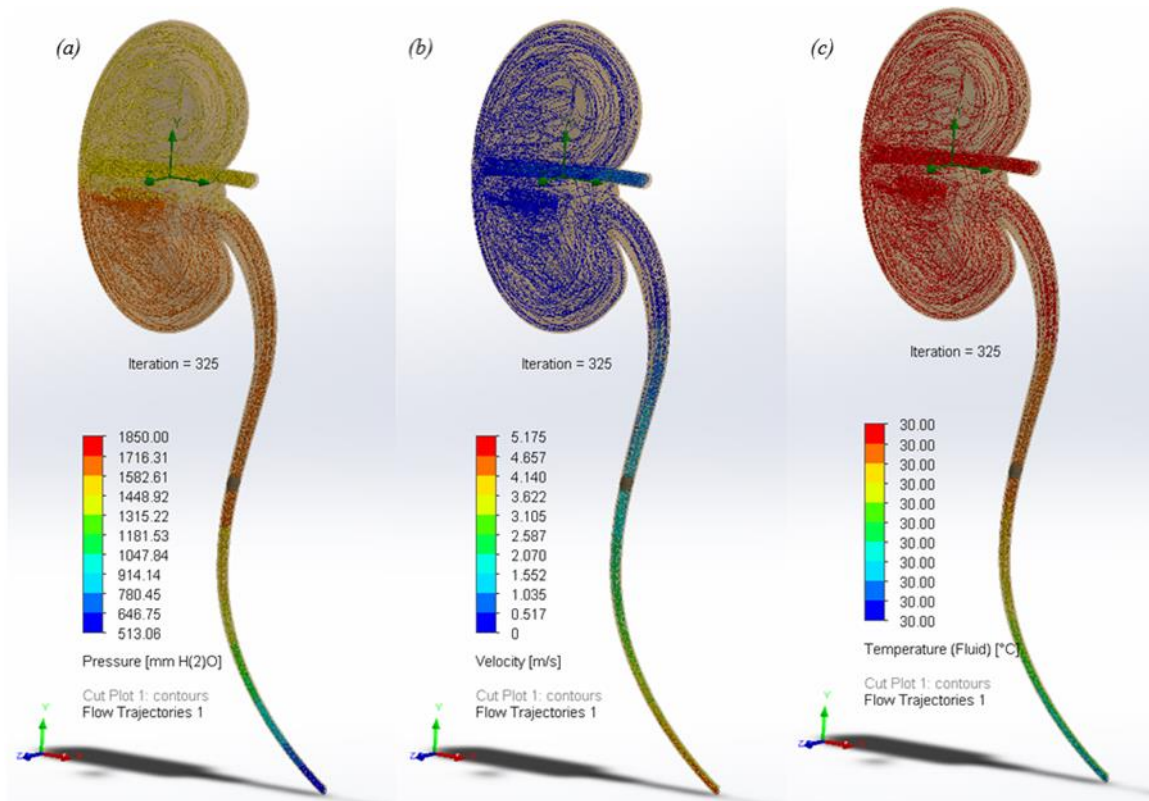


Figure 7. Flow trajectories a) Pressure b) Velocity c) Temperature

In addition, it should be understood from Figure 7.c that different temperature zones can be formed only by the effect of flow. Since the fluid produced in the kidney is closer to the outlet, it is expected to be warmer than the ureter outlet. This situation should be examined in detail by considering the thermal energy of the produced urine and the heat transfer interactions of the system. Note that it is emphasized here that only modeling simulation can be done.

The kidney stone simulation, modeled as a porous medium, gives information about the change of flow properties in channel narrowing with permeability condition. Flow trajectories for pressure and velocity in this region are given in Figures 8.a and 8.b, respectively. It is difficult to predict the movement of true ureteral stones, which often have different surface roughness properties. However, different permeability conditions are expected to occur with the effect of channel cross-section and rotation as it progresses along the channel.

It is understood that with the increase of permeability, the pressure in the kidney and ureter and thus the pressure-related pain may decrease. On the other hand, it can be interpreted that the decrease in pressure will decrease the magnitude of the forces that have a repulsive effect on the stone and adversely affect the dropping process.

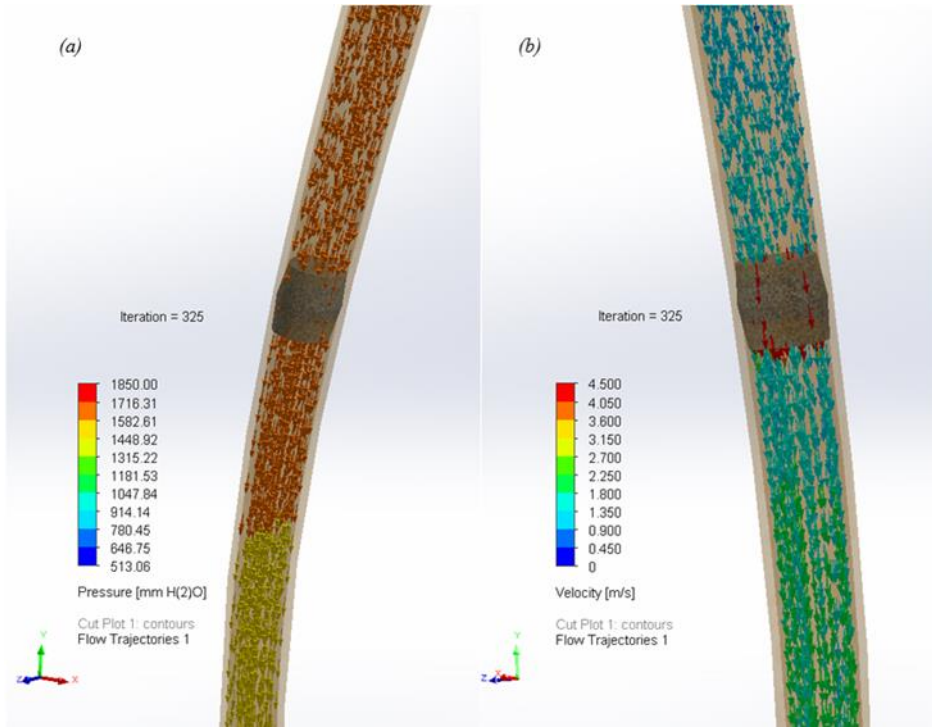


Figure 8. Occlusion (stone) zone flow trajectories a) Pressure b) Velocity

The velocity, pressure and temperature contours in the congestion zone are given in Figure 9. The presence of fluid flow is visible in all contours. Pressure drop in this region is accompanied by high seepage flows. The temperature contours have the potential to change according to the duct heat transfer conditions. This situation needs to be examined separately according to body mechanisms.

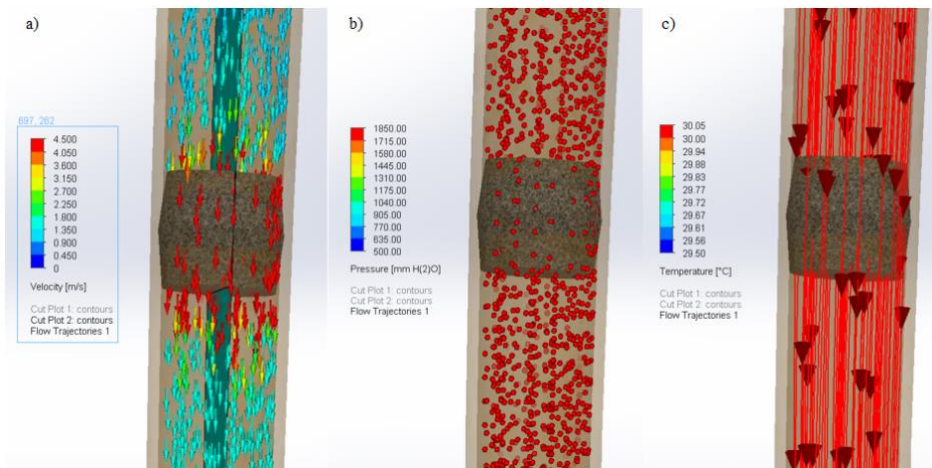


Figure 9. Contours in Congestion Zone a) Velocity b) Pressure c) Temperature

3.3. Effect of Inlet Conditions and Permeability

The numerical pressure difference values obtained from these models, especially focusing on the flow in the inlet, constricted and outlet regions, are given in Figure 10. In the channel flow, the direct effects of the inlet and outlet region on the flow are avoided and continuous flow conditions are provided. In the congested region, there is a continuous flow situation like seepage. The permeability values determined to indicate the severity of the blockage significantly affect the flow. The values presented in Figure 9 are representative approximations based on the model created, average permeability and assumptions made.

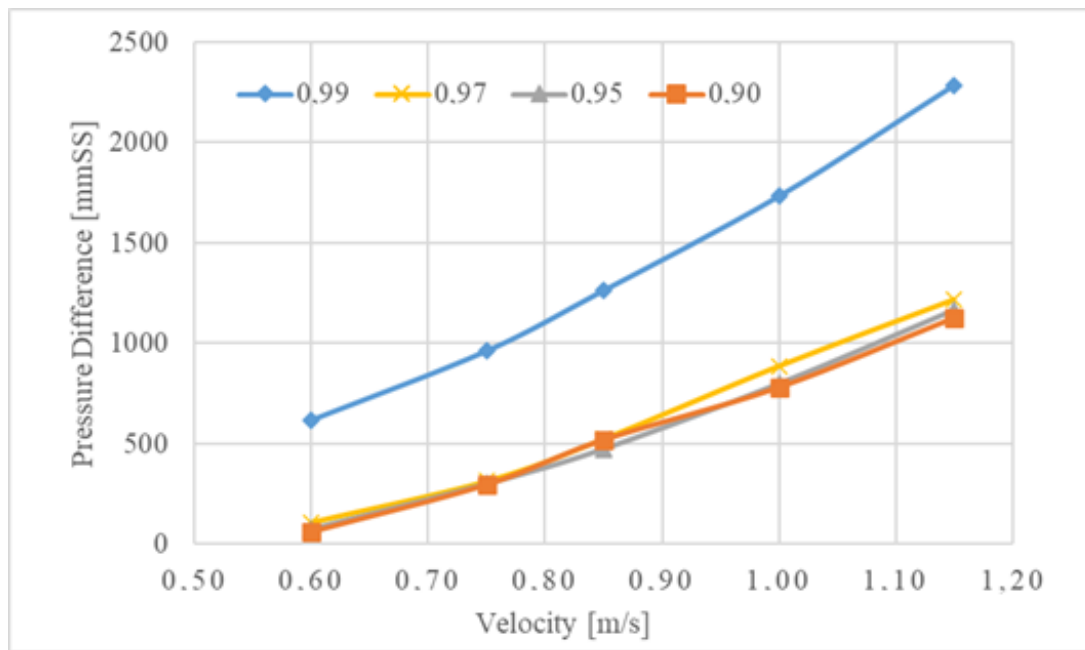


Figure 10. Effect of permeability on pressure difference according to input conditions

Increasing the inlet velocity causes an increase in the pressure difference for all roughness values. However, it is not possible to talk about a continuous flow for the case of complete occlusion. Here, the values obtained for the states from 99% transmittance to 60% are compared. The highest permeability is a flow condition with almost no clogging and, as expected, the highest-pressure difference is for this value.

4. Conclusions and Recommendations

Applications in which fluid and flow conditions are evaluated are within the working areas of engineers. Improving flow and fluid conditions by performing numerical and experimental studies are the focus points for such applications. Blood and urine flow, which are the subjects of two health

fields, also attract the attention of engineers in terms of flow and flow geometries. It is expected that these different professional groups will cooperate in determining the materials and methods necessary for the prevention or treatment of diseases, especially in the protection of human health. The continuous development of computational fluid mechanics analytical tools gives good results in the analysis of most real flow phenomena. The use of these benefits for the protection of human health is an inevitable necessity of science. In this study, the issue of the removal of stones produced in the kidney or canal from the body as a result of their movement along the ureteral canal is discussed. As a basic approach, it is thought that solid formation causing obstruction at any point of the ureteral canal will influence the pressure increase in the canal and kidney. An occlusion zone that allows partial flow in an average narrow section of the ureteral canal was considered. Increasing the inlet velocity introduced into the system from 0.6 m/s to 1.2 m/s to represent water consumption and thus urine production ensures an increase in pressure difference for all permeabilities included in the analysis. The situation where this difference is greatest is for 0.99 permeability at 2257 mmH₂O. Thus, the effect of permeability and increased fluid amount on pressure, which is thought to be one of the causes of pain, was simulated in the stone removal process. As a result, the velocity, pressure, and temperature effects of the flow region at different permeability allowing flow in any section of the ureteral canal were revealed. It was ensured that the urine produced in the kidney could be evaluated as the continuous flow condition introduced to the kidney. For example, it has been interpreted that increased fluid consumption will increase the continuous flow rate in this region, and accordingly, where high pressure regions may occur. Thanks to this study, it was thought that it would be useful for evaluations that can only be made in the diagnosis and treatment of flow and fluid conditions. A more realistic modeling of the renal environment and computerized analysis taking into account the stretching ability of the ureteral blood were recommended.

Authors' Contributions

The author contributed one hundred percent 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

- Allen, M. (2023). Kidney Stone Treatment Options. Retrieved from North Dallas Urology Associates: <https://northtexasurologist.com/>
- Carniel, C. G. (2021). Computational Tools for the Investigation of the Male Lower Urinary Tract Functionality in Health and Disease. *Journal of Medical and Biological Engineering*, 41, pages 203–215
- Caruso, M. V., Rossi, M., Serraino, G. F., Renzulli, A., & Fragomeni, G. (2015). A computational fluid dynamics comparison between different outflow graft anastomosis locations of Left Ventricular Assist Device (LVAD) in a patient-specific aortic model. *Int J Numer Method Biomed Engineering.*, 31(2). <https://doi.org/Doi: 10.1002/cnm.2700>
- Coe, F. L., & Worcester, A. E. (2005). Kidney stone disease. *The Journal of Clinical Investigation*, 115(10), 2596-2608. <https://doi.org/Doi.org/10.1172/JCI26662>.
- Constante-Amores, C. R., Kahouadji, L., Williams, J. G., Turney, B. W., Shin, S., Chergui, J., Juric, D., Moulton, D. E., and Waters, S. L. (2023). "Role of Kidney Stones in Renal Pelvis Flow." *ASME. J Biomech Eng.* May 2023; 145(5): 051007. <https://doi.org/10.1115/1.4056461>
- Inman, B. A., Etienne, W., Rubin, R., Owusu, R. A., Oliveira, T. R., Rodrigues, D. B., . . . Dewhirst, M. W. (2013). The impact of temperature and urinary constituents on urine viscosity and its relevance to bladder hyperthermia treatment. *International Journal of Hyperthermia*, 29(3), 206-210. <https://doi.org/Doi: 10.3109/02656736.2013.775355>
- Mackiewicz, R. R. (2020). Numerical analysis of deformation and flow in the proximal area of the urethra. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 25(2), 130-141. <https://doi.org/doi.org/10.2478/ijame-2020-0025>
- Mayo. (2023). Kidney Stones. Retrieved from Mayo Foundation for Medical Education and Research.:<https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/kidney-stones/multimedia/kidney-stones/img-20005738>
- Ravi D, Raj Rajagopal T. K. (2022). Numerical investigation on the effect of slit thickness and outlet angle of the bladeless fan for flow optimization using CFD technique. *J. Ther Eng*; 9(2):279–296.
- Resnick, M. S. (2004). Urinary Tract Obstruction.. . Retrieved from eMedicine Clinical Knowledge Base: WebMD, <http://www.emedicine.com/med/topic2782.htm>.
- Singla, N., K, A., Singla, M., & Lee, J. S. (2008). A Novel, Non-Invasive Approach to Diagnosing Urinary Tract Obstruction Using CFD. *Journal of Young Investigators*, 50-62.
- Stelmashuk, V., & Tugolukov, A. (2020). Comparison and Validation of Two Mathematical Model of Underwater Spark Simulation Using Cylindrical and Elleptical Coordinates. 2020 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS), (pp. Physics, 111–117). Singapore. <https://doi.org/Doi: 10.1109/ICOPS37625.2020.9717518>.
- SolidWorks (2020). SolidWorks Flow Simulation. Dassault Systemes SolidWorks Corporation. <https://my.solidworks.com/training/elearning/69/solidworks-flow-simulation>.

Zeytinyağı Üretiminde Verim Artırıcı Maddelerin Kullanımının Bazı Kalite Özellikleri Üzerine Etkileri

Mustafa Remzi OTAĞ^{1*}, Aytaç Saygın GÜMÜŞKESEN²

Öz

Bu çalışmada; zeytinyağı üretiminde verim arttırıcı maddelerin kullanımının yağ verimi ve yağın kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Verim artırıcı maddeler olarak naturel mikronize talk, enzim ve naturel mikronize talk-enzim kombinasyonu kullanılmıştır. Naturel mikronize talk, % 1, % 1.5, ve % 2, enzim 0.02 ml enzim/ 100 g zeytin hamuru ve naturel mikronize talk-enzim kombinasyonu; en uygun naturel mikronize talk oranı olarak saptanan %1'e % 0.01, %0.015 ve % 0.02 oranlarında enzim ilave edilerek uygulanmıştır. Denemeler Abencor sisteminde, Ayvalık ve Memecik zeytin çeşitlerinde gerçekleştirilmiştir. Verim arttırıcı maddelerin her iki zeytin çeşidinde de yağ verimi ve kalitesi üzerine etkileri incelenmiştir. Zeytin çeşitlerinin; olgunlaşma indeksi, yağ ve su içerikleri, zeytinyağı örneklerinin ise; serbest asitlik değerleri, 232 ve 270 nm'deki U.V. absorbans değerleri ve toplam polifenol içerikleri saptanmıştır. Elde edilen sonuçlar ; %1 naturel mikronize talk kullanımının verim artışı açısından enzim kullanımdan daha etkili olduğunu ve yağın kalite kriterlerinde olumsuz bir değişiklik oluşturmadığını ortaya koymaktadır.

Anahtar Sözcükler: verim artıcı madde, zeytinyağı ekstraksiyonu, polifenol, enzim, naturel mikronize talk

Effects of the Use of Processing Aids on Some Quality Characteristics in Olive Oil Production

Abstract

In this study, the use of processing aids for olive oil extraction was investigated from the olive oil quality and oil yield point of view. Enzyme preparation and natural talc were used as processing aids in a laboratory-scale Abencor system. Olive paste was treated with 1%, 1.5% and 2% natural talc during malaxation process. The enzyme dosages applied were 0.02 ml enzyme / 100 g olive paste. Physical and chemical analyses were performed in olive and olive oil samples produced by using processing aids. Maturation index, oil and water content were determined in the olive samples of two different varieties which is called Ayvalık and Memecik, whereas UV absorbance, total polyphenol content and free fatty acid content were measured in olive oil samples. The results showed that the oil yield is increased when 1% of naturel talc is used as technological aid primarily because of the reduced oil content and humidity of the pomace. Moreover; vegetable water also contains less oil. Olive paste treated with technological aids has a quicker oil release and higher oil yield. It can be stated that using technological aids in the malaxation process results in olive oil containing a significantly higher oxidative stability was observed.

Key Words: processing aids, olive oil extraction, polyphenol, enzymes, natural micronised talc

¹ Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Giresun, Türkiye, mustafa.otag@giresun.edu.tr

² Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye, agumuskesen@gmail.com

¹<https://orcid.org/0000-0001-5450-1546>

²<https://orcid.org/0000-0002-4197-021X>

1. Giriş

Zeytin, Doğu Akdeniz bölgesi kökenli dünyanın en önemli ticari meyve bitkilerinden biridir (Khaleghi ve ark., 2015). Zeytinyağı, zeytin ağacının (*Olea europea L.*) olgun meyvelerinden üç veya iki aşamalı santrifüjleme, kombine perkolasyon-santrifüjleme ve presleme gibi mekanik ve fiziksel işlemlerle elde edilen, oda sıcaklığında sıvı, berrak, yeşilden sarıya değişen renkte, kendine özgü tat ve kokuda, doğal olarak tüketilebilen önemli bir bitkisel yağ kaynağıdır. Bununla birlikte yüksek antioksidatif özellikleri ve tekli doymamış yağ asitleri içeriği nedeniyle insan sağlığında önemli rol oynamaktadır (Altieri ve ark., 2015).

Zeytinyağı sektörü, ekstraksiyon işleminin performansını arttırmak ve son ürünün kalite özelliklerini geliştirmek gibi iki önemli amaç doğrultusunda mekanik ekstraksiyon sürecini iyileştirmeye odaklanmaktadır. Performansın artırılması esas olarak zeytin değirmenlerinin çalışma verimliliğinin ve yağ çıkarılabilirliğinin artırılmasıyla ilgiliyken, kalitenin artırılması sağlık ve duyuşsal özelliklerle bağlantılı olan ve potansiyel olarak yağ çıkarma işlemi ve tekno-mantıksal süreçlerin yönetiminden etkilenen ana zeytinyağı kalite özelliklerinin korunmasını ve iyileştirilmesini içermektedir. Sürecin en önemli aşaması olan kırma ve malaksasyon adımları sırasında zaman, sıcaklık, oksijen ve yardımcı maddeler gibi teknolojik parametrelerin dikkatli bir şekilde yönetilmesi, yüksek kalite standardına sahip sızma zeytinyağı elde etmek için işleme yöntemlerinin iyileştirilmesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Angerosa ve ark., 2001; Caponio ve ark., 2016; Kalua ve ark., 2006; Squeo ve ark., 2020; Veneziani ve ark., 2018)

Verim artırıcılar, zeytin hamurunun yağ çıkarma özelliğini geliştirmek amacıyla 30 yılı aşkın bir süredir geleneksel olarak zeytinyağı üretiminde kullanılmaktadır. Yağ çıkarma işleminde işleme yardımcılarının kullanılmaya başlanması, prina içinde yüksek yağ kayıplarına yol açan bazı zeytin çeşitlerinin hamurundan yağ çıkarmanın zorluğundan kaynaklanmıştır. İşleme zorluğunun derecesi kısmen zeytin meyvesi içindeki katı ve sıvı bileşenler arasındaki yakınlık ile açıklanabilir. Meyvenin kabuğu karakteristik bir lipofilik yapıya sahiptir ve bu nedenle yüzeyine bitkisel sudan ziyade yağ adsorbe etme eğilimindedir. Bunun yerine zeytin çekirdeği, bitkisel suyu parçacıklarına tutmasını sağlayan hidrofilik bir afiniteye sahiptir. Hamurun (mezokarp) genellikle hidrofilik bir afiniteye sahip olmasına rağmen, bu afinitenin aynı zamanda lipofilik nitelikte olması da mümkündür. Posanın lipofilik yapısı yağın serbestçe salınmasına izin vermez ve zeytin ezmelerinin işleme zorluk derecesini artırır (Espínola ve ark., 2009). Çeşit ve meyve olgunluğu genellikle bu hamur davranışı değişikliği ile bağlantılıdır. Yağ taşıyan hücrelerin içindeki yağ kısmen serbest olduğu vakuolde (~%76) ve kısmen de kolloidlere bağlı küçük damlacıklar şeklinde dağıldığı sitoplazmada (~%24) bulunur (Ranalli ve De Mattia, 1997). Bu "bağlı" yağı serbest bırakmanın zorluğu, esas olarak dağılmış veya emülsifiye edilmiş yağ damlacıklarının, onları bu durumda tutan bir lipoprotein

membranı (fosfolipidler ve proteinler) ile çevrili olmasından kaynaklanmaktadır (Boskou, 2006). Hamur hazırlama tekniği uygun şekilde uygulanırsa, büyük damlacıklardaki yağ hamurdan kolayca çıkarılabilir. Kolloidlere bağlı daha küçük damlacıkların mevcut santrifüj teknolojisi ile çıkarılması çok daha zordur. Bu küçük damlacıkların çıkarılabilirliğini artırmak için çeşitli yardımcı maddeler denenmiştir. Bu yardımcı maddeler arasında talk tozu, enzimler ve ılık su (malaksöre eklenen veya dekantöre enjekte edilen) geçmiş yıllarda İspanya, İtalya ve diğer Akdeniz ülkelerinde en yaygın kullanılan ve üzerinde çalışılan konular arasında olmuştur (Ranalli ve ark., 2003; Muller ve ark., 2012; Tamborrino ve ark., 2017).

Zeytinyağı endüstrisinin sürekli evriminde, teknolojik yardımcı maddelerin eklenmesi daha fazla gelişmeyi beraberinde getirmiş ve çeşitli çalışmaların konusu olmuştur. Bazı çalışmalar naturel mikronize talk kullanımına odaklanmıştır. Zeytinyağı üretiminde bu zor hamurların yönetimini sıcaklığı arttırmadan iyileştirmek ve sızma zeytinyağı tanımına uymak için, yaygın olarak kabul edilen alternatiflerden biri, malaksasyon aşaması sırasında bu hamurlara teknolojik bir yardımcı eklenmesidir. Bu yardımcı maddeler arasında en çok kullanılan, Uluslararası Zeytin Konseyi tarafından önerilen ve Avrupa Birliği tarafından kabul edilen Naturel Mikronize Talklar (NMT)'dir (Sánchez ve ark. 2022). Doğal mikrotalkların (hidratlı magnezyum silikat) kullanımına, zeytinyağının fiziksel ve organoleptik özelliklerinde herhangi bir değişiklik olmaması koşuluyla, 1986 yılından beri Avrupa yönetmeliği tarafından sadece gıda amaçlı olarak izin verilmektedir. Mevcut Avrupa Birliği Yönetmeliği, NMT'de ağırlıkça maksimum %6 kalsiyum karbonat konsantrasyonuna izin vermektedir (Sadkaoui ve ark., 2017).

Bu çalışmada laboratuvar ölçekli Abencor sistemde, Ayvalık ve Memecik zeytin çeşitlerinden zeytinyağı üretiminde, verim arttırıcı madde olarak natürel mikronize talk NMT (%1, %1,5 ve %2), enzim preparatı (0.02 ml enzim/ 100 g) ve % 1 naturel mikronize talk (NMT) ile % 0.01, %0.015 ve % 0.02 oranında enzim preparatı birlikte kullanımının yağ verimi ve yağın kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Bu çalışma için Ayvalık ve Memecik çeşitlerine ait yeknesak özelliklere sahip zeytin ağaçları (*Olea europaea L.*) seçilmiştir. Standart yetiştirme teknikleri kullanılarak İzmir Zeytincilik Araştırma Enstitüsünün Kemalpaşa yöresindeki deneysel meyve bahçesinde yetiştirilen zeytin ağaçlarından elde edilen zeytinler kullanılmıştır. Bu çalışma 2000-2001 hasat yılında yapılmıştır.

Verim arttırıcı madde olarak natürel mikronize talk (NMT) (Talcoliva, Boñar León, Spain) ve enzim preparatı (E.P) (Novozymes, Bagsvaerd, Denmark) kullanılmıştır.

2.2. Method

2.2.1. Zeytinyağı Ekstraksiyonu

Verim arttırıcı maddelerin yağ verimi ve yağ kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesinde laboratuvar ölçekli Abencor Sistemi kullanılmıştır. Bu sitemde çekiçli değirmenden geçirilerek kırılıp ezme haline getirilen zeytin hamuru (600g) 20 dk süreyle paletli karıştırıcıda yoğrulmaktadır. Bu sürenin sonunda 90°C sıcaklıktaki sudan 150 ml ilave edilerek yoğurma işlemine 5 dk süreyle devam edilmektedir. Tekrar 90°C sıcaklıktaki sudan 150 ml ilave edilerek 5 dk süreyle hamur yoğrularak 1 dk santrifüjlenmektedir. Bu işlemin sonunda katı fazdan ayrılan sıvı faz santrifüjden alınarak kalan katı faz 100 ml su ilave edilerek bir kez daha 1 dk santrifüjlenerek alınan ikinci sıvı faz birinci sıvı faz ile birleştirilip ölçü silindirine aktarılmakta, dekantasyon yöntemi ile karasuyun yağdan ayrılması sağlanmaktadır. Dekantasyon işlemi 90 dk sürmektedir. Yoğurma işleminin bitiminde hamur sıcaklığı 40-45°C arasında değişmektedir.

Verim arttırıcı maddelerin kullanıldığı denemelerde deneme planına göre belirlenen miktarlardaki verim arttırıcı maddeler hamura ilave edildikten sonra 20 dk süreyle yoğurma işlemine başlanmıştır. Denemelerde natürel mikronize talk %1.0, %1.5 ve %2.0, enzim preparatı, 0.02 ml enzim/ 100g, NMT ve enzim preparatı kombinasyonunda ise %1 oranındaki natürel mikronize talk ise sırasıyla % 0.01, %0,015 ve %0,02 oranlarındaki enzim preparatı ile beraber kullanılmıştır.

Denemeler iki paralel olarak gerçekleştirilerek yağ verimi ile ilgili ortalama değerler hesaplanmıştır. Elde edilen yağ örnekleri ise birleştirilerek fiziksel ve kimyasal analizler yapıncaya kadar kahverengi örnek şişelerinde, +4°C sıcaklıkta saklanmıştır.

2.2.2. Zeytinlerin olgunlaşma indekslerinin belirlenmesi

Olgunlaşma indeksi Boskou (1996) öngördüğü yöntemle göre belirlenmiştir. Bu yöntemde meyve kabuk rengi ile meyve eti renginin esas alındığı olgunluk indeksi saptanmaktadır. Zeytin örneklerinden rastgele 100 adet zeytin alınarak iç etlerini ortaya çıkarmak için ikiye bölünmüş kabuk ve meyve eti rengine göre 0-7 arasında 8 kategoriye ayrılmıştır. Bu kategoriler şöyledir:

- 0 : Kabuk rengi koyu yeşil olan zeytinler
- 1 : Kabuk rengi sarı veya sarımsı-yeşil olan zeytinler
- 2 : Kabuk rengi kırmızımsı lekeli sarımsı olan zeytinler
- 3 : Kabuk rengi kırmızımsı veya açık menekşe olan zeytinler
- 4 : Kabuk rengi siyah ve meyve eti hala tamamıyla yeşil olan zeytin
- 5 : Kabuk rengi siyah ve meyve eti kalınlığının yarısına kadar menekşe rengi olan zeytinler
- 6 : Kabuk rengi siyah ve meyve etinin çekirdeğe kadar olan kısmı menekşe rengi olan zeytinler

7 : Kabuk rengi siyah ve meyve eti tamamıyla koyu renk olan zeytinler

Her kategorideki toplam zeytin sayısı sayılmış ve kaydedilmiştir. Daha sonra olgunluk indeksini belirlemek için aşağıdaki denklem 1 uygulanmıştır:

$$\text{Olgunluk indeksi} = [(0 \times n_0) + (1 \times n_1) + (2 \times n_2) + \dots + (7 \times n_7)] / 100 \quad (1)$$

Burada : $n_0, n_1, n_2, \dots, n_7$ yukarıda belirtilen 8 kategorinin her birine ait zeytin miktarını ifade etmektedir.

2.2.3. Zeytinlerde yağ miktarı tayini

Zeytinlerdeki yağ miktarı, IUPAC (Standart Methods for Analysis of Oils, Fats and Derivatives)'da verilen yöntemle göre belirlenmiştir (IUPAC,1992).

2.2.4. Zeytinlerde su miktarı tayini

Zeytinlerdeki su miktarı, IUPAC (Standart Methods for Analysis of Oils, Fats and Derivatives)'da verilen yöntemle göre belirlenmiştir (IUPAC,1992).

2.2.5. Zeytinyağında serbest asitlik değerinin tayini

Serbest yağ asitlerinin belirlenmesi, Avrupa Ekonomik Komisyonu (EEC)/2568/91 ve EEC/1429/92 sayılı yönetmeliklerde açıklanan analitik yöntemlere göre gerçekleştirilmiştir. % oleik asit olarak verilen serbest yağ asidi, etanol/eter (1:1, v/v) içinde çözülmüş yağ çözeltisinin etanolik potasyum hidroksit ile titrasyonu yoluyla belirlenmiştir.

2.2.6. Zeytinyağında UV absorbans (232 ve 270 nm) değerinin tayini

UV absorbans değeri, Avrupa Ekonomik Komisyonu (EEC)/2568/91 sayılı yönetmeliğinde açıklanan analitik yöntemle göre gerçekleştirilmiştir. K232 ve K270 sönme katsayıları, bir spektrofotometre (Beckman Instruments, Inc., Fullerton, CA) ile sırasıyla 232 ve 270 nm'deki absorpsiyondan hesaplanmış ve kör olarak saf sikloheksan kullanılmıştır.

2.2.7. Zeytinyağında Toplam fenolik madde miktarı tayini

Yağların toplam polifenol içerikleri, genellikle kafeik asit cinsinden aktif oksijen varlığında indüksiyon hızının belirlenmesi esasına dayanan analiz yöntemleriyle belirlenmektedir. Zeytinyağının toplam polifenol miktarını belirlemek amacıyla Vazquez ve ark. (1971) tarafından uygulanan yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde 0.025 g kafeik asit 250 ml balon jodede su ile

çözdürülmektedir. Çözdürme işlemini kolaylaştırmak amacıyla balon jöjeye 1-2 ml metanol ilave edilmektedir. Bu çözeltilerden 50 ml'lik balonlara 0 ml'den 4 ml'ye kadar 0.2 birim arttırarak farklı konsantrasyonlarda çözeltiler elde edilmektedir. Daha sonra 25 ml saf su ve 2.5 ml Folin-cicalteau reaktifi ilave edilerek 3 dk beklenmekte ve 5 ml % 20'lik sodyum karbonat çözeltisi ilave edilmektedir. Daha sonra balon saf su ile tamamlanarak 1 saat beklenir. Bu işlemlerin ardından spektrofotometrede 725 nm ye karşılık gelen absorbans değerleri ölçülür. Konsantrasyona karşılık absorbans grafiği çizilir bu grafik lineer bir grafikdir ve denklem 2'de verilmiştir.

$$y = a_2 + (b_2 \times X) \quad (2)$$

y : mg olarak kafeik asit

X : L725 nm

Polifenol eğrisi oluşturulduktan sonra zeytinyağındaki toplam polifenol miktarı şu şekilde belirlenir.

10-20 g filtre edilmiş yağ tartılır ve 50 ml hekzan ilave edilerek çözümlenir. Karışım ayırma hunisine alınır. Üzerine 20 ml metanol/su (% 60 metanol + % 40 su) karışımı ilave edilir ve ayırma hunisi 2 dk boyunca çalkalanır. Sürenin sonunda dekantasyona bırakılır. Alt faz 100 ml'lik balona alınır. Yıkama işlemi 3 kez tekrarlanır. Bu arada emülsiyon oluşumu söz konusu ise bu kısım alınır. Önemli olan balon jöje içinde yağ olmamasıdır. Balon destile su ile tamamlanır. Bu çözelti toplam polifenollerini saptamak için kullanılan ana çözeltidir.

50 ml'lik balona 25 ml destile su üzerine yukarıda hazırlanan çözeltilerden 5 ml ilave edilir daha sonra 2.5 ml Folin-cicalteau reaktifi ilave edilir ve 3 dk beklenir. Üzerine 5 ml % 20'lik sodyum karbonat ilave edilir. Balon saf su ile tamamlanır ve 1 saat beklenir. Daha sonra spektrofotometrede 725 nm'de absorbans değeri okunur. Okunan değer daha önce hazırlanmış polifenol eğrisindeki eğri ile karşılaştırılarak kafeik asit konsantrasyonu belirlenir.

2.2.8. İstatiksel analiz

Sunulan tüm değerler, standart sapmalarla birlikte iki ayrı tespitinin ortalamalarıdır. İstatistiksel analizler SPSS Version II yazılımı kullanılarak Student'st-testi ile varyans analizi (ANOVA [Duncan's multiple range test]) ile gerçekleştirilmiştir. Değerler arasındaki anlamlı farklılıklar $P \leq 0.05$ düzeyindedir.

3. Bulgular ve Tartışma

Denemelerde kullanılan Ayvalık ve Memecik zeytin çeşitlerinin yağ, su içerikleri ile olgunlaşma indeksleri, Ayvalık çeşidi için sırasıyla % 24.70, %58.65 ve 4.96 olarak bulunmuşken Memecik çeşidi için bu parametreler sırasıyla % 23.10, %56.23 ve 5.81 olarak kaydedilmiştir. Verilerden görüleceği gibi Ayvalık çeşidinin yağ içeriği Memecik çeşidine kıyasla bir miktar daha fazladır. Buna karşılık Memecik çeşidinin olgunlaşma indeksi Ayvalık çeşidine göre daha yüksek bulunmuştur.

3.1. Verim artırıcı maddelerin yağ verimi üzerine etkisi

Farklı Verim artırıcı madde olarak natürel mikronize talk, enzim preparatı ve natürel mikronize talk ve enzim preparatlarının beraber kullanımının yağ miktarı ve yağ verimi üzerindeki etkileri Ayvalık ve Memecik zeytin çeşitleri için Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Ayvalık ve Memecik çeşitlerine ait zeytinlere verim artırıcı maddelerin ilavesiyle elde edilen zeytinyağı miktarları ve verimleri

	AYVALIK		MEMECİK	
	Yağ miktarı (ml)	Yağ Verimi (%)	Yağ miktarı (ml)	Yağ Verimi (%)
KONTROL	96.25±1,03c	58.68±0,67c	128.75±1,31b	83.60±0,74cd
% 1 NMT	121.25±1,17a	73.93±0,85a	145.00±1,13a	94.15±0,77a
% 1,5 NMT	88.75±0,94e	54.11±0,66e	131.25±1,06b	85.23±0,62c
% 2 NMT	83.75±0,86f	51.06±0,72f	110.00±1,22d	71.43±0,87e
% 0,02 E.P	93.25±0,79d	56.86±0,59d	140.00±1,15ab	90.90±0,73b
% 1 NMT + % 0,02 E.P	63.75±0,84h	38.87±0,63h	106.25±0,98e	68.99±0,91f
% 1 NMT + % 0,015 E.P	70.00±0,92g	42.68±0,27g	107.50±0,93e	69.80±0,57f
% 1 NMT + % 0,01 E.P	105.00±1,01b	64.02±0,55b	120.00±1,04c	77.92±0,64d

*Değerler iki tekrarın ortalamaları ± standart sapma olarak verilmiştir. Aynı sütundaki farklı harflere sahip ortalamalar $P \leq 0.05$ düzeyinde anlamlı farklılık gösterir.

Tablo 1’den görüleceği üzere Ayvalık zeytin çeşidinde NMT’ın kullanılmadığı kontrol örneklerine ait yağ verimi %58.68 olarak hesaplanmıştır. NMT’ın %1 oranında kullanılmasıyla yağ veriminin %73.93’e yükseldiği saptanmıştır. NMT konsantrasyonunun %1.5 ve %2.0 değerlerine yükseltilmesi ise yağ veriminde düşmelere neden olmakta buna bağlı olarak alınamayan yağ miktarı yükselmektedir. Aynı şekilde Memecik zeytin çeşidinde NMT’ın kullanılmadığı denemelere ait yağ verimi %83.60 olarak hesaplanmıştır. NMT’ın %1 oranında kullanılmasıyla yağ veriminin

%94.15'e yükseldiği bulunmuştur. NMT konsantrasyonunun %1.5 ve %2 değerlerine yükseltilmesiyle yağ verimi düşmekte, alınamayan yağ miktarında artış meydana gelmektedir. Elde edilen sonuçlar, her iki zeytin çeşidi için optimum NMT miktarının %1 olduğunu göstermektedir. Zeytin hamuruna yoğurma aşamasında ilave edilen NMT yapısı gereği, sistemde bulunan karasuyu absorbe ederek yağ moleküllerinin birleşip makromoleküller hale gelmesine yardımcı olmakta ve sistemdeki emülsiyon oluşumunu engellemektedir. Bunun sonucu olarak yağ verimi artmaktadır. Bununla birlikte elde edilen sonuçlardan da görüldüğü gibi natürel NMT miktarının %1.5 ve %2.0 değerlerine yükseltilmesi elde edilen yağ miktarını düşürmektedir. Bu durum, optimum konsantrasyon değerlerinin üzerinde ilave edilen NMT'nin sistemde mevcut olan yağı da absorblayarak katı fazla sistemden uzaklaştırmasıyla açıklanabileceği düşünülmüştür. Ayrıca her ne kadar %1 NMT ilavesi her iki zeytin çeşidi için verimi artırmışsa da Memecik zeytin çeşidinde daha etkili olduğunu Çizelge 1'den görülmüştür. Bunun natürel mikronize talkın özellikle zor hamur olarak tanımlanan zeytin hamurundan yağın alınmasında daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Denemelerde verim arttırıcı madde olarak selülozik ve pektolitik özellikteki enzim preparatı kullanımının yağ verimi üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, %0.02 oranında enzim kullanımının Memecik zeytin çeşidinde verim arttırıcı etki gösterdiği, buna karşılık Ayvalık çeşidinde aynı etkiyi göstermediği görülmektedir. Memecik zeytin çeşidinde enzim kullanımı ile yağ verimi ise %83.60'dan %90.90'a yükselmişken Ayvalık çeşidinde %58.68'den %56,86 değerlerine düşmüştür.

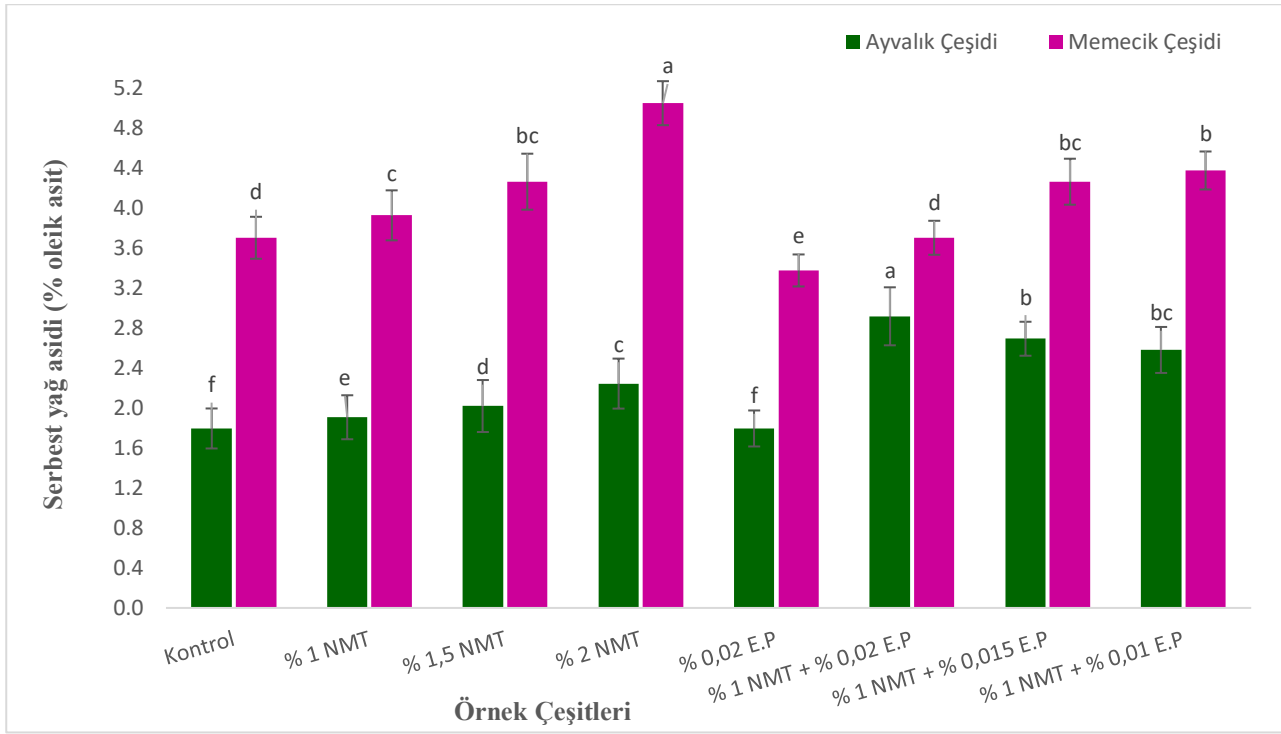
Elde edilen sonuçlar ışığında, natürel mikronize talk ile enzim preparatının birlikte kullanımının sinerjistik bir etki oluşturmadığı, aksine her iki zeytin çeşidinde de yağ verimini düşürdüğü söylenebilir. Bu konuda yapılan araştırma sonuçları incelendiğinde söz konusu sinerjistik etkinin kesinlik kazanmadığı ve çalışmaların mümkün olduğunca fazla veri elde edilecek şekilde yoğunlaştırılmasının önerildiği görülmektedir.

3.2 Verim arttırıcı maddelerin yağ kalitesi üzerine etkileri

Verim arttırıcı maddelerin kullanımının yağın kalite kriterlerinden serbest yağ asidi miktarı, 232 ve 270 nm U.V. absorbans değeri ve toplam polifenol miktarı üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

3.2.1. Serbest yağ asidi miktarı üzerine etkisi

Zeytinyağları serbest yağ asidi içeriklerine göre sınıflandırıldıkları için, serbest asitlik önemli bir kalite kriteridir. Bu nedenle verim arttırıcı maddelerin yağın asitliği üzerindeki etkisi de incelenerek her iki zeytin çeşidine ait sonuçlar Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Ayvalık ve Memecik zeytinlerinden elde edilen zeytinyağlarının serbest yağ asidi içerikleri

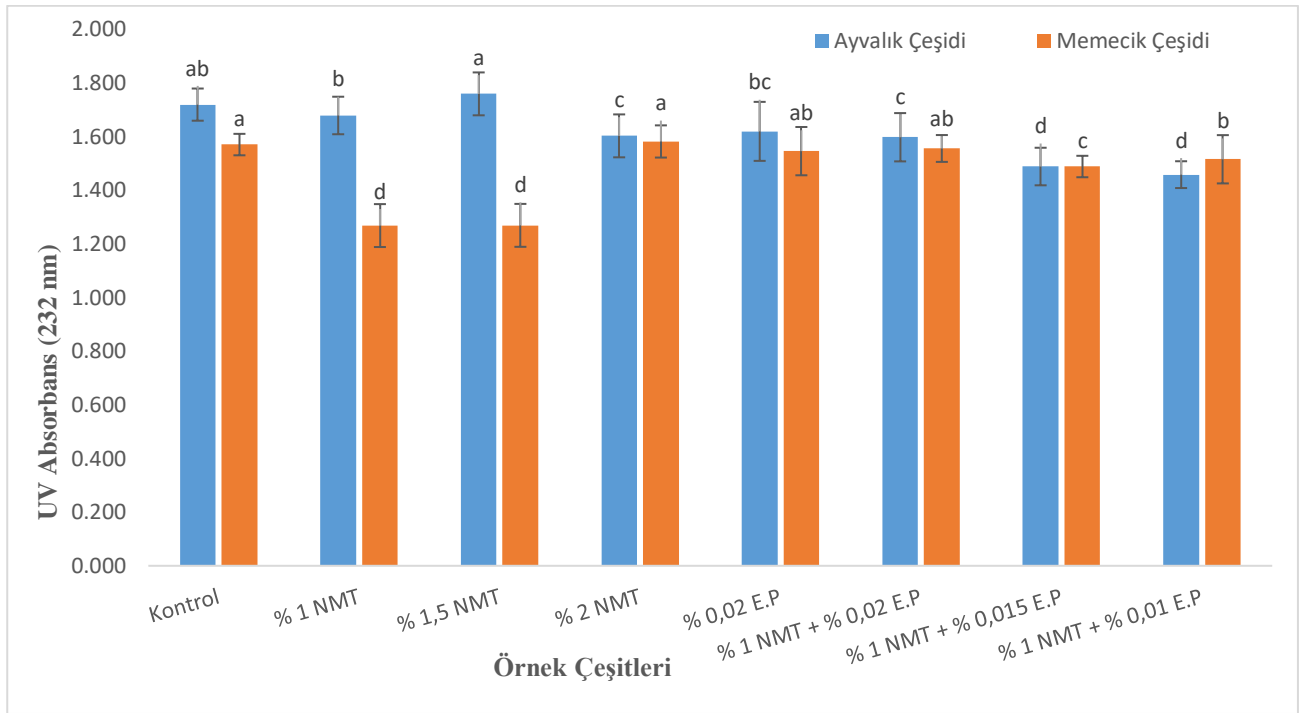
Şekil 1’de görüleceği üzere verim artırıcı maddelerin zeytin hamuruna ilavesiyle elde edilen zeytinyağı örneklerinin serbest yağ asidi değerleri incelendiğinde, her iki zeytinyağı çeşidinde de natürel mikronize talk oranının artması ile yağların serbest yağ asitliğinin yükseldiği, %0.02 oranında enzim kullanımının ise serbest yağ asidi miktarında herhangi bir değişime neden olmadığı görülmektedir. Natürel mikronize talkın değişik oranlardaki enzimle beraber kullanılması da Ayvalık ve Memecik zeytin çeşitlerinden elde edilen yağların asitliğinde bir miktar artışa neden olduğu görülmektedir. Ranali ve ark.(2003) üç farklı zeytin çeşidine uyguladıkları enzim preparatı ilavesiyle zeytin yağların serbest yağ içeriğinin bir tanesinde 0,4 mg oleik asit/kg dan 0,3 mg oleik asit/kg düştüğünü diğer iki zeytinyağı örneğinde ise kontrol örneklerine göre bir değişim gözlenmediğini belirlemişlerdir. Araştırmacıların sonuçları yapılan bu çalışma ile elde edilen bulgularla benzer sonuçlar göstermiştir.

Yağ veriminde oluşturduğu artış açısından en uygun miktar olarak belirlenen %1 oranındaki natürel mikronize talkın, Ayvalık zeytin çeşidinde yağın asitliğinin % 1.8’den %1.9’a, Memecik zeytin çeşidinde ise %3.7’den %3.9’a yükseltmesi göz önünde bulundurulduğunda natürel mikronize talk kullanımının yağların serbest asitliğini önemli ölçüde etkilemediği söylenebilir. Bununla birlikte enzim preparatı ilave edilmiş yağların serbest asitliği her iki zeytin çeşidi için en düşük değer olarak bulunması da önemli bir durum olarak değerlendirilmiştir.

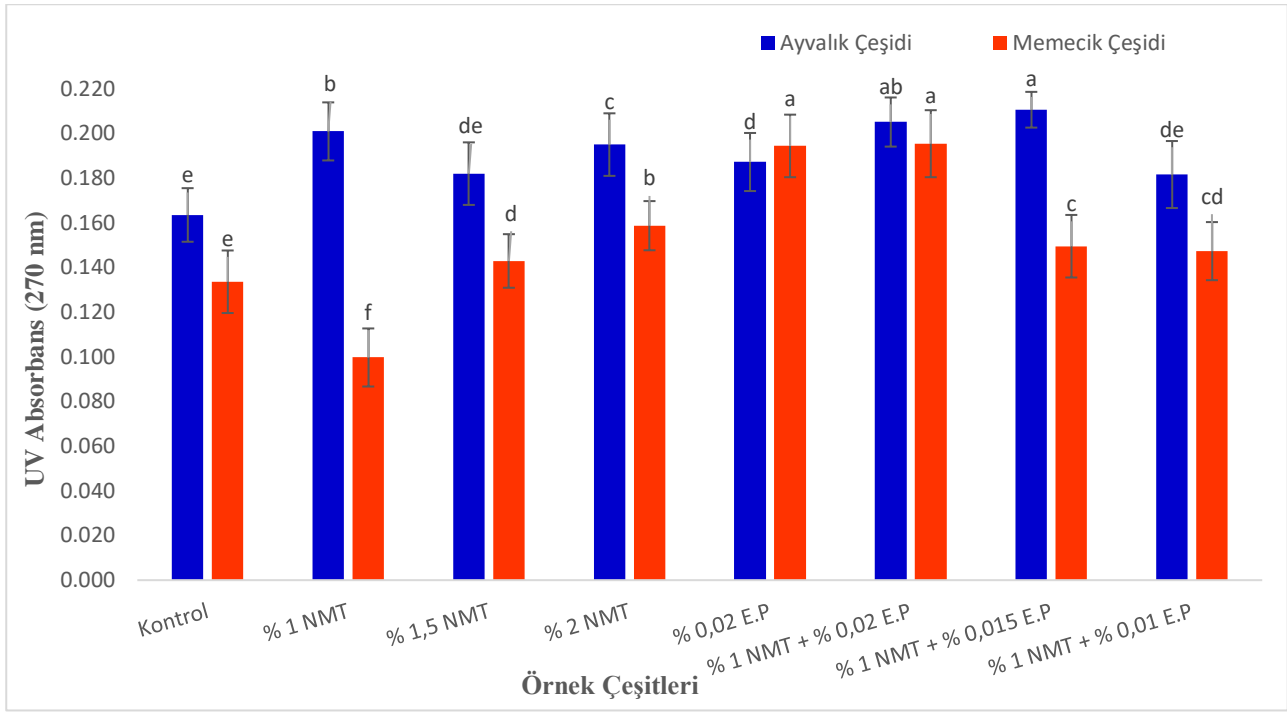
3.2.2. UV absorbans değerleri üzerine etkisi

Yağlarda 232nm’de ölçülen absorbans değeri dien konjuge yapı oluşumu, 270nm dalga boyunda ölçülen absorbans değeri ise trien konjuge yapı oluşumu hakkında fikir veren önemli bir kalite kriteridir (Sanaeifar ve ark, 2018). Bu değerlerin yükselmesinin yağlardaki peroksit sayısı ve otooksidasyon derecesiyle ilişkili olduğu bilinmektedir. Uluslararası standartlar sızma zeytinyağının 232 ve 270 nm’deki maksimum UV Absorbans değerlerini sırasıyla 2.60 ve 0.25 olması gerektiğini belirtmektedir (Reda ve ark., 2023).

Önemli bir kalite kriteri olması nedeniyle Ayvalık ve Memecik zeytin çeşitlerinden elde edilen yağların 232 ve 270 nm dalga boyundaki U.V absorbans değerleri üzerine verim arttırıcı maddelerin kullanımının etkileri incelenerek sonuçlar Şekil 2a ve Şekil 2b’te verilmiştir.



Şekil 2a. Ayvalık ve Memecik çeşitlerinde verim arttırıcı madde kullanımının zeytinyağlarının 232 nm dalga boyundaki UV absorbans değerine etkisi



Şekil 2b. Ayvalık ve Memecik çeşitlerinde verim artırıcı madde kullanımının zeytinyağlarının 270 nm dalga boyundaki UV absorbans değerine etkisi

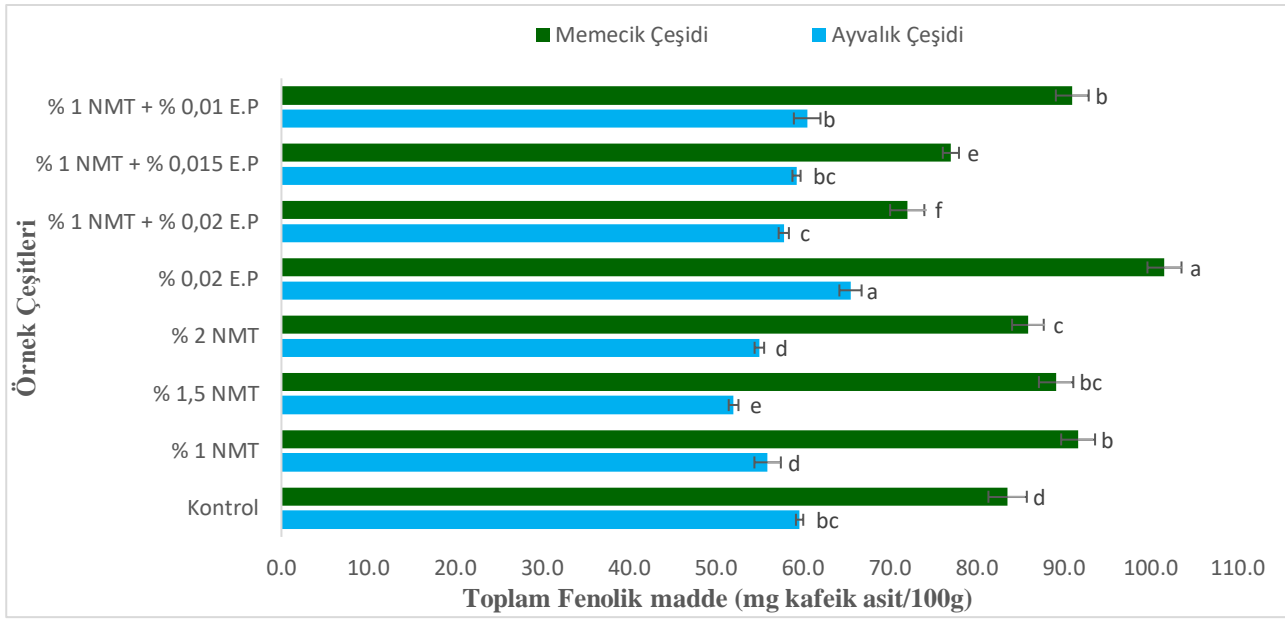
Şekil 2a ve Şekil 2b’de verilen Ayvalık zeytin çeşidinden elde edilen yağların 232nm ve 270nm dalga boylarındaki UV absorbans değerleri incelendiğinde bu değerlerin sırasıyla 1.458-1.759 ve 0.164-0.211 arasında değiştiği görülmektedir. Aynı şekilde Memecik zeytin çeşidinden elde edilen yağların 232nm ve 270nm dalga boylarındaki UV absorbans değerleri incelendiğinde bu değerlerin sırasıyla 1.269-1.582 ve 0.099-0.194 arasında değiştiği görülmektedir. 232 nm dalga boyunda Ayvalık çeşidinden elde edilen zeytinyağlarının en düşük UV absorbans değeri %1 NMT ve % 0.01 enzim preraratının (E.P) birlikte uygulandığı örneklerde bulunurken en yüksek değer ise % 1,5 oranında NMT ilave edilmiş örneklerde saptanmıştır. Aynı dalga boyunda Memecik çeşidinden elde edilen zeytinyağlarının en düşük UV absorbans değeri ise % 1 oranında NMT kullanılan örneklerde en yüksek UV absorbans değeri ise kontrol örneğinde tespit edilmiştir. Benzer durumun 270 nm dalga boyunda UV absorbans değerlerinde olduğu görülmektedir. Khaleghi ve ark. (2023) işleme yardımcıları ve tekniklerinin zeytinyağı ekstrakte edilebilirliği ve yağ kalite indeksleri üzerindeki etkilerinin inceledikleri bir çalışmada zeytin hamuruna işleme yardımcısı olarak ilave edilen % 2 oranındaki talk maddesinin zeytinyağın 232 nm dalga boyundaki UV absorbance değerinde önemli bir değişikliğe neden olmadığı bu karşılık zeytinyağının 270 nm dalga boyundaki UV absorbans değerinde önemli oranda düşme sağladıklarını tespit etmişlerdir.

Ayvalık ve Memecik zeytin çeşitlerine ait sonuçlar incelendiğinde 232nm ve 270nm dalga boylarındaki UV absorbans değerlerinin zeytinyağı için verilen standart değerlerin altında olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle, verim artırıcı maddelerin zeytin hamuruna ilavesiyle elde edilen

zeytinyağının 232 ve 270 nm dalga boylarındaki UV absorpsiyon değerinde standart dışı bir değişiklik oluşturmadığı söylenebilir.

3.2.2. Toplam fenolik madde değerleri üzerine etkisi

Zeytinyağının oksidasyon stabilitesi açısından önemli bir kriter olan toplam polifenol miktarı üzerine verim arttırıcı maddelerin etkisi de incelenerek her iki zeytin çeşidine ait sonuçlar mg kafeik asit/100g olarak Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Ayvalık ve Memecik çeşitlerinde verim arttırıcı madde kullanımının zeytinyağların toplam fenolik madde miktarı üzerine etkisi

Verim arttırıcı madde olarak enzim (% 0.02) kullanımı ise yağdaki toplam polifenol miktarını her iki zeytin çeşidinde de arttırmaktadır. Ayvalık çeşidinden elde edilen zeytinyağlarında toplam polifenol miktarı enzim kullanımı ile 59.65 mg kafeik asit değerinden 65.5 mg kafeik asit değerine yükselmektedir. Memecik çeşidinde ise toplam polifenol miktarı 83.6 mg kafeik asit'ten 101.6 mg kafeik asit değerine ulaşmaktadır. Toplam polifenol miktarları açısından tüm deneme kombinasyonları incelendiğinde her iki zeytin çeşidi için %0.02 oranında enzim kullanımı ile en yüksek değerlere ulaşıldığı görülmektedir. Natürel mikronize talkın %0.01 oranında enzim ile beraber kullanılması ile de Ayvalık zeytin çeşidinde toplam polifenol miktarı 60.5 mg kafeik asit değerine, Memecik çeşidinde ise 91.0 mg kafeik asit değerine yükselmektedir.

% 1 oranında NMT kullanımının Ayvalık zeytin çeşidinden elde edilen yağın toplam polifenol miktarını 59.6 mg kafeik asit/100g değerinden daha düşük değerlere indirdiği Şekil 3'te görülmektedir. Memecik zeytin çeşidinde ise %1.0 oranında natürel mikronize talk kullanımı toplam

polifenol miktarını 83.6 mg kafeik asit/100g değerinden 91.7 mg kafeik asit/100g değerine yükseltmektedir

Ayvalık çeşidi zeytinden elde edilen zeytinyağlarına verim artıcı maddelerin ilave edilmesiyle yağların toplam fenolik madde değerleri kontrol örneğine kıyasla NMT ve enzim preparatı farklı sonuçlar vermiştir. NMT ilave edilen örneklerdeki toplam fenolik madde değerinde azalma meydana gelirken enzim preparatı ilave edilen örneklerin toplam fenolik madde değerinde artış gözlenmiştir. En düşük toplam fenolik madde miktarı % 1,5 oranında NMT ilave edilen zeytinyağı örneklerinde tespit edilmişken en yüksek toplam fenolik madde miktarı % 0.02 oranında enzim preparatı ilave edilen zeytinyağı örneklerinde bulunmuştur. Buna karşılık Memecik zeytin çeşidinde kontrol örneğine kıyasla hem 3 farklı oranında NMT ilaveli zeytinyağları hem de enzim preparatı ilave edilmiş zeytinyağlarının toplam fenolik madde miktarı daha yüksek tespit edilmiştir.

Enzimin doğal bir antioksidan olan ve dolayısıyla yağların oksidasyon stabilitesini arttıran bir madde olarak bilinen polifenol miktarı üzerindeki yükseltici etkisinin, selülitik ve pektolitik karakteri nedeniyle hücre çeperini bio-degradasyona uğratarak yağla birlikte hücre çeperi tarafından çevrelenmiş polifenoller de açığa çıkartmasından kaynaklandığı söylenebilir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Söz konusu veriler ışığında optimum konsantrasyon olarak saptanan % 1.0 oranındaki natürel mikronize talk kullanımı; her iki zeytin çeşidinde de verimi yükseltmektedir. Ancak % 1'in üzerindeki oranlarda natürel mikronize talk kullanımının verimi düşürdüğü saptanmıştır. Bununla birlikte natürel mikronize talkın özellikle zor hamur olarak tanımlanan zeytin hamurundan yağın alınmasında daha etkili olduğu düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde % 0.02 oranında enzim kullanımının Memecik zeytin çeşidinde verim arttırıcı etki gösterdiği, buna karşılık Ayvalık çeşidinde aynı etkiyi göstermediği görülmektedir. Diğer bir ifadeyle, zor hamur oluşumuna neden olan zeytin çeşitlerinin işlenmesinde NMT 'ın kullanımının, verimde meydana getirdiği artış açısından daha uygun olduğu düşünülmektedir

Natürel mikronize talk kullanımının her iki zeytin çeşidinde de serbest yağ asidi miktarını arttırdığı, enzim kullanımının ise önemli ölçüde bir asitlik artışına neden olmadığı görülmüştür. Ancak asitlikteki artışın kayda değer düzeyde olmadığı saptanmıştır. Toplam polifenol miktarına ilişkin sonuçlar incelendiğinde NMT kullanımının söz konusu değerler üzerinde önemli bir değişikliğe neden olmadığı, buna karşılık enzim kullanımının bu değerleri önemli ölçüde arttırdığı görülmektedir.

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

- Altieri, G., Genovese, F., Tauriello, A. and Di Renzo, G.C. (2015). Innovative plant for the separation of high quality virgin olive oil (VOO) at industrial scale. *Journal of Food Engineering*, 166, 325-334.
- Angerosa, F., Mostallino, R., Basti, C. and Vito, R. (2001). Influence of malaxation temperature and time on the quality of virgin olive oil. *Food Chemistry*, 72, 19-28.
- Boskou, D. (1996). Olive oil: chemistry and technology. *American Oil Chemists' Society press*, Champaign, Illinois
- Boskou, D. (2006). Olive Oil Chemistry and Technology. (2nd Edition) Thessaloniki: *AOCS Press*, Champaign, Illinois, 261.
- Caponio, F., Squeo, G., Monteleone, J.I., Paradiso, V.M., Pasqualone, A. and Summo, C. (2016). First and second centrifugation of olive paste: Influence of talc addition on yield, chemical composition and volatile compounds of the oils. *LWT-Food Science and Technology*, 64, 439-445.
- EEC (1991). European Commission Regulation 2568/91 of 11 July 1991 on the characteristics of olive oil and olive-residue oil and on the relevant methods of analysis. *Official Journal of the European Community*, August 5, 1991
- Espinola, F., Moya, M., Fernandez, D. and Castro, E. (2009). Improved extraction of virgin olive oil using calcium carbonate as coadjuvant extractant. *Journal of Food Engineering*, 92, 112-118.
- IUPAC (1992). Standard Methods for the Analysis of Oils, Fats and Derivatives, Supplement to the 7th Edition. International Union of Pure and Applied Chemistry. *Pergamon Press*, Oxford:
- Kalua, C. M., Bedgood, D.R., Bishop, A.G. and Prenzler, P.D. (2006). Changes in volatile and phenolic compounds with malaxation time and temperature during virgin olive oil production. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(20), 7641-7651.
- Khaleghi, E., Arzani, K., Moallemi, N. and Mohsen Barzegar, M. (2015). The efficacy of kaolin particle film on oil quality indices of olive trees (*Olea europaea* L.) cv 'Zard' grown un-der warm and semi-arid region of Iran. *Food Chemistry*, 166, 35-41.
- Khaleghi, E., Norozi Moghadam, H. and Mortazavi, S. (2023). The effects of processing aids and techniques on olive oil extractability and oil quality indices. *Grasas y Aceites*, 74 (1), e494.
- Müller, R.H., Harden, D.M. and Keck, C.M. (2012). Development of industrially feasible concentrated 30% and 40% nanoemulsions for intravenous drug delivery. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 38, 420-430.
- Ranalli, A. and De Mattia, G. (1997). Characterisation of olive oil produced with a new enzyme processing aid. *Journal of American Oil Chemist's Society*, 74, 1105-1113.
- Ranalli, A., Pollastri, L., Contento, S., Iannucci, E. and Lucera, L. (2003). Effect of olive paste kneading process time on the overall quality of virgin olive oil. *Eurean Journal of Lipid Science and Technology*, 105, 57-67.

- Reda, R., Saffaj, T., Bouzida, I., Saidi, O., Belgrir, M., Lakssir, B. and El Hadrami, E.M. (2023). Optimized variable selection and machine learning models for olive oil quality assessment using portable near infrared spectroscopy. *Spectrochimica Acta. Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 303, 123213 .
- Sadkaoui, A., Jimenez, A., Pacheco, R. and Beltran, G. (2017). Micronized natural talc affects the proteins and pectic cell wall polysaccharides during “Hojiblanca” virgin olive oil extraction. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 119, 1600039.
- Sanaeifar, A., Jafari, A. and Golmakani, M. (2018). Fusion of dielectric spectroscopy and computer vision for quality characterization of olive oil during storage. *Computers and Electronics in Agriculture*, 145, 142-152.
- Sánchez, S., Olivares, I., Puentes, J. G., Órpez, R., La Rubia, M. D., Pacheco, R. and García Martín, J. F. (2022). Use of Natural Microtalc during the Virgin Olive Oil Production Process to Increase Its Content in Antioxidant Compounds. *Processes*, 10(5), 950.
- Squeo, G., Difonzo, G., Summo, C., Crecchio, C., and Caponio, F. (2020). Study of the influence of technological coadjuvants on enzyme activities and phenolic and volatile compounds in virgin olive oil by a response surface methodology approach. *LWT - Food Science and Technology*, 133, 109887.
- Tamborrino, A., Squeo, G., Leone, A., Paradiso, V. M., Romaniello, R., Summo, C., Pasqualone, A., Catalano, P., Bianchi, B. and Caponio, F. (2017). Industrial trials on coadjuvants in olive oil extraction process: Effect on rheological properties, energy consumption, oil yield and olive oil characteristics. *Journal of Food Engineering*, 205, 34-46.
- Vazquez, R.A., Maestro, D.R. and Graciani, C.E. (1971). Changes in olive polyphenols during ripeness. *Grasas y Aceites*, 22, 366-369.
- Veneziani, G., Esposto, S., Taticchi, A., Urbani, S., Selvaggini, R., Sordini, B. and Servili, M. (2018). Characterization of phenolic and volatile composition of extra virgin olive oil extracted from six Italian cultivars using a cooling treatment of olive paste. *LWT - Food Science and Technology*, 87, 523-528.

KARADENİZ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

YAZIM KURALLARI

Özet kısmında çalışmanın yenilikleri ve temel bulguları vurgulanmalıdır. Türkçe ve İngilizce özet kısımları Times New Roman yazı tipi ile yazılmalıdır ve 10 punto büyüklüğü seçilmelidir. Özet kısmının yazımında tek satır aralığı seçilmelidir. Makale özetinin en fazla 200 kelime olmasına dikkat edilmelidir. Türkçe ve İngilizce özetlerin 1 (bir) sayfayı geçmemesi önerilmektedir. Anahtar kelime sayısı en az 3 en fazla 6 olmalıdır.

Makalenin sayfa yapısı A4 kağıt boyutuna ve tüm kenar boşlukları 2 cm olmalıdır. Hem Türkçe hem de İngilizce başlıklar makale konusuna uygun, amacı ve sonucu anlatan, kısa ve yalın olmalıdır. Makale başlığı koyu, ilk harfleri büyük ve ortalanarak 14 punto Times New Roman fontu ile yazılmalıdır. Türkçe makalelerde İngilizce başlık, İngilizce özetten önce verilmelidir. Yazar isimleri kısaltılmadan soy isimler büyük harfle başlığın altına yan yana ortalanarak yazılır. Adreslerde kısaltma kullanılmamalıdır. Farklı adreslere sahip yazarlar için rakamlı üst indis kullanılmalıdır. İsimler Times New Roman 12 punto, düz; adresler ise Times New Roman 10 punto, düz olmalıdır. İsimlerden önce Ünvan yazılmamalıdır. Ayrıca sorumlu yazarın e-posta adresi 10 punto Times New Roman fontunda Sorumlu Yazar kısmına yazılmalıdır.

Ana metin 12 punto yazı büyüklüğünde Times New Roman yazı tipi ile 1,5 satır aralığında ve her iki yana yaslı şekilde yazılmalıdır. Ana bölüm başlıkları numaralandırılmalı, kelimelerin ilk harfleri büyük olmalı ve **koyu (bold)** karakterde yazılmalıdır. Ana bölüm başlığından sonra 1,5 satır aralıklı bir satır boşluk bırakılarak metne geçilmelidir. Başlıkla üst metin arasında da bir satır boşluk bırakılmalıdır. Paragraflar 1 cm içeriden başlamalıdır. Paragraflar arasında boşluk bırakılmamalıdır.

Bu bölümde çalışmayla ilgili yeterli literatür taraması verilmeli, çalışmanın amaçları ve literatürdeki yeri vurgulanmalıdır. Detaylı literatür incelemesinden ve sonuçların özetinin verilmesinden kaçınılmalıdır.

Materyal ve Metot bölümünde çalışmada kullanılan materyal ve metotlar detaylı ve açık bir şekilde anlatılmalıdır.

Şekiller grafik, diyagram fotoğraf, resim, harita olabilir. Şekil yazısı şeklin alt kısmına yazılmalıdır. Hem şekil hem de şekil yazısı sayfaya ortalanmalıdır. Şekil yazılar okunaklı olmalıdır. Şekil ile üst metin arasında 1 satır boşluk bırakılmalıdır. Şekil yazısı ile alt metin arasında da 1 satır boşluk bırakılmalıdır. Şekil yazısı 11 punto ve tek satır aralıklı olarak yazılmalıdır. Şekil yazılarına atıfta bulunulmalıdır.

Tablolar açık çerçeveli tercih edilebilir. Tablo yazısı tablonun üst kısmına yazılmalıdır. Hem tablo hem de tablo yazısı sayfanın soluna hizalanmalıdır. Tablo yazısı ile üst metin arasında 1 satır boşluk bırakılmalıdır. Tablo ile alt metin arasında 1 satır boşluk bırakılmalıdır. Tablo yazıları tercihen

11 punto ile ya da 10 punto ile yazılmalıdır ve tek satır aralığı seçilmelidir. Tablo yazılarına atıfta bulunulmalıdır.

Denklem ekleme ihtiyacı duyulduğunda denklemler sırasıyla 1'den başlanarak numaralandırılmalıdır. Denklem paragraftan başlanarak yazılır. Denklem numarası sağ kenara yerleştirilmelidir. Denklem ile metin arasında üstten ve alttan bir satır boşluk bırakılır. Denklemler resim formatında olmamalıdır.

Bulgular ve Tartışma bölümünde çalışma sonucunda elde edilen bulgular verilmelidir. Elde edilen bulgular ile ilgili literatür çalışmaları yapılarak karşılaştırmalar yapılabilir.

Sonuçlar ve Öneriler bölümünde çalışmadan elde edilen sonuçlar verilmelidir. Okuyucular için öneriler ve görüşler belirtilebilir.

Teşekkür kısmında çalışmada yardımcıları ya da destekleri bulunan kişi veya kişilere ya da kurumlara teşekkür edilebilir.

Yazarların makaleye olan katkıları belirtilmelidir. (Örneğin: Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.), (Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.), (Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.)

Kaynaklar 11 punto yazı büyüklüğünde Times New Roman yazı tipi ile tek satır aralığında yazılmalıdır. Kaynaklar yazar soyadına göre (alfabetik sıralama) dizini hazırlanmalıdır ve sayfanın sol kenar boşluğu hizasından başlanarak yazılmalıdır. Metin içindeki literatür açıklamaları soyadı ve tarih verilme suretiyle (Soyadı, 2017), (Soyadı ve Soyadı, 2017) şeklinde düzenlenmelidir. İki'den fazla yazar olması durumunda birinci yazardan sonra "ark." kısaltılması yapılmalıdır (Soyadı ve ark., 2017). Birden fazla kaynak belirtilmek istendiğinde bunlar noktalı virgül ile ayrılmalıdır (Soyadı, 2017; Soyadı ve Soyadı, 2017). Kaynaklar APA formatından esinlenerek hazırlanmıştır.

Periyodik yayınlar:

Soyadı, A., Soyadı, B. B. ve Soyadı, C., (2017). Yayınlanan Makalenin Adı. *Makalenin Yayınlandığı Dergi Adı*, 7(1), 1-12.

Kitaplar:

Soyadı, A. A., (2017). *Kitap adı*. Kitabın basıldığı yer: Yayınevi.

Sempozyum, Kongre, Bildiri:

Soyadı, A., Soyadı, B. B. ve Soyadı, C., (2017, Ay). Yayınlanan Bildirinin Adı. *Bildirinin Yayınlandığı Sempozyum, Kongre, Toplantı ya da Konferans Adı* (s. 1-12). Şehir: Varsa Üniversite veya Kuruluş.

Tez:

Soyadı, A. A., (2017). *Yüksek Lisans veya Doktora Tezinin Adı*. Yüksek Lisans Tezi, Giresun Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Giresun.

Diğer Kaynaklar:

Hallam, A. Duality in consumer theory [PDF document]. Retrieved from Lecture Notes Online Web site: <http://www.econ.iastate.edu/classes/econ501/Hallam/index.html>
URL-1: <http://www.giresun.edu.tr>, (Erişim Tarihi: 22 Mart 2017).

THE BLACK SEA JOURNAL OF SCIENCES

AUTHOR GUIDELINES

The abstract section should highlight the research in question's novelties and fundamental findings. Both the Turkish and English versions of the abstracts should be single spaced, and should be written in Times New Roman with a 10 pt font size. Abstracts should be no more than 200 words in length. Both versions of the abstract together should not exceed one (1) page in length. Number of keywords should be no less than 3, and no more than 6.

The page structure of the paper should be A4 size (210x297mm) and all margins should be 2 cm. Both Turkish and English titles should be appropriate for the topic of the paper, should describe the purpose of the paper and its conclusion and should be short and simple. The title of the paper should be in bold, with initials large and centered and 14 pt Times New Roman font. The Turkish title in the English papers should be given before the Turkish abstract. Author names are written side by side under the heading, without abbreviation (surnames in capital letters). Abbreviations should not be used in addresses. Numerical overhead indices should be used for authors with different addresses. Names of the authors should be Times New Roman 12 pt. and addresses should be Times New Roman 10 pt and flat. Appellations should not be written before names. In addition, the corresponding author's e-mail address should be written in 10 pt Times New Roman font in Corresponding Author.

The main text should be typed in Times New Roman font with a font size of 12 pt and lines spacing of 1.5. Main headings should be numbered and written in bold, and the initial letter of each word within the heading should be capitalized. A single 1.5-sized line spacing should be left underneath each main heading. A single line spacing should also be left between the heading and the text preceding it. Paragraphs should be indented by 1 cm. Spacing should not be left between paragraphs.

An adequate number of academic/scientific literature relating to the research in question, as well the overall aims of the research should be provided and emphasized within this section. Here, one should avoid detailed examining the literature as well as should avoid summarizing any results.

Materials and methodology used in the conducting of the research need to be described in detail in this section.

Figures can entail graphics, diagrams, photographs, illustrations, and/or maps. Figure descriptions should be written at the bottom of or below the figure(s), and should be legible. A single line space should be left between the figure and the text preceding it. Figure descriptions should be typed in a point-size of 11, as well as should be referenced.

Tables preferably should be open framed. Table descriptions should be written at the top of or above table. Both the table and the table description should be aligned on the left of the page. A single line space should be left between the table and the text preceding it. Table descriptions preferably should be single-spaced and written in either 11 or 10 pt. font, as well as should be referenced.

Equations—where needed—should be numbered from 1 and onwards. Equations are written starting with/following the paragraph. The equation number should be placed on the right edge. A single line spacing should be left between the equation and both the preceding as well as subsequent text. Equations should not be presented in the format of an image.

In Findings and Discussion Section, the results of as well as the findings obtained from the research in question are provided in this section. Here, one can compare and contrast the obtained findings with other relevant academic/scientific literature.

The conclusions of the results obtained from the research in question are given in this section. Here, one can provide readers with suggestions and personal comments.

Acknowledgements section is where one can acknowledge and thank the individuals and/or institutions who helped with and supported the author(s) with her/his/their research.

Contribution of the authors to the article should be indicated. (For example: All authors contributed equally to the study.), (There is no conflict of interest between the authors.), (The author declares that this study complies with Research and Publication Ethics.)

The references should be typed in Times New Roman font with a size of 11 pt font in single line spacing. Bibliographic resources should be arranged in alphabetical order according to the surname(s) of the author(s), and should be written starting from the left corner margin of the page. References to citations within the text should include the author's surname and the year of publication in parenthesis: (Surname, 2017), (Surname and Surname, 2017). In situations whereby a citation reference involves more than two authors, the abbreviation "et al." is to be written after the first author's surname: (Surname et al., 2017). In case of citing more than one resource, surnames and dates are to be separated using semicolons: (Surname, 2017; Surname and Surname, 2017). References should be prepared according to APA (American Psychological Association) Style format.

Periodicals:

Surname, A., Surname, B. B., and Surname, C., (2017). Title of the Published Paper. *Name of the Journal that the Paper is Featured/Published in*, 7(1), 1-12.

Books:

Surname, A. A., (2017). *Book title*. Location of where the book was published: Publisher.

Symposiums, Congresses, Presentations:

Surname, A., Surname, B. B., and Surname, C., (2017, Month). Title of the Published Presentation. *Name of the Symposium, Congress, Meeting or Conference that the Presentation was delivered at*. (pp. 1-12). City: University or Institution (If available).

Theses and Dissertations:

Surname, A. A., (2017). *Title of the Graduate or Doctoral Thesis/Dissertations*. Graduate Thesis, Giresun University, Institute of Natural Sciences, Giresun.

Other Resources:

Hallam, A. Duality in consumer theory [PDF document]. Retrieved from Lecture Notes Online Web site:
<http://www.econ.iastate.edu/classes/econ501/Hallam/index.html>

URL-1: <http://www.giresun.edu.tr>, (Date Accessed: 22 Mart 2017).

Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi (KFBD)

The Black Sea Journal of Sciences

Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Güre Kampüsü, GİRESUN
Telefon: 0 454 310 10 87-88 Faks: 0 454 310 10 89 E-posta: kfbd@giresun.edu.tr
ISSN: 2564-7377 (Online) <http://dergipark.org.tr/kfbd>

TELİF HAKKI DEVİR SÖZLEŞMESİ

Makale Adı :

Makalenin yazarları :

Sorumlu Yazar;

Adı Soyadı :

Adresi :

T.C. Kimlik No :

E-posta :

Telefon :

Sunulan makalenin sorumlu yazarı tüm yazarlar adına aşağıdaki konuları taahhüt eder:

- Bu makale tarafım(ız)dan yapılmış özgün bir çalışmadır ve makalede intihal yapılmamıştır.
- Bu çalışma için yazar(lar) her türlü sorumluluğa ortakdır.
- Bu makale başka bir yerde yayınlanmamıştır ve yayınlanmak üzere sunulmamıştır.
- Yazar(lar) makaleyi görmüş ve onaylamıştır.
- Makalede bulunan materyaller, diğer şahısların telif haklarını ihlal etmemektedir.
- Makale etik kurallara uygundur ve belirtilen materyaller ve yöntemler kullanıldığında herhangi bir zarara ve yaralanmaya neden olmayacaktır.
- Telif hakkı ihlali durumunda tüm sorumluluk yazar(lar)a aittir.

Yazar(lar) makalenin telif hakkından feragat etmeyi kabul ederler. Makalenin telif hakkı Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi'ne devredilmiştir.

Makalenin tüm yazarlarından makale ile ilgili tüm mali hakları Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi'ne devretme hususunda yetki aldığımı ve bu nedenle doğabilecek tüm uyuşmazlıklardan sorumlu olacağımı taahhüt ederim.

Makaleye ait tüm materyaller, bilim ve yayın kurulunca bir yıl süreyle saklanacak ve daha sonra imha edilecektir. Bu belge sorumlu yazar tarafından ıslak imza ile imzalanmalıdır.

Sorumlu Yazar Adı Soyadı:

İmza / Tarih:

Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi (KFBD)

The Black Sea Journal of Sciences

Giresun University Institute of Natural Sciences Güre Campus, GİRESUN
Phone: 0 454 310 10 87-88 **Fax:** 0 454 310 10 89 **E-mail:** kfbd@giresun.edu.tr
ISSN: 2564-7377 (Online) <http://dergipark.org.tr/kfbd>

AGREEMENT FOR THE TRANSFER OF COPYRIGHT

Title of Paper :

Authors' Names :

Corresponding Author;

Full Name :

Address :

Identity Number :

E-mail :

Telephone :

The corresponding author of the submitted manuscript undertakes on behalf of all authors for following issues:

- This manuscript is an original work done by us and is not plagiarized.
- The author(s) are responsible for all kinds of responsibilities for this study.
- This article has not been previously published and is not under consideration by another journal.
- The author(s) has seen and confirmed the article.
- The material contained in the article does not infringe the copyrights of other persons.
- The article is suitable for ethical rules. The use of the specified materials and methods will not cause any damage or injury.
- In the event of copyright infringement, all responsibility belongs to the author(s).

The authors agrees to disclaim the copyright of the article. The copyright of the manuscript has been transferred to The Black Sea Journal of Sciences.

I undertake to authorize from all authors of the article to transfer all financial rights related to the study to The Black Sea Journal of Sciences, and to be liable for all incidences arising from this.

All materials belonging to the study will be kept for one year at the time of the science and publishing committee and will be destroyed later. This document must be signed by the corresponding author with a wet signature.

Corresponding Author Full Name:

Signature / Date:

KARADENİZ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Etik İlkeler ve Yayın Politikası

Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi Mart, Haziran, Eylül ve Aralık aylarında olmak üzere yılda dört kez yayımlanan hakemli akademik bir dergidir.

Gönderilecek eserlerde; alanında bir boşluğu dolduracak özgün bir araştırma makalesi olması şartı aranır.

Dergimizde hakemlerin ve yazarların birbirlerine karşı kimliklerinin gizli tutulduğu çift taraflı kör hakem sistemi kullanılır. Yazarlar ve hakemler, kimliklerinin gizli kalması için gayret göstermelidir. Bu amaçla sisteme dosya gönderen yazar, editör, hakem gibi kişilerin metin ve dosyaları sisteme yüklerken dikkat etmeleri gerekir.

Yayın Kurulu, dergiye gönderilen eserlerin öncelikle yayın ilkeleri ile dergi kapsamı, bilimsel içerik ve şekil açısından inceler. Ön incelemeden geçen eserler değerlendirilmesi amacıyla en az 2 hakeme gönderilir. Eserin dergiye kabul edilebilmesi için 2 hakemden de olumlu değerlendirme alması gerekir. Gerektiği durumlarda 3. hakemden de değerlendirme sürecine katkı sağlaması istenebilir. Son karar editöre aittir.

Yayımlanmak 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, dağıtılabılır, basılabilir, taranabilir, tam metinlere bağlantı verilebilir, dizinlenebilir, yazılıma veri olarak aktarılabilir ve her türlü yasal amaç için kullanılabilir olması"dır.

Dergimize gönderilen akademik çalışmalardaki intihalleri tespit etmek amacıyla İntihal Tespit Programları kullanılır. Dergimize makale gönderen yazarlar etik ihlal yapmadıklarını beyan etmiş sayılırlar. İntihal yaptığı tespit edilen yazarların eserlerine dergimizde yer verilmez. Bu konuyla ilgili rapor yazara gönderilir.

Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi yazarlardan makale değerlendirme ve yayın süreci için herhangi bir ücret talep etmemektedir.

Bu dergi, iştirak eden kütüphanelerin dağıtılan arşivleme sistemi yaratması amaçlı, kütüphanelerin koruma ve restorasyon amaçlı kalıcı arşivler yaratmasına izin vermek için LOCKSS sistemi kullanmaktadır.

Bu dergide makalelerini yayımlayan yazarlar aşağıdaki şartları kabul etmiş bulunmaktadır:

Yazar makale telif hakkını elinde tutar ve ilk yayımlama hakkını dergiye verir. Makale, yazarının belirtilmesi ve ilk yayımının bu dergide yapılması koşuluyla diğerleri tarafından paylaşılmasına olanak veren Creative Commons Attribution lisansı altında lisanslanır.

Yazar, makalenin dergide yayımlanmış versiyonunun tam yetki vermeden dağıtımını (örneğin, kurumsal bir veri bankasına gönderilmesi ya da bir kitapta yayımlanması) için ayrı sözleşme düzenlemeleri yapabilir.

Yazarların makalelerini dergiye göndermeden önce ya da gönderi süreci devam ederken internet üzerinden (örneğin, kurumsal veri tabanında ya da kendi web sitelerinde) paylaşımları teşvik edilir; bu, hem verimli fikir alışverişlerine hem de makalenin daha erken ve daha çok atıf almasına yol açabilir (bakınız Açık Erişimin Etkisi).

THE BLACK SEA JOURNAL OF SCIENCES

Ethical Principles and Publication Policy

The Black Sea Journal of Sciences is a peer-reviewed academic journal that is published four times a year in March, June, September and December.

Prospective papers are expected to fill a gap in their respective field through innovative research.

Our journal employs a bilateral blind review system in which the personal identities of the reviewers and authors are kept confidential from one another, and whereby the parties involved are expected not to reveal themselves. With this objective in mind, parties submitting the file in question to the system such as the author, editor, and/or reviewer must handle the uploading of those files to the system with utmost care and attention.

The publishing team first examines (the) prospective papers in accordance with the criteria of the journal's scope, as well as for scientific content and format. After the pre-review step, the papers are forwarded to at least two reviewers for evaluation. In order for a paper to be accepted, it must receive positive evaluations from both reviewers. Papers can be requested to be reviewed again if needed and evaluation of a third reviewer should necessity warrant it. The final decision is made by the editor.

Papers that are to be submitted for publishing are first controlled using special detection software in order to verify that they have not been previously published elsewhere, as well as to ensure that they do not include any plagiarized content.

Publishing takes between 2 to 6 months from the acceptance date.

The publishing or evaluation of manuscripts are free of charge.

The Black Sea Journal of Sciences is an open access journal which means that all content is freely available without charge to the user or his/her institution. Users are allowed to read, download, copy, distribute, print, search, or link to the full texts of the articles in this journal without asking prior permission from the publisher or the author. This is in accordance with the BOAI definition of open access.

Academic research submitted to our journal is run through plagiarism detection software in order to check for any possible plagiarized content. Authors are expected as they declare that their work do not include any plagiarism. A report regarding this issue is sent to the authors.

The publishing or evaluation of manuscripts are free of charge.

This journal makes use of the LOCKSS system, which allows participating libraries to create a distributed digital archiving system, as well as allowing libraries to develop permanent archives for the purposes of protection and restoration.

An author's paper is entitled to copyright protection, and is to give her/his copyright to the journal upon its first initial publishing. One's paper is licensed under the Creative Commons Attribution License, which enables it to be shared by others via permission from the author as well according to the terms and conditions laid out by this journal upon (the paper's) first initial publishing.

The author is entitled to have a separate contract drawn up in which allows for her/his paper as it is published in our journal to be distributed without providing full authorisation (e.g., a paper's being sent to the databank of an institution, or for its being published in a book, etc.)

Authors are encouraged to share their share their papers via the internet either before they submit their work to our journal or as they wait through the submission process (e.g., to an institutional database or via their own personal websites, etc.). In doing so, this allows both for a fruitful exchange of ideas and feedback, as well as allows for the paper to be earlier as well as more widely referenced (see: The Effects of Open Access).