

ISSN 1012-2354



ERCIYES ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ

ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

*Erciyes University
Journal of
the
Institute
of
Science and Technology*

Cilt (Vol.): 39

Sayı (No): 1



ERCİYES ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology

ISSN: 1012-2354



Genel Yayın Yönetmeni

Prof. Dr. Sultan TAŞCI, Erciyes Üniversitesi

İmtiyaz Sahibi

Prof. Dr. Fatih ALTUN, Erciyes Üniversitesi

Baş Editör

Prof. Dr. Emel KIZILKAYA AYDOĞAN, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. M. Duran TOKSARI, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. M. Gökhan HALICI, Erciyes Üniversitesi

Düzenleme Editörleri

Hüseyin ÖZKAYA

Ali Yankı TEKOL

Editörler Kurulu

Prof. Dr. Mehmet AKKURT, Erciyes Üniversitesi, akkurt@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Nuray ATEŞ, Erciyes Üniversitesi, nuraya@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Musa SARI, Gazi Üniversitesi, msari@gazi.edu.tr

Prof. Dr. Orhan BÜYÜKGÜNGÖR, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, orhanb@omu.edu.tr

Prof. Dr. Hasan KÜÇÜKBAY, İnönü Üniversitesi, hasan.kucukbay@inonu.edu.tr

Prof. Dr. Kamil KOÇ, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, kamil.koc@cbu.edu.tr

Prof. Dr. Tuncay CANDAN, The American University of the Middle East, tuncay.candan@aum.edu.kw

Prof. Dr. Derviş KARABOĞA, Erciyes Üniversitesi, karaboga@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. M. Tamer ŞENEL, Erciyes Üniversitesi, senel@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Doğan IŞIK, Erciyes Üniversitesi, dogani@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Burak UZAL, Abdullah Gül Üniversitesi, burak.uzal@agu.edu.tr

Prof. Dr. Niğmet UZAL, Abdullah Gül Üniversitesi, nigmet.uzal@agu.edu.tr

Prof. Dr. Murat GÖKÇEK, Ömer Halisdemir Üniversitesi, mgokcek@ohu.edu.tr



ERCİYES ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology

ISSN: 1012-2354



Yayın Danışma Kurulu

Prof. Dr. Ülkü YETİŞ, Ortadoğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Filiz B. DİLEK, Ortadoğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Gülçin BÜYÜKÖZKAN, Galatasaray Üniversitesi

Prof. Dr. Ceyda OĞUZ, Koç Üniversitesi

Prof. Dr. Yaman BARLAS, Boğaziçi Üniversitesi

Prof. Dr. Levent KANDİLLER, Yaşar Üniversitesi

Prof. Dr. Cengiz KAHRAMAN, İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Metin DAĞDEVİREN, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Cevriye Temel GENCER, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet TANYAŞ, Maltepe Üniversitesi

Prof. Dr. Tuncay CANDAN, Ömer Halisdemir Üniversitesi

Prof. Dr. Li TONGXING, Linyi University

Prof. Dr. Panos M. PARDALOS, University of Florida

Prof. Dr. José Machado Minho, University

Prof. Dr. Petraq PAPAJORGJË, University of New York Tirana

Prof. Dr. Fatih ALTUN, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Recai KILIÇ, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Şahin YILDIRIM, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Derviş KARABOĞA, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Orhan BÜYÜKGÜNGÖR, Ondokuz Mayıs Üniversitesi



ERCİYES ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology

ISSN: 1012-2354



Cilt 39, Sayı 1, Hakem Kurulu

Prof. Dr. Abdulkadir BİLİŞİK, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet ZENGİN, Sakarya Üniversitesi

Prof. Dr. Ali DELİCEOĞLU, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Fuat ÖZYONAR, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Prof. Dr. Funda CENGİZ ÇALLIOĞLU, Süleyman Demirel Üniversitesi

Prof. Dr. Funda KAHRAMAN, Tarsus Üniversitesi

Prof. Dr. Gökşen ÇAPAR, Ankara Üniversitesi

Prof. Dr. Nadir DİZGE, Mersin Üniversitesi

Prof. Dr. Nevzat Özgü YİĞİT, Süleyman Demirel Üniversitesi

Prof. Dr. Nilüfer TOPSAKAL, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Prof. Dr. Sabriye Banu İKİZLER, Karadeniz Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Asuman DEVECİ ÖZKAN, Sakarya Üniversitesi

Doç. Dr. Baybars Ali FİL, Balıkesir Üniversitesi

Doç. Dr. Ebru YILMAZ, Çukurova Üniversitesi

Doç. Dr. Fatih Yavuz ILGIN, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi

Doç. Dr. Figen KANGALGİL, Dokuz Eylül Üniversitesi

Doç. Dr. İlyas KARASU, Samsun Üniversitesi

Doç. Dr. Koray KARABULUT, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Doç. Dr. Md SYDUZZAMAN, Bangladeş Tekstil Üniversitesi

Doç. Dr. Muhammet Nuri SEYMAN, Bandırma Onyediy Eylöl Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Doç. Dr. Nuray VAROL, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Öznur Begüm GÖKÇEK, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Doç. Dr. Şahset İRDEMEZ, Atatürk Üniversitesi

Doç. Dr. Yonca YÜZÜGÜLLÜ KARAKUŞ, Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Yılmaz DELİCE, Kayseri Üniversitesi

Doç. Dr. Zülküf KAYA, Erciyes Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet GANI, Kayseri Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi ARZU GÜRSOY ERGEN, Ankara Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Can VATANDAŞLAR, Artvin Çoruh Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Erdem İLTEN, Balıkesir Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ersin DEMİREL, Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Esra AKGÜL, Erciyes Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Faruk Baturalp GÜNAY, Atatürk Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hacımurat DEMİR, Aksaray Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hasan ZORLU, Erciyes Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Neslihan BAL, Gazi Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Saadet HACISALİHOĞLU, Bursa Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Salih HİMMETOĞLU, Kayseri Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Vedat YILMAZ, Artvin Çoruh Üniversitesi

Öğr. Gör. Gökçe YILDIRIM, Bingöl Üniversitesi

Arş. Gör. Dr. Burak GÜLMEZ, Leiden Üniversitesi

Arş Gör. Vahtettin Cem BAYDOĞAN, Tarsus Üniversitesi

Cilt: 39 Sayı: 1

Nisan 2023

İçindekiler

Sayfalar	Makaleler	Türü
1-12	Geri Dönüştürülebilir Atık Malzemelerin Geoteknik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi	Araştırma Makalesi
13-26	Ayrık Zamanlı Caputo-Fabrizio Kesirsel Meriteden Ekli Allee Etkili Lojistik Denklemin Kompleks Dinamiği	Araştırma Makalesi
27-36	Çevresel, Sosyal ve Ekonomik Kriterler Dikkate Alınarak MABAC Yöntemi ile En Uygun Konut Kredisi Sağlayıcının Belirlenmesi	Araştırma Makalesi
37-43	Evrışimli Sinir Ağları Kullanılarak Duygu Durum Tespitinin İyileştirilmesi ve Eğitim Verimliliğinin Analizi	Araştırma Makalesi
44-53	Ağaç Karameleği (<i>Hipparchia statilinus</i> (Hufnagel, 1766)) ve Bazı Türlerin Yangın Sonrası Manavgat Ormanları'na Dönüşü	Araştırma Makalesi
54-69	Tetrasiklin Giderimi için Elektrokimyasal Oksidasyon Yöntemi	Araştırma Makalesi
70-78	Güçlü S-box Yapıları Üretmek İçin Yeni Bir Yaklaşım	Araştırma Makalesi
79-86	Primary Culture of Cancer Cells Derived from Human Lung Tumors	Araştırma Makalesi
87-99	An Evaluation of the Environmental Problems of Burdur Lake Basin	Araştırma Makalesi
100-115	Yeşil Üretim için Çevresel Etki Temelli Termoplastik Malzeme Seçimi: Karşılaştırmalı Bir Hibrid ÇKKV Yaklaşımı	Araştırma Makalesi
116-125	Öndeki Aracın Akışına Maruz Kalan Otobüsün Üzerinde Oluşan Aerodinamik Etkinin Sayısal Olarak İncelenmesi	Araştırma Makalesi
126-131	MOS Transistor Based Low Power and High Speed Fundamental Logic Gates	Araştırma Makalesi
132-137	Evaluation of Phosphate Recovery from Treated Municipal Wastewater by Forward Osmosis	Araştırma Makalesi
138-149	Üç boyutlu (3B) Polipropilen Halı Yapıların Aşınma ve Sürtünme Özellikleri	Araştırma Makalesi

Geri Dönüştürülebilir Atık Malzemelerin Geoteknik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi

Bilal Korkmaz¹, Şüheda Taştan¹, Ash Y. Dayıoğlu^{*1}, Mustafa Hatipoğlu¹

*¹ İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği, İstanbul

(Alınış / Received: 03.04.2023, Kabul / Accepted: 28.04.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 02.05.2023)

Anahtar Kelimeler

Elektrik ark cürufu,
Pota cürufu,
Geri dönüştürülmüş asfalt
agregası,
Geri dönüştürülmüş beton
agregası,
Yol inşaatı.

Öz: Yol inşaatlarında dolgu malzemesi olarak kullanılan doğal zemin kaynaklarının giderek azalması, alternatif malzeme ihtiyacı doğurmaktadır. Bu ihtiyaç doğrultusunda büyük miktarlarda yapı malzemesi gerektiren yol inşaatı gibi yapım işlerinde, atık malzemelerin kullanılabilirliği güncel bir araştırma konusu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada; geri dönüştürülmüş beton agregası (RCA), geri dönüştürülmüş asfalt agregası (RAP), elektrik ark fırın cürufu (EAF) ve pota cürufu (PF) gibi atık malzemelerin geoteknik uygulamalarda dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmaktadır. Bu amaçla temin edilen atık malzemelerin; dane çapı dağılımı, özgül ağırlığı, kompaksiyon özellikleri, permeabilite katsayıları, kayma mukavemeti parametreleri, ıslak ve kuru CBR değerlerini belirlemek üzere deneyler yapılmıştır. Bunlara ek olarak, çelik cürufularının şişme potansiyelleri hızlandırılmış şişme deneyleri ile belirlenmiştir.

Investigation of the Geotechnical Properties of Recycled Waste Materials

Keywords

Electric arc slag,
Ladle slag,
Recycled asphalt pavement,
Recycled concrete,
Road construction.

Abstract: The gradual decrease in natural aggregate resources used as embankment material in road construction arises demand for alternative materials. To fulfill this demand, it is suggested that waste materials are used in road construction applications, which requires large amounts of building materials. This study aims to determine whether waste materials from different sources such as recycled concrete aggregate (RCA), recycled asphalt pavement (RAP), electric arc furnace slag (EAF), and ladle slag (LS) can be used as geotechnical filling materials for road construction. For this purpose, experiments were carried out to determine the particle diameter distribution, specific gravity, compaction parameters, coefficients of permeability, shear strength parameters, and soaked/unsaturated CBR values of the waste materials. In addition, the expansion potential of steel slags was determined by accelerated swelling experiments.

*İlgili Yazar, email: yalcinas@itu.edu.tr

1. Giriş

Birçok ülkede, yol inşaatında dolgu malzemesi olarak kullanılan doğal zeminlerin temin edilmesi giderek zorlaşmaktadır. Bu duruma, taş ocaklarının açılması ve işletilmesi hususunda yeni düzenlemeler ile getirilen sıkı kuralların da etkisi mevcuttur [1]. Ayrıca, yerleşim birimlerine yakın olan taş ocaklarında ve dere yataklarında doğal zemin rezervlerinin tükenmeye başlaması temini zorlaştıran diğer bir etkidir. Bu nedenle yerleşim birimlerine daha uzak bölgelerde bulunan taş ocaklarına yönelme söz konusudur. Ancak bu durum nakliye giderlerini ve yol yapım maliyetlerini arttırmaktadır. Maliyet artışının önüne geçilebilir ve doğal kaynakların

korunması için, atık malzemelerin yeniden kullanımı zorunluluk haline gelmektedir. Bu nedenle yol inşaatlarında kullanılması planlanan atık malzemelerin mekanik ve çevresel etkilerini incelemeye yönelik birçok bilimsel çalışma mevcuttur [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11]. Atık malzemelerin yol dolgu malzemesi olarak kullanılması, yol yapım maliyetlerinde iyileşmeye ve atık malzemelerin yeniden kullanımına katkı sağlayarak sürdürülebilirliği de desteklemektedir. Ayrıca, atık malzemelerin yeniden kullanılması hem depolama sorununu ortadan kaldırmakta hem de doğal kaynaklara olan talebi azaltmaktadır [12].

EAF ve PF cürufları; kimyasal olarak hafif oksitler, silikatlar ve boratlardan oluşmaktadır. Bu malzemeler, çelik üretim süreçlerinde oluşan ve eriyik çeliğe göre daha düşük yoğunluğa sahip olduğu için yüzeyde biriken katı yan ürünlerdir [13] [14] [15]. Üretim aşamalarından edinilen verilere göre genellikle 1 ton ham çelik üretimi için %15 - %20 oranında cüruf atığı oluşmaktadır [16] [17]. Belirtilen üretim kapasitesi ve oluşan cüruf atığının miktarı, depolama sorununa ve buna bağlı olarak çevresel ve biyolojik zararlara neden olmaktadır. Cüruf atıklarının yeniden kullanılması veya geri dönüştürülmesinde geoteknik mühendisliği uygulamalarının büyük katkısının bulunacağı düşünülmektedir. Sürdürülebilirliğin sağlanması amacıyla yapılan çalışmalar ışığında, çelik cüruflarının yol dolgusunda kullanılan doğal zeminlere alternatif sunabileceği belirtilmiştir [18] [19] [20] [21] [15] [22]. Cürufların agrega olarak değerlendirildiği saha uygulamalarında, dayanımın artması ile servis ömrünün uzadığı ve oturmaların azaldığı rapor edilmiştir [23]. Ancak yüksek dayanım özelliklerine rağmen çelik cürufu agregalarında bulunan silikat yapıdaki reaksiyona girmemiş serbest kireç ve magnezyum oksitler, su ile temas ettiğinde şişmeye neden olmaktadır. Bu durum kaplama tabakasının kabarmasına ve yüzeyde çatlamalara neden olabilmektedir [24]. Bu nedenle yol dolgusunda kullanılması planlanan cürufun mekanik özelliklerinin yanı sıra şişme potansiyelinin de değerlendirilmesi gerekmektedir.

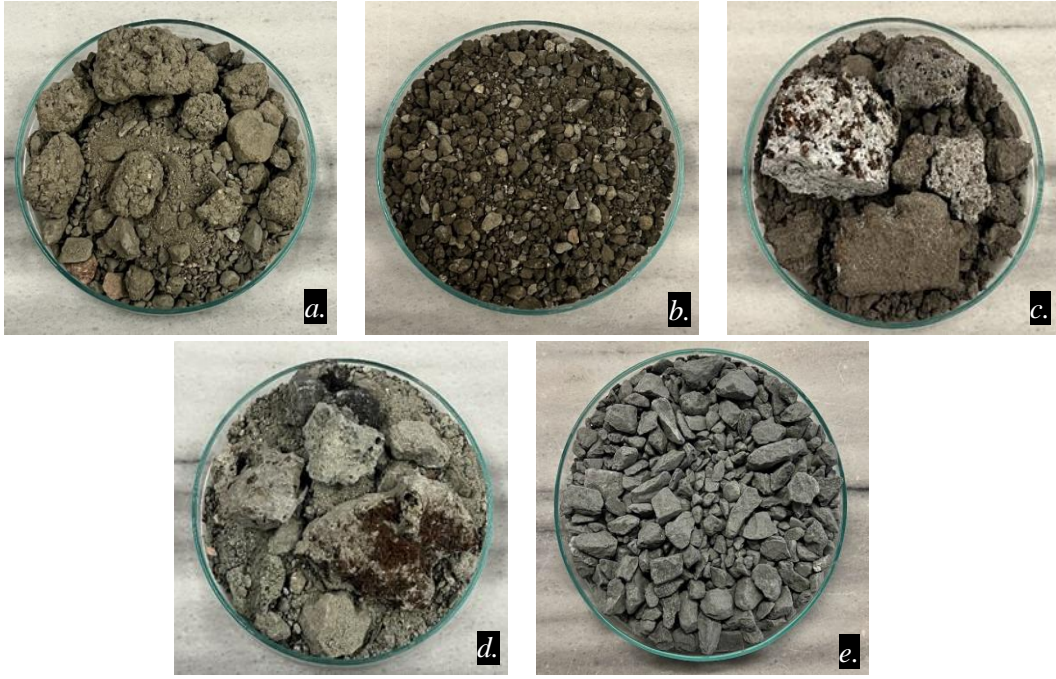
Geri dönüştürülmüş asfalt agregası (RAP), bozulmuş veya kullanım ömrünü tamamlamış asfalt kaplamaların yol yüzeyinden kazınması ve öğütülmesi ile ortaya çıkan, içerisinde yaklaşık %96 oranında agrega ihtiva eden atık malzemedir [25]. Ayrıca içeriğinde asfalt, zift, doğal polimer gibi malzemelerin yanı sıra yüksek oranda kuvars ve belirli oranlarda kalsit, kaolin, şamozit, tramolit, mika vb. mineraller bulundurması sebebiyle yeniden kullanılabilme potansiyeline sahip ikincil bir agrega türüdür [26]. 2005 yılı verilerine göre Japonya'da, geri dönüştürülen RAP malzemesinin yaklaşık %60'ı asfalt olarak, %40'ı ise yol yapımında agrega olarak kullanılmıştır [27].

Geri dönüştürülmüş beton agregası (RCA) ise, kullanım ömrünü tamamlamış betonarme yapılardan ve doğal afet sonucu oluşan betonarme yıkıntıların geri dönüşümü ile elde edilen atık malzemedir [28]. Betonun mutlak bileşiminde hacimsel olarak yaklaşık %60-80 oranında agrega bulunmaktadır. İçeriğinde bulundurduğu mineraller RAP ile benzer özellikte olup ilave olarak muskovit minerali bulundurmaktadır. Bu mineral, RCA içerisinde bulunan tuğla ve kayanın varlığı ile ilişkilendirilmektedir [26]. RCA malzemesi ihtiva ettiği mineraller ve agrega miktarı bakımından yeniden kullanılabilme potansiyeline sahip ideal bir geri dönüşüm malzemesidir. Yapılan çalışmalarda, RCA'nın mekanik ve çevresel özellikleri incelenmiş ve yol inşaatı için uygun nitelikte olduğu kanısına varılmıştır [3] [4] [6] [8] [9]. Bunlara ek olarak RCA, yol inşaatının farklı aşamalarında en çok kullanılan atık malzemesi olarak bilinmektedir [29].

Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen atık malzemeler üzerinde, elek analizi, piknometre, kompaksiyon, permeabilite, direkt kesme, ıslak ve kuru CBR deneyleri yapılmıştır. Ayrıca kimyasal özelliklerinden dolayı şişme potansiyeline sahip çelik cüruflarına hızlandırılmış şişme deneyleri yapılmış ve geoteknik açıdan atık malzemelerin yol dolgusunda kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

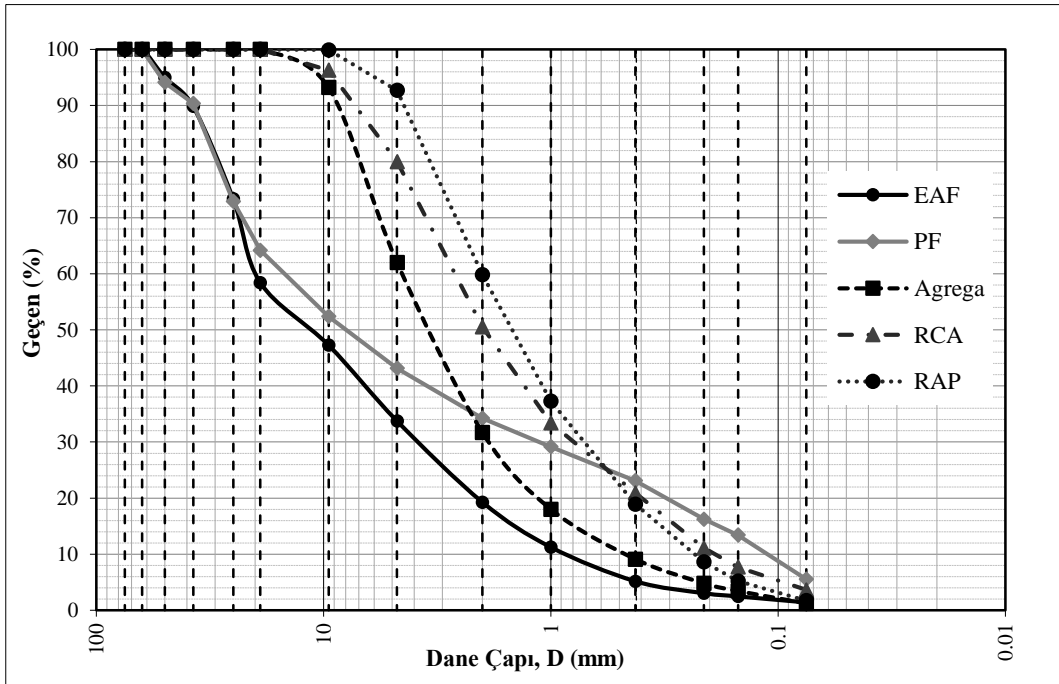
2. Materyal ve Metot

Geri dönüştürülmüş beton agregası (RCA) "İSTAÇ A.Ş.", geri dönüştürülmüş asfalt agregası (RAP) "İSFALT A.Ş." çelik cürufları (EAF-PF) "ÇEMTAŞ Çelik Makina Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den tedarik edilmiştir. Ayrıca, atık malzemelerin yol dolgu performansını kıyaslamak üzere kontrol numunesi olarak agrega "İ.T.Ü Yapı Malzemeleri" laboratuvarından temin edilmiştir. Şekil 1'de, kullanılan malzemeler gösterilmiştir.



Şekil 1. Kullanılan malzemeler: a. RCA b. RAP c. EAF d. PF e. Agregat

Tesislerden alınan numunelere ilk olarak sınıflandırma deneyleri yapılmıştır. Atık malzemelerin ve agreganın granülometri eğrileri Şekil 2’de verilmiş, fiziksel özellikleri ise Tablo 1’de özetlenmiştir.



Şekil 2. Dane çapı dağılımı eğrileri

Tablo 1. Malzemelerin fiziksel özellikleri

Malzeme	Gs	Çakıl İçeriği (%)	Kum İçeriği (%)	İnce Dane İçeriği (%)	IP (%)	Zemin Sınıfı (AASHTO)	Zemin Sınıfı (USCS)
RCA	2.68	20.0	76.4	3.6	NP	A-2-7	SW
RAP	2.50	7.3	89.1	1.7	NP	A-2-7	SW
EAF	3.62	66.3	32.4	1.3	NP	A-2-7	GP
PF	2.73	56.9	37.6	5.5	NP	A-2-7	GP
Agregat	2.71	38.0	61.0	1.0	NP	A-2-7	SW

Yapılan sınıflandırma deneyleri [30] sonucunda, malzemelerin ince dane içeriğinin %1.0 – %5.5 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Tüm malzemelerin ince dane içeriği %12'den az olduğu için, dona karşı hassasiyeti olmayan malzeme koşulunu karşılamaktadır [31]. AASHTO Sınıflandırma Sistemi'ne göre malzemeler A-2-7 olarak belirlenirken, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne (USCS) göre RCA ve RAP iyi derecelenmiş kum (SW), cürufur kötü derecelenmiş çakıl (GP) ve agrega ise iyi derecelenmiş kum (SW) olarak belirlenmiştir. Piknometre deneylerine göre [32] EAF cürufuru, demir içeriği nedeni ile diğer malzemelere kıyasla daha yüksek özgül ağırlığa sahiptir [33].

2.1. Kompaksiyon deneyleri

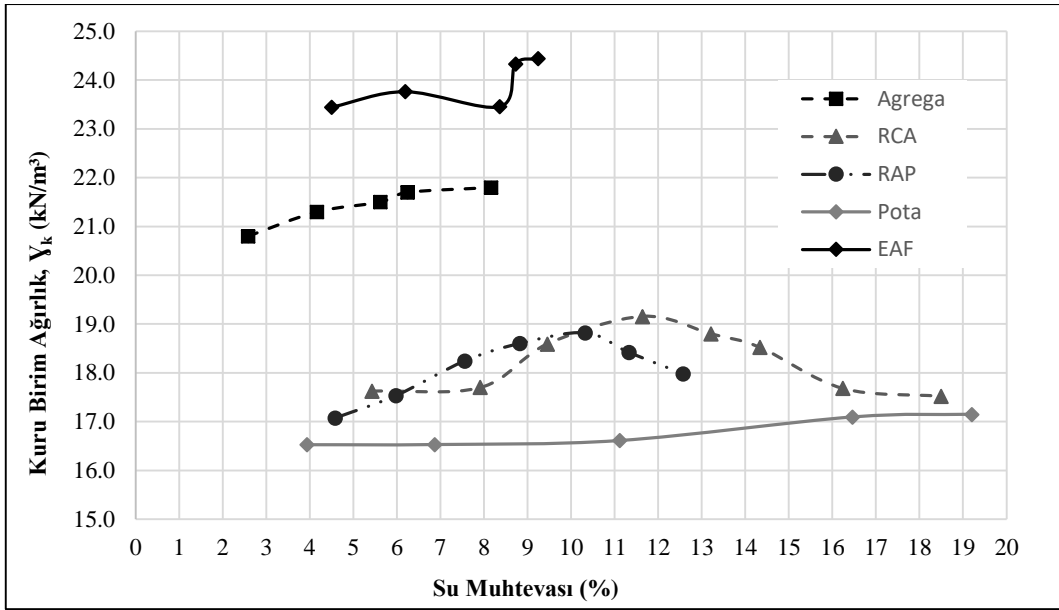
Malzemelerin dane çapı dağılım eğrileri ve ASTM D698-12 [34] standardına uygun olarak RAP için Metot A, RCA ve agrega için Metot B, EAF ve PF için ise Metot C' ye göre standart proktor enerjisi uygulanarak kompaksiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kalıp tabanında serbest su gözlemlendiğinde deneyler sonlandırılmıştır. Kompaksiyon parametreleri ise Maryland Standard Method of Test (MSMT) 321'e göre serbest suyun gözlemlendiği noktanın su içeriği ile bir önceki nokta arasındaki farkın yarısı alınarak belirlenmiştir. Şekil 3'te pota cürufundaki serbest su çıkışı gösterilmiştir.



Şekil 3. Kalıp tabanında serbest su gözlemlenmesi

Doğal zeminlerde beklenen kompaksiyon eğrilerinden farklı olarak birkaç tepe noktası içeren düzensiz sıkışma eğrileri de mevcuttur. Düzensiz eğrilikler üzerine yapılmış çalışmalara göre dane dağılımı, kıvam limitleri, dane şekli, mineraloji ve yüzey gerilimi gibi faktörlerin bu eğrileri oluşturduğu ve özellikle cüruf vb. atıklar için de söz konusu olduğu belirtilmiştir [35] [36]. Şekil 4'te tüm malzemelere ait kompaksiyon eğrileri, Tablo 2'de ise kompaksiyon parametreleri verilmektedir.

Tablo 2'den görüldüğü gibi EAF, $\omega_{opt} = \%9.0$ ve $\gamma_{kmax} = 24.4 \text{ kN/m}^3$ kompaksiyon parametreleri ile diğer malzemelere oranla en yüksek kuru birim hacim ağırlık değerine sahiptir ve bulunan değerler önceki çalışmalarla uyumludur [37]. Ayrıca tüm malzemelerin, dolgu malzemesi için belirlenen $\gamma_{kmax} = 14.5 \text{ kN/m}^3$ değerine eşit veya büyük olmalı koşulunu sağladığı görülmektedir [31].



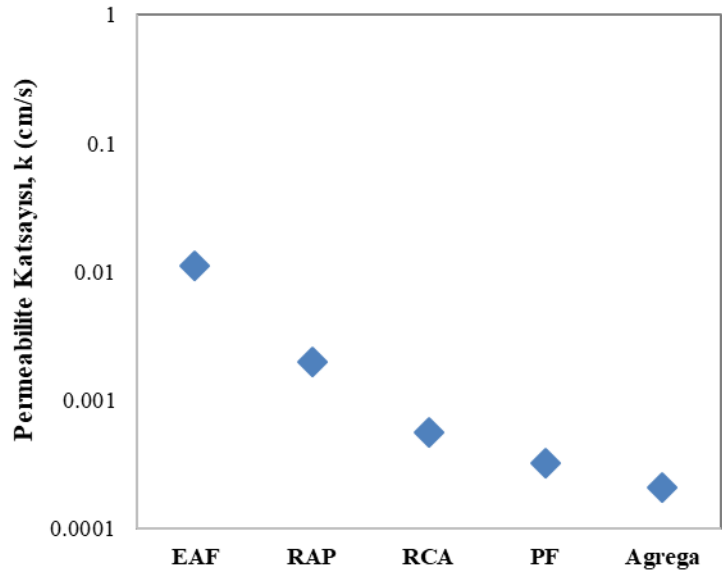
Şekil 4. Kompaksiyon eğrileri

Tablo 2. Malzemelerin kompaksiyon parametreleri

Malzeme	γ_{kmax} (kN/m^3)	ω_{opt} (%)
RCA	19.16	16
RAP	18.82	10
EAF	24.38	9
PF	17.12	18
Agrega	21.75	7

2.2. Geçirimlilik deneyleri

Malzemelerin hidrolik iletkenliklerini belirlemek için sabit seviyeli permeabilite deneyleri [38] gerçekleştirilmiştir olup deney düzeneği Şekil 5'te gösterilmiştir. RCA, RAP, EAF, PF ve agreganın permeabilite katsayıları sırasıyla 5.69×10^{-4} cm/s, 1.99×10^{-3} cm/s, 1.11×10^{-2} cm/s, 3.23×10^{-4} cm/s ve 2.08×10^{-4} cm/s olarak elde edilmiştir. PF ve RCA'da ince dane oranı nispeten yüksek olduğu için daha düşük geçirimsizlik göstermiştir. Ayrıca RCA'da bulunan çimento gibi bağlayıcı maddelerin varlığı düşük geçirimsizliğe neden olmuştur [39].



Şekil 5. Permeabilite deney düzeneği ve permeabilite katsayıları grafiği

2.3. Kesme kutusu deneyleri

Atık malzemelerin kayma mukavemeti parametrelerini belirlemek için 10x10 cm boyutlarındaki numune hücrelerinde direkt kesme deneyleri yapılmıştır. Numuneler #10 numaralı (2 mm) elekten geçirilerek, 100, 200 ve 300 kPa'lık normal gerilme seviyelerinde kuru şekilde kesmeye tabi tutulmuştur. Kesme kutusu cihazı Şekil 6'da kesme deneyinden elde edilen kayma mukavemeti parametreleri ise Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 6. Kesme kutusu deney aleti

Tablo 3. Malzemelerin kayma mukavemeti parametreleri

Malzeme	Kayma mukavemet açısı, ϕ_f (°)	Kohezyon değeri, c (kPa)
RCA	37	0
RAP	34	20
EAF	37	0
PF	28	40
Agrega	47	0

2.4. Kalifornia Taşıma Oranı (CBR) deneyleri

CBR deneyi 19 mm elekten geçen malzemelere uygun olarak tasarlandığı için [40] tüm malzemeler 19 mm elekten geçirilerek CBR deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler, optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri dikkate alınarak ıslak ve kuru koşullarda gerçekleştirilmiştir [41].

2.4.1. Kuru (CBR) deneyleri

Kuru CBR deneyinde 15 mm penetrasyona kadar okumalar alınmış ve yük-penetrasyon ilişkisini gösteren eğriler elde edilmiştir. Eğrilerde gerekli düzeltmeler yapıldıktan sonra kuru CBR değerleri belirlenmiş ve Tablo 4'de verilmiştir. Kuru CBR değerlerine bakıldığında, RCA ve RAP alt temel tabakası için, EAF ve PF'nin ise temel veya alt temel tabakası için kullanıma uygun olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Malzemelerin kuru CBR değerleri

Malzeme	Kuru CBR Değeri (%)
RCA	16.5
RAP	11.8
EAF	25.8
PF	26.6
Agrega	26.8

2.4.2. Islak (CBR) deneyleri

Kuru CBR deneylerinden farklı olarak malzemeler yaklaşık 72 saat su içerisinde bekletilip numunelerden şişme okumaları alınmış ve CBR deneyleri yapılmıştır. Tüm malzemelerin, Karayolları Teknik Şartnamesi'nde dolgu malzemeler için belirtilen maksimum yaş CBR şişme yüzdesi olan %3 değerini sağladığı görülmektedir [31]. Numuneyi suya doyurma işlemi Şekil 7'de gösterilmiş ve ıslak CBR değerleri Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 7. Numuneyi suya doyurma işlemi

Tablo 5. Malzemelerin ıslak CBR değerleri

Malzeme	Islak CBR Değeri (%)
RCA	30.4
RAP	7.7
EAF	53.6
PF	46.3
Agrega	28.9

Elde edilen değerlere göre EAF ve PF diğer malzemelere oranla daha fazla performans göstermiştir. Bu durum çelik çürufunun köşeli ve pürüzlü yüzey yapısından dolayı yüksek dayanım özelliklerine sahip olması ve içeriğindeki demir içeriği ile açıklanabilir [33]. Öte yandan EAF, PF ve RCA malzemesinin ıslak CBR değerlerinin kuru CBR değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum malzemelerin su ile temas etmesi sonucu gerçekleşen hidratlaşma reaksiyonları ile açıklanabilir [39].

2.4. Hızlandırılmış şişme deneyleri

Çelik çürufuları silika, alümina, kireç, magnezyum ve demir gibi oksitler içerir. Uygun sıcaklık ve kür koşulları altında, serbest kireç ve serbest magnezyum oksitler su ile temas edip hidroksitler oluşturarak uzun vadeli genişlemeye veya şişmeye neden olmaktadır [42] [43] [44] [45]. Özellikle serbest kirecin büyük ölçüde hidratasyona uğrayacağı ve bunun servis ömrü boyunca şişmeye ve stabilite sorunlarına yol açacağı bilinmektedir. Ayrıca serbest magnezyum, kireçten daha yavaş bir hidratasyon hızına sahiptir, bu nedenle yukarıda belirtilen uzun vadeli şişmeye neden olur [46]. Yol dolgusunda kullanılması planlanan mevcut EAF ve PF çürufularının şişme potansiyelini incelemek için, numunelere ASTM D4792-13'e [47] uygun hızlandırılmış şişme testi yapılmıştır.

Hızlandırılmış şişme testlerinde, EAF ve PF malzemeleri maksimum kuru birim ağırlık ve optimum su muhtevasında ASTM D1883-07 [48] genel prosedürlerine uygun olarak sıkıştırılmış ve numune üzerine sürşarj yükü konulmuştur. Şişme yüzdesini belirlemek için okuma saatleri yerleştirilip ardından 70 ± 3 °C sıcaklıktaki su ilave edilen kovalar etüve yerleştirilmiştir. Deplasman saatleri ile okumalar alınmıştır. Şekil 8'de deneyin kurulumu, şişme eğrileri ise Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmektedir.

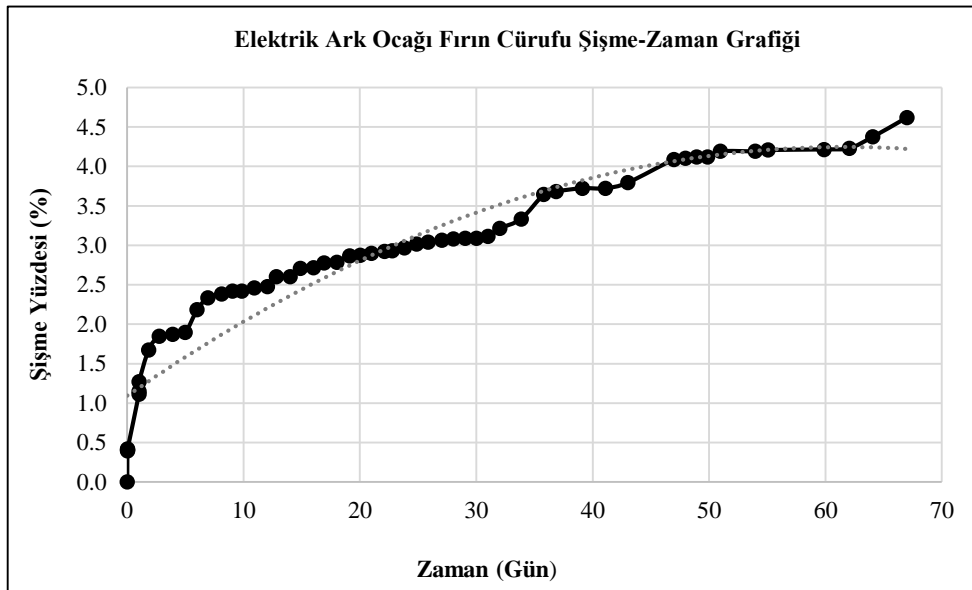
EAF'ın maksimum şişme yüzdesi %4.6, pota çürufunun ise %4.4 olarak belirlenmiştir. Şekil 9'daki şişme eğrileri incelendiğinde EAF ve pota çürufu, 2.dereceden parabolik bir eğri oluşturacak şekilde şişmektedir. Deney sonucu her iki çüruf malzemesi için elde edilen şişme değeri, şişme potansiyeli olan malzemelerin karayolu uygulamalarında kullanılabilirliğini ölçen ASTM D-2940 standardında izin verilen %0.5 sınır değerini aşmaktadır. Bu nedenle çüruf atıklarına, çeşitli iyileştirme ve yaşlandırma yöntemleri uygulandıktan sonra yol dolgusunda kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi gerekmektedir.

Yzenas (2008) [49], çelik cürufunun inşaat agregası olarak uygunluğunu değerlendirmek için bir ölçek geliştirmiştir. Bu ölçeğe göre, %11'lik şişme yüzdesine kadar çelik cüruf numunesi uygun; %11 - %16 arasında ise, aykırı (marjinal) olarak adlandırılmakta ve malzemenin daha fazla araştırılmasını önermektedir. Şişme yüzdesi %16'dan fazla olan çelik cürufları uygun olmayan malzeme olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte Juckes (2003) [50], yaptığı çalışmada çeşitli çelik cürufu malzemelerinin şişme davranışını hem laboratuvar hem de saha koşullarında değerlendirmiş ve malzemenin laboratuvar ve saha koşullarındaki şişme davranışının farklı olabileceğini göstermiştir. Buna göre, hızlandırılmış laboratuvar şişme testinde şişme hızı, sahada gerçekleşen şişme hızından oldukça yüksektir. Böylece laboratuvar test sonuçları saha performansı ile tam olarak ilişkilendirilmemektedir ve elde edilen değerler saha koşullarında meydana gelebilecek şişme miktarını kesin olarak göstermemekle birlikte bir öngörü niteliğindedir [47].

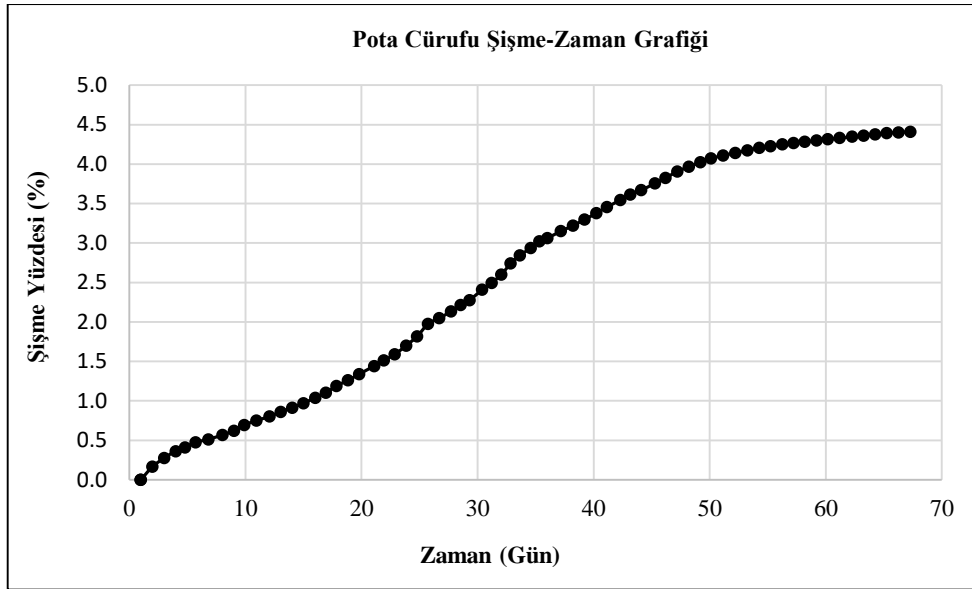


Şekil 8. Hızlandırılmış şişme testi kurulumu

Cüruflardaki şişme miktarının azaltmaya yönelik birçok bilimsel çalışma mevcuttur. Verhasselt vd. (1989) [51], kum tabakasının içindeki boşlukların şişmeyi bertaraf edebilmesi nedeniyle cüruf tabakasının altına ve üstüne kum tabakaları yerleştirmenin şişme miktarı azaltılabileceğini göstermiştir. Ghionna vd. (1996) [52], düzenli depolama sahalarında yapısal dolgu malzemesi olarak çelik cürufu kullanma potansiyelini incelemişler ve çelik cürufunun çakıl ve kum gibi malzemelerle seyreltilmesinin şişme potansiyelini azaltılabileceğini göstermişlerdir. Yıldırım ve Prezzi (2011) [15], EAF cürufuna ağırlıkça %10 oranında C sınıfı uçucu kül ilave edilmesinin, şişme değerlerini ihmal edilebilir seviyelere indirdiğini göstermiştir. Dayıoğlu (2018) [17], çelik cüruf malzemelerini bitümlü asfalt ile kaplayarak veya su arıtma rezidüelleri ile karıştırarak, yol inşaatında dolgu malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermiştir.



Şekil 9. EAF - Hızlandırılmış şişme eğrisi



Şekil 10. PF - Hızlandırılmış şişme eğrisi

3. Tartışma ve Sonuç

Çelik üretimi sonucu ortaya çıkan endüstriyel atık miktarları depolama sorunlarına ve buna bağlı olarak çevresel zararlara yol açmaktadır. Benzer durum, geri kazanılmış inşaat-yıkım agregalarında da mevcuttur. Atıkların bertaraf edilebilmesi açısından geoteknik uygulamalar elverişlidir. Özellikle yol inşaatlarında doğal zemin yerine kullanılabilirleri, büyük hacimlerdeki atığın bertaraf edilmesini sağlayacaktır. Bu bakımdan; EAF, PF, RAP ve RCA gibi atık malzemelerin yol dolgusu olarak kullanımının araştırıldığı bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Mukavemet parametreleri, geçirimsizlik katsayıları ve kimyasal yapıdan kaynaklı rijitlik değerleri dikkate alındığında, atık malzemelerin yol dolgusu olarak kullanıma uygun şartlara sahip olduğu anlaşılmaktadır. ($\phi'_{EAF} = 37^\circ$, $\phi'_{PF} = 28^\circ$, $\phi'_{RAP} = 34^\circ$, $\phi'_{RCA} = 37^\circ$). Ancak cüruf kullanımı durumunda, servis ömrü boyunca oluşabilecek duraylılık sorunlarını azaltmak için uzun vadeli şişme potansiyellerinin irdelenmesi gerekmektedir.

Sabit seviyeli permeabilite deneylerine göre RCA ve PF malzemeleri düşük geçirimsizliğe; RAP ve EAF ise orta düzey geçirimsizliğe sahiptir. Malzemeler genel olarak iyi drenaj özelliği gösteren permeabilite katsayılarına sahiptir ($k_{RCA} = 5.69 \times 10^{-4}$ cm/s, $k_{RAP} = 1.99 \times 10^{-3}$ cm/s, $k_{EAF} = 1.11 \times 10^{-2}$ cm/s, $k_{PF} = 3.23 \times 10^{-4}$ cm/s). RCA bünyesinde bulunan bağlayıcı maddeler, zamanla çimentolaşma ile yol kesitinin drenaj potansiyelini olumsuz etkileyebilecektir.

Karayolları Teknik Şartnamesi'nde izin verilen kuru CBR değerlerine bakıldığında, RCA ve RAP alt temel tabakası için, EAF ve PF ise temel veya alt temel tabakası için kullanıma uygundur [31]. Öte yandan EAF, PF ve RCA malzemesinin ıslak CBR değerlerinin kuru CBR değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, malzemelerin su ile temas etmesi sonucu gerçekleşen hidratlaşma reaksiyonları ile açıklanabilir.

Literatürde cürufunların uygun koşullarda hidratlaşma eğilimi gösterdiği belirtilmiştir. Bu çalışmada, yapılan ıslak CBR ve permeabilite deneylerinde de hidratlaşmanın etkileri gözlenmiştir. Buna göre, hidratlaşma reaksiyonları geçirimsizlik katsayısında azalmaya neden olurken, EAF, PF ve RCA malzemelerinin CBR değerlerini arttırmıştır.

Hızlandırılmış şişme deneylerin, EAF'nin maksimum şişme yüzdesi %4.6, pota cürufunun ise %4.4 olarak belirlenmiştir. Deney sonucu her iki cüruf malzemesi için elde edilen şişme değeri, izin verilen %0.5 sınır değerini aşmaktadır. Bu nedenle cüruf atıklarına, çeşitli iyileştirme ve yaşlandırma yöntemleri uygulandıktan sonra yol dolgusunda kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi gerekmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Bilimi (BAP) tarafından 43769 ve 42841 nolu projelerle desteklenmiştir. Ayrıca yazarlar çalışma esnasında verdiği bilimsel destekten ötürü Prof. Dr. Aykut ŞENOL'a teşekkür eder.

Kaynakça

- [1] TÇÜD, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2015) Demir Çelik Cüruf Raporu. Türkiye Çelik Üreticileri Derneği. 2015.
- [2] Abbaspour, A., B.F. Tanyu, and B. Cetin, Impact of aging on leaching characteristics of recycled concrete aggregate. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016. 23: p. 20835-20852.
- [3] Arulrajah, A., et al., Geotechnical properties of recycled concrete aggregate in pavement sub-base applications. *Geotechnical Testing Journal*, 2012. 35(5): p. 743-751.
- [4] Bestgen, J.O., et al., Mechanical and environmental suitability of recycled concrete aggregate as a highway base material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016. 28(9): p. 04016067.
- [5] Cetin, B., A.H. Aydilek, and Y. Guney, Stabilization of recycled base materials with high carbon fly ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010. 54(11): p. 878-892.
- [6] Cooley, L.A., H. Hornsby, and B.C. Dennis, Evaluation of crushed concrete base strength. 2012, Mississippi. Dept. of Transportation.
- [7] Dayioglu, A.Y. and A.H. Aydilek, Effect of pH and subgrade type on trace-metal leaching from steel-slag embankments into groundwater. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019. 31(8): p. 04019149.
- [8] Engelsen, C.J., H.A. van der Sloot, and G. Petkovic, Long-term leaching from recycled concrete aggregates applied as sub-base material in road construction. *Science of the Total Environment*, 2017. 587: p. 94-101.
- [9] Haider, I., et al. Evaluation of the mechanical performance of recycled concrete aggregates used in highway base layers. in *Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability*. 2014.
- [10] Jahren, C.T. and D. Chen. Long-term performance of cold in-place recycled asphalt roads. in *Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium Ames, Iowa*. 2005.
- [11] Li, L., et al., Sustainable construction case history: Fly ash stabilization of recycled asphalt pavement material. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2008. 26: p. 177-187.
- [12] Augiseau, V., Construction materials flows and stocks in Paris region: An overview. *Ecocycles*, 2020. 6(1): p. 18-22.
- [13] Uysal, F.F. and S. Bahar, Cüruf Çeşitleri ve Kullanım Alanları. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2018. 19(1): p. 37-52.
- [14] Yi, H., et al., An overview of utilization of steel slag. *Procedia Environmental Sciences*, 2012. 16: p. 791-801.
- [15] Yildirim, I.Z. and M. Prezzi, Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag. *Advances in Civil Engineering*, 2011. 2011.
- [16] Association, W.S., World steel in figures. World Steel Association: Brussels, Belgium, 2022.
- [17] Dayioglu, A.Y., et al., Trace metal leaching from steel slag used in structural fills. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018. 144(12): p. 04018089.
- [18] Dayioglu, A.Y., A.H. Aydilek, and B. Cetin, Preventing swelling and decreasing alkalinity of steel slags used in highway infrastructures. *Transportation Research Record*, 2014. 2401(1): p. 52-57.
- [19] Mina, E., R. Kusuma, and N. Ulfah. Utilization of steel slag and fly ash in soil stabilization and their effect to california bearing ratio (CBR) value.(Case study: Kp. Kadusentar road Medong village Mekarjaya Subdistrict Pandeglang District). in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. IOP Publishing.
- [20] Shi, C., Steel slag—its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *Journal of materials in civil engineering*, 2004. 16(3): p. 230-236.
- [21] Wang, S., et al., Experimental Research on Steel slag Stabilized Soil and its Application in Subgrade Engineering. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020. 38(5): p. 4603-4615.
- [22] Yildirim, I.Z. and M. Prezzi, Subgrade stabilisation mixtures with EAF steel slag: an experimental study followed by field implementation. *International Journal of Pavement Engineering*, 2022. 23(6): p. 1754-1767.

- [23] Senol, A. and B. Erol. 2D Numerical Settlement Analysis of A Slag Aggregated Test Road on Weak Soils. in Material Design, Construction, Maintenance, and Testing of Pavements: Selected Papers from the 2009 GeoHunan International Conference. 2009.
- [24] Dayioglu, A.Y. and A.H. Aydilek, Evaluation of mitigation techniques for the expansive behavior of steel slag, in Geotechnical Frontiers 2017. 2017. p. 360-368.
- [25] Şeref, O., B. YILMAZ, and M.S. Mazlum, Geri kazanılan asfalt kaplamaların sıcak asfalt karışımlarda yeniden kullanılabilirliğinin araştırılması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2018. 30(1): p. 87-93.
- [26] Hung, V.Q., et al., Investigating Potential Environmental Issues of using Recycled Materials in Road Construction.
- [27] Cabrera, M.B., T. Satomi, and H. Takahashi, Study on recycling of waste asphalt blocks containing roadbed materials using new screenless separation equipment with a vibration device. International Journal of Pavement Research and Technology, 2017. 10(3): p. 228-244.
- [28] Akbaş M., D.A.Y., Hatipoğlu M., İyisan R., Geri Dönüştürülmüş Beton Agregaların Geoteknik Mühendisliğinde Kullanımı, in Conference Paper September. 2018.
- [29] Zhang, Y., D. Goulias, and A. Aydilek, Sustainability evaluation of pavements using recycled materials, in Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. 2017, CRC Press. p. 1283-1291.
- [30] ASTM-D422-63, D422-63. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA: 2007. 2007.
- [31] KTS, T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü. (2013) Karayolları Teknik Şartnamesi 2013.
- [32] ASTM D854-14, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. 2014: ASTM International, West Conshohocken, PA: 2014. In.
- [33] Deniz, D., E. Tutumluer, and J.S. Popovics, Expansive characteristics of reclaimed asphalt pavement (RAP) used as base materials. 2009, Illinois. Dept. of Transportation. Bureau of Materials and Physical Research.
- [34] ASTM-D698, Standard practice for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). Book of Standards 04.08, 2003.
- [35] Rohde, L., W. Peres Núñez, and J. Augusto Pereira Ceratti, Electric arc furnace steel slag: base material for low-volume roads. Transportation research record, 2003. 1819(1): p. 201-207.
- [36] Yildirim, I.Z. and M. Prezzi, Use of steel slag in subgrade applications. 2009.
- [37] Noureldin, A.S. and R.S. McDaniel, Evaluation of surface mixtures of steel slag and asphalt. Transportation Research Record, 1990(1269).
- [38] ASTM D2434-68, Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head): ASTM D2434-2006, ASTM International West Conshohocken, PA.
- [39] McCulloch, T., et al., Long-term performance of recycled concrete aggregate for subsurface drainage. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017. 31(4): p. 04017015.
- [40] ASTM D4318-17, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. 2017: West Conshohocken, PA; ASTM International.
- [41] ASTM D1883-21, Standard test method for California bearing ratio (CBR) of laboratory-compacted soils, in ASTM International. 2021.
- [42] Cikmit, A.A., et al., Expansion characteristic of steel slag mixed with soft clay. Construction and Building Materials, 2019. 227: p. 116799.
- [43] Dayioglu, A.Y., Geotechnical and environmental impacts of steel slag in highway embankments. 2016, University of Maryland, College Park.
- [44] Feng, P., et al., Steel slag aggregate concrete filled-in FRP tubes: Volume expansion effect and axial compressive behaviour. Construction and Building Materials, 2022. 318: p. 125961.
- [45] Ramonich, E.V. and M. Barra, Reactivity and expansion of electric arc furnace slag in their application in construction. Materiales de Construcción, 2001. 51(263-264): p. 137-148.
- [46] Montenegro-Cooper, J., et al., Study of the expansive behavior of ladle furnace slag and its mixture with low quality natural soils. Construction and Building Materials, 2019. 203: p. 201-209.
- [47] ASTM D4792-13, Standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions. 2019.

- [48] ASTM D1883-07, Standard test method for CBR (California bearing ratio) of laboratory compacted soils. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [49] Yzenas, J. Utilization of Steel Furnace Slag in Asphalt. in Presentation in ADC60 Waste Management and Resource Efficiency in Transportation Summer Conference, July. 2008.
- [50] Juckes, L.M., The volume stability of modern steelmaking slags. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2003. 112(3): p. 177-197.
- [51] Verhasselt, A. and F. Choquet, Steel slags as unbound aggregate in road construction: problems and recommendations, in Unbound Aggregates in Roads. 1989, Elsevier. p. 204-211.
- [52] Ghionna, V., et al. Geotechnical investigation on steel slags mixtures for landfills embankments construction. in Environmental geotechnics. 1996.

Ayrık Zamanlı Caputo-Fabrizio Kesirsel Mertebeden Ekli Allee Etkili Lojistik Denklemin Kompleks Dinamiği

Hatice Karakaya^{*1}, Şenol Kartal², İlhan Öztürk³

^{*1} Erciyes Üniversitesi Fen Fakültesi Matematik Bölümü, KAYSERİ

² Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, NEVŞEHİR

³ Kapodokya Üniversitesi, UBYO, NEVŞEHİR

(Alınış / Received: 02.11.2022, Kabul / Accepted: 01.03.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 02.05.2023)

Anahtar Kelimeler
Fark denklem,
Kararlılık,
Neimark-Sacker
çatallanma,
Caputo-Fabrizio
türev,
Allee etkisi.

Öz: Bu çalışmada ekli (additive) Allee etkisine sahip Caputo-Fabrizio lojistik model ele alınmıştır. Adams-Bashfort nümerik yöntemiyle kesirsel mertebeden dinamik sistemden iki boyutlu bir fark denklem sistemi elde edilmiştir. Bu fark denklem sisteminin denge noktaları hesaplanmış ve her bir denge noktasının lokal asimptotik kararlılığı için gerekli olan cebirsel koşullar Schur-Cohn kriterlerinin kullanılmasıyla elde edilmiştir. Ayrıca fark denklem sisteminin, pozitif denge noktası civarında Neimark-Sacker çatallanması sergilediği gösterilmiştir. Yine Allee fonksiyonunun sistemin dinamik yapısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Allee fonksiyonunun kararlılık bölgesini genişlettiği ve daha geç çatallanmaların oluşmasına sebebiyet verdiği gözlemlenmiştir. Son olarak bütün teorik sonuçlar nümerik olarak test edilmiştir.

Complex Dynamics of a Discretized Caputo-Fabrizio Fractional Logistic Model with Additive Allee Effect

Keywords
Difference equation,
Stability,
Neimark-Sacker
bifurcation,
Caputo-Fabrizio
derivative,
Allee effect.

Abstract: In this study, the Caputo-Fabrizio logistic model with the additive Allee effect is considered. Two dimensional system of difference equation is obtained by using the Adams-Bashfort numerical method. The equilibrium points of the system of difference equation are calculated and by using the Schur-Chon criterion the algebraic conditions that required for the local asymptotic stability of each equilibrium point are obtained. Moreover, we show that discrete system exhibit Neimark-Sacker bifurcation around the positive equilibrium point. Furthermore, the effect of the Allee function on the dynamic structure of the system is investigated. It has been observed that the Allee function expands the stability region and bifurcation begin to form later. Finally, all theoretical results are tested numerically.

*İlgili Yazar, email: htckrky.38@gmail.com

1. Giriş

Karmaşık sistemlerde mevcut olan sistem hafıza etkisi ve kalıtsal özelliklerini matematiksel modellere yansıtılabilmek tam sayılı mertebeden türevler vasıtasıyla mümkün olamamaktadır [1]. Kesirsel mertebeden türev bu sorunu ortadan kaldırması ile bilimin çok çeşitli alanlarında kendine yer bulmaya başlamıştır [2-5]. Çalışmalar da gösterilmiştir ki kesirsel mertebeden türev yardımıyla oluşturulan matematiksel modeller klasik adi diferansiyel denklemlerle oluşturulan modellere göre daha başarılı sonuçlar vermektedir [6-7]. Literatürde kesirsel mertebeden türevin birçok tanımı vardır ve bunlardan en önemlileri Riemann-Liouville (R-L) ve Caputo kesirli türevdir [8]. Riemann-Liouville ve Caputo kesirli türevler bir integral denklemini vasıtasıyla tanımlanmakta olup bu integral denklemlerin çekirdekleri bir tekilliğe sahiptir. Bu ise uygulamada bazı sorunlara yol açmaktadır. Bu ve benzeri engellerin üstesinden gelmek için Caputo ve Fabrizio, Caputo-Fabrizio kesirsel türevi (CF) olarak adlandırılan tekilli olmayan bir çekirdeğe sahip yeni bir kesirsel türev tanımı önerdiler [9]. CF kesirsel mertebeden

türev; kimya [10], kanser [11], Covid-19 [12], Hepatit-E virüs [13], ilaç [14] gibi literatürde bir çok fiziksel ve biyolojik süreçlerin matematiksel modellenmesinde kullanılmıştır.

α . mertebeden Caputo kesirsel mertebeden türev

$${}^c D_t^{(\alpha)} f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha - n)} \int_a^t \frac{f^{(n)}(\tau)}{(t - \tau)^{\alpha+1-n}} d\tau, \quad (n - 1 < \alpha < n) \quad (1)$$

şeklinde tanımlanır.

$L^2(a, b)$, (a, b) aralığında kare integrallenebilir fonksiyonların uzayı [15], $H^1(a, b) = \{f | f \in L^2(a, b) \text{ ve } f' \in L^2(a, b)\}$, $\alpha \in (0, 1)$ ve $f \in H^1(a, b)$ olmak üzere Caputo- Fabrizio kesirsel mertebeden türev

$${}_{CF} D_t^\alpha f(t) = \frac{M(\alpha)}{1-\alpha} \int_a^t f'(\tau) \exp\left(\frac{-\alpha(t-\tau)}{1-\alpha}\right) d\tau \quad (2)$$

olarak tanımlanır. Burada $M(\alpha)$, $M(0) = M(1) = 1$ koşulunu sağlayan normalizasyon fonksiyonudur [9].

1931 yılında Allee, popülasyon dinamiğinde önemli bir yere sahip olacak ve Allee etkisi olarak adlandırılacak bir teoriyi ortaya atmıştır. Bu teoriye göre eğer popülasyon düşük yoğunluğa sahip ise lojistik denklem gerçekçi sonuçlar vermez ve bundan ötürü lojistik denklem Allee fonksiyonu ile yer değiştirmelidir [16]. Popülasyon dinamiğinde Allee etkisi genel olarak nüfus yoğunluğu ve bireysel uygunluk arasındaki pozitif ilişki olarak tanımlanabilir [17-20]. Dennis [21] çalışmasında ekli Allee etkisine sahip

$$\frac{dN}{dt} = rN(t) \left[\left(1 - \frac{N(t)}{K} \right) - \frac{m}{N(t) + a} \right] \quad (3)$$

lojistik denklemini incelemiştir. Burada $\frac{m}{N(t)+a}$ ekli Allee etkili terimi a ve m Allee sabitlerini temsil etmektedir [22]. Eğer $0 < m < a$ ise zayıf Allee etkisinden $m > a$ ise güçlü Allee etkisinden söz edilir [23,24]. Genel olarak, Allee etkisi için modelleme metodolojilerini iki farklı kategoride sınıflandırabiliriz: fenomenolojik model ve mekanik model. Fenomenolojik model, Allee etkisini dinamik popülasyon modellerine doğrudan dahil ederken ve modelleyiciler genellikle Allee etkisinin sonucuyla ilgilenirken, mekanik model, alta yatan mekanizmayı modeller ve genellikle Allee etkisinin nasıl oluşturulduğunu test eder [25].

Kesirsel mertebeden diferansiyel denklemlerin nümerik çözümlerini elde etmede en sık kullanılan metotlardan bir tanesi Adams-Bashfort metodudur [26]. Lineer olmayan Caputo-Fabrizio kesirsel mertebeden

$${}_{CF} D_0^\alpha(t) = g(t, u(t)), \quad u(0) = u_0 \quad (4)$$

denklemini ele alalım. Bu denklemin Adams-Bashfort nümerik metoduyla çözümünden [27]

$$u_{n+1} = u_n + \left(\frac{1-\alpha}{M(\alpha)} + \frac{3\alpha h}{2M(\alpha)} \right) g(t_n, u_n) + \left(\frac{1-\alpha}{M(\alpha)} + \frac{\alpha h}{2M(\alpha)} \right) g(t_{n-1}, u_{n-1}) \quad (5)$$

fark denklemi elde edilir.

2. Kararlılık ve Çatallanma Analizi

Ekli Allee fonksiyonlu Lojistik denklemini

$${}_{CF} D_t^{(\alpha)}(t) = rN(t) \left[\left(1 - \frac{N(t)}{K} \right) - \frac{m}{N(t)+a} \right] \quad (6)$$

şeklinde ele alalım. (6) denkleminin Adams-Bashforth nümerik metoduna dayalı nümerik çözümü

$$N_{CF}(t_{n+1}) = N(t_n) + \left(\frac{1-\alpha}{M(\alpha)} + \frac{3\alpha h}{2M(\alpha)} \right) rN(t_n) \left[\left(1 - \frac{N(t_n)}{K} \right) - \frac{m}{N(t_n) + a} \right] + \left(\frac{1-\alpha}{M(\alpha)} + \frac{\alpha h}{2M(\alpha)} \right) rN(t_{n-1}) \left[\left(1 - \frac{N(t_{n-1})}{K} \right) - \frac{m}{N(t_{n-1}) + a} \right] \quad (7)$$

olarak hesaplanır.

(7) denkleminde $N(t_n) = X_1(n)$ ve $N(t_{n-1}) = X_2(n)$ değişken değiştirmesi yaparsak

$$\begin{aligned} X_1(n+1) &= X_1(n) + \left(\frac{1-\alpha}{M(\alpha)} + \frac{3ah}{2M(\alpha)}\right) r X_1(n) \left(1 - \frac{X_1(n)}{K} - \frac{m}{X_1(n)+a}\right) \\ &+ \left(\frac{1-\alpha}{M(\alpha)} + \frac{ah}{2M(\alpha)}\right) r X_2(n) \left(1 - \frac{X_2(n)}{K} - \frac{m}{X_2(n)+a}\right) \\ X_2(n+1) &= X_1(n) \end{aligned} \quad (8)$$

iki boyutlu fark denklem sistemini elde ederiz. Bu sistemin denge noktaları

$$E_0 = (X_1, X_2) = (0, 0),$$

$$E_1 = (X_1, X_2) = \left(\frac{1}{2}(-a + K + \sqrt{(a+K)^2 - 4Km}), \frac{1}{2}(-a + K + \sqrt{(a+K)^2 - 4Km})\right)$$

ve

$$E_2 = (X_1, X_2) = \left(\frac{1}{2}(-a + K - \sqrt{(a+K)^2 - 4Km}), \frac{1}{2}(-a + K - \sqrt{(a+K)^2 - 4Km})\right)$$

olarak bulunur. E_2 denge noktasının pozitifliği için

$$0 < a < K \quad (9)$$

ve

$$a < m \leq \frac{(a+K)^2}{4K} \quad (10)$$

koşullarına ihtiyaç vardır.

Teorem 1: (8) fark denklem sisteminin E_0 denge noktası

a) $0 < m < a$ için kararsız

b) $0 < a < m, 0 < \alpha < 1$

ve

$$r < -\frac{2aM}{(a-m)(2+(-2+h)\alpha)} \quad (11)$$

koşulları altında lokal asimptotik kararlıdır.

İspat: (8) fark denklem sisteminin E_0 denge noktasındaki lineerleştirilmiş sisteminin Jakobiyen matrisi

$$J(E_0) = \begin{pmatrix} 1 + \frac{(a-m)r(2+(-2+3h)\alpha)}{2aM} & \frac{(a-m)r(2+(-2+h)\alpha)}{2aM} \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

şeklinde hesaplanır. Bu matrisin karakteristik denklemi

$$p(\lambda) = \lambda^2 + p_1\lambda + p_0 = 0$$

olarak elde edilir. Burada

$$p_1 = \frac{-2a(M+r) + a(2-3h)r\alpha + mr(2+(-2+3h)\alpha)}{2aM}$$

ve

$$p_0 = -\frac{(a-m)r(2+(-2+h)\alpha)}{2aM}$$

dir. Schur-Cohn kriterlerinden

$$1 + p_1 + p_0 = -\frac{2(a-m)r(1+(-1+h)\alpha)}{aM}$$

$$1 - p_1 + p_0 = 2 + \frac{h(a-m)r\alpha}{aM}$$

ve

$$1 - p_0 = -\frac{2(a-m)r(1+(-1+h)\alpha)}{aM}$$

elde edilir.

a) $0 < m < a$ koşulu altında $1 + p_1 + p_0 > 0$ eşitsizliği mevcut değildir ve buradan sistemin E_0 denge noktasının kararsız olduğunu söyleyebiliriz.

b) $0 < a < m$ ve $0 < \alpha < 1$ koşulları altında $1 + p_1 + p_0 > 0$ elde edilirken

$$0 < a < m, \quad 0 < \alpha < 1 \text{ ve } 0 < r < -\frac{2aM}{ah\alpha - hm\alpha}$$

koşulları altında

$$1 - p_1 + p_0 = 2 + \frac{h(a-m)r\alpha}{aM} > 0$$

bulunur.

$$0 < a < m, \quad 0 < \alpha < 1 \text{ ve } 0 < r < -\frac{2aM}{(a-m)(2+(-2+h)\alpha)}$$

koşulları altında ise

$$1 - p_0 = -\frac{2(a-m)r(1+(-1+h)\alpha)}{aM} > 0$$

yazılabilir. Burada

$$r < -\frac{2aM}{(a-m)(2+(-2+h)\alpha)} < -\frac{2aM}{ah\alpha - hm\alpha}$$

olabilmesi için $0 < \alpha < 1$ koşulunun varlığı yeterlidir.

Teorem 2: $\delta = (a + K)^2 - 4Km$ olmak üzere (8) fark denklem sisteminin E_1 denge noktası için aşağıdaki ifadeler doğrudur.

i) $0 < m < a$, $0 < \alpha < 1$, $0 < a < K$ olsun. Bu durumda

$$0 < m < \frac{a^2 + aK}{2K} \tag{12}$$

ve

$$r < \sqrt{\frac{(a(a+K) - 2Km)^2 M^2}{(a-m)^2 \delta (2 + (-2+h)\alpha)^2}} + \frac{Ma}{(a-m)(2 + (-2+h)\alpha)} \quad (13)$$

veya

$$\frac{a^2 + aK}{2K} \leq m < a \quad (14)$$

ve

$$r < -\sqrt{\frac{(a(a+K) - 2Km)^2 M^2}{(a-m)^2 \delta (2 + (-2+h)\alpha)^2}} + \frac{Ma}{(a-m)(2 + (-2+h)\alpha)} \quad (15)$$

ise E_1 denge noktası lokal asimptotik kararlıdır.

ii) $m > a$, $0 < \alpha < 1$ ve $0 < a < K$ olsun

$$a < m < \frac{(a+K)^2}{4K} \quad (16)$$

ve

$$0 < r < \sqrt{\frac{(a(a+K) - 2Km)^2 M^2}{(a-m)^2 \delta (2 + (-2+h)\alpha)^2}} + \frac{Ma}{(a-m)(2 + (-2+h)\alpha)} \quad (17)$$

ise E_1 denge noktası lokal asimptotik kararlıdır.

İspat: (8) fark denklem sisteminin E_1 denge noktasındaki lineerleştirilmiş sisteminin Jakobiyen matrisi

$$J(E_1) =$$

$$\begin{pmatrix} 1 + \frac{(-a+K+\sqrt{\delta}) \left(-\frac{1}{K} + \frac{4m}{(a+K+\sqrt{\delta})^2} \right) r(2 + (-2+3h)\alpha)}{4M} & -\frac{(\sqrt{\delta}m + \sqrt{\delta}(a+K-2m)r(2 + (-2+h)\alpha))}{(a+K+\sqrt{\delta})^2 M} \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

olarak bulunur ve bu matrisin karakteristik denklemi

$$p(\lambda) = \lambda^2 + p_1 \lambda + p_0 = 0$$

şeklinde hesaplanır. Burada

$$p_1 = \frac{-2m\sqrt{\delta}r(2 + (-2+3h)\alpha) - a(2K + \sqrt{\delta})(2M + r(-2+2\alpha-3h\alpha)) + a^2(-2M + r(2-2\alpha+3h\alpha))}{(a+K+\sqrt{\delta})^2 M}$$

$$+ \frac{K^2(-2M + r(2 - 2\alpha + 3h\alpha)) + K(4m(M + r(-2 + 2\alpha - 3h\alpha)) + \sqrt{\delta}(-2M + r(2 - 2\alpha + 3h\alpha)))}{(a + K + \sqrt{\delta})^2 M}$$

ve

$$p_0 = \frac{((a + K)^2 - 4Km + a\sqrt{\delta} + K\sqrt{\delta} - 2m\sqrt{\delta})r(2 + (-2 + h)\alpha)}{(a + K + \sqrt{\delta})^2 M}$$

dır. Schur-Cohn kriterlerinden

$$1 + p_1 + p_0 = \frac{4((a + K)^2 - 4Km + a\sqrt{\delta} + K\sqrt{\delta} - 2m\sqrt{\delta})r(1 + (-1 + h)\alpha)}{(a + K + \sqrt{\delta})^2 M}$$

$$\frac{1 - p_1 + p_0}{=} \frac{4K(K - 2m)M + 4K\sqrt{\delta}M - 2hK(K - 4m)r\alpha - 2hK\sqrt{\delta}r\alpha + 4hm\sqrt{\delta}r\alpha + a^2(4M - 2hr\alpha) + 2a(2K + \sqrt{\delta})(2M - hr\alpha)}{(a + K + \sqrt{\delta})^2 M}$$

ve

$$1 - p_0 = 1 - \frac{((a + K)^2 - 4Km + a\sqrt{\delta} + K\sqrt{\delta} - 2m\sqrt{\delta})r(2 + (-2 + h)\alpha)}{(a + K + \sqrt{\delta})^2 M}$$

elde edilir.

$0 < \alpha < 1$ ve $0 < m < a$ koşulları altında $1 + p_1 + p_0 > 0$ dir. Öte yandan (12) ve (13) den veya (14) ve (15) ten $1 - p_1 + p_0 > 0$ ve $1 - p_0 > 0$ dir.

ii) Farzedelim ki $m > a$ ve $0 < \alpha < 1$ olsun

$$0 < a < K \text{ ve } a < m < \frac{a^2 + 2aK + K^2}{4K}$$

koşulları altında $1 + p_1 + p_0 > 0$ elde edilirken

$$0 < a < K, \quad a < m < \frac{a^2 + 2aK + K^2}{4K}$$

ve

$$0 < r < \sqrt{\frac{(a(a + K) - 2Km)^2 M^2}{h^2(a - m)^2 \delta \alpha^2}} + \frac{Ma}{aha - hma}$$

koşulları altında $1 - p_1 + p_0 > 0$ elde edilir. Yine

$$0 < a < K, \quad a < m < \frac{a^2 + 2aK + K^2}{4K}$$

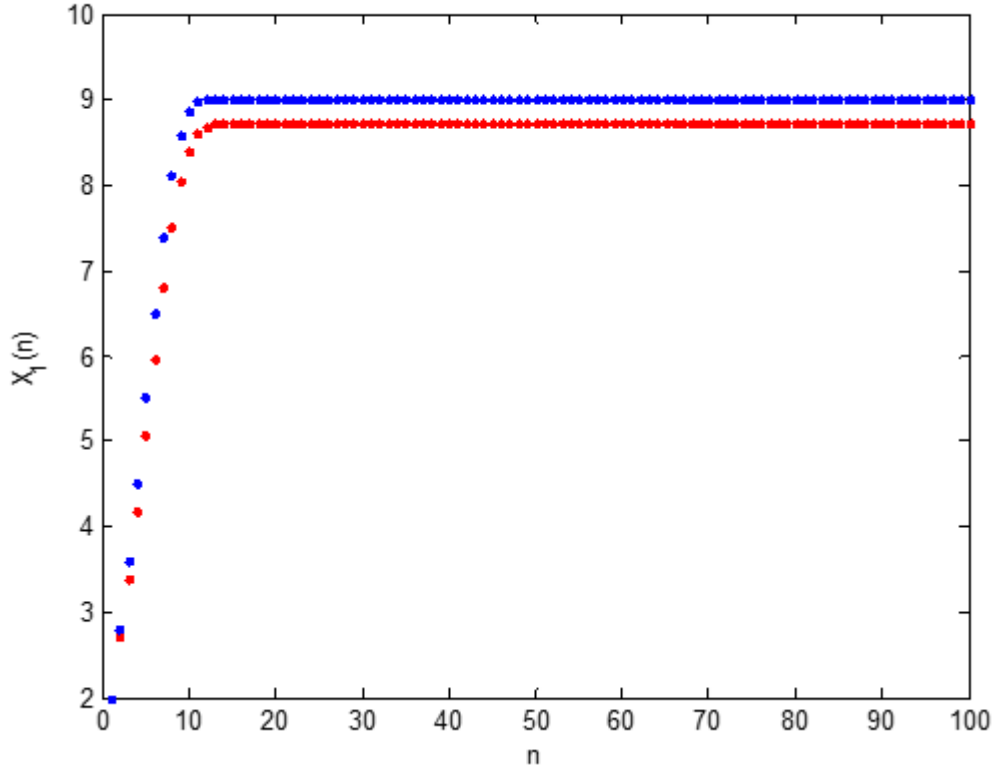
ve

$$r < \sqrt{\frac{(a(a + K) - 2Km)^2 M^2}{(a - m)^2 \delta (2 + (-2 + h)\alpha)^2}} + \frac{Ma}{(a - m)(2 + (-2 + h)\alpha)}$$

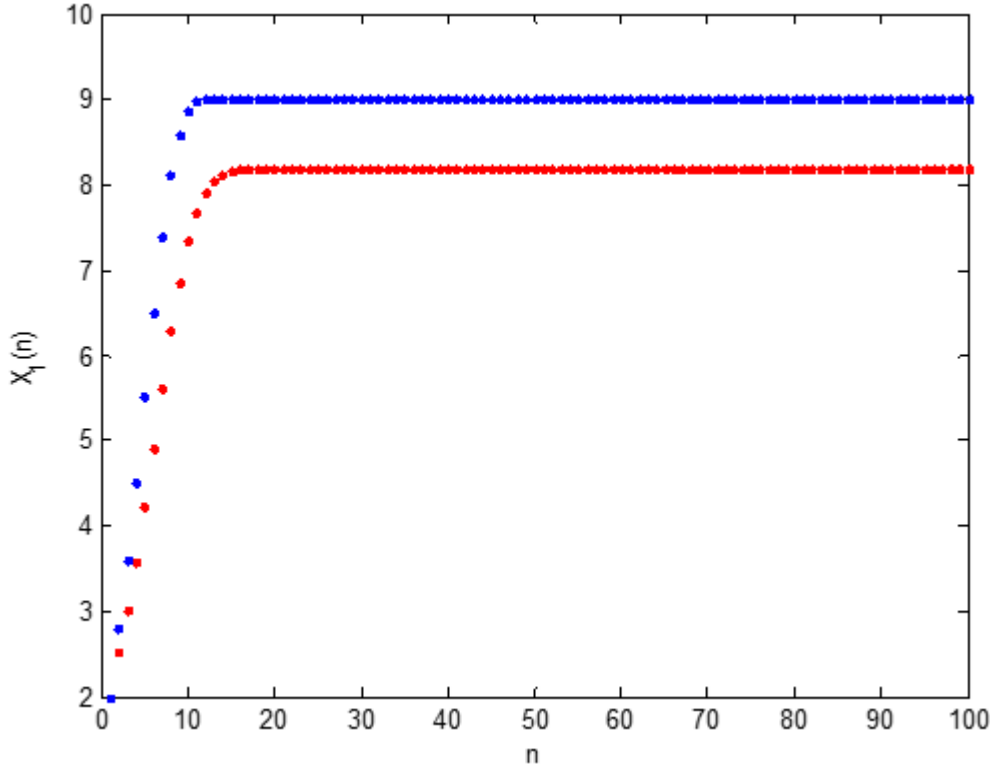
koşulları altında $1 - p_0 > 0$ dir. Son olarak

$$\sqrt{\frac{(a(a+K)-2Km)^2M^2}{(a-m)^2\delta(2+(-2+h)\alpha)^2}} + \frac{Ma}{(a-m)(2+(-2+h)\alpha)} < \sqrt{\frac{(a(a+K)-2Km)^2M^2}{h^2(a-m)^2\delta\alpha^2}} + \frac{Ma}{h\alpha(a-m)}$$

olduğu açıktır.



Şekil 1. $K = 9, m = 0.3, h = 0.001, M = 0.88716, \alpha = 0.8, r = 1, a = 0.9$ parametre değerleri ve $X_1(1) = 2, X_2(1) = 3$ başlangıç koşulları için Allee etkisiz (mavi eğri) ve zayıf ekli Allee etkili (kırmızı eğri) ayrık zamanlı Caputo- Fabrizio lojistik denklemlerin yerel asimptotik kararlı denge noktası E_1 .



Şekil 2. $K = 9, m = 0.8, h = 0.001, M = 0.88716, \alpha = 0.8, r = 1, a = 0.7$ parametre değerleri ve $X_1(1) = 2, X_2(1) = 3$ başlangıç koşulları için Allee etkisiz (mavi eğri) ve güçlü ekli Allee etkili (kırmızı eğri) ayrık zamanlı Caputo-Fabrizio lojistik denklemlerin yerel asimptotik kararlı denge noktası E_1 .

Teorem 3: (8) fark denklem sisteminin E_2 denge noktası kararsızdır.

İspat: Sistemin E_2 denge noktasındaki lineerleştirilmiş sistemin Jakobiyen matrisi

$$J(E_2) =$$

$$1 + \frac{(-a + K - \sqrt{\delta}) \left(-\frac{1}{K} + \frac{4m}{(a+K-\sqrt{\delta})^2} \right) r(2 + (-2 + 3h)\alpha)}{4M} \quad \frac{(-a^2 - K^2 - 2m\sqrt{\delta} + a(-2K + \sqrt{\delta}) + K(4m + \sqrt{\delta})) r(2 + (-2 + h)\alpha)}{(a + K - \sqrt{\delta})^2 M}$$

ve bu matrisin karakteristik denklemi

$$p(\lambda) = \lambda^2 + p_1\lambda + p_0 = 0$$

şeklindedir. Burada

$$p_1 = \frac{2m\sqrt{\delta}r(2 + (-2 + 3h)\alpha) + a(-2K + \sqrt{\delta})(2M + r(-2 + 2\alpha - 3h\alpha)) + a^2(-2M + r(2 - 2\alpha + 3h\alpha))}{(a + K - \sqrt{\delta})^2 M}$$

$$\left(+ \frac{K^2(-2M + r(2 - 2\alpha + 3h\alpha)) + K(4m(M + r(-2 + 2\alpha - 3h\alpha))) + \sqrt{\delta}(2M + r(-2 + 2\alpha - 3h\alpha))}{(a + K - \sqrt{\delta})^2 M} \right)$$

ve

$$p_0 = -\frac{(-a^2 - K^2 - 2m\sqrt{\delta} + a(-2K + \sqrt{\delta}) + K(4m + \sqrt{\delta}))r(2 + (-2 + h)\alpha)}{(a + K - \sqrt{\delta})^2 M}$$

dır. Schur-Cohn kriterinin ilk kriterinden

$$1 + p_1 + p_0 = -\frac{4(-a^2 - K^2 - 2m\sqrt{\delta} + a(-2K + \sqrt{\delta}) + K(4m + \sqrt{\delta}))r(1 + (-1 + h)\alpha)}{(a + K - \sqrt{\delta})^2 M}$$

elde edilir ki denge noktasının pozitiflik koşullarından $1 + p_1 + p_0 > 0$ eşitsizliği sağlanmaz.

Teorem 4: Farzedelim ki $0 < a \leq K$, $0 < m < \frac{a^2 + 2aK + K^2}{4K}$ ve $0 < \alpha < 1$ olsun. Üstelik $\alpha \neq \frac{2}{2+h}$ olsun. Eğer

$$r = r^* = \sqrt{\frac{(a(a + K) - 2Km)^2 M^2}{(a - m)^2 \delta (2 + (-2 + h)\alpha)^2}} + \frac{Ma}{(a - m)(2 + (-2 + h)\alpha)}$$

ise (8) fark denklem sisteminin E_1 denge noktası civarında Neimark-Sacker çatallanması oluşur.

İspat:

$1 - p_0 = 0$ dan kritik çatallanma değeri

$$r^* = \sqrt{\frac{(a(a + K) - 2Km)^2 M^2}{(a - m)^2 \delta (2 + (-2 + h)\alpha)^2}} + \frac{aM}{(a - m)(2 + (-2 + h)\alpha)}$$

olarak bulunur. r nin bu kritik değeri için jakobiyen matris

$$J(r^*) = \begin{pmatrix} -\frac{2h\alpha}{2 + (-2 + h)\alpha} & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

formundadır. Bu matrisin özdeğerleri ise

$$\lambda_{1,2} = \frac{-h\alpha}{2 - 2\alpha + h\alpha} \pm i \frac{2\sqrt{1 - 2\alpha + h\alpha + \alpha^2 - h\alpha^2}}{2k}$$

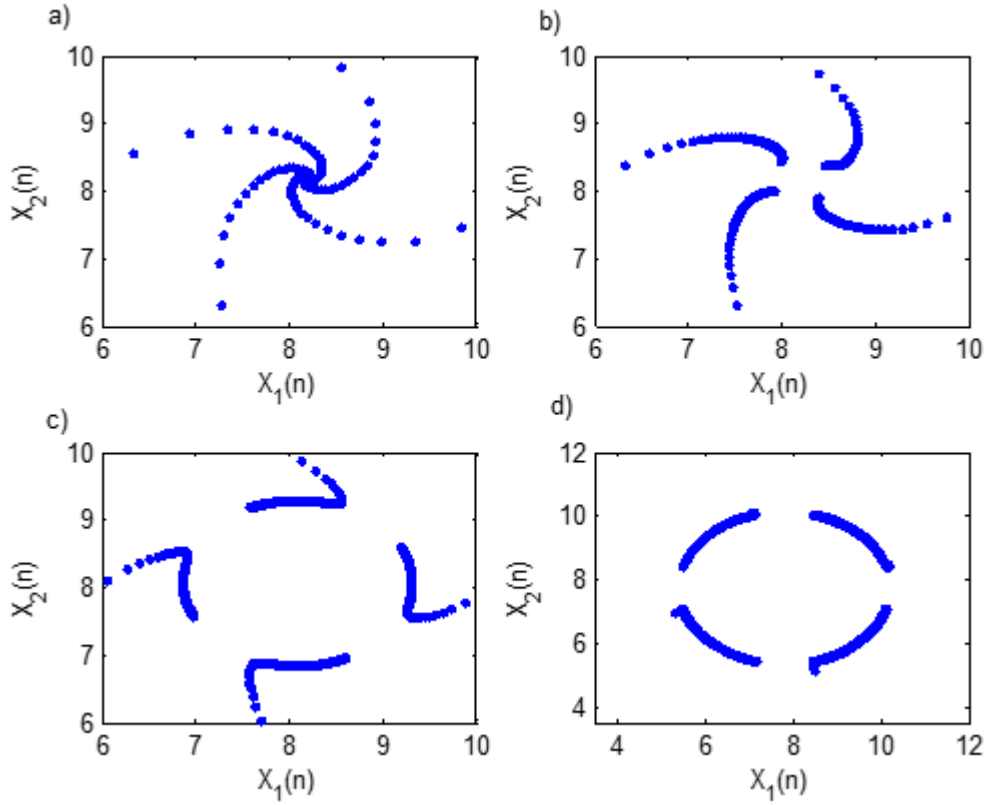
şeklinde elde edilir. Bu özdeğerler için $|\lambda_{1,2}| = 1$ olduğu açıktır. Öte yandan Nonresonance koşulundan eğer $\alpha \neq \frac{2}{2+h}$ ise

$$p_1(r^*) = \frac{2h\alpha}{2 + (-2 + h)\alpha} \neq 0,1$$

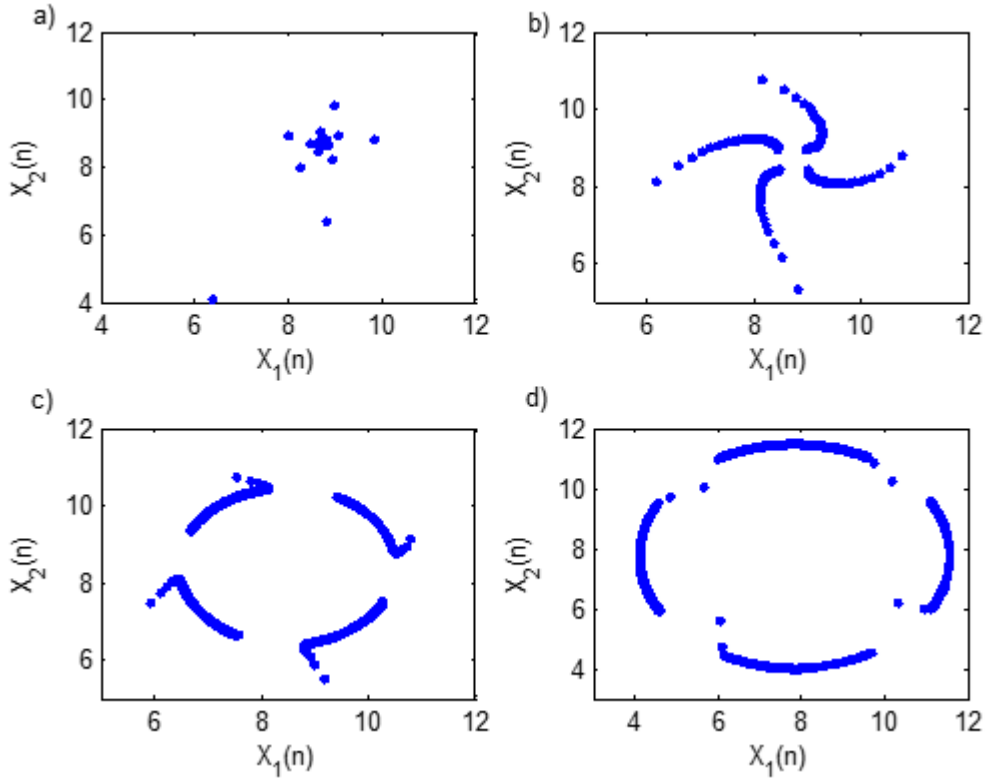
dır. Transversality koşulundan ise eğer $0 < a \leq K$, $0 < m < \frac{a^2 + 2aK + K^2}{4K}$ ve $0 < \alpha < 1$ ise

$$\frac{d|\lambda_{1,2}|}{dr} \Big|_{r=r^*} = \frac{((a + K)^2 - 4Km + a\sqrt{\delta} + K\sqrt{\delta} - 2m\sqrt{\delta})(2 + (-2 + h)\alpha)}{2(a + K + \sqrt{\delta})^2 M} \neq 0$$

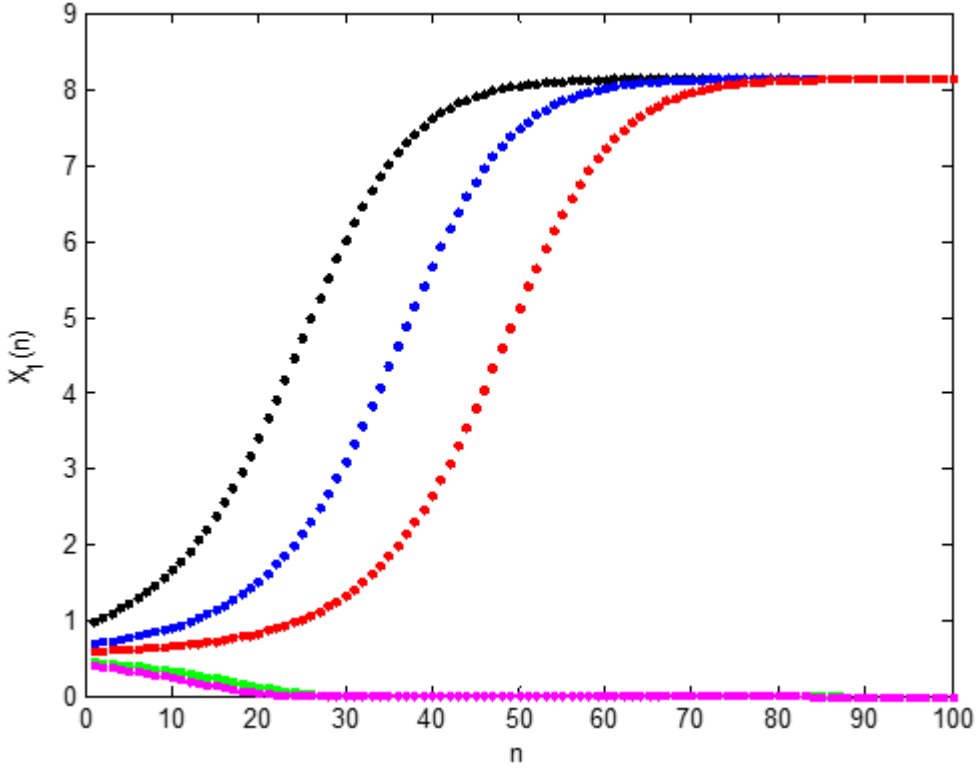
dır.



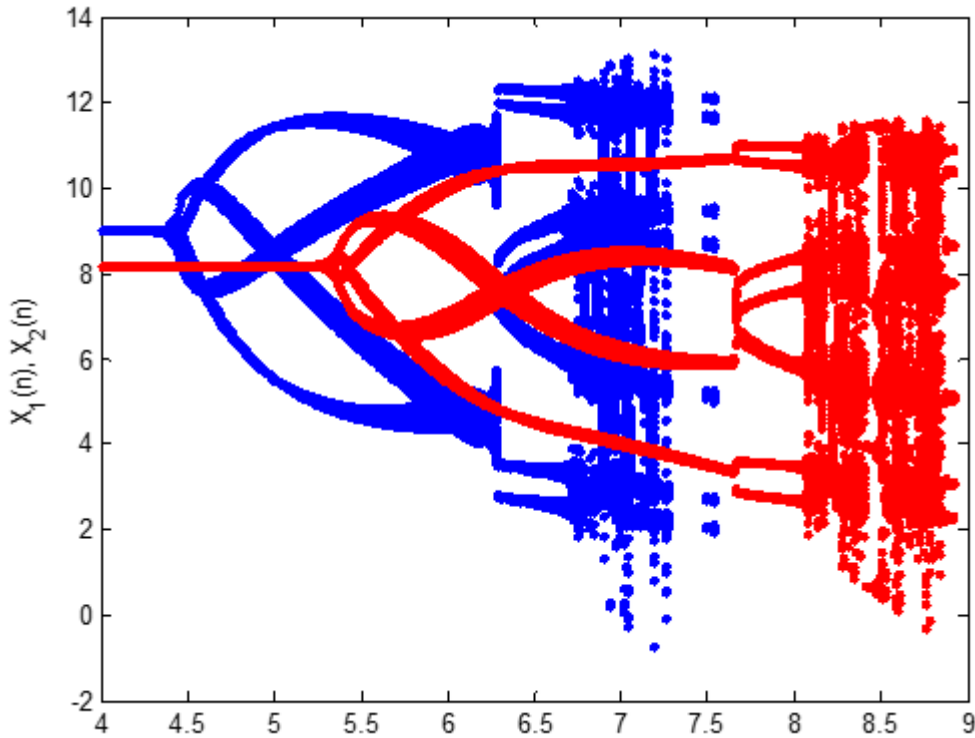
Şekil 3. Güçlü Allee etkisine sahip (8) fark denklem sisteminin E_1 denge noktasındaki faz diyagramları. (a) $r = 5$, (b) $r = r^* = 5.3523$, (c) $r = 5.5$ ve (d) $r = 6$. Diğer parametre değerleri ve başlangıç koşulları Şekil 2 deki gibidir.



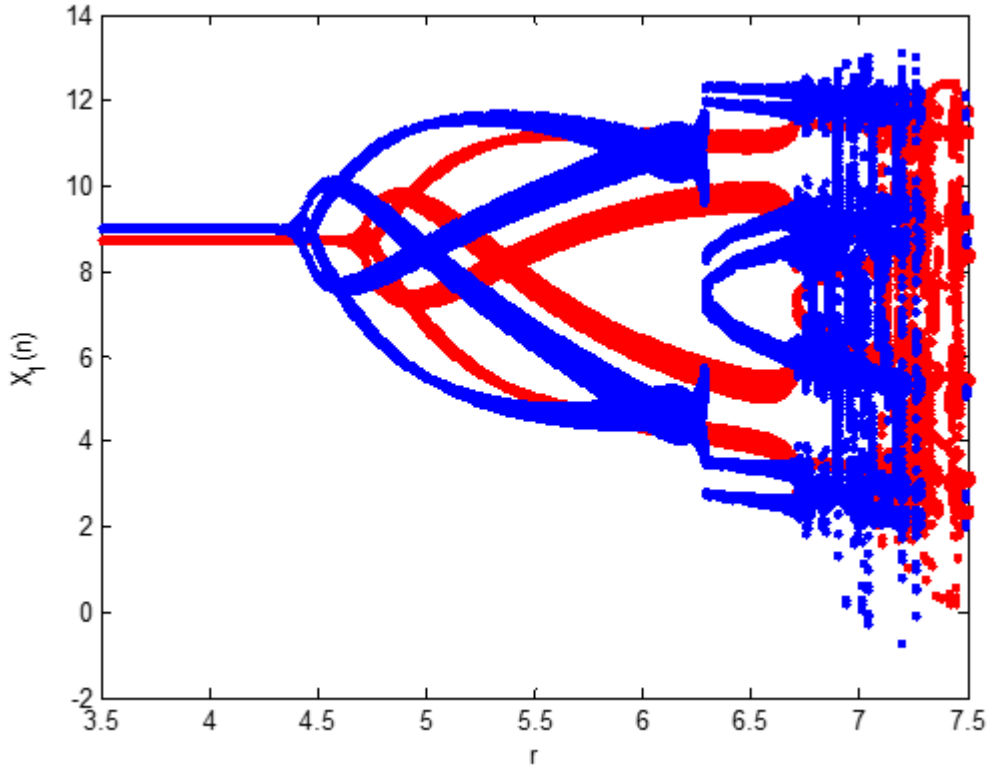
Şekil 4. Zayıf Allee etkisine sahip (8) fark denklem sisteminin E_1 denge noktasındaki faz diyagramları. (a) $r = 3$, (b) $r = r^* = 4.7068$, (c) $r = 5$ ve (d) $r = 6$. Diğer parametre değerleri ve başlangıç koşulları Şekil 1 deki gibidir.



Şekil 5. $K = 9, m = 0.8, h = 0.001, M = 0.88716, \alpha = 0.8, r = 4, a = 0.3$ parametre değerleri (8) fark denklem sisteminin farklı başlangıç koşulları altında E_1 denge noktasındaki dinamik davranışları. $X_1(1) = X_2(1) = 0.7$ (mavi eğri), $X_1(1) = X_2(1) = 0.6$ (kırmızı eğri), $X_1(1) = X_2(1) = 0.45$ (yeşil eğri), $X_1(1) = X_2(1) = 0.4$ (siyah eğri).



Şekil 6. Allee etkisiz (mavi eğri) ve güçlü Allee etkili (kırmızı eğri) ayrık zamanlı Caputo- Fabrizio lojistik denklemlerin çatallanma diagramları. Diğer parametre değerleri ve başlangıç koşulları Şekil 2 deki gibidir.



Şekil 7. Allee etkisiz (mavi eğri) ve zayıf Allee etkili (kırmızı eğri) ayrık zamanlı Caputo-Fabrizio lojistik denklemlerin çatallanma diagramları. Diğer parametre değerleri ve başlangıç koşulları Şekil 1 deki gibidir.

3. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada Ekli Allee etkiye sahip ayrık zamanlı Caputo-Fabrizio lojistik modeli (8) in dinamik davranışları incelenmiştir. (8) fark denklem sisteminin denge noktaları E_0 , E_1 ve E_2 olarak bulunmuştur. E_0 denge noktası zayıf Allee etkisi altında ($0 < m < a$) kararsız iken güçlü Allee etkisi altında ($m > a$) (11) eşitsizliğinin varlığı altında lokal asimptotik kararlı olabilmektedir. E_1 pozitif denge noktası ise $0 < a < K$ ve $0 < \alpha < 1$ olmak üzere zayıf Allee etkisi altında (12) ve (13) veya (14) ve (15) eşitsizlikleri için lokal asimptotik kararlıdır (Şekil 1). $0 < a < K$ ve $0 < \alpha < 1$ olmak üzere güçlü Allee etkisi altında (16) ve (17) eşitsizliklerinin var olması E_1 pozitif denge noktasını lokal asimptotik kararlı yapmaktadır (Şekil 2). E_2 denge noktası ise denge noktasının pozitif olma koşulları altında kararsızdır. Güçlü Allee etkisi altında $K = 9, m = 0.8, h = 0.001, M = 0.88716, \alpha = 0.8, a = 0.7$ parametre değerleri için kritik çatallanma değeri $r^* = 5.3523$ olarak bulunur. r nin bu kritik değerinde Neimark-Sacker çatallanmasının oluşabilmesi için gerekli olan transversality ve non-resonance koşullarının sağlandığı gösterilmiştir (Şekil 3 ve Şekil 6). Zayıf Allee etkisi altında $K = 9, m = 0.3, h = 0.001, M = 0.88716, \alpha = 0.8, a = 0.9$ parametre değerleri için kritik çatallanma değeri $r^* = 4.7068$ olarak bulunur (Şekil 4 ve Şekil 7). Güçlü Allee etkisi altında r parametresine göre çatallanma değeri $r^* = 5.3523$ iken zayıf Allee etkisi altında bu değer $r^* = 4.7068$ olmaktadır. Dolayısıyla güçlü Allee etkisinin zayıf Allee etkisine göre kararlılık bölgesini daha da genişlettiğini söyleyebiliriz.

Şekil 5, farklı başlangıç değerleri altında popülasyonun dinamik davranışlarını göstermektedir.

Ekli Allee etkili (8) ve Allee etkisiz dinamik sistemleri karşılaştırdığımızda Allee fonksiyonunun kararlılık bölgesini genişlettiğini görebiliriz (Şekil 6 ve Şekil 7). Yani diğer bir deyişle Ekli Allee etkiye sahip dinamik sistemde daha geç çatallanmalar oluşmaya başlamaktadır.

Kaynakça

- [1] Djeddi, N., Hasan, S., Al-Smadi, M., Momani, S. 2020. Modified analytical approach for generalized quadratic and cubic logistic models with Caputo-Fabrizio fractional derivative. Alex. Eng. Jour., 59(2020), 5111-5122.

- [2] Vivek, D., Kanagarian, K., Harikrishnan, S. 2016 Numerical solution of fractional-order logistic equations by fractional Euler's method. *IJRASET*, 4(2016), 775-780.
- [3] Zhu, S., Cai, C., Spanos, P. D. 2015. A nonlinear fractional derivative viscoelastic model for rail pads in dynamic analysis of coupled vehicle-slap track system. *Jour. of Sound. and Vibr.*, 335(2015), 304-320.
- [4] Singh, J., Kumar, D., Hammouch, Z., Atangana, A. 2015. A fractional epidemiological model for computer viruses pertaining to a new fractional derivative. *Appl. Math. and Compt*, 316 (2015), 504-515.
- [5] Laj, J., Mao, S., Qui, J., Zhang, Q., Hu, Z., Chen, J. 2016. Investigation progress and Applications of Fractional Derivative Model in Geotechnical Engineering. *Hindawi*, (2016).
- [6] Balcı, E., Öztürk, İ., Kartal, S. 2019. Dynamical behaviour of fractional order tumor model with Caputo and conformable fractional derivative. *Chaos, Solutions and fractals*, 123 (2019), 43-51.
- [7] Javidi, M., Nyamoradi, N. 2013. Dynamic analysis of order prey-predator interaction with harvesting. *Appl. Math. Model*, 37(2013), 8946-8956.
- [8] Aydoğan, S. M., Baleanu, D., Mousalou, A., Rezapour, S. 2017. On approximate solutions for two higher-order Caputo-Fabrizio fractional integro-differential equations. *Adv. Differ. Equ*, (2017), 221.
- [9] Caputo, M., Fabrizio M. 2015. A new Definition of Fractional Derivative without Singular Kernel. *Prog. Fract. Differ. Appl*, 2 (2015), 73-85.
- [10] Bashiri, T., Vaezpour, S. M., Nieto, J. 2018. Approximating Solution of Fabrizio-Caputo Volterra's Model for Population Growth in a Closed System by Homotopy Analysis Method. *Hindawi*, (2018).
- [11] Dokuyucu, M. A., Celik, E., Bulut, H., Baskonus, H. M. 2018. Cancer treatment model with the Caputo-Fabrizio fractional derivative. *Eur. Phys. J. Plus*, 133:92 (2018).
- [12] Baleanu, D., Mohammadi, H., Rezapour, S. 2020. A fractional differential equation model for the Covid-19 transmission by using the Caputo-fabrizio derivative. *Adv. Differ. Equ*, 299(2020).
- [13] Khan, M. A., Hammouch, Z., Baleanu, D. 2019. Modeling the Dynamics of Hepatitis E via the Caputo-Fabrizio derivative. *Math. Model. Nat. Phenom*, 14 (2019).
- [14] Harrouche, N., Momani, S., Hasan, S., Al-Smadi, M. 2021. Computational algorithm for solving drug pharmacokinetic model under uncertainty with nonsingular kernel type Caputo-Fabrizio fractional derivative. *Alex. Eng. J*, 60(2021), 4347-4362.
- [15] Karakaya, H., Öztürk, İ., Kartal, Ş., Gurcan, F. 2021. Dynamical Analysis of Discretized Logistic Model with Caputo-Fabrizio Fraction Derivative. *Comp. Ecol. and Soft*, 11(2021), 21-34.
- [16] Yousef, A., Yousef, F.B. 2019. Bifurcation and stability Analysis of a system of Fractional-Order Differential Equations for a Plant-Herbivore Model with Allee Effect. *mathematics*, DOI: 10.3390/math7050454.
- [17] Vinoth, S., Sivasamy, R., Sathiyathan, K., Rajchakit, G., Hammachukiattikul, P., Vadivel, R., Gunasekaran, N. 2021. Dynamical analysis of a delayed food chain model with additive Allee effect. *Adv. Differ. Equ*, (2021), 2021:54.
- [18] Merdan, H., Gümüş, Ö. A. 2012. Stability analysis of a general discrete-time population model involving delay and Allee effects. *Appl. Maths. Comp*, 219 (2012), 1821-1832.
- [19] Kang, Y., Udiani, O. 2014. Dynamics of a single species evolutionary model with Allee effects. *J. Math. Anal. Appl*. 418 (2014), 492-515.
- [20] Xue, C., Liu, X. 2015. Chaos and bifurcation of a Leslie-Gower food chain with strong Allee effect. *Hindawi*. (2015), <http://dx.doi.org/10.1155/2015/430985>.

- [21] Dennis, B. 1989. Allee effects: Population growth, Critical Density and the Change of extinction. *Nat. Resc. Mod*, 3(1989).
- [22] Cai, Y., Zhao, C., Wang, W., Wang, J. 2015. Dynamics of a Leslie-Gower predator-prey model with additive Allee effect. *App. Math. Model*, 39 (2015), 2092-2106.
- [23] Lv, Y., Chen, L., Chen, F. 2020. Stability and bifurcation in a single species logistic model with additive Allee effect and feedback control. *Adv. Differ. Equ*, 129 (2020).
- [24] Chen, L., Liu, T., Chen, F. 2021. Stability and bifurcation in a two-patch model with additive Allee effect. *Mathematics*, (2021), DOI: 10.3934/math.2022034.
- [25] Qin, L., Zhang, F., Wang, W., Song, W. 2017. Interaction between Allee effects caused by organism-environment feedback and by other ecological mechanisms. *Plos. One*, 12(2017).
- [26] Koca, I. 2018. Efficient numerical approach for solving fractional partial differential equations with non-singular kernel derivatives. *Chaos Solutions Fractals* 116 (2018), 278-286.
- [27] Noupoue, Y., Y., Tandogan, Y., Awadalla, M. 2019. On numerical techniques for solving the fractional logistic differential equation,. *Adv. Differ. Equ*, 108 (2019).

Determination of the Most Appropriate Housing Loan Provider with the MABAC Method Considering Environmental, Social and Economic Criteria

Fatma ŞENER FİDAN* 

*₁ Abdullah Gül Üniversitesi Teknoloji Transfer Ofisi, KAYSERİ

(Alınış / Received: 31.10.2022, Kabul / Accepted: 11.12.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 02.05.2023)

Keywords

Housing Loan,
Bank,
Sustainability,
MCDM,
MABAC,

Abstract: The banking sector in Turkey is one of the most important industries with its asset size, and loans are the largest item in the sector. Due to global legal regulations and increasing competition, banks have to consider environmental and social factors as well as economic factors in order to maintain their current position. Therefore, in this study, a Multi-Criteria Decision Making (MCDM) problem has been put forward for the evaluation of housing loans provided by banks by considering environmental and social criteria as well as economic aspects. A Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison (MABAC) method was used in the integrated evaluation of 7 banks located in Turkey with the criteria obtained from the literature. In the ranking obtained, Ziraat Bank took the first place, İş Bank took the second place and Vakıf Bank took the third place.

Çevresel, Sosyal ve Ekonomik Kriterler Dikkate Alınarak MABAC Yöntemi ile En Uygun Konut Kredisi Sağlayıcının Belirlenmesi

Anahtar Kelimeler

Konut Kredisi,
Banka,
Sürdürülebilirlik,
ÇKKV,
MABAC,

Öz: Türkiye'de bankacılık sektörü, aktif büyüklüğü ile en önemli sektörlerden biri olup sektörün en büyük aktif kalemi olan kredilerdir. Küresel yasal düzenlemeler ve artan rekabet nedeniyle bankalar mevcut konumlarını koruyabilmek için ekonomi faktörlerin yanı sıra çevresel ve sosyal faktörleri de göz önünde bulundurma zorundadırlar. Bu nedenle bu çalışmada, bankalar tarafından sağlanan konu kredisinin ekonomik değerlendirmesinin yanı sıra çevresel ve sosyal kriterleri de dikkate alınarak değerlendirilmesi için bir Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) problemi ortaya konulmuştur. Literatürde elde edilen kriterlerle Türkiye'de yerleşik 7 bankanın bütünlük değerlendirmesinde Çok Nitelikli Sınır Yakınlaştırma Alanı Karşılaştırması (MABAC) metodu kullanılmıştır. Elde edilen sıralama da Ziraat Bankası birinci, İş Bankası ikinci ve Vakıfbank üçüncü sırada yer almıştır.

*Corresponding Author, email: fatmasener@gmail.com

1. Introduction

The banking sector in Turkey was one of the most important sectors with an asset size of ₺12,699,119 in August 2022 [1]. Loans, which were the largest asset item in August 2022, amounted to ₺6,661,162. The sector's total assets increased by 37.8% in 2021, while its total loans increased by 35.5%. Asset sizes and growth rates clearly reveal the size of the banking sector. For this reason, banks have a decisive mission with their services in all kinds of issues such as the environment and social justice. Because everyone, between the public and private sectors, from the states to individuals, needs banks. However, due to increasing competition and various legal regulations, banks have to consider environmental factors as well as economic factors in order to maintain their current positions [2]. Today, the protection and improvement of the environment have gained importance in the banking sector as it is an important issue that every sector focuses on. Many banks have started to publish reports as well

as their environmental and social impacts besides their economic activities. One of the most important problems in this sector is the greenhouse gas reporting rate with methods such as CDP (Carbon Disclosure Project).

One of the sectors where competition is most intense, banks' efforts in the field of environmental impacts have now become important for consumers as well. When it concerns loans, which are the most valuable asset for banks, consumers are typically cost-conscious. As in other industries, environmentally concerned consumers are on the verge of favoring banks that consider their environmental impact when determining their bank loan choices. Because it is not possible to ignore the environmental impacts of banks with significant economic size.

In the literature, the studies on the bank selection of the customers were primarily in the form of determining the selection criteria. For instance, Alferos and Cristobal [3] discovered that the Philippines' savings rate, convenient location, and overall quality of service were the most crucial factors when choosing a bank, followed by the availability of self-banking facilities, fees for bank services, and low interest rates on loans. According to Ta and Har's [4] research, Singaporeans choose their banks based on the caliber of their services, staff recommendations, and supplementary services. Dhinaiyagovind [5] looked at the factors influencing bank preference and selection criteria in India and discovered that a bank's reputation was the most crucial factor. Shammami and Mili [6] found that loan and deposit interest rates and transaction costs were the main factors used to attract customers in the selection of banks. Utilizing earlier research from the literature and expert input, Akpınar [7] created the bank selection criteria for Turkish consumers. Ten determined bank selection criteria were feeling special, low service fees, financial advice, confidentiality, speed, variety of services, easy credit, easy access, ease of use, total service quality. On the other hand, Koçak and Çalık [8] employed six variables to evaluate five banks in their model, including the number of ATMs, fees and commissions, guidance, and employee characteristics. Environmental and relatively social criteria have been ignored in most of these studies, which evaluate banks by determining bank selection criteria.

There has been an increasing interest in the literature recently for the evaluation of branches in terms of sustainability. Khan et al. [9], and Sobhani et al. [10] for Bangladeshi banks; Roca and Searcy [11] for Canadian banks; Kumar et al. [12] for the Indian banking sector; Weber [13] for Chinese banks; Nobanee and Fifties [14] for United Arab Emirates banks, and Aras et al. [15] for Turkish banks carried out corporate sustainability analyzes with various methods. Financial and non-financial reports, websites and sustainability reports were generally taken into account in these analyzes. However, none of these studies performed analysis at the level of a banking product.

The application of MCDM problems to bank selection was available in the literature and was very limited. For example, Javalgi et al. [16] studied bank selection in the USA using Analytical Hierarchy Process (AHP). Arslan [17] used Simple Multi-Attribute Rating Technique (SMART) and Evaluation based on Distance from Average Solution (EDAS) methods to select the most suitable bank for a loan in Turkey. As a result of the analysis, Ziraat Bank ranked first. Koçak and Çalık [8] used the Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) technique to rank different banks, whereas they employed AHP in both the classical logic and fuzzy logic environments to study the factors influencing consumer choice in the bank selection process. Eş and Kamacı [18] analyzed the banks operating in Turkey using EDAS and A new additive ratio assessment (ARAS) methods, and the sustainability performances of the banks were listed. Chien et al. [19] employed Fuzzy Analytical Network Process (FANP) and TOPSIS methods to select the best leasing company. Akpınar [7] used TOPSIS and Elimination and Choice Translating Reality (ELECTRE) methods to determine the bank selection criteria of consumers in Turkey. Shammami and Mili [6] applied a fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) multi-criteria decision model, ranking customers' priorities in the selection of commercial banks. The methods generally used in bank selection problems were limited to AHP, EDAS, ARAS, ELECTRE and TOPSIS.

In the literature, the number of studies measuring corporate sustainability performance using MCDM methods was quite limited. Özçelik and Avcı Öztürk [20] measured the sustainability performance of banks using the gray relational analysis (GIA) method, using sustainability reports. The banks with the best performance were TSKB, Garanti Bank and Akbank. Goyal et al. [21] evaluated corporate sustainability practices using the AHP method. The investigation' findings showed that the most crucial practices for enhancing a company's performance in terms of sustainability were those related to market value, environmental management and strategy, development and research pollution prevention, corporate management, and investor responsibility. Aras et al. [22] and Ömürbek et al. [23], on the other hand, evaluated the sustainable performance of various branches in Turkey with the entropy-based TOPSIS and ARAS, multi objective optimization on the basis of simple ratio analysis (MOOSRA) and Complex Proportional Assessment (COPRAS) methods, respectively. Rebai et al. [24] evaluated three French banks with the AHP method and Korzeb and Samaniego-Medina [25] evaluated the banks in Poland with the TOPSIS method and revealed their sustainability performance.

As a result of the literature review, in most of the bank selection studies, the criteria that include the environmental and social dimensions of sustainability were used very limitedly, while the studies evaluating these dimensions generally focus on the measurement of the sustainability performance of the banks and do not make an evaluation on the basis of credit products in terms of conscious consumers, and generally limited MCDM methods were used in bank selection problems. It has been determined that no one uses the MABAC method. The MABAC technique, a straightforward and logical approach to problem-solving, was chosen because the resulting findings are stable and account for the hidden values of gains and losses [26], [27]. Moreover, it has been found that the measurement of sustainability performance needs more work, especially in the field of financial services [15], [28]. This study proposed to fill these gaps in the literature by evaluating banks by using the MABAC method by including social and environmental criteria as well as economic criteria for housing loan preference by conscious customers.

Housing loan selection, which is conducted by considering many different environmental, social, and economic criteria, is a MCDM problem for consumers. For this reason, in this study, an MCDM problem has been put forward for evaluating the housing loan provided by the banks in Turkey by considering their environmental and social impacts in addition to their economic impacts. Using the MABAC MCDM approach, a rating of the banks offering housing loans was given. This research is structured as follows; the second section was devoted to materials and methods. In the first part of the second section, the MABAC method was introduced, and in the second part, the problem was defined and the MABAC method was applied. The results and conclusion were presented in the study's final section.

2. Material and Method

The aim of this study was to rank the alternatives for housing loan use from banks residing in Turkey by MABAC method, considering environmental and social criteria as well as economic criteria. In the next parts of the study, after the definitions of the MABAC method were made, the application phase of the problem was started.

2.1. MABAC method

Although the MABAC method, developed by Pamučar and Ćirović [29] in 2015, was a new approach, it has been very popular in the literature. Examples of these were material, enterprise resource planning, personnel selection and analysis of satisfaction level [30]–[33]. The MABAC Steps are given below;

Step 1: Creation initial decision matrix (X). In this step, the evaluation of m alternatives by n criteria are conducted. The alternatives are presented with the vectors $A_i (= X_{i1}, X_{i2}, \dots,)$ where X_{ij} is the value of the i alternative by j criterion ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$) where m is the alternative number, n is total number of criteria. The criteria are presented with the vectors C_n .

$$X = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

Step 2: Normalization of initial decision matrix (X) elements.

$$N = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & \dots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & & t_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{m1} & t_{m2} & \dots & t_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

Elements of normalized matrix (N) are obtained by applying the expression:

- a) For benefit-type criteria

$$t_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i^-}{x_i^+ - x_i^-} \quad (3)$$

b) For cost-type criteria

$$t_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i^+}{x_i^- - x_i^+} \quad (4)$$

where X_{ij} , X_i^+ and X_i^- present the elements of initial decision matrix (X), where in X_i^+ and X_i^- are defined as follows:

$X_i^+ = \max (x_1, x_2, \dots, x_m)$ represents maximum values of the observed criterion by alternatives.

$X_i^- = \min (x_1, x_2, \dots, x_m)$ represents minimal values of the observed criterion by alternatives

Step 3: Calculation of weighted matrix (V) elements.

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Weighted matrix (V) elements are calculated based on the expression (6):

$$V_{ij} = w_i * t_{ij} + w_i \quad (6)$$

where t_{ij} presents the elements of normalized matrix (N), w_i presents weight coefficients of criteria.

Step 4: Determination of border approximate area matrix (G). The border approximate area for every criterion is defined according to the expression (7)

$$g_i = \left(\prod_{j=1}^m v_{ij} \right)^{1/m} \quad (7)$$

where v_{ij} presents weighted matrix elements (V), m presents total alternatives number.

Step 5: Calculation of matrix elements of alternative distance from the border approximate area (Q)

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & \dots & q_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{m1} & q_{m2} & \dots & q_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

The alternative distance from the approximate border area (q_{ij}) is determined as the difference of weighted matrix elements (V) and the values of border approximate area (G);

$$Q = V - G \quad (9)$$

Step 6: Locations are determined according to the border proximity area. The alternative A_i can belong to the border approximate area (G), upper approximate area (G^+) or lower approximate area (G^-). Belonging of the alternative A_i to the approximate area is determined based on the expression (10).

$$A_i \in \begin{cases} G^+ & \text{if } q_{ij} > 0 \\ G & \text{if } q_{ij} = 0 \\ G^- & \text{if } q_{ij} < 0 \end{cases} \quad (10)$$

Step 6. Ranking alternatives. The total of the alternative's (11) distances from the approximate area (q_j) area is used to calculate the values of criteria functions by alternatives. The final values of the criteria function of alternatives are calculated by summing the matrix elements Q along the lines.

$$S_i = \sum_{j=1}^n q_{ij}, j = 1, 2, \dots, n, i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

where n presents the number of criteria, m presents the number of alternatives.

2.2. Problem statement

In order to evaluate the housing loan provided by banks in Turkey for conscious consumers in terms of environmental, economic and social dimension, criteria and weights were determined at the first stage. In the second stage, the banks were ranked by evaluating the alternatives in the problem with the MABAC method.

Criteria selection

The most important step of social, economic and environmental evaluation is to determine the criteria correctly. For this reason, the criteria to be used in this study were carried out by reviewing the literature. The criteria and details are given in Table 1. Information about the criteria was obtained from the banks' websites and sustainability reports. For the criteria selected for the evaluation, 21 banks residing in Turkey and providing housing loans were examined, and finally, 7 banks whose data were available for all criteria were included in the evaluation.

Table 1. Criteria List

Criteria	Name	Unit	Max/Min	Weight	Reference
C1	Capital adequacy ratio	%	Max	0.14	[20]
C2	Total branches	Number	Max	0.1	[34]
C3	Total employees	Number	Max	0.1	[34]
C4	Total ATM	Number	Max	0.2	[35]
C5	Scope 1 Emissions	TCO2e	Min	0.11	[20]
C6	Scope 2 Emissions	TCO2e	Min	0.11	[20]
C7	Interest rate	%	Min	0.2	[36]
C8	Credit allocation file cost	TL	Min	0.012	[17]
C9	Appraisal fee	TL	Min	0.018	[37]
C10	Housing facility fee	TL	Min	0.01	[37]

The MABAC implementation

The solution of the problem with the MABAC method is given below step by step.

Step 1: Creation initial decision matrix (X) were created and given in Table 2. Maximum and minimum values of criteria in the initial decision matrix were calculated and given in Table 3.

Table 2. Initial Decision Matrix (X)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10

Am	Max	Max	Max	Max	Min	Min	Min	Min	Min	Min
A1	14.0	841	18354	5306	18643	0	29.69%	5000	1450	250
A2	16.5	1730	24607	7264	34198	38564	15.58%	5000	1092	365
A3	21.1	710	12184	5202	18187	24300	26.28%	5000	1070	207
A4	14.5	1030	20339	4059	15795	31406	14.40%	5000	1100	390
A5	20.4	1118	22802	6555	22528	8784	23.40%	5000	1890	405
A6	14.7	940	16928	4222	12796	5406	15.48%	10000	1500	0
A7	16.3	801	15452	4526	15717	25450	25.32%	5000	1351	405

Table 3. Maximum and Minimum Values of Criteria in the Initial Decision Matrix

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
X _{j+}	21.1	1730	24607	7264	34198	38564	0.296	10000	1890	405
X _{j-}	13.9	710	12184	4059	12796	0	0.144	5000	1070	0

Step 2: Normalization of initial decision matrix (X) elements were calculated and given in Table 4.

Table 4. Normalized Initial Decision Matrix

Am	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
A1	0	0.128	0.497	0.389	0.727	1	0	1	0.537	0.383
A2	0.354	1	1	1	0	0	0.923	1	0.973	0.099
A3	1	0	0	0.357	0.748	0.370	0.223	1	1	0.489
A4	0.069	0.314	0.656	0	0.860	0.186	1	1	0.963	0.037
A5	0.902	0.400	0.855	0.779	0.545	0.772	0.411	1	0	0
A6	0.104	0.225	0.382	0.051	1	0.860	0.929	0	0.476	1
A7	0.326	0.089	0.263	0.146	0.864	0.340	0.286	1	0.657	0

Step 3: Weighted matrix (V) elements were calculated and given in Table 5.

Table 5. Weighted Decision Matrix

Am	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
A1	0.140	0.113	0.150	0.278	0.190	0.220	0.200	0.024	0.028	0.014
A2	0.190	0.200	0.200	0.400	0.110	0.110	0.385	0.024	0.036	0.011
A3	0.280	0.100	0.100	0.271	0.192	0.151	0.245	0.024	0.036	0.015
A4	0.150	0.131	0.166	0.200	0.205	0.130	0.400	0.024	0.035	0.010
A5	0.266	0.140	0.185	0.356	0.170	0.195	0.282	0.024	0.018	0.010
A6	0.154	0.123	0.138	0.210	0.220	0.205	0.386	0.012	0.027	0.020
A7	0.186	0.109	0.126	0.229	0.205	0.147	0.257	0.024	0.030	0.010

Step 4: Border approximate area matrix (G) were determined and given in Table 6.

Table 6. Boundary Proximity Matrix

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
g _i	0.189	0.128	0.149	0.270	0.181	0.161	0.298	0.022	0.029	0.012

Step 5: Matrix elements of alternative distance from the border approximate area (Q) were calculated and given in Table 7.

Table 7. Distances of Alternatives from the Boundary Proximity Area

Am	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
A1	-0.049	-0.015	0.001	0.008	0.009	0.059	-0.098	0.002	-0.001	0.001
A2	0.001	0.072	0.051	0.130	-0.071	-0.051	0.086	0.002	0.006	-0.001
A3	0.091	-0.028	-0.049	0.002	0.012	-0.010	-0.054	0.002	0.007	0.002
A4	-0.039	0.004	0.017	-0.070	0.024	-0.031	0.102	0.002	0.006	-0.002
A5	0.078	0.012	0.037	0.086	-0.011	0.034	-0.016	0.002	-0.011	-0.002
A6	-0.034	-0.005	-0.010	-0.059	0.039	0.044	0.087	-0.010	-0.003	0.008
A7	-0.003	-0.019	-0.022	-0.040	0.024	-0.014	-0.041	0.002	0.001	-0.002

Step 6: Locations were determined according to the border proximity area and alternatives were ranked. The Ranked bank and their S_i are given in Table 8.

Table 8. Alternative Ranking

Rank	Bank	Am	S_i
1	Ziraat Bank	A2	0.227
2	İş Bank	A5	0.209
3	Vakıflar Bank	A6	0.056
4	Halk Bank	A4	0.013
5	Akbank	A3	-0.024
6	Garanti Bank	A1	-0.082
7	Yapı Kredi Bank	A7	-0.115

3. Results and Conclusion

According to the results, it was determined that the bank preference that best meets the determined criteria of the consumers should be in favor of Ziraat Bank. The comparison of the S_i values is given in Figure 1. The last preferred bank was Yapı Kredi Bank. Ziraat Bank was the bank with the best ranking according to environmental, social and economic criteria with a S_i value of 0.227. İş Bank followed this bank with a S_i value of 0.207. The values of these two banks were calculated very close to each other. The S_i value of Vakıf Bank, which was the third bank in the ranking with 0.056 S_i value, which was quite far from the value of the first two banks. Finally, the S_i value of Halk Bank, the fourth bank, was calculated as 0.013. The S_i values of Akbank, Garanti and Yapı Kredi Banks were calculated as negative. Akbank had a S_i value of -0.024 and Garanti Bank had a S_i value of -0.082. Lastly, Yapı Kredi Bank had a S_i value of -0.115. With these values, Yapı Kredi Bank was the bank with the worst ranking.

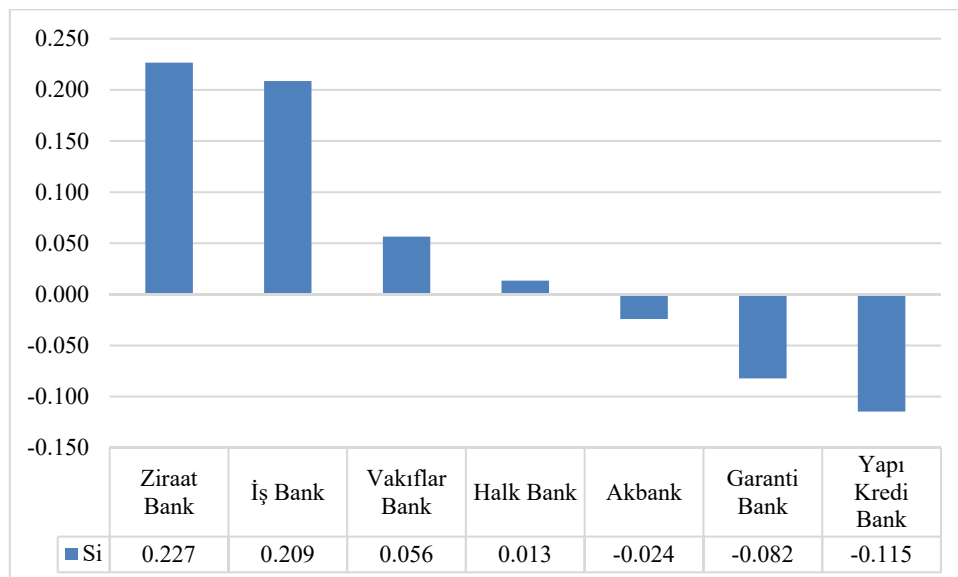


Figure 1. Ranking of Alternatives

The banks with the highest Capital adequacy ratio, total branches, employees, and ATMs were Ziraat Bank and İş Bank. Since it was desirable that these requirements be maximal, the contribution of these data to the achieved findings was substantial. However, despite being the bank with the greatest scope 1 and scope 2 emissions, Ziraat Bank placed top due to its low interest rate, low appraisals fees, and low housing facility fees. Despite having a moderate interest rate compared to other banks, İş Bank scored second due to its scope 2 emissions and low appraisal and housing facility fees. Vakıf Bank, on the other hand, was placed third since it was the bank with the lowest scope 1 emissions and the second-lowest interest rate, despite the fact that other criteria values were of a moderate nature. Halk Bank was the fourth-ranked bank with the lowest interest rate and the third-highest number of employees. Although Akbank had the lowest total branch value, it ranked fifth because it had the lowest appraisal and housing facility fees. The sixth-ranked Garanti Bank had the lowest scope 2 emissions, but its interest rate was high and its capital adequacy ratio was inadequate. The bank in last order, Yapı Kredi, had one of the three highest interest rates, but all other criteria values were average.

Ziraat Bank ranked first in a study conducted by Arslan [17] to determine which of four Turkish banks offers the most suitable loan with SMART and EDAS methods. This result was identical to the findings of this study. However, Garanti Bank ranked second in the evaluation based solely on economic criteria, but seventh in this study that also considers environmental and social criteria. Akbank ranked third in Arslan's [17] study and fifth in this study. Although İş Bank, the final bank evaluated, was ranked fourth, it was ranked second in this research. These results demonstrated that decision makers can make different choices if additional dimensions, such as environmental assessment criteria, are considered.

The aim of this study was to evaluate the housing loans provided by the banks operating in Turkey based on the economic, social and environmental criteria. The MABAC method, which has not been used in this field before, was chosen as the evaluation method. According to the results, in the integrated evaluation of the 7 banks examined, Ziraat Bank ranked first, İş Bank was ranked second, and Vakıf Bank ranked third. These results revealed that only the economic point of view cannot be sustained in the evaluation of bank products and that environmental and social criteria are important. The findings of this study provided scientists, policy makers and industry experts with a perspective on the criteria that are important in consumer preference for banking products. In addition, with the increasing importance given to environmental and economic impacts, it indirectly contributed to the development of this field. In future studies, this study can be expanded by expanding the selected criteria and applying other MCDM methods.

Acknowledgment

N/A

References

- [1] BDDK. 2022. Türk Bankacılık Sektörünün Konsolide Olmayan Ana Göstergeleri. [https://www.bddk.org.tr/BultenAylik/tr/Home/HaberBulteni#:~:text=Bankalar%20taraf%C4%B1ndan%20Kurumumuza%20raporlanan%20verilere,3.483.656%20milyon%20TL%20artm%C4%B1%C5%9Ft%C4%B1r.\(Erişim Tarihi: 30.10.2022\).](https://www.bddk.org.tr/BultenAylik/tr/Home/HaberBulteni#:~:text=Bankalar%20taraf%C4%B1ndan%20Kurumumuza%20raporlanan%20verilere,3.483.656%20milyon%20TL%20artm%C4%B1%C5%9Ft%C4%B1r.(Eri%C5%9FimTarihi:30.10.2022).)
- [2] Gerekan, B., Bulut, E. 2018. Sürdürülebilir Sosyal Sorumlulukta Üç Boyutlu Raporlama: Türkiye’de Sürdürülebilirlik Raporu Yayınlayan Bankalar Üzerine Bir Araştırma. Sosyal Bilimler Metinleri, 2018(1),80–8
- [3] Dennis, B.A., Jerry, S.C. 2018. Bank Selection Criteria by the Students: Input to the Banking Sector of the Philippines. International Journal of Management and Commerce Innovations, ISSN 2348-7585, 5(2)
- [4] Ta, H.P., Har, K.Y. 2000. A study of bank selection decisions in Singapore using the analytical hierarchy process. International Journal of Bank Marketing, 18(4), 170-180
- [5] Dhinaiya, G.M. 2016. A study on determinants of preference and selection of bank. International Journal of Research in Business Management, 4(9)
- [6] Al-Shammari, M., Mili, M. 2021. A fuzzy analytic hierarchy process model for customers’ bank selection decision in the Kingdom of Bahrain. Operational Research, 21(3), 1429–46
- [7] Akpınar, Ayhan. 2019. Investigation of the selection criteria of consumers and the distribution channels strategies of the banks with multicriteria decision-making methods, KTO Karatay Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 151s, Konya
- [8] Koçak, M., Çalık, A. 2020. Banka seçim tercihlerinin bulanık kümelerle dayalı yeni bir karar verme çerçevesi ile değerlendirilmesi. İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi. 19(2020), 73–94
- [9] Islam, M.A., Fatima, J.K., Ahmed, K. 2011. Corporate Sustainability Reporting of Major Commercial Banks In Line With GRI: Bangladesh Evidence. Social Responsibility Journal, 7(3), 347-362

- [10] Sobhani, F.A., Amran, A., Zainuddin, Y. 2012. Sustainability Disclosure in Annual Reports and Websites: A Study of the Banking Industry in Bangladesh. *Journal of Cleaner Production*, 23(1), 75–85
- [11] Roca, L.C., Searcy, C. 2012. An analysis of indicators disclosed in corporate sustainability reports. *Journal of cleaner production*, 20(1), 103–18
- [12] Kumar, R., Pande, N., Afreen, S. 2018. Developing a GRI-G4-based persuasive communication framework for sustainability reporting (SR): Examining top 10 Indian banks. *International Journal of Emerging Markets*, 13(1), 136-161
- [13] Weber, O. 2016. The sustainability performance of Chinese Banks: institutional impact. SSRN 2752439
- [14] Nobanee, H., Ellili, N. 2016. Corporate sustainability disclosure in annual reports: Evidence from UAE banks: Islamic versus conventional. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 55, 1336–1341
- [15] Aras, G., Tezcan, N., Furtuna, Ö. 2018. Evaluation of Turkish Banking Industry based on Multi-Dimensional Corporate Sustainability Model: Comparison between State Owned and Private Banking. *Ege Academic Review*, 18(1)
- [16] Javalgi, R.G., Armacost, R.L., Hosseini, J.C. 1989. Using the analytic hierarchy process for bank management: Analysis of consumer bank selection decisions. *Journal of Business Research*, 19(1), 33–49
- [17] Arslan, H.M. 2018. Determination of the Most Suitable Credit Provider in Banking Services with Multi Criteria Decision Making Methods. *International Journal of Engineering Science Invention (IJESI)*, 7(3)
- [18] Abdulhamit, E., Kamacı, T.B. 2020. Bankaların Sürdürülebilirlik Performanslarının Edas ve Aras Yöntemleriyle Değerlendirilmesi. *Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 20(4), 807–31
- [19] Chien, F., Wang, C.N., Chau, K.Y., Nguyen, V.T., Nguyen, V.T. 2021. Sustainability in the Business Sector: A Fuzzy Multicriteria Decision-Making Model for Financial Leasing Company Selection of the Vietnamese SMEs. *SAGE*, 11(3):21582440211036080
- [20] Özçelik, F., Avcı, Ö. B. 2014. Evaluation of Banks' Sustainability Performance in Turkey with Grey Relational Analysis. *Journal of Accounting & Finance*, (63)
- [21] Goyal, P., Rahman, Z., Kazmi, A.A. 2015. Identification and Prioritization of Corporate Sustainability Practices Using Analytical Hierarchy Process. *Journal of Modelling in Management*, 10(1), 23-49
- [22] Aras, G., Tezcan, N., Furtuna, Ö.K. 2016. Geleneksel Bankacılık Ve Katılım Bankacılığında Kurumsal Sürdürülebilirlik Performansının Topsis Yöntemiyle Karşılaştırılması. *İsletme İktisadi Enstitüsü Yönetim Dergisi*, 27(81), 58 - 81
- [23] Ömürbek, V., Aksoy, E., Akçakanat, Ö. 2017. Bankaların Sürdürülebilirlik Performanslarının ARAS, MOOSRA ve COPRAS Yöntemleri ile Değerlendirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 8(19), 14–32
- [24] Rebai, S., Azaiez, M.N., Saidane, D. 2016. A Multi-Attribute Utility Model for Generating a Sustainability Index in The Banking Sector. *Journal of Cleaner Production*, 113(1), 835–849
- [25] Korzeb, Z., Samaniego-Medina, R. 2019. Sustainability Performance, A Comparative Analysis in The Polish Banking Sector. *Sustainability*, 11(3), 653
- [26] Wang, J., Wei, G., Wei, C., Wei, Y. 2020. MABAC Method for Multiple Attribute Group Decision Making Under Q-Rung Orthopair Fuzzy Environment. *Defence Technology*, 16(1), 208–16
- [27] Zhao, M., Wei, G., Chen, X., Wei, Y. 2021. Intuitionistic Fuzzy MABAC Method Based On Cumulative Prospect Theory for Multiple Attribute Group Decision Making. *International Journal of Intelligent Systems*, 36(11), 6337–59
- [28] Ecer, F. 2019. A Multi-Criteria Approach Towards Assessing Corporate Sustainability Performances of Privately-Owned Banks: Entropy-ARAS Integrated Model. *Eskişehir Osmangazi University Journal of Economics and Administrative Sciences*, 14(2), 365–90.
- [29] Pamučar, D., Ćirović, G. 2015. The Selection of Transport and Handling Resources in Logistics Centers Using Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison (MABAC). *Expert Systems with Applications*, 42(6), 3016–28
- [30] Bakır, M. 2019. SWARA ve MABAC Yöntemleri İle Havayolu İşletmelerinde Ewom'a Dayalı Memnuniyet Düzeyinin Analizi. *İzmir İktisat dergisi*, 34(1), 51–66
- [31] Ulutaş, A. 2019. Entropi ve MABAC Yöntemleri İle Personel Seçimi. *OPUS International Journal of Society Researches*, 13(19), 1552–73
- [32] Xue, Y.X., You, J.X., Lai, X.D., Liu, H.C. 2016. An Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy MABAC Approach for Material Selection with Incomplete Weight Information. *Applied Soft Computing*, 38:703–13
- [33] Ayçin, E. 2019. Kurumsal Kaynak Planlama (KKP) Sistemlerinin Seçiminde MACBETH ve MABAC Yöntemlerinin Bütünleşik Olarak Kullanılması. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 33(2), 533–52
- [34] Aydın, Y. 2020. A Hybrid Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Model Consisting of SD And COPRAS Methods In Performance Evaluation Of Foreign Deposit Banks. *Equinox Journal of Economics Business and Political Studies*, 7(2), 160–76
- [35] Hemmati, M., Dalghandi, S., Nazari, H. 2013. Measuring Relative Performance of Banking Industry Using a DEA and TOPSIS. *Management Science Letters*, 3(2), 499–504

- [36] Marjanović, I., Popović, Ž. 2020. MCDM approach for assessment of financial performance of serbian banks, ss 71-90. Horobet, A., Polychronidou, P., Karasavoglou, A., ed. 2020. Business Performance and Financial Institutions in Europe. Contributions to Economics, Springer, Cham, 163s
- [37] Wu, H.Y., Tzeng, G.H., Chen, Y.H. 2009. A Fuzzy MCDM Approach for Evaluating Banking Performance Based On Balanced Scorecard. Expert systems with applications, 36(6), 10135-47

Evrişimli Sinir Ağları Kullanılarak Duygu Durum Tespitinin İyileştirilmesi ve Eğitim Verimliliğinin Analizi

Berkay Çakmak^{*,1}, İbrahim Develi²

^{*,1,2}Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, KAYSERİ

(Alınış / Received: 12.02.2023, Kabul / Accepted: 10.04.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 02.05.2023)

Anahtar Kelimeler

Evrişimli Sinir Ağları,
Yüz duygu ifadeleri
tanımlama,
FER2013 veri seti,
Eğitim verimliliği

Öz: Bu çalışmada, yüzdeki duygu ifadelerini tespit etmek için literatürdeki diğer modellerden daha yüksek doğruluk oranına sahip bir evrişimli sinir ağı modeli (CNN) önerilmiştir. Evrişimli sinir ağı modelini eğitmek için yedi duygu kategorisinde insan yüzleri içeren ve 30.000 imge'den oluşan FER2013 veri seti kullanılmıştır. Modelin eğitim doğruluğu %97,83 ve test doğruluğu %83,52 olarak elde edilmiştir. İnternet üzerinden yapılan eğitim ve sunumlarda; dinleyicilerin duygu durumları, geliştirilen CNN modeli ile gerçek zamanlı olarak tespit edilmekte ve tasarlanan algoritma ile eğitim süresince ve eğitimin sonunda katılımcıların duygu yoğunlukları sunucuya zaman bazlı olarak rapor halinde sunulmasını sağlayan bir algoritma geliştirilmiştir. Sunulan rapor sayesinde dinleyicilerin zamana göre duygu durumları analiz edilerek eğitim verimliliği artırılmaktadır.

Improving Facial Expression Detection Using Convolutional Neural Networks and Analysis of Education Efficiency

Keywords

Convolutional Neural
Networks,
Identifying facial expressions
of emotions,
FER2013 dataset,
Online education efficiency

Abstract: In this paper, a convolutional neural network model (CNN) with higher accuracy than other models in the literature is proposed to detect facial emotional expressions. To train the convolutional neural network model, the FER2013 dataset consisting of 30,000 images and human faces in seven emotion categories was used. The training accuracy of the model was 97.83% and the test accuracy was 83.52%. In training and presentations made over the Internet; The emotional states of the listeners are detected in real time with the developed CNN model, and an algorithm has been developed that allows the emotional intensity of the participants to be reported to the presenter on a time basis during the training and at the end of the training with the designed algorithm. Thanks to the presented report, the emotional states of the listeners are analyzed according to time, thereby increasing the educational efficiency.

*İlgili Yazar, email: brkayckmak@gmail.com

1. Giriş

Duygu analizi, insan duygularını görüntü işleme yöntemleri ile tanımayı hedefleyen geniş ve önemli bir araştırma alanıdır. Bir iletişim sırasındaki yüz değişiklikleri, duygusal durumu ileten ilk işaretlerdir [1]. Pek çok sözel olmayan bileşen arasında yüz ifadeleri, duygusal anlam taşımamasından dolayı kişilerarası iletişimdeki temel bilgi kanallarından biridir. Yirminci yüzyıldan beri insanoğlu, içinde büyüdüğü kültürden bağımsız olarak öfke, korku, mutlu, üzgün, küçümseme, iğrenme ve şaşkınlık olmak üzere yedi temel duygu ile duygularını tanımlanmıştır [2].

Geleneksel yüz ifadelerinden duygu analizi yaklaşımları; yüz ve yüz bileşeni algılama, özellik çıkarma ve ifade sınıflandırma olmak üzere üç ana adımdan oluşmaktadır. İlk olarak, bir giriş görüntüsünden bir yüz görüntüsü algılanmaktadır ve yüz bölgesinden yüz bileşenleri (örneğin, gözler ve burun) veya yer işaretleri algılanmaktadır. İkinci olarak, yüz bileşenlerinden çeşitli uzamsal ve zamansal özellikler çıkarılmaktadır. Üçüncüsü, derin öğrenme algoritmaları ile çıkarılan öznitelikleri kullanarak tanıma sonuçları üretilmektedir [3].

CNN, görsel görüntüleri analiz etmek için yaygın olarak uygulanan bir derin sinir ağı sınıfıdır. CNN, ileri beslemeli bir sinir ağıdır ve çok katmanlı algılayıcılar (MLP'ler) olarak da adlandırılmaktadır. CNN'in ana çalışma alanı görüntü tanıma ve görüntü sınıflandırmadır. Evrişim katmanı, bir giriş görüntüsünün özelliklerini eğitim veri kümesinden çıkarmaktadır. CNN modeli; evrişim, birleştirme, düzleştirme ve yoğun katmanlardan oluşmaktadır. Büyük veri kümelerinde daha iyi doğruluk için evrişim katmanları eklenmektedir [4].

Bu çalışmada, görüntü işleme teknolojisi kullanılarak insanların duygularını yüz ifadeleri vasıtasıyla tespit edebilen bir CNN modeli tasarlanmıştır [5]. Tasarlanan CNN modeli, literatürdeki mevcut FER2013 veri seti ile eğitilmiş diğer algoritmalarından daha verimli bir şekilde çalışmaktadır. İnternet üzerinden gerçekleştirilen canlı eğitimlerde gerçek zamanlı olarak elde edilen duygu durumları ile eğitim alan kişilerin zamana göre yoğunluklu duygu durumları analiz edilmektedir. Analiz sonucunda eğitime anlık duygu yoğunluğundaki değişimin bildirim ve eğitim sonunda rapor verilerek eğitim verimliliğinin artırılmasına yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, literatürde bulunan FER2013 veri seti ile eğitilmiş duygu tanıma algoritmalarına göre daha yüksek doğruluk oranına sahip bir makine öğrenmesi modeli eğitilmiştir. Ayrıca çalışma, eğitilen modelin kullanım amacı ile de literatürde bulunan diğer çalışmalardan yüksek oranda ayrılmaktadır. Yüksek doğruluk oranına sahip CNN modeli ve gerçek zamanlı veri işlemeye dayalı raporlar veren algoritma ile literatürdeki çalışmalardan ayrılan bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

2. Literatür Değerlendirmesi

Yüz ifadeleri, duyguları belirtmek için tüm insanlar için ortak sinyaldir. Robotik, tıp, sürüş destek sistemleri gibi birçok alanda uygulama alanı mevcut olduğu için, görüntü işleme ile yüz ifadesi analiz araçları yapmak adına birçok girişimde bulunmaktadır [6].

Literatürde, FER2013 veri seti kullanılarak duygu analizi gerçekleştiren çalışmalar mevcuttur. [7]'de FER2013 veri seti ile eğitilen Xception algoritmasının performansı %61,7 olarak elde edilmiş, ardından yüz görüntüsü harmanlama işlemi ile doğruluk %63'e çıkarılmıştır. [8]'de yapılan çalışmada duygu analizi için bir CNN modeli tasarlanmış ve %57,1 doğruluğa ulaşılmıştır. Başka bir duygu analizi çalışmasında ise FER2013 veri seti ile mini Xception mimarisi eğitilerek %65,97 doğruluğa ulaşılmıştır. Bu çalışmada gerçek zamanlı CNN modeli doğruluğunu da göstermişlerdir [9]. [10]'da hazırlanan 11 katmanlı CNN modeli, FER2013 veri seti ile 106 tekrar boyunca eğitilerek %70 doğruluk oranına ulaşmayı başarmıştır. Bu çalışmada ayrıca yüz ifadelerin hangi ifadeye yüzdesel bağlamda ne kadar benzediği çalışması da yapılmıştır. [11]'de birkaç CNN modeli, önceden eğitilmiş model ve eğitim prosedürleri ile ilgili çalışmalar yapılmış, yapılan çalışmalar karşılaştırılmıştır. [11]'de bir giriş görüntüsü için en yakın eğitim örneklerini seçmek amacıyla bir k-en yakın komşu modeli uygulanmış, sonrasında seçilen eğitim örnekleri üzerinde destek vektör makineleri (SVM) sınıflandırıcısı eğitilmiş ve son olarak SVM sınıflandırıcısı, eğitildiği test görüntüsü için sınıf etiketini tahmin etmek için kullanılmıştır. Bu yöntem ile FER2013 veri seti üzerinde %75,42 doğruluğa ulaşılmıştır. Başka bir çalışmada ise 11 katmanlı bir CNN modeli tasarlanmış olup ölçek değişmeyen özellik dönüşümü (SIFT) metodu bu modele uygulanmıştır. SIFT metodunun amacı düşük hacimli veri kümesi ile yüksek doğruluk yakalamaktır ancak doğruluk oranı %73,4 olarak belirlenmiştir [12]. Bahsedilen çalışmaların başarımları Tablo 1'de özetlenmiştir.

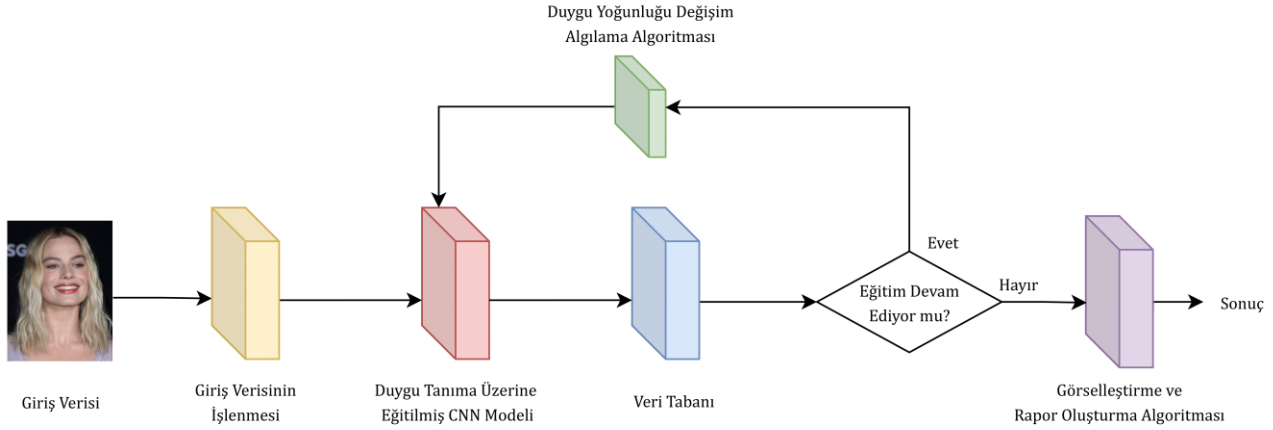
Tablo 1. Literatürdeki çalışmalar ve önerilen yaklaşımın doğruluk başarımları.

Literatürdeki Çalışmalar	Algoritma	Doğruluk Başarımı
[7]	Xception (CNN)	63,00%
[8]	CNN	57,10%
[9]	mini Xception (CNN)	65,97%
[10]	11 katmanlı CNN	70,00%
[11]	KNN + SVM	75,42%
[12]	CNN + SIFT	73,40%
Önerilen	CNN	97,83%

Yapılan başka bir çalışmada görüntü işleme algoritmaları ile eğitimlerdeki öğrencilerin duygularının analizi eğitim sonunda tek seferlik bir görsel alınarak analiz edilmiştir [13]. Yaptığımız çalışma, dinleyicilerin duygularını her saniyede 4 defa analiz ederek anlatıcıya anlık duygu değişimi bildirimleri, eğitim sonunda zamana bağlı duygu değişim grafiği sunması ve belirtildiği şekilde yüksek doğruluk oranı ile [13]'den ayrılmaktadır.

3. Materyal ve Metot

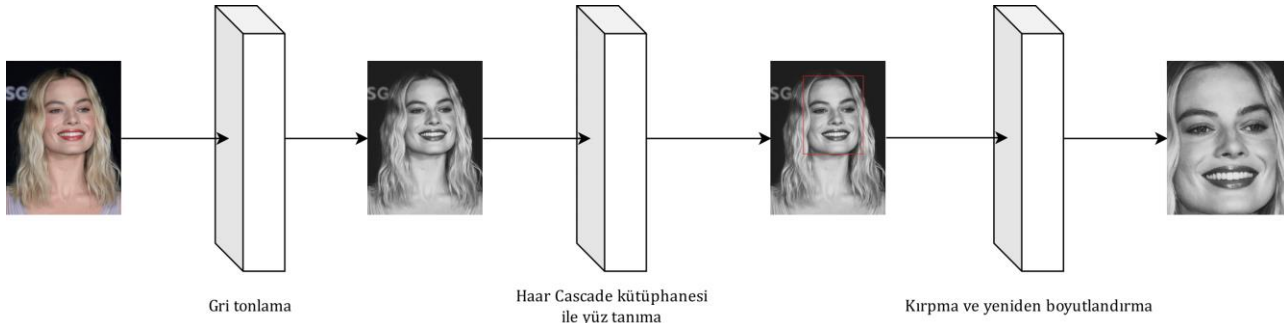
Giriş verisi olarak dinleyicilerin yüz görsellerini zamana bağlı her saniyede 4 defa alan ve duyguların zamana bağlı grafiğini oluşturan bir algoritma tasarlanmıştır. Algoritma temel olarak 4 ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler sırasıyla; giriş görüntüsünü işleme, duygu tanıma, duygu verilerini veri tabanına aktarma ve son olarak verilerin görselleştirilmesi ve rapor oluşturma olarak tanımlanabilmektedir. Şekil 1'de algoritma diyagramı görülmektedir.



Şekil 1. Algoritma diyagramı.

3.1. Giriş görüntüsünün işlenmesi

Bu çalışmada giriş görüntüsü, 3 adımdan oluşan bir ön işleme aşamasından geçmektedir. İlk adımda kırmızı, yeşil ve mavi olmak üzere 3 boyuta sahip olan giriş görüntüsü gri tonlama işleminden geçirilerek tek boyuta indirgenmektedir. Bu işlemin ardından ikinci adımda yüz bölgesi haricinde kalan piksellerin geliştirilen CNN modelinin tahmin başarısını etkilemesi ihtimalini ortadan kaldırmak amacıyla yüzün olduğu bölge Haar Cascade kütüphanesi kullanılarak tespit edilmektedir [14]. Üçüncü adımda ise giriş görüntüsünden yüzün olduğu bölge kırılmakta ve 48x48 boyutuna dönüştürülmektedir. Şekil 2'de görüntü ön işleme aşamaları görselleştirilerek sunulmuştur. Bu işlemler sonucunda elde edilen görüntü, eğitilmiş olan CNN modeli ile işlenerek duygu tespiti yapılmaktadır.

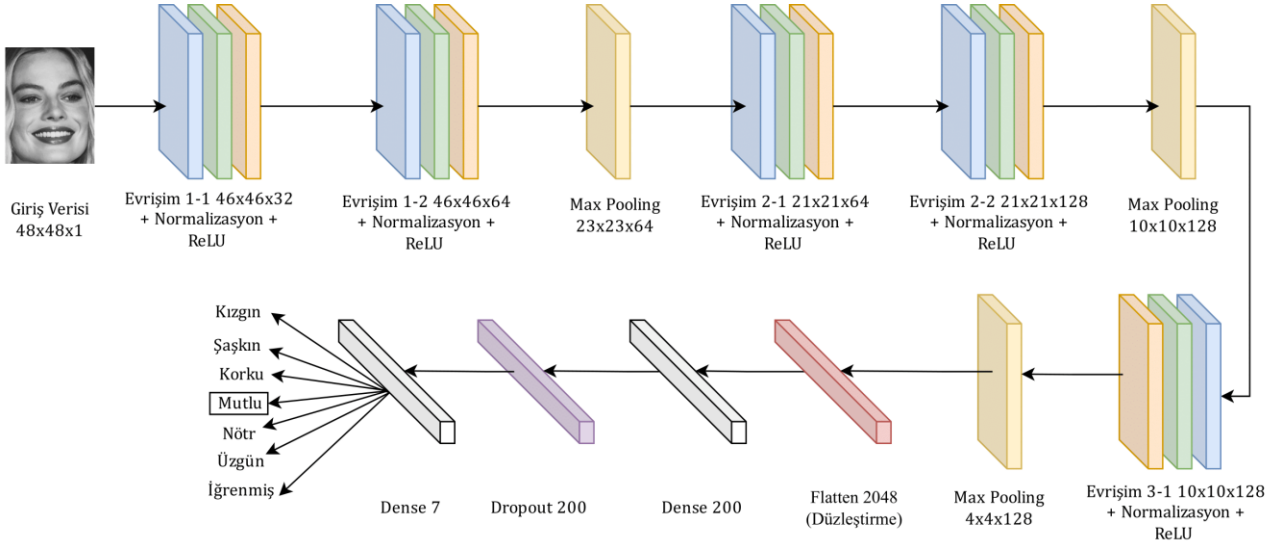


Şekil 2. Giriş görüntüsünün ön işleme aşamaları.

3.2. Duygu tanıma üzerine eğitilen CNN modeli

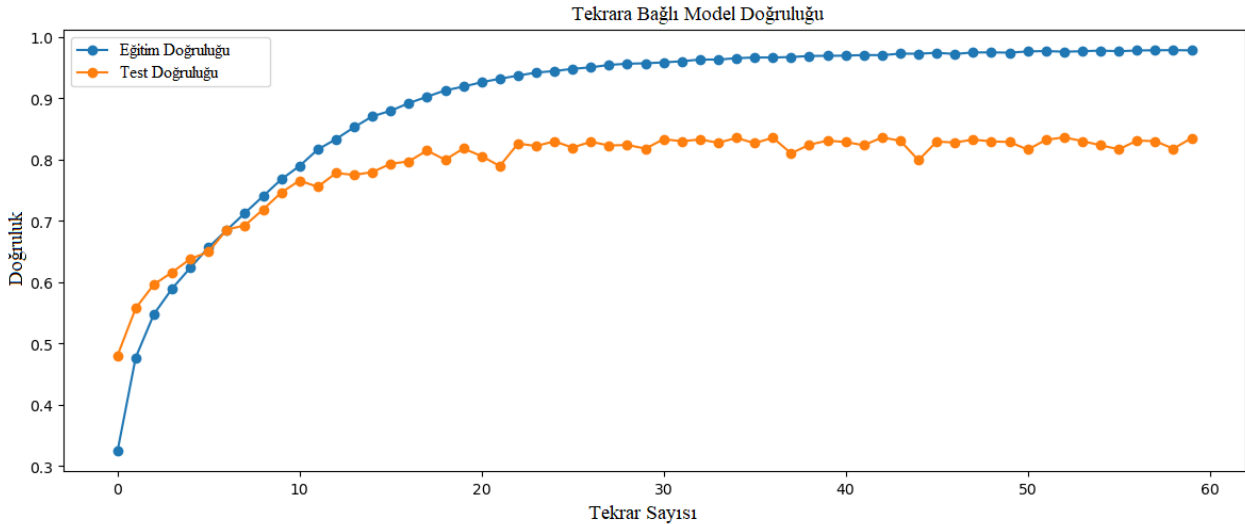
İlk katman 48x48 boyutlarında bir giriş görselinden oluşmaktadır. Bu katmanı 32 özellik haritasından oluşan evrişim, normalizasyon ve aktivasyon (ReLU) katmanlarından oluşan bir blok takip etmektedir. Bu bloğun ardından 64 özellik haritasından oluşan, normalizasyon ve aktivasyon katmanları bulunduran başka bir blok ile model yapısı devam etmektedir. Bu bloğun devamında 2x2 boyutunda bir havuzlama (max pooling) katmanı

bulunmaktadır. Dolayısıyla ortaya çıkan görüntünün boyutu $23 \times 23 \times 64$ olmaktadır. Benzer şekilde bu katmanın ardından 64 özellik haritasından oluşan evrişim, normalizasyon ve aktivasyon (ReLU) katmanlarından oluşan bir blok ve 128 özellik haritasından oluşan evrişim, normalizasyon ve aktivasyon (ReLU) katmanlarından oluşan bir blok ve bu blokları takip eden başka bir 2×2 boyutunda havuzlama (max pooling) katmanı bulunmaktadır. Bu katmanın ardından ortaya çıkacak görüntünün boyutu $10 \times 10 \times 128$ olmaktadır. Bu katmanın ardından bir düzleştirme katmanı ile veri tek boyutlu hale getirilmektedir. Sonrasında 200 boyutlu bir dense ardından bir dropout ve son olarak 7 boyutlu bir dense katmanı ile model oluşturulmuştur. Model; kızgın, şaşkın, korku dolu, mutlu, nötr, üzgün ve iğrenmiş olmak üzere 7 farklı duygunun tahmini gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 3'te CNN modelinin mimarisi görülmektedir [6].



Şekil 3. Oluşturulan CNN modelinin mimarisi.

FER2013 veri setinin %80'i eğitim, %20'si ise test için kullanılmıştır. Oluşturulan CNN modeli eğitim ve test için ayrıştırılan FER2013 veri seti ile 60 tekrar boyunca eğitilmiş ve eğitim veri setinde %97,83, test veri setinde %83,52 doğruluğa ulaşmıştır. Şekil 4'te tekrara bağlı model doğruluk grafiği mevcuttur. Şekil 5'te CNN modelinin eğitim veri setindeki hata matrisi görülmektedir. Hata matrisindeki bölümlerde görüntü sayıları yoğunlaştıkça matristeki bölümün rengi koyulaşmaktadır. Hata matrisi incelendiğinde, eğitilmiş olan CNN modeline giriş olarak verilen görüntülerin büyük bölümünün doğru tahmin edildiği görülmektedir.

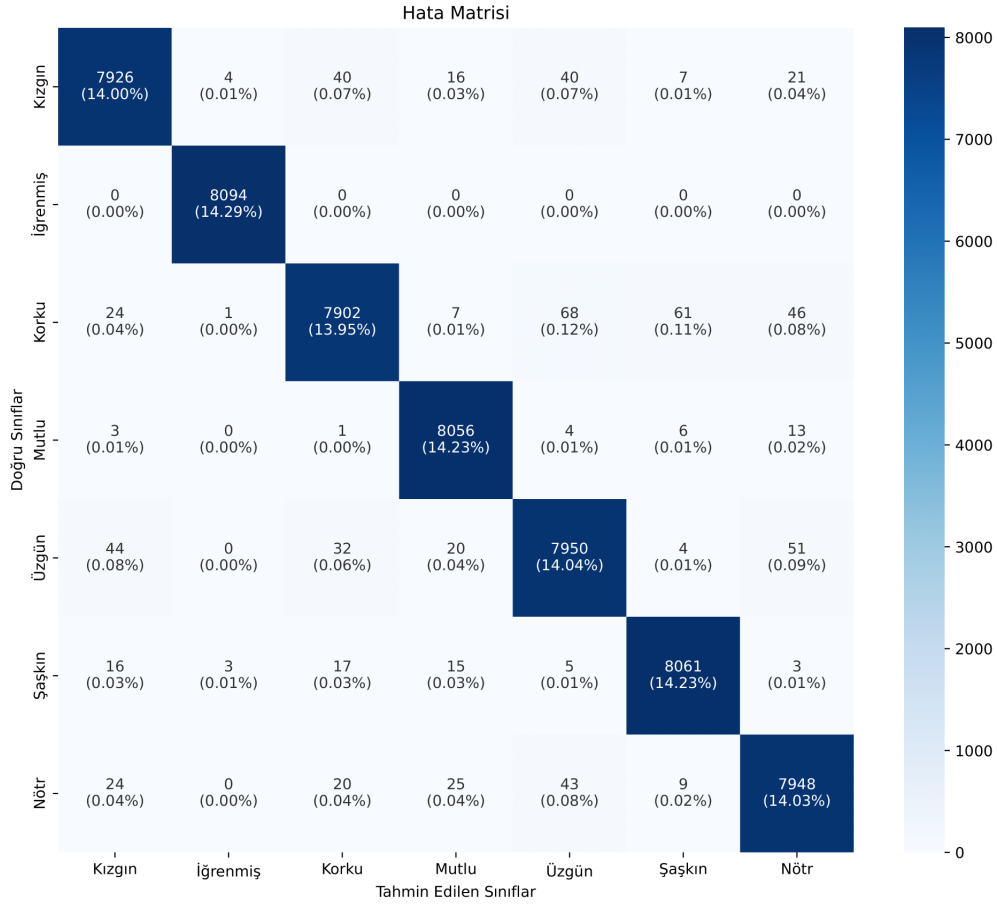


Şekil 4. Tekrara bağlı model doğruluk grafiği.

3.3. Elde edilen duygu verilerini veri tabanına aktarmak

Kurulan algoritma dinleyicilerin yüzlerini analiz ederek her saniyede 4 defa duygu tahmini yapmaktadır. CNN modelinden çıkan veriler, eğitim devam ettiği süre boyunca, her bir dinleyici için saniyede 4 duygu verisi MsSQL veri tabanına Python bağlantısı yardımı ile aktarılarak görselleştirilmek ve raporlanmak üzere saklanmaktadır. Veriler eğitim bitiminde raporlandıktan sonra silinmektedir. Anlık olarak gelen veriler veri tabanı bağlantısı ile

eş zamanlı olarak başka bir algoritma tarafından işlenerek duygu yoğunluğundaki belli değişimler anlatıcıya ders devam ederken bildirim şeklinde sunulmaktadır.



Şekil 5. CNN modelinin eğitim verisindeki hata matrisi

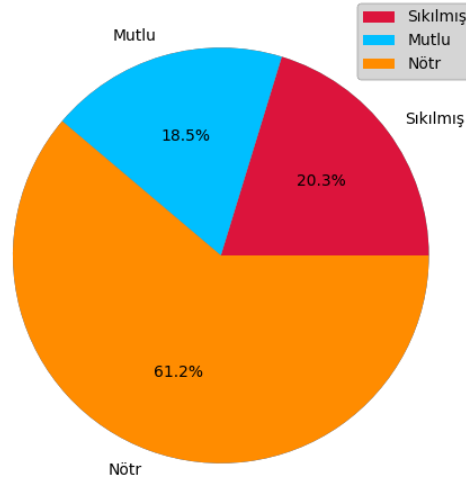
3.4. Verilerin görselleştirilmesi ve rapor oluşturmak

Eğitim sona erdiğinde anlatıcının analiz etmesi için bir rapor oluşturulmaktadır. Eğitim esnasında kızgın, şaşkın, korku dolu ve iğrenme duyguları nadir gerçekleşeceği için bu duygular raporda analiz edilmemektedir. Rapor içerisinde yazılı olarak eğitim süresi ve tespit edilen duyguların eğitim boyunca olan toplam duygulara oranı olan yüzdesel veriler yer almaktadır. Duyguların oranı verisinin daire grafiği olarak görselleştirilmiş hali de eğitime rapor üzerinde sunulmaktadır. Eğitmenin dinleyicilerin duygularını zamana bağlı analiz edebilmesi için çizgi grafik olarak bir duygu/yoğunluk grafiği oluşturulmuştur.

Eğitim sonunda eğitime gönderilen raporda; derste kaç öğrenci bulunduğu, öğrencilerin ders süresi boyunca sürenin yüzde kaçında sıkıldığı, mutlu olduğu ve nötr kaldığı ve derste belirli zaman aralıklarında hangi duygu durumunun yoğun olduğu bilgisi yazılı ve görsel olarak verilmektedir.

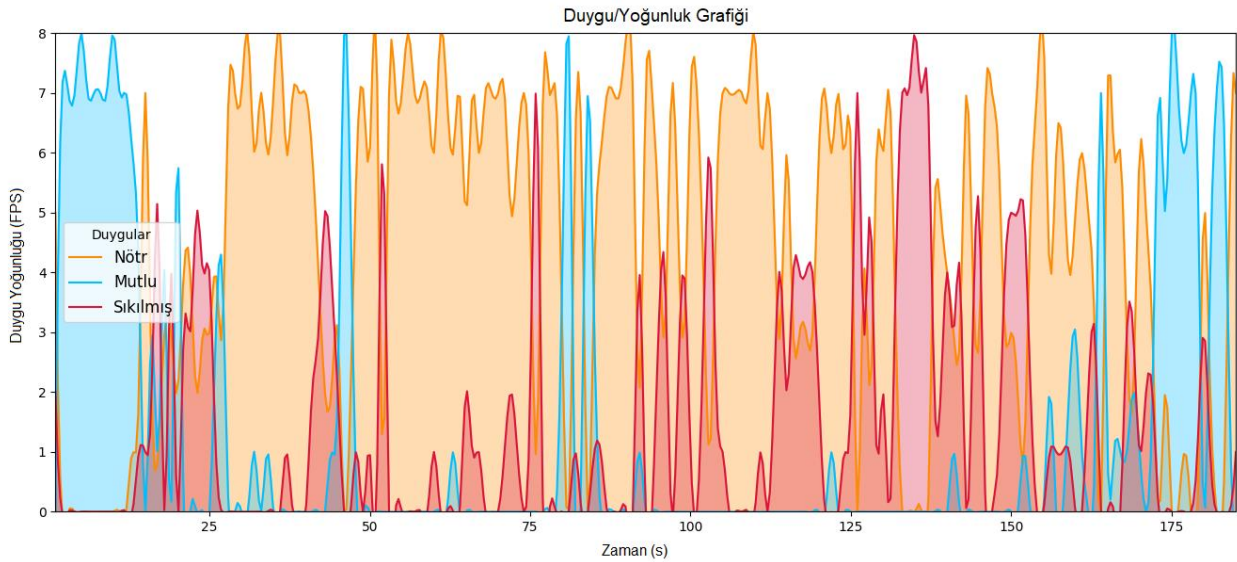
4. Bulgular

2 dinleyiciden oluşan ve 3 dakika süren bir ders ortamı oluşturulmuş ve oluşturulan algoritma bu ortamda test edilmiştir. Deney süresince yoğun duygu durum değişimlerinde anlatıcıya bilgi verilmiş, deney sonucunda ise anlatıcıya deney süresince sınıftaki öğrencilerin duygu durumlarını içeren bir rapor gönderilmiştir. Rapor içerisinde ham veriyi anlaşılır hale getirip bu veriden faydalı bilgi elde etmek amacıyla sınıftaki duygu durumlarının yüzdesi, bu verinin daire grafiği ile görselleştirilmesi ve zamana bağlı duygu durumlarının çizgi grafiği bulunmaktadır. Şekil 6'da deney sonucunda raporlanan daire grafiği görülmektedir.



Şekil 6. Eğitim sonucunda raporlanan daire grafiği.

Raporlanan daire grafiğinin açıklaması olarak anlatıcıya rapor üzerinde, “Dinleyiciler; 186 saniye boyunca %61 oranında nötr, %18 oranında mutlu, %20 oranında sıkılmıştır.” bilgisi yazılı olarak verilmektedir. Şekil 7’de deney eğitimi sonucunda raporlanan duygu yoğunluk grafiği görülmektedir. Grafikte X eksenini kamera vasıtasıyla her saniye elde edilen 4 görüntünün işlenmesi ile elde edilen duygu sayısını yani saniye başına düşen kareyi (FPS), Y eksenini ise zamanı saniye türünden ifade etmektedir.



Şekil 7. Eğitim sonucunda raporlanan duygu/yoğunluk grafiği

186 saniye süren deney eğitimi sonucunda çıkan veriler üzerinden dinleyicilerin ders başında mutlu oldukları; 25, 50 ve 100. saniyeler civarlarında sıkıldıklarını ayrıca 130 ile 155. saniyeler arasında da sıkıldıklarını, genel olarak nötr kaldıklarını ve dersin bitiminde mutlu oldukları çıkarılabilmektedir. Anlatıcı 130. saniyede başlayan yoğun ve kalıcı olan duygu değişimini nedeniyle bu değişimin bildirimini “Dinleyicilerin duyguları yoğunluklu olarak ‘Sıkılmış’tır.” şeklinde canlı olarak almıştır. 175. saniyede ise duygu yoğunluğu değişim bildirimini “Dinleyicilerin duyguları yoğunluklu olarak ‘Mutlu’dur.” şeklinde canlı olarak vermiştir.

5. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada yedi farklı duyguyu gerçek zamanlı olarak tespit edebilmek için yüksek sınıflandırma doğruluğuna sahip bir CNN modeli hazırlanmıştır. Hazırlanan CNN modeli, çevrimiçi eğitim platformlarında katılımcıların duygu durumlarının analizi için tasarlanan algoritmanın içerisine entegre edilmiştir. Tasarlanan sistem ile anlatıcı, katılımcıların duygu durumlarını ders esnasında canlı olarak takip edebilmekte, ders sonunda gönderilen raporda bulunan faydalı bilgiler ve grafikler ile eğitimlerinin verimliliğini, kalitesini ve performansını olumlu olarak etkileyecek aksiyonlar alabilmektedir. Bu çalışma için yapılan, 2 öğrenciden oluşan ve 186 saniye süren deney eğitiminden çıkarılan sonuçlar ile çalışmanın başarısı analiz edilebilmektedir.

Yapılan çalışma, CNN modelinin doğruluk başarısının yüksekliği ve zaman bazlı olarak veri işlemesi ile literatürdeki diğer çalışmalardan ayrılmaktadır. Literatürdeki diğer çalışmalar incelendiğinde FER2013 veri seti ile eğitilmiş derin sinir ağları arasında %97,83 eğitim başarısı ve %83,52 test başarısına ulaşabilen bir çalışma bulunmamaktadır. Model doğruluğunun yüksekliği, tahmin edilen duyguların doğruluğu ile doğrudan bağlantılı olduğu için model doğruluğu derin sinir ağları ile duygu tespiti çalışmalarında önemli rol oynamaktadır. Literatürde bulunan derin sinir ağları ile duygu analizinin eğitim verimliliğinin yükseltilmesinde kullanılmasına yönelik diğer çalışmalarda öğrencilerin duygularının zamana bağlı olarak işlenmemesinden kaynaklanan analiz problemleri mevcuttur. Sadece ders sonunda alınan görüntüden duygu analizinin yapılması ders boyunca öğrencilerin hangi duygular içerisinde olduğu verisini tutmaması nedeniyle çalışmamıza göre büyük boyutta bir faydalı veri sunmamaktadır. Çalışmamızda hazırlanan algoritma ile her bir öğrenci için saniyede 4 duygu tespiti yapıldığı için hem ders süresi içerisinde anlatıcıya bildirim verilerek ders bitmeden verimlilik artırılmakta, hem de ders sonunda paylaşılan detaylı rapor sayesinde öğretmenin gelecek derslerinin verimliliği artırılmaktadır.

Kaynakça

- [1] Mellouk, W., Wahida H. 2020. Facial emotion recognition using deep learning: review and insights. *Procedia Computer Science* 175 (2020): 689-694.
- [2] Ekman, P., Wallace V. F. 1971. Constants across cultures in the face and emotion. *Journal of Personality and Social Psychology* 17.2 (1971): 124.
- [3] Ko, B. C. 2018. A brief review of facial emotion recognition based on visual information. *Sensors* 18.2 (2018): 401.
- [4] Altekin, F., Demir, H. 2021. Emotion Detection from Facial Expression Using Different Feature Descriptor Methods with Convolutional Neural Networks. *European Journal of Engineering and Applied Sciences* 4.1 (2021): 14-17.
- [5] Cakmak, B., Develi, I. 2023. Convolutional Neural Network-Based Classification of Facial Emotional Expressions and Computational Complexity Analysis. *International Conference on Frontiers in Academic Research*. Vol. 1. (2023) 168-173.
- [6] Mehendale, N. 2020. Facial emotion recognition using convolutional neural networks (FERC). *SN Applied Sciences* 2.3 (2020): 1-8.
- [7] Kim, J., Hwan, A. P., Dong, S. H. 2021. The extensive usage of the facial image threshing machine for facial emotion recognition performance. *Sensors* 21.6 (2021): 2026.
- [8] Tümen, V., Söylemez, Ö. F., Ergen, B. 2017. Facial emotion recognition on a dataset using convolutional neural network. *2017 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*. IEEE, (2017).
- [9] Zahara, L., et al. 2020. The facial emotion recognition (FER-2013) dataset for prediction system of micro-expressions face using the convolutional neural network (CNN) algorithm based Raspberry Pi. *2020 Fifth international conference on informatics and computing (ICIC)*. IEEE, (2020).
- [10] Lasri, I., Solh, A. R., El Belkacemi, M. 2019. Facial emotion recognition of students using convolutional neural network. *2019 third international conference on intelligent computing in data sciences (ICDS)*. IEEE, (2019).
- [11] Georgescu, M. I., Ionescu, R. T., Popescu, M. 2019. Local learning with deep and handcrafted features for facial expression recognition. *IEEE Access* 7 (2019): 64827-64836.
- [12] Connie, T., et al. 2017. Facial expression recognition using a hybrid CNN-SIFT aggregator. *International Workshop on Multi-disciplinary Trends in Artificial Intelligence*. Springer, Cham, (2017).
- [13] Wang, W., et al. 2020. Emotion recognition of students based on facial expressions in online education based on the perspective of computer simulation. *Complexity* (2020).
- [14] Viola, P., Jones M. 2001. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *Proceedings of the 2001 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition*. CVPR (2001). Vol. 1. IEEE, 2001.

Ağaç Karameleği (*Hipparchia statilinus* (Hufnagel, 1766)) ve Bazı Türlerin Yangın Sonrası Manavgat Ormanları'na Dönüşü

Gökçe Coşkun¹, Önder Cırık², Esra Per^{*3}

¹Antalya Kuş Gözlem Topluluğu, Antalya

²Türkiye'de 6 Şubat 2023 tarihinde gerçekleşen depremde vefat etti

^{*3}Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Biyoloji Bölümü, Ankara

(Alınış / Received: 21.09.2022, Kabul / Accepted: 24.02.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 02.05.2023)

Anahtar Kelimeler

Gözlem,
Kelebek,
Pasif Restorasyon,
Yangın Ekolojisi,
Zoocoğrafya

Öz: Türkiye'de 2021 yılında Ocak-Ağustos ayları arasında 170.000 hektarın üzerinde ormanlık alan yanmıştır. Yangın geçirmiş alanlardan biri olan Manavgat Ormanları'nda yangın sırasında yaban hayatı büyük oranda zarar görmüştür. Bu nedenle alanda biyolojik çeşitlilik temelli bir izleme çalışmasına başlanmıştır. Pasif restorasyon; çevresel tehditlerin ortadan kaldırılması, bitkilerin kolonileşmesi ve sıralı değişimin doğal olarak başlamasıdır. Pasif restorasyon ile ilgili Türkiye'de yapılmış bir araştırma bulunmamaktadır. Türkiye'de yaygın bir kelebek türü olan ve Dünya'da genellikle yılda bir kez yumurta bırakan ağaç karameleğinin (*Hipparchia statilinus* (Hufnagel, 1766)) Ekim ayında bu alanda yumurtladığı görüntülenmiştir. Bu tür, bazı Avrupa ülkelerinde ve Mısır'da yılda iki nesil verebilmektedir. Türkiye'deki durumu bilinmemekle birlikte araştırma alanı Akdeniz Havzası'nda olduğu için yılda en az iki nesil verebileceği tahmin edilmektedir. Bu tür, açık kumlu alanlarla, fundalıkları tercih etmekte ve otsu bitkilere yumurta bırakmaktadır. Alanda yangın sonrasında bitkiler filizlenmeye başlamış olmasına rağmen kelebeğin bitki örtüsü olmayan boş bir alandaki bir çam iğnesine yumurta bırakması dikkat çekicidir.

The Tree Grayling's *Hipparchia statilinus* (Hufnagel, 1766) and Some Species to Manavgat Forests Following the Fire

Keywords

Observation,
Butterfly,
Passive Restoration,
Fire Ecology,
Zoogeography

Abstract: Between January and August of 2021, more than 170,000 hectares of forest burned in Turkey. The wildlife in the Manavgat Forests, which was one of the places affected by the fire, was severely damaged during the fire. For this reason, a biodiversity-based monitoring study has been initiated in the area. Passive restoration is the elimination of environmental hazards, plant colonization, and the start of succession naturally. There is no research conducted in Turkey on the passive restoration. The tree grayling (*Hipparchia statilinus* (Hufnagel, 1766)), a common butterfly species in Turkey that generally lays eggs once a year in the world, has been photographed while laying eggs in this field in October. In several European countries and Egypt, this species can give two generations each year. Although the status in Turkey is unknown, it is estimated that it can give at least two generations per year because the research region is in the Mediterranean Basin. This species prefers open sandy areas, heathlands and lays eggs on herbaceous plants. It is noteworthy that the butterfly laid eggs on a pine needle in an empty area without vegetation, although plants began to sprout after the fire in the area.

*İlgili Yazar, email: esraper@yahoo.com

1. Giriş

Kelebekler, renkli pullar ile kaplı büyük iki çift kanadı olan, genellikle larva döneminde bitkiler üzerinden, ergin dönemde ise doğrudan bitki özsuyu ile beslenen böceklerdir [1]. Emici tipteki ağız yapılarının bir parçası olan emme hortumunu kıvrıma özellikleri ile de diğer böceklerden ayırırlar.

Dünya'da Insecta sınıfı, Lepidoptera takımında, yaklaşık 18.000 kelebek ve 160.000 güve türü bulunmaktadır [2]. Avrupa'da 482 kelebek türü, Türkiye'de ise 45'i endemik 415 kelebek türü doğal yayılış göstermektedir. Bu durum Türkiye'nin kelebek türleri açısından zengin olduğunu ve önemini göstermektedir [3]. Insecta sınıfı, Lepidoptera takımının, Nymphalidae familyasından olan ağaç karameleği (*Hipparchia statilinus*) Hufnagel, 1766)) türü Türkiye dışında kuzeybatı Afrika'da (Fas, Cezayir, Tunus), orta ve güney Avrupa ile Balkanlar'da da yayılış göstermektedir [4].

Nymphalidae "Fırça ayaklı" olarak bilinen kelebeklerdir ve Dünya çapında yaklaşık 5.772 türü vardır [5]. Türkiye'de Nymphalidae familyası *Hipparchia* Fabricius, 1807cinsinden dokuz tür yayılış göstermektedir göstermektedir [6]. Türkiye'de yayılış göstermekte olan kelebeklerin %2'si karameleklendir.

Ağaç karameleğinin koruma statüsünü göstermekte olan küresel kırmızı liste kategorisi önceliği düşüktür (LC) [4], Avrupa düzeyinde kırmızı liste kategorisi tehlike altına girmeye yakın (NT) [7] ve ulusal kırmızı liste kategorisi LC'dir [6]. Dünya genelinde önemli, büyük bir tehditten etkilendiği bilinmeyen ve geniş yayılış gösteren bir türdür. Nüfus eğilimi durağandır, sayısal olarak birey sayısı fazla olmasa da uygun habitatlarda yaygın olarak görülmektedir. Engebeli, kayalık alanlar ve yer yer orman açıklığı alanlarda yayılış gösterir. Konukçu bitkileri; bölgede geniş yayılış gösteren ot ve çayırlardır. Ağaç karameleğine yönelik bir koruma önlemi mevcut değildir [4]. Tür için en büyük tehdit habitat değişimi ve parçalanmasıdır [8]. Dünya genelinde türe ait verilerin %80'i vatandaşların gözlemlerine dayanmaktadır ve en çok gözlemlendiği aylar Temmuz, Ağustos ve Eylüldür. Küresel Biyoçeşitlilik Bilgilendirme Birimi Sekreteryası (GBIF)'nda bu türe ait Türkiye'deki kayıtlar listelenmektedir, ancak Manavgat Ormanlarında daha önce bu türe dair bir kayıt mevcut değildir [9].

Ağaç karameleği genellikle kayalık alanlarda ağaçların eşlik ettiği yerlerde dinlenirken görülen bir türdür. Bu kelebek Dünya'da yılda bir nesil veren (univoltine) bir tür olarak bilinmektedir. Erginler Haziran-Eylül arasında uçarlar. Larvaları çayır bitkileri arasında kış uykusuna yatar [10]. Bu tür yalnızca sınırlı bir habitat aralığında yaşayabilir, özellikle açık ve geniş, kumlu ve kuru alanları tercih eder [8]. Avrupa'da 1.500 m, Kuzey Afrika'da 2.500 metreye kadar rakımda görülebilir. Kanatlar açıkken asla dinlenmez. Genellikle sıcak güneş ışığının gölgesinde ağaç gövdelerinde veya ısınması gerektiğinde kayalarda veya toprakta dinlenir [11]. Türkiye'de kaç metre rakıma kadar yayılış gösterdiği bilinmemektedir.

Ağaç karameleği hakkında Türkiye'de mevcut literatürde oldukça sınırlı bilgi olduğundan, türün bir yılda verdiği nesil sayısı, yumurtlama dönemi ve yumurtasını bıraktığı yer bilinmemektedir. Bununla birlikte tüm Türkiye'de yayılış gösteren bu tür Temmuz - Ekim ayları arasında aktif olduğu, orman açıklığı, taşlık arazi, bozkır ve çayırılık alanları tercih ettiği, buğdaygiller (Poacea) familyasından bitkilerle beslendiği bildirilmiştir [12]. Türkiye'nin zengin biyoçeşitliliğinin bir yansıması kelebek çeşitliliği ile de ön plana çıkmaktadır, ancak bu çeşitlilik farklı tehdit faktörlerinden ve çevresel sorunlardan etkilenmektedir.

Her yaz tekrarlanan orman yangınları Türkiye'nin önemli çevre sorunlarından biridir, ancak bu yangınları tamamen ortadan kaldırmak da mümkün değildir. Çünkü yangınlar Akdeniz ve Ege bölgelerinde orman ekosisteminin doğal bir parçasıdır. Kızılçam kozalaklarının açılması için yüksek sıcaklık gerekirken, tohumlar yangın sonrasında daha iyi çimlenmektedir. Bununla birlikte insan etkisiyle kısa zaman aralıklarında yangın çıkması ise kızılçam gibi türlerin kendini yenilemesine engel olmaktadır [13]. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün Manavgat İklim İstasyonu'nda 1980-2019 yılları arasında kaydettiği hava sıcaklık verilerindeki değişime dayanarak, bu bölgelerde gelecekte oluşabilecek sıcak hava dalgalarının orman yangını olasılığını arttıracığı tahmin edilmektedir [14].

"Akdeniz iklim kuşağında yer alan Türkiye ormanlarının büyük bir bölümü yangın tehdidi altındadır". Ancak Türkiye'deki orman yangınlarının %91'i insan etkisiyle gerçekleşmektedir [15]. Türkiye'de 2008 -2020 yılları arasında yıllık ortalama 58 orman yangını çıkmışken, yalnızca 2021 yılında 158 orman yangını çıkmıştır [16]. 2021 yılındaki orman yangınlarından şiddetli bir şekilde etkilenmiş alanlardan biri de Manavgat Ormanları'dır. Manavgat Ormanları'nın yangından sonraki durumu izlenmektedir.

Pasif restorasyon, mevcut rahatsızlık kaynağının ortamdaki kaldırılmasından sonra bir ekosistemde sıralı değişim (süksesyon)'in doğal olarak gerçekleşmesine izin vermektir [17]. Pasif restorasyonun gelişimi ile ilgili Türkiye'de yapılmış bir araştırma bulunmamaktadır. Bu nedenle yangın sonrası Manavgat Ormanları'nda biyolojik çeşitlilik temelli doğrudan ve dolaylı gözlemler yapılmaya başlanmıştır.

Bu araştırmada 2021'de yanmış olan Manavgat Ormanları'nda yapılmakta olan biyolojik çeşitlilik temelli izleme çalışmasının ilk bulguları ile yumurtlamak için alanı kullanmaya başladığı tespit edilen ilk böcek türü olan ağaç karameleğinin durumunun değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1 Çalışılan Alan

Bitki coğrafyasında Akdeniz Bölgesi, Akdeniz Flora Bölgesi ile temsil edilmektedir. Bu bölgede vejetasyon genellikle kesintiye uğramadan yıl boyu devam etmektedir. İklimsel olarak yazları sıcak ve kurak, kışları yağışlı ve ılıktır. Bölgede kuru ormanlar ve maki elemanları baskındır [18]. Palearktik zoocoğrafya bölgesinde ortaya çıkmış olan en karakteristik türlerden bazıları Alageyik (*Dama dama* Linnaeus, 1758)), yabankeçisi (*Capra aegagrus* Erxleben, 1777) ve yaban domuzu (*Sus scrofa* Linnaeus, 1758)'dur [19]. Çalışılan alan Türkiye'nin Akdeniz Bölgesi'nde Antalya ili Manavgat ilçesindeki Manavgat Ormanları (Manavgat Orman İşletme Müdürlüğü sınırları içinde kalan ormanlık alanlar) olup bu memeli türleri alanda coğrafi dağılım göstermektedir.

Manavgat Ormanları'nda 28 Temmuz 2021'de başlamış ve on gün sürmüş olan büyük yangın öncesinde uzun yıllara dayanan bir habitat değişimi gerçekleşmiştir. Manavgat ilçe merkezinin kuzeyinde ormanlık alanlarla sınır teşkil eden tarım alanlarının genişletilmesi ile ormanlık alanlar karışık tarım alanlarına dönüşmüştür. Manavgat Barajı nedeniyle insan etkisiyle ormanlık alanlardan karasal sulara doğru bir habitat değişimi gerçekleşmiştir. Barajın enerji üretimi ve nakli için de yer yer ormanlık alanlar çalı ve/veya otsu bitkiler topluluğuna dönüşmüştür. Bölgede yerleşim alanları da genişlemiştir [20].

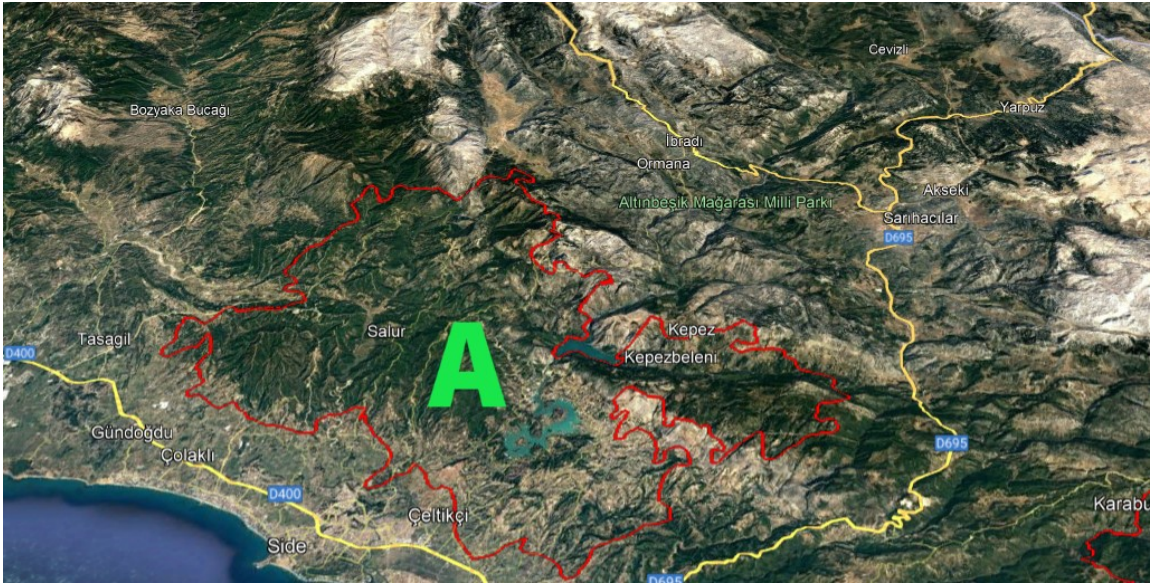
Akdeniz Bölgesi'nde artan sıcaklıklardan sonra aşırı ve uç hava olaylarının şiddeti ve sıklığında artışlar olmaktadır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün Manavgat İklim İstasyonu'nda 1980-2011 yılları arasında kayıt edilmiş olan yağış verilerine göre yağış ekstremeleri azalma eğilimindedir. Yangın olasılığı ise artmaktadır [14].

2.2 Metot

Antalya'da 2021 yılında 28 Temmuz günü Manavgat merkezli olarak çıkmış ve on gün sürmüş olan yangın sırasında yaklaşık 60.000 hektar büyüklüğünde ormanlık alan tahrip olmuştur. Yangın geçirmiş alan, drone görüntüleri ile karşılaştırılarak, Tarım ve Orman Bakanlığı'na ait veri altlıkları kullanılarak internet tabanlı Google Earth programı üzerinde işaretlenmiştir (Şekil 1). Yaban hayatı için oldukça değerli olan Manavgat ilçesi sınırlarındaki bu bölgede orman yangını sonrasında ekolojik değerlendirme ve izleme yapılmaya başlanmıştır. Arazi çalışmalarında; mevsime göre aylık ve haftalık ziyaretler ile dürbün ve fotoğraf makinesi kullanılarak ekosistemdeki değişim ve yaban hayvanlarının yangın sonrası alan kullanımı izlenmektedir.

Biyolojik çeşitlilik gözlemi: Alan çok büyük olduğu ve farklı lokasyonlar ziyaret edilmek istendiği için gün doğumundan batımına kadar rastlantısal aralıklarda nokta sayımı yapılmış, fauna ve flora elemanları kayıt altına alınmış, vejetasyon görüntülenmiştir.

Davranışsal gözlem: Kuş ve memelileri doğrudan tespit etmek için dürbün ve Fujifilm kamera, dolaylı olarak tespit etmek için fotokapan kullanılmıştır. Habitatı haritalamak için DJI Phantom 3 drone kullanılmıştır.



Şekil 1. Manavgat'ın yüksek rakımlı bölgeleri ve sahil kesimine kadar ilerlemiş olan yangın geçirmiş alanlar

3. Bulgular

Farklı görselleştirme teknikleri kullanılarak yangın nedeniyle ekosistemdeki meydana gelen değişim gösterilmiştir (Şekil 2). Alanda katran ardıcı (*Juniperus oxycedrus* Linnaeus), mazı meşesi (*Quercus infectoria* G. Olivier), kızılçam (*Pinus brutia* Ten.) ağaçları ve makilikler yanmış olarak gözlenmiştir. Memeli türlerinden sincap, 18 kuş türü ile çekirge, karınca ve kızböcekleri rastlantısal olarak gözlenirken Ağaç karameleği (*Hipparchia statilinus*)'nin yumurtladığı tespit edilmiştir. Yangın sonrası 2021 yılında yapılan arazi çalışmalarında mantar türü tespit edilmemiştir (Tablo 1). Alanda yeni filizlenmekte olan mazı meşesi (*Quercus infectoria*) sıralı değişim sürecinin bir göstergesidir.

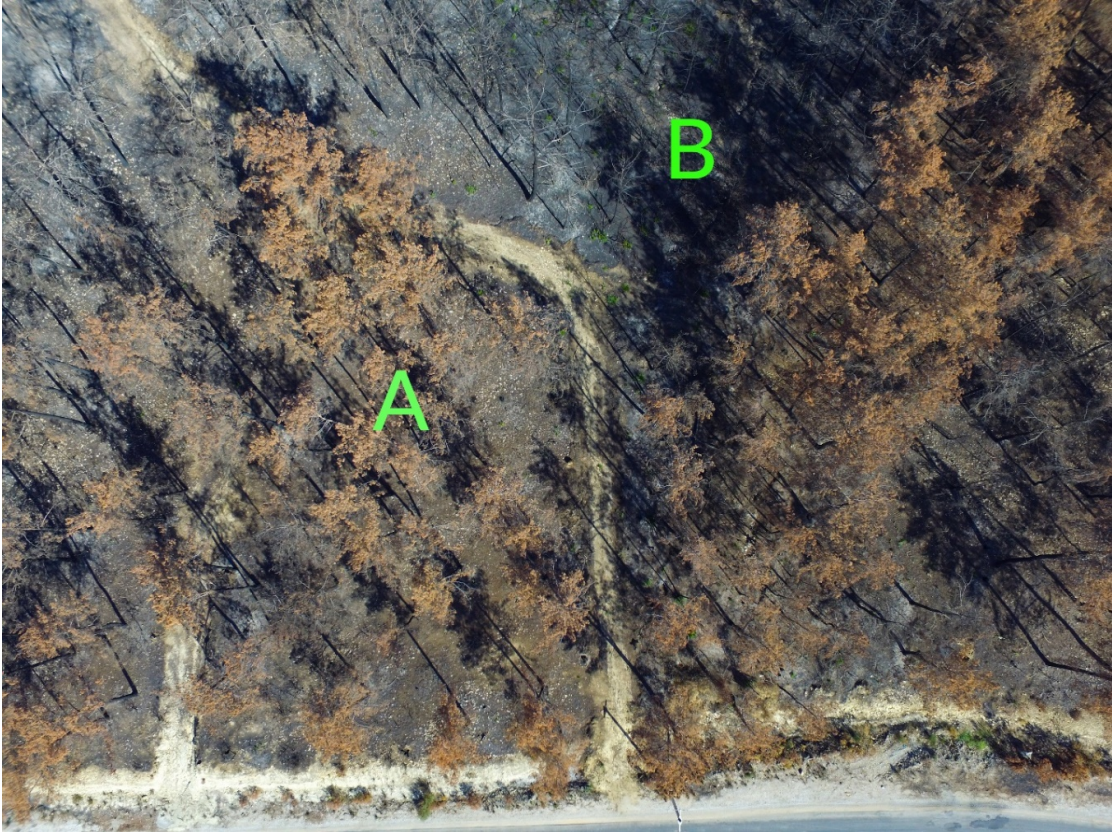


Şekil 2. Oymapınar Barajı Yeşil Kanyon'da yangına maruz kalmış bir orman ekosistemi ©Gökçe Coşkun

Tablo 1. Alanda tespit edilen bazı canlı türleri

Alem	Takson adı	2021 yılı gözlem süreci
Bitki	Kızılçam (<i>Pinus brutia</i>)	Ağustos - Ekim
	Mazi meşesi (<i>Quercus infectoria</i>)	Ağustos - Ekim
	Katran ardıcı (<i>Juniperus oxycedrus</i>)	Ağustos - Ekim
Hayvan	Ağaç karameleği (<i>Hipparchia statilinus</i>)	10.10.2021
	Alaca ağaçkakan (<i>Dendrocopos syriacus</i> (Hemprich & Ehrenberg, 1833))	Ağustos - Ekim
	Alakarga (<i>Garrulus glandarius</i> (Linnaeus, 1758))	Ağustos - Ekim
	Arıkuşu (<i>Merops apiaster</i> Linnaeus, 1758)	Ağustos
	Atmaca (<i>Accipiter nisus</i> (Linnaeus, 1758))	Ağustos
	Benekli sinekkapan (<i>Muscicapa striata</i> (Pallas, 1764))	Ağustos - Eylül
	Büyük baştankara (<i>Parus major</i> Linnaeus, 1758)	Ağustos - Ekim
	Çekirge (Orthoptera)	Ağustos - Ekim
	İspinoz (<i>Fringilla coelebs</i> Linnaeus, 1758)	Ekim - Kasım
	Kara Çaylak (<i>Milvus migrans</i> (Boddaert, 1783))	Ekim
	Karınca (Hymenoptera)	Ağustos - Ekim
	Kerkenez (<i>Falco tinnunculus</i> Linnaeus, 1758)	Ağustos - Ekim
	Kız böcekleri (Odonata)	Ağustos - Ekim
	Kızılsırtlı örümcekuşu (<i>Lanius collurio</i> Linnaeus, 1758)	Ağustos - Ekim
	Kızılgerdan (<i>Erithacus rubecula</i> (Linnaeus, 1758))	Kasım
	Kuyrukkakan (<i>Oenanthe oenanthe</i> (Linnaeus, 1758))	Ağustos - Ekim
	Kuzgun (<i>Corvus corax</i> Linnaeus, 1758)	Ağustos - Ekim
	Küçük ağaçkakan (<i>Dryobates minor</i> (Linnaeus, 1758))	Eylül - Ekim
	Küçük akgerdanlı ötleğen (<i>Curruca curruca</i> (Linnaeus, 1758))	Ağustos - Eylül
	Pelasg Kaya Kertenkelesi (<i>Anatololacerta pelasgiana</i> (Mertens, 1959))	Ağustos - Ekim
	Sarıasma (<i>Oriolus oriolus</i> (Linnaeus, 1758))	Eylül - Ekim
	Saka (<i>Carduelis carduelis</i> (Linnaeus, 1758))	Ağustos - Ekim
	Sarı azamet (<i>Colias croceus</i> (Fourcroy, 1785))	24.10.2021
	Sincap (<i>Sciurus anomalus</i> Gmelin, 1778)	Ağustos - Ekim
	Şahin (<i>Buteo buteo</i> (Linnaeus, 1758))	Ağustos - Ekim

Manavgat Ormanları'nda 10.10.2021 tarihinde yapılmış olan doğa gözleminde; yangın geçirmiş açık taşlık alanda (Şekil 3) pulları dökülmeye başlamış yani pupadan yeni çıkmamış olgun görünümde bir dişi ağaç karameleğinin yanmış çam iğnelerinden birinin alt tarafına (Şekil 4) yumurta bıraktığı tespit edilmiştir (Şekil 5). Baskın vejetasyon olan çam ve makilikler drone ile görüntülemiş ve kelebeğin yumurta bıraktığı yer (36°56'11.614" N 31°22'48.702" E) ile rakımı (383 m.) kayıt altına alınmıştır.



Şekil 3. A- Ağaç kameleğinin yumurta bıraktığı alan, B- Bitki filizlenmesinin yoğun olarak görüldüğü alanın drone görüntüsü ©Gökçe Coşkun



Şekil 4. Ağaç kameleğinin yumurta bıraktığı yer ©Gökçe Coşkun

Ağaç kameleğinin yumurta bıraktığı yerdeki çamların gövdesi yanmış ve iğneleri yere dökülmüştür, zeminde yeni yeni filizlenmekte olan bitkiler gözlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 5. Dişi ağaç karameleğinin yumurta bırakma süreci (Sırasıyla yumurtlama aşamaları) ©Gökçe Coşkun

4. Tartışma ve Sonuç

Antalya Manavgat'ta 2021 yılında 28 Temmuz günü başlayan yangın 10 günde kontrol altına alınmış, toplam 60.000 hektar orman ve 59 mahalle yanmıştır [21]. Bu süreçte (Şekil 1; 2) yaban hayatı zarar görmüştür. Yangın sonrası bölgenin durumunu tespit etmek için yapılan bu izleme çalışmasında; yanmış kızılçam ağaçlarının olduğu alanda bir ağaç karameleğinin yumurtladığı tespit edilmiştir (Tablo 1, Şekil 5).

Akdeniz Bölgesi'nde yaz mevsiminde giderek artan sıcaklıklar; enerji tüketimini artırırken, su temininde yetersizliklere, bulaşıcı hastalıklara ve insan sağlığı için yetersiz ve olumsuz hava koşullarına sebep olabilecektir [14]. Yangın geçirmiş ormanlık alanlardaki hayvanların zamansal ve konumsal olarak izlenmesi habitat kullanımı, tür mevcudiyetleri ve etkileri hakkında bilgi sağlayacaktır. Bu veriler ekosistem tabanlı orman amenajmanı yaklaşımlarının geliştirilmesine katkı sağlayacaktır [22]. Ormanlarda dökülen dallar ve gövdeler özellikle çok özelleşmiş böcekler için yeni yaşam alanları oluşturur ve organik madde açısından da zengindir [23]. Yangın sonrası yaban hayvanlarının alan kullanımında öncelikle böcek, sürüngen, kuş ve memeli sınıfı türlerinin alandaki varlığı tespit edilmiştir.

Omurgasız canlılar, ekosistem hizmetlerinin gerçekleşmesi açısından kilit rol oynamaktadırlar. Kısa yaşam döngüleri olmasına rağmen çevresel değişimlere hızlı yanıt verirler. Sağlıklı kelebek popülasyonları da sağlıklı çevrenin bir göstergesidir [3]. Kelebekler, topoğrafya, vejetasyon, sıcaklık, bakı, yön, nem, ışık ve suya karşı çok hassastır. Bu hassasiyet onların çevreleri hakkında bilgi sunmaktadır. Yağmurlu havada nadiren uçarlar, birçoğu tarıma tolerans gösteremez ve kentsel alanlarda az görülür [24]. Türkiye'de yaygın olarak gözlenmekte olan ağaç karameleği'nin yangın sonrasında alanda yumurtladığının tespit edilmesi pasif restorasyon ve sağlıklı bir ekosistem işleyişi için önemli bir gelişme olabilir.

Bu tür çok az da olsa, gümüşü huş ağacı (*Betula pendula* Roth) veya sarıçam (*Pinus sylvestris* Linnaeus) gibi ağaçların da özsuyu ile beslenir. Dişi yumurtaları olgunlaştırmak için çok fazla yiyeceğe ihtiyaç duyar. Bu kelebeğin konukçu bitkisi esas olarak çayırotu (*Corynephorus canescens* (L.) Beauv.)'dur, bazen başka otları da kullanılır [25]. Kelebeklerde kur davranışları türler arasında büyük farklılıklar gösterir. Birçok engelin olduğu alanlarda hassasiyetli bir şekilde uçabilirler [5]. Döllenmeden sonra yumurtaların olgunlaşması bir haftadan daha kısa sürer. Dişi, yumurtaları yapıştırmak için liken, yosun ve açık kumlu alanlarda, çok alçak ve açık bitki örtüsünde yetişen ot kümelerini seçer. Yumurtalar konukçu bitkiye ayrı ayrı bırakılır. Tırtıl Eylül sonunda yumurtadan çıkar. Neredeyse hiçbir şey yemeden bir ot yığınının dibinde kış uykusuna yatar [25]. Ağaç karameleğinin yangın sonrası Ekim ayında açık alanda yumurta bırakmış olması dikkat çekicidir. Bu durum bu türün nesil (jenerasyon) vermeye devam ettiğinin bir göstergesi olabilir. Alanda toprak çıplak olup otsu bitkiler de mevcut değildir. Yanmış çam iğnesinin alt tarafına yumurta bırakması da literatüre göre [25] olağandışı bir durumdur (Şekil 6).



Şekil 6. A-Bu çalışmada kelebeğin bıraktığı yumurtanın genel görünümü ©Gökçe Coşkun, B- Avrupa'nın pul kanatlıları ve ekolojileri internet sayfasından alınmış olan türe ait başka bir yumurtanın detaylı görünümü[26]

Bu türün yumurta hacmi (EV): 0.29 mm³, Yumurta uzunluğu (WL): 26.9 mm'dir [27]. Ağaç karameleğinin yumurta şekli hakkında literatürde herhangi bir bilgiye rastlanmamıştır.

Bu tür Güney Avrupa'da yaygın olarak devamlı yayılış gösterirken, Batı Avrupa'da ise nadir olup parçalı dağılım göstermektedir [25]. Ağaç karameleği'nin Orta Avrupa'da genel olarak yılda bir nesil verdiği bilinmektedir [10]. Bu tür Güney Avrupa ve Mısır'da yılda iki tam nesil ve kısmi üçüncü nesil verirken, Hollanda'da her yıl sadece bir tam nesil vermektedir, bununla birlikte yıl içinde yüksek sıcak ortalamaları olması durumunda kısmi ikinci nesil verebilmektedir [28]. Türün diğer Avrupa ülkelerinde ve Türkiye'de kaç nesil verdiği bilinmemektedir. Bununla birlikte bu araştırma Akdeniz Bölgesi'nde yapılmıştır. Akdeniz Havzası'ndaki bir ülke olan Mısır'da yılda en az iki tam nesil verdiği için Antalya'da da en az iki tam nesil verebileceği tahmin edilebilir.

Ağaç karameleği popülasyonunun devam edebilmesi için büyük ve açık alanlara ihtiyacı vardır. Küçük ve izole alanlarda, düşük sıcaklık veya yüksek yağışlı geçen yıllarda popülasyonlarında yerel olarak düşüşler olmaktadır. Bu tür ısınmak için açık kumlu alanları ve likenleri kullandığından açık kumlu alanların ve likenlerin azalması ergin bireyleri olumsuz etkileyecektir. Bu türün besini olan süpürge otunun bazı bölgelerde istilacı otlar nedeniyle ortadan kaybolması türü olumsuz etkileyecektir. Bununla birlikte, tırtılların habitat değişikliklerine yetişkinlerden daha duyarlı olduğu tahmin edilmektedir [29]. Çalışılan alanda yangın etkisi ile habitat köklü biçimde değişmiş ve vejetasyon sıralı değişim ile yeniden ortaya çıkmaktadır.

Hollanda ve Almanya'nın iç kısımlarında rüzgarla sürüklenen kumul ekosistemlerde mevcut olan mikro iklim, sınırlı miktarda besin ve rüzgar dinamiği nedeniyle canlılara yaşamak için çok zorlu bir ortam sunmaktadır. Fiziksel, fizyolojik ve davranışsal adaptasyonların bir sonucu olarak sadece birkaç hayvan türü bu koşullarla başa çıkabilmektedir. Bu nedenle fauna bileşimi çok karakteristiktir, nadir ve nesli tehdit altındaki türleri içermektedir; ağaç karameleği (*Hipparchia statilinus*), boyunçeviren (*Jynx torquilla* Linnaeus, 1758) kır incirkuşu (*Anthus campestris* (Linnaeus, 1758)), kuyrukkakan (*Oenanthe oenanthe*) ve büyük örümcek kuşu (*Lanius excubitor* Linnaeus, 1758) gibi türler bu kumul ekosistemlerde yayılış göstermektedir [27]. Yangın sonrasında alanda yapılan gözlemlerde kır incir kuşu ve büyük örümcekkuşu tespit edilmemiştir, bu türlerin Türkiye'de nesli tehlike altında değildir ve yangın öncesinde de alanda gözlenmemişlerdir. Alanda yangın sonrasında yapılan gözlemlerde; göç esnasında kuyrukkakan ile kıvılcırtılı örümcekkuşu (Tablo 1) yoğun olarak gözlenmiştir.

Gelecekte Manavgat Ormanı'nı temsil edecek karakteristik türlerin kompozisyonu alanın insan etkisiyle şekillenmesi ya da pasif restorasyonun devam etmesine göre belirlenecektir.

Yangına bağımlı ekosistemlerde sıralı değişimin gerçekleşmesi yeni habitatların ortaya çıkmasında kilit rol oynamaktadır [30]. Yangın sonrası yaban hayvanlarının alan kullanımında öncelikle böcekler (insecta) sınıfı türlerinin alanda varlığı tespit edilmiştir. Bu süreçte böcekçil kuşlar da eş zamanlı olarak alana dönmektedir. Bu türlerden ekosistem mühendisi olan; arıkuşu [31]; ağaçkakanlar [32, 33] ve alakarga [34] gibi türler tohum taşıma, balık ve böcek popülasyonlarının dengelenmesi, yeni bir ekosistem kurulması ve besin zincirinin devamında ekosistem hizmetleri sağlamakta olup sağlıklı ekosistemin bir göstergesi olarak bilinmektedirler. Bu kuş türlerinin hepsi yangın sonrasında Manavgat Ormanları'nda belirli bir dönem tespit edilmiştir, gelecekte alandaki üreme durumları da izlenecektir.

Ağaç karameleği hakkında Türkiye'de mevcut literatürde oldukça sınırlı bilgi bulunmaktadır. Türün bir yılda verdiği nesil sayısı, yumurtlama dönemi ve yumurtasını bıraktığı yer dahi bilinmemektedir. Araştırmamızın bu konuda ulusal literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Alanda tek bir kelebek bireyinin gözlenmesinin türün popülasyonuna ilişkin bilgi veremeyeceği açıktır, ancak dişi bir bireyin yumurta bırakmaya başlaması türün geri dönüşünün ve ekosistemin canlanmasının bir göstergesi sayılabilir. Ayrıca yangın sonrasında alanda gözlenen bitki türleri ve alanı kullandığı tespit edilen hayvan türleri de listelenmiştir. Bu araştırma kapsamında Manavgat Ormanları'nın biyolojik çeşitlilik unsurları yangın sonrasında üç yıl süre ile izlenecektir. Gelecekte farklı görselleştirme teknikleri kullanılarak ekosistemdeki değişim, sıralı değişim, yangın sonrası yaban hayvanlarının alan kullanımı, davranışları, pasif restorasyon ve ekosistem hizmetleri üzerine değerlendirmeler yapılacaktır.

Teşekkür

Bu araştırmanın arazi çalışmaları T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Doğa Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürlüğü (DKMP)'nün izni ve Orman Genel Müdürlüğü (OGM)'nün bilgisi dâhilinde yapılmıştır. Ağaç karameleğinin Türkiye'deki durumu hakkında bilgi veren Süleyman Ekşioğlu'na ve önerileri ile makaleye katkı sağlayan Zafer Karaer'e teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] Taylor, M. (2020). Doğa Kitabı, Bitkiler, Hayvanlar ve Gezegenimiz. (2. bs). İstanbul, Maya Kitap. 192 s.
- [2] IUCN. (2021). International Union for Conservation of Nature (IUCN) SSC Butterfly and Moth Specialist Group, URL: <https://www.iucn.org/commissions/ssc-groups/invertebrates/butterfly-and-moth>. (Erişim Tarihi: 14.11.2021).
- [3] Karaçetin, E., Welch, H.J., Turak, A., Balkız, Ö., Welch, G. (2011). Türkiye'deki Kelebeklerin Koruma Stratejisi. Ankara, Doğa Koruma Merkezi. 65 s.
- [4] Tennent, W.J. (2011). *Hipparchia statilinus*. The IUCN Red List of Threatened Species 2011: e.T160360A5364211. URL: <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2011-2.RLTS.T160360A5364211.en>. (Erişim Tarihi: 13.11.2021).
- [5] Smithsonian. (2021). The Smithsonian Institution, the world's largest museum, education, and research complex URL: <https://www.si.edu/spotlight/buginfo/butterfly>. (Erişim Tarihi: 14.11.2021).
- [6] Karaçetin, E., Welch, H.J., (2011). Türkiye'deki Kelebeklerin Kırmızı Kitabı. Ankara, Doğa Koruma Merkezi.
- [7] Van Swaay, C., Cuttelod, A., Collins, S., Maes, D., López Munguira, M., Šašić, M., Settele, J., Verovnik, R., Verstrael, T., Warren, M., Wiemers, M., Wynhof, I. (2010). European Red List of Butterflies. Luxembourg, Publications Office of the European Union. 47 p.
- [8] Luft, L., Neumann, C., Itzerott, S., Lausch, A., Doktor, D., Freude, M., Blaum, N., Jeltsch, F. (2016). Digital and real-habitat modeling of *Hipparchia statilinus* based on hyper spectral remote sensing data. International Journal of Environmental Science and Technology, 13(1), 187–200.
- [9] GBIF. (2021). *Hipparchia statilinus* (Hufnagel, 1766) in the Global Biodiversity Information Facility Secretariat. GBIF Backbone Taxonomy. Checklist dataset URL: <https://doi.org/10.15468/39omei>, (Erişim Tarihi: 13.11.2021).
- [10] Goodden, R., Goodden, R. (2016). Green Guide to Butterflies of Britain and Europe. London, UK., Bloomsbury Publishing. 112 p.
- [11] Rowlings, M. (2021). EuroButterflies (The photographic record of the butterflies in Europe). 2003-2021. URL: <http://www.eurobutterflies.com/sp/statilinus.php>, (Erişim Tarihi: 12.11.2021).
- [12] Baytaş, A. (2019). Türkiye'nin Kelebekleri Arazi Rehberi, DKM Yayınları, Ankara. 263 s.
- [13] Kışlalıoğlu, M., Berkes, F. (2019). Çevre ve Ekoloji (17. bs). İstanbul, Remzi Kitabevi. 270 s.
- [14] Durmuş, B., Bulut, İ. ve Gönençgil, B. (2021). Antalya Bölümünde sıcaklık ve yağış indislerinin değişim analizleri. Türk Coğrafya Dergisi, 78, 91-108.

- [15] ÇŞB. (2021). T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Çevresel Göstergeler. URL: <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/orman-yanginlari-i-85850>, (Erişim Tarihi: 12.11.2021).
- [16] EFFISS. (2021). European Forest Fire Information System EFFIS. URL: <https://effis.jrc.ec.europa.eu>, Son (Erişim Tarihi: 12.11.2021).
- [17] Vaughn, K.J., Porensky, L.M., Wilkerson, M.L., Balachowski, J., Peffer, E., Riginos, C., Young, T.P. (2010). Restoration Ecology. *Nature Education Knowledge*, 3(10), 66.
- [18] Avcı, M. (1993). Türkiye'nin flora bölgeleri ve "Anadolu Diagonali" ne coğrafi bir yaklaşım. *Türk Coğrafya Dergisi*, 28, 225-248.
- [19] Avcı, M. (2000). Yeryüzünün Zoocoğrafya Bölgeleri ve Türkiye'nin Yeri. *Coğrafya Dergisi*, 8, 157-200.
- [20] Yıldırım, E., Ortaçşme, V. (2013). Manavgat Nehri Havzası'ndaki peyzaj değişiminin peyzajların korunması, planlanması ve yönetimine yönelik değerlendirilmesi. *Mediterranean Agricultural Sciences*, 29(2), 65-72.
- [21] DW. (2021). Deutsche Welle (DW). URL: <https://www.dw.com/tr/manavgatta-60-bin-hektar-ormanl%C4%B1k-alan-k%C3%BCI-oldu/a-58796833>, (Erişim Tarihi: 12.11.2021).
- [22] Baysal, İ., Bilgili, E., Başkent, E. Z. (2016). Orman Yangınları ve Orman Amenajman Planları. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 16(1), 169-180.
- [23] Jones, C., Lawton, J., Shachak, M. (1994). Organism as ecosystem engineers. *Oikos*, 69:373-386.
- [24] Gooley, T. (2019). Doğanın İşaretlerini Okumanın Kaybolmuş Sanatı (4. bs). İstanbul, Destek Yayınları. 392 s.
- [25] Bos, F. (2006). Dagvlinders: Kleine heivlinder *Hipparchia statilinus*. *Natuur van Nederland*, 7(1), 238-240.
- [26] Pyrgus, (2021). The ecology of European lepidoptera, *Hipparchia statilinus* (Hufnagel, 1766), URL: http://www.pyrgus.de/Hipparchia_statilinus_en.html. (Erişim Tarihi: 14.11.2021).
- [27] García-Barros, E. (2000). Egg size in butterflies (Lepidoptera: Papilionoidea and Hesperioidea): a summary of data. *Journal of Research on the Lepidoptera*, 35, 90-136.
- [28] Nijssen, M., Siepel, H. (2010). The characteristic fauna of inland drift sands. In J. Fanta & H. Siepel (Eds.), *Inland Drift Sand Landscapes: Origin and History; Relief, Forest and Soil Development; Dynamics and Management* (pp. 255- 278), The Netherlands, KNNV Publishing. 255-278 p.
- [29] Riksen, M., Ketner-Oostra, R., Van Turnhout, C., Nijssen, M., Goossens, D., Jungerius, P. D., Spaan, W. (2006). Will we lose the last active inland drift sands of Western Europe? The origin and development of the inland drift-sand ecotype in the Netherlands. *Landscape Ecology*, 21(3 SPEC. ISS.), 431-447.
- [30] Baysal, İ., Uçarlı, ., & Bilgili, E. (2017). Orman yangınları ve kuşlar. *Kastamonu Üniv. Orman Fakültesi Dergisi*, 17, 543-553.
- [31] Casas-Crivillé, A., Valera, F. (2005). The European bee-eater (*Merops apiaster*) as an ecosystem engineer in arid environments. *Journal of Arid Environments*, 60(2), 227-238.
- [32] Jones, C., Lawton, J., Shachak, M. (1994). Organism as ecosystem engineers. *Oikos* 69, 373-386.
- [33] Catalina-Allueva, P., Martín, C. A. (2021). The role of woodpeckers (family: Picidae) as ecosystem engineers in urban parks: a case study in the city of Madrid (Spain). *Urban Ecosystems*, 1-9.
- [34] Hougner, C., Colding J., Söderqvist, T. (2006) Economic valuation of a seed dispersal service in the Stockholm National Urban Park, Sweden. *Ecol Econ* 59(3), 364-374

Tetrasiklin Giderimi için Elektrokimyasal Oksidasyon Yöntemi

Muhammed Arslantaş¹, Ömür Gökkuş^{*1}

*¹ Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği, KAYSERİ

(Alınış / Received: 06.03.2023, Kabul / Accepted: 10.04.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 02.05.2023)

Anahtar Kelimeler

Tetrasiklin, Titanyum Anot,
Paslanmaz Çelik,
Elektrooksidasyon,
Farmasotik

Öz: Bu çalışmada dünya genelinde yaygın olarak kullanılan antibiyotik tetrasiklin etken maddesinin doğrudan elektrooksidasyon yöntemlerinden birisi olan anodik oksidasyon prosesi ile giderimi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalar esnasında titanyum anot ve paslanmaz çelik katot elektrot konfigürasyonu ile 60 dakikalık elektroliz esnasında tetrasiklin giderimi araştırılmıştır. Çalışmada elektrokimyasal proses performansını etkileyen pH, akım şiddeti, destek elektrolit konsantrasyonu ve ilaç etken madde konsantrasyonu gibi temel işletme parametrelerinin optimum düzeyleri tespit edilmiştir. Ayrıca optimum işletme koşullarında prosese ait kinetik parametreler incelenerek yalancı birinci derece reaksiyon hız sabitleri belirlenmiştir. Buna göre titanyum anot kullanılarak yürütülen deneysel çalışmalarda optimum işletme koşulları pH, akım şiddeti, destek elektrolit konsantrasyonu ve tetrasiklin başlangıç konsantrasyonu sırasıyla pH 3, 100 mA, 10 mM Na₂SO₄ ve 10 mg/L tetrasiklin konsantrasyonu olarak belirlenmiştir. Belirtilen bu çalışma koşullarında %55,35 tetrasiklin giderimine ulaşılmıştır. Diğer taraftan 20 – 120 mA akım şiddetleri için reaksiyon hız sabitleri incelendiğinde ise 100 mA akım şiddeti değerinde en yüksek reaksiyon hız sabiti değerine ($k=0,0148 \text{ dak}^{-1}$) ulaşıldığı görülmüştür. Optimum işletme koşullarında toplam organik karbon (TOK) giderimi incelendiğinde ise %25,8 TOK giderimine ulaşılabilirdiği görülmüştür. Deneysel çalışmalar esnasında incelenen diğer bir parametre ise sistem enerji tüketimleridir. Bu bağlamda 10 mg L⁻¹ tetrasiklin konsantrasyonu için anodik oksidasyon prosesi uygulandığında 120 mA'lık akım şiddetinde 46,80 kWh/m³ lük bir enerji tüketimi söz konusudur. Ancak prosesin optimum giderim sağladığı 100 mA akım şiddeti için 43,20 kWh/m³ lük bir enerji gereksinimi duyulmaktadır. Anodik oksidasyon prosesi ile tetrasiklin giderimi için yapılan çalışmalar neticesinde belirlenen koşullarda toksisite testleri de yapılmış olup, deneysel çalışmalarda kullanılan tetrasiklin konsantrasyonu için herhangi bir toksisite bulgusuna rastlanmamıştır.

Electrochemical Oxidation Method for Tetracycline Removal

Keywords

Tetracycline, Titanium
Anode, Stainless Steel,
Electrooxidation,
Pharmaceutic

Abstract: In this study, it was aimed to remove the antibiotic tetracycline, which is widely used around the world, by the anodic oxidation process, which is one of the direct electrooxidation methods. During the experimental studies, tetracycline removal was investigated during 60 min electrolysis with titanium anode and stainless-steel cathode electrode configuration. In the study, the optimum levels of the basic operating parameters such as pH, applied current, background electrolyte concentration, and initial drug concentration, which affect the electrochemical process performance, were determined. In addition, pseudo-first-order reaction rate constants were determined by examining the kinetic parameters of the process at optimum operating conditions. Accordingly, in the experimental studies performed with titanium anode, the optimum operating conditions were determined as pH, applied current, background electrolyte concentration and initial

tetracycline concentration of 3, 100 mA, 10 mM Na₂SO₄, and 10 mg L⁻¹, respectively. At these experimental conditions, 55.35% tetracycline removal was attained. On the other hand, when the reaction rate constants were examined at the applied current of 20 – 120 mA, it was seen that the highest reaction rate constant value ($k=0.0148 \text{ min}^{-1}$) was reached at the applied current of 100 mA. When the total organic carbon (TOC) removal is analyzed at optimum operating conditions, 25.8% TOC removal was attained. Another parameter examined during the experimental studies is electrical energy consumption. In this context, when the anodic oxidation process is applied for initial tetracycline concentration of 10 mg L⁻¹, the electrical energy consumption of the process was calculated as 46.80 kWh/m³ at an applied current of 120 mA. However, the energy consumption of 43.20 kWh/m³ is calculated at the applied current of 100 mA as the optimum current value. Toxicity tests were also carried out at the optimum conditions and no toxicity findings were found for the tetracycline concentration used in the experimental studies.

*İlgili Yazar, email: omurgokkus@erciyes.edu.tr

1. Giriş

Sudaki antibiyotikler biyolojik etkileri ve çevre ve insan sağlığı için potansiyel riskleri nedeniyle gün geçtikçe artan ilgi görmektedir [1-3]. Tetrasiklin, insan sağlığı üzerinde önemli etkileri olan en yaygın kullanılan antibiyotiklerden biridir ve bu nedenle uzaklaştırılması için uygun yaklaşımlara ihtiyaç duyar [4-6]. Çeşitli antibiyotikler arasında tetrasiklin, büyük terapötik değerleri nedeniyle insan hastalıklarının tedavisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [7]. Tetrasiklin genellikle hayvanlarda ve insan vücudunda zayıf ayrışması nedeniyle sindirim sisteminde herhangi bir değişime uğramaksızın çevreye deşarj edilmektedir. Bu nedenle, çevresel ortamda en çok rastlanılan ilaç kalıntı maddelerden birisidir. Atıksularda, tetrasiklin konsantrasyonunun ortalama 2,2 mg/L değerlerine ulaştığı ve su ortamlarında dikkatle incelenmesi gereken kirleticilerden birisi olduğu düşünülmektedir [8]. Buna ek olarak, yeraltı suyu ve yüzey suyunda (0,1-4,5 mg / L) yüksek konsantrasyonlarda tetrasiklin varlığı çeşitli literatür çalışmalarında da rapor edilmektedir [9].

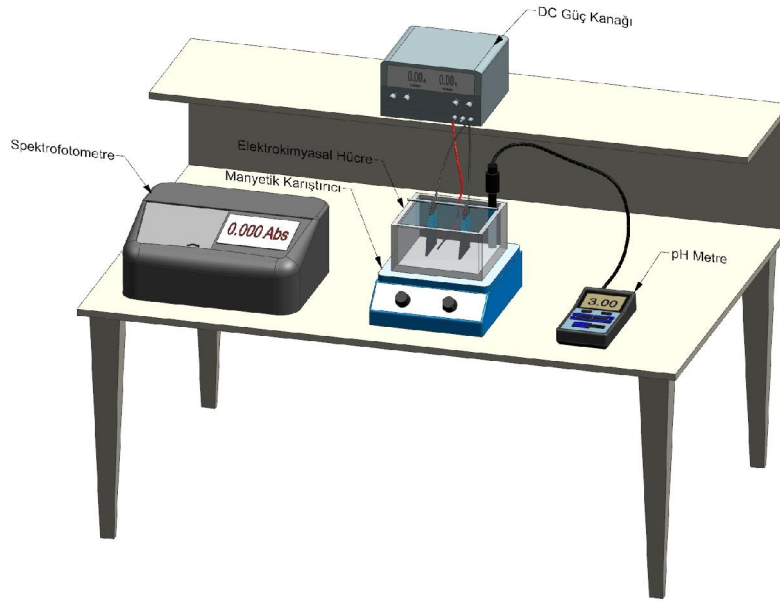
Biyolojik prosesler de dâhil olmak üzere atıksudan tetrasiklin giderimi için çeşitli arıtma yöntemlerinin performans değerlendirmesi birçok araştırmacı tarafından yapılmıştır [10]. Atıksulardan tetrasiklin giderimi için biyolojik işlemler, koagülasyon flokülasyon, adsorpsiyon, ozonlama, fotokataliz ve fotoelektrokataliz dâhil olmak üzere çeşitli teknikler detaylı bir şekilde araştırılmıştır [11]. Biyolojik arıtma, koagülasyon ve flokülasyon ve adsorpsiyon prosesleri gibi konvansiyonel yöntemler tetrasiklin giderimi için özel olarak tasarlanmadıkları için etkili bir giderim performansı sağlayamamaktadırlar [10, 12, 13]. Ozonlama, yüksek oksidasyon kapasitesi nedeniyle atıksulardan tetrasiklin giderimi için etkili bir yöntemdir, ancak toplam organik karbonun (TOK) giderim verimi yetersiz kalmaktadır. Bunun sebebi ise ozonlama yönteminin tipik olarak organik bileşikler kısa zincirli karboksilik asitlere indirgeyerek, tamamen CO₂ ve H₂O'ya dönüştürememesi ile açıklanabilir [14, 15]. Fotokataliz ve fotoelektrokataliz yöntemleri ile oldukça yüksek tetrasiklin ve TOK uzaklaştırma verimleri elde edilebilmektedir, ancak söz konusu proseslerin nispeten yüksek maliyetleri, büyük ölçekli uygulamalar için kullanımlarını sınırlandırabilmektedir [11, 16, 17]. Bu nedenle, atıksu arıtma tesislerinin atıksularından tetrasiklin giderimi için daha verimli süreçler geliştirmesi gerekmektedir. Son yıllarda, elektrokimyasal ileri oksidasyon proseslerinin (EAOP) güçlü oksitleme kabiliyeti, basit işletim koşulları ve çevresel uyumluluklarından dolayı tetrasiklin giderimi için umut verici bir arıtım yöntemi olduğu rapor edilmektedir. EAOP'lerin arıtım verimliliği büyük ölçüde kullanılan anot malzemesinin türüne ve kararlılığına bağlıdır. Konu ile ilgili mevcut literatür çalışmaları incelendiğinde elektrokimyasal yöntemlerle tetrasiklin giderimi için Ti / RuO₂, Ti / RuO₂-IrO₂ ve bor katkılı elmas (BDD) elektrot gibi çeşitli elektrot malzemelerin oldukça başarılı giderim sonuçları sağladıkları görülmektedir. Ti / RuO₂ ve Ti / RuO₂-IrO₂ anotların, sulu çözeltilerden yüksek verimlilikte (>%90) tetrasiklin giderebildikleri rapor edilmektedir, ancak KOİ ve TOK gideriminde yeterli ölçüde giderim sağlayamadıkları (<%30) bilinmektedir. BDD daha iyi bir elektrokimyasal anot malzemedir, çünkü tetrasiklin ve parçalanma sürecinde ortaya çıkan ara ürünleri neredeyse tamamen mineralize edebilmekte ve sonuç olarak yüksek oranda konsantrasyon (>%95), KOİ (%93) ve TOK (%87) giderim verimlilikleri sağlayabilmektedir [4, 5, 18, 19]. Konu ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde elektrokimyasal oksidasyon yöntemi kullanılarak Ti₄O₇ anodunun tetrasiklin giderim verimini ve proses performansı üzerinde etkili işletimsel koşulları inceleyen oldukça az sayıda çalışma bulunduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, anodik oksidasyon prosesi ile tetrasiklin giderimi çalışmalarında toksisite gideriminin araştırılması ise arıtım süreci sonrasında sucul canlılar üzerinde tam mineralize olmamış ilaç etken madde kalıntılarının ne oranda olumsuz etki yaratacağı konu ile ilgili farklı bir sorunun cevabı olacaktır. Bu nedenle, tetrasiklin mineralizasyonu, parçalanma sürecinde oluşan diğer organik kirleticilerin (ara ürünlerin) toksisitesini değerlendirilebilmesi için daha fazla çalışma yapılmasına ihtiyaç bulunmaktadır [20, 21].

Önceki yıllarda yapılan bazı çalışmalarda, atıksu toksisitesini önemli ölçüde değiştiren ozonlama ve fotokataliz sonrasında tetrasiklin için mineralizasyon ara ürünleri rapor edilmiştir. Ancak, tetrasiklin için elektrokimyasal oksidasyon yoluyla tam mineralizasyon sağlanamadığı ve ara ürünlerden kaynaklanan toksisite değişim mekanizmasının belirsizliğini koruduğu belirtilmektedir. Tetrasiklin giderimi için elektrokimyasal oksidasyon mineralizasyon ürünlerine ilişkin daha derin araştırmalar, toksisiteden sorumlu ara bileşiklerin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlayabilir ve tetrasiklin içeren atıksular için elektrokimyasal oksidasyon yöntemlerinin seçimi konusunda fayda sağlayabilir [22-25].

Bu çalışmada Tetrasiklin anodik oksidasyon prosesi üzerinde etkili işletimsel faktörler (uygulanan akım şiddeti, elektrotlar arası mesafe ve başlangıç tetrasiklin konsantrasyonu) için optimum koşullar araştırılmış ve çeşitli kinetik değerlendirmeler yapılmıştır. Ayrıca, mineralizasyon sonrasında atıksuyun toksisite değerlendirmesi de çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir.

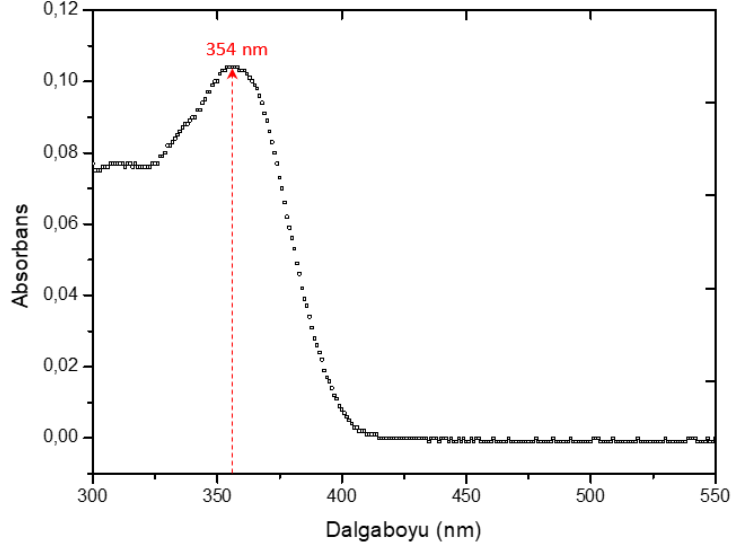
2. Materyal ve Metot

Çalışma kapsamında anodik oksidasyon prosesi ile tetrasiklin giderimi için yürütülen deneyler 60 dakikalık elektroliz sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda başlangıç tetrasiklin konsantrasyonunun elektroliz süresine bağlı olarak azalışını değerlendirmek üzere her 10 dakikada bir elektrokimyasal hücreden örnekler alınarak absorbands ölçümleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda efektif hacmi 250 mL olan bir elektrokimyasal hücre kullanılmış olup periyodik olarak 2,5 mL numuneler reaktörden alınarak ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan elektrokimyasal hücreye ait şematik diyagram Şekil 2.1'de verilmektedir. Deneysel çalışmalarda anodik oksidasyon prosesinin tetrasiklin giderimindeki verimliliğini değerlendirebilmek amacıyla işletimsel parametrelerin aralık değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla çeşitli ön denemeler gerçekleştirilerek pH, akım şiddeti, elektroliz süresi, tetrasiklin konsantrasyonu gibi parametreler için çalışma aralıkları belirlenmiştir.



Şekil 2.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan deney düzeneğine ait şematik diyagram.

Tetrasiklin konsantrasyonunun zamana bağlı azalışını inceleyebilmek için spektrofotometrik analizler yapılmış olup, öncelikle tetrasiklin için 300-700 nm aralığında bir absorbands taraması gerçekleştirilmiştir. 100 mg/L tetrasiklin konsantrasyonu için yürütülen absorbands taraması sonucu Şekil 2.2'de verilmektedir. Spektrum taraması ile numunelerin analizinde kullanılacak dalga boyu değeri 354 nm olarak tayin edilmiştir.



Şekil 2.2. Tetrasiklin için maksimum absorbans taraması sonuçları

2.1. Elektrokimyasal Sistem

Deneylerde kullanılan dikdörtgen şeklinde bölünmemiş hücre (undivided cell) pleksiglass maddeden yapılmış olup 12,5 x 7,5 x 6 cm boyutlarına sahiptir. Deneyde anot malzeme olarak, 10 x 7 x 5 cm boyutlarında titanyum levha ve katot malzeme olarak aynı boyutlarda SS-316L malzemeden yapılmış paslanmaz çelik levha tercih edilmiştir. Elektrotlar, GW Instek 3606 marka dijital bir güç kaynağına bağlanmış ve sabit akım koşullarında kullanılmıştır. Anodik oksidasyon ile tetrasiklin giderimi çalışmalarında ihtiyaç duyulan elektrolitik iletkenlik, stok konsantrasyonu 2M Na₂SO₄ olan farklı konsantrasyonlarda seyreltilmiş destek elektrolit ilaveleri ile sağlanmıştır. Anodik oksidasyon çalışmalarına ait ön denemelerde düşük akım şiddetleri uygulandığı için önemli bir ısı artışı gözlemlenmemiştir. Reaktör ortamında anodik oksidasyon reaksiyonlarının gerçekleşebilmesi için tetrasiklin çözeltisinin doğal pH değeri (pH 6,4) elektroliz işlemi öncesinde 0,1N H₂SO₄ veya 0,1N NaOH çözeltileri kullanılarak asidik şartlara ayarlanmıştır. Elektroliz işlemleri esnasında oluşan reaktiflerin çözelti ortamında homojen dağılımının gerçekleşebilmesi için IKA C-MAG HS7 manyetik karıştırıcı vasıtasıyla 200 dev/dak karıştırma hızında sürekli karıştırılmıştır. Elektrokimyasal reaktör ortamının pH, iletkenlik, sıcaklık değerleri Hach-Lange HQ40D bir multiparametre ölçer kullanılarak ölçülmüştür. Elektrokimyasal oksidasyon deney düzeneği Şekil 2.3’de verilmektedir.



Şekil 2.3. Elektrokimyasal deneysel düzeneğine ait genel görünüm

Tetrasiklin giderimi için absorbans ölçümleri Hach-Lange DR 6000 marka bir spektrofotometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda ayrıca tetrasiklin çözeltisinin karakterizasyonu amacıyla elektroliz

öncesi ham sentetik çözeltinin toplam organik karbon (TOK) değerleri de analiz edilmiştir. TOK analizleri için Kayseri Su ve Kanalizasyon İdaresi (KASKİ) laboratuvarlarında Shimadzu TOC-L marka bir TOK analizörü kullanılarak yüksek sıcaklıkta yakma “High-Temperature Combustion” metoduna [26] göre 720 °C fırın sıcaklığı ve yüksek saflıkta kuru hava kullanılarak yapılmıştır.

2.3. Kullanılan Kimyasallar

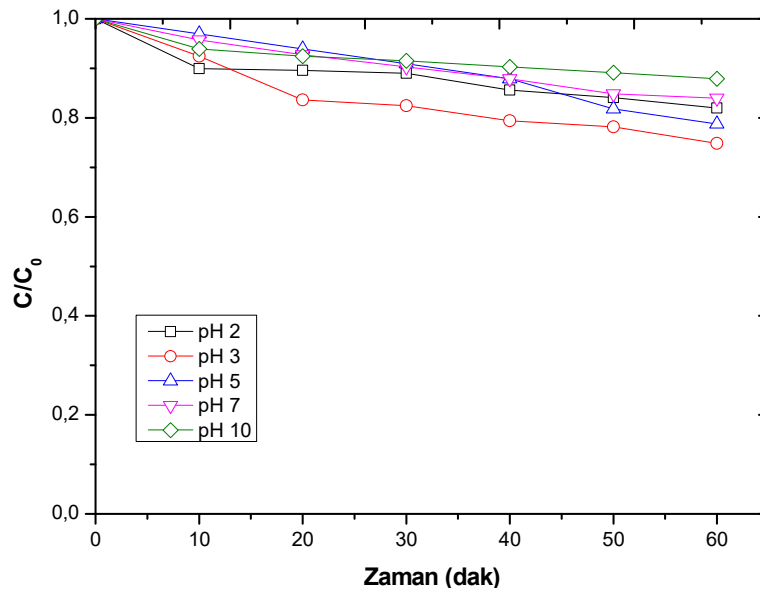
Deneysel çalışmalarda pH ayarlamak amacıyla 0,1N H₂SO₄ veya 0,1N NaOH kullanılmış olup, bu çözeltileri hazırlamak için sülfürik asit ve sodyum hidroksit (Merck %97) kullanılmıştır. Anodik oksidasyon denemelerinde sodyum sülfat (Merck %99) destek elektrolit olarak kullanılmıştır.

3. Bulgular

3.1. pH Etkisinin İncelenmesi

Konu ile ilgili çalışmalar incelendiğinde birçok makalede pH'nın anodik oksidasyon prosesi üzerinde kilit öneme sahip bir parametre olduğu rapor edilmektedir. Ancak sonuçlar genellikle çelişkilidir. Aslında bazı yazarlar anodik oksidasyon prosesinin alkali ortamlarda tercih edildiğini belirtmekte, diğer taraftan bazı yazarlar ise asidik ortamlarda prosesin daha verimli işletilebildiğini ifade etmektedirler. Bununla birlikte bazı araştırmacılar ise proses performansının pH değişimleri ile önemli ölçüde etkilenmediğini bildirdikleri görülmektedir [16]. Ortaya çıkan bu farklılıklar test edilen organik maddenin kimyasal yapısındaki bağlı fonksiyonel gruplardan ileri gelmektedir [27].

Bu sebeple çalışma kapsamında yürütülen deneysel çalışmalara ilk olarak pH parametresi için en iyi giderim veriminin belirlenmesine yönelik araştırma ile başlanılmıştır. Bu amaçla pH 2-10 arasında farklı değerler uygulanmak suretiyle en uygun pH değeri araştırılmıştır. Deneylerde diğer değişkenler tetrasiklin konsantrasyonu, akım şiddeti ve destek elektrolit konsantrasyonu sırasıyla 10 mg/L, 20 mA ve 25 mM olarak sabit tutulmuştur. pH denemelerine ilişkin bulgular Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Tetrasiklin gideriminde çözelti pH'sının anodik oksidasyon verimi üzerine etkisinin araştırılması. Deneysel çalışmada uygulanan işletme koşulları, 10 mg/L tetrasiklin konsantrasyonu, 20 mA akım şiddeti, 25 mM destek elektrolit (Na₂SO₄) konsantrasyonu ve elektroliz süresi 60 dakika.

Şekil 3.1'e bakıldığında tetrasiklin giderim verimlerinin pH ile değişim gösterdiği anlaşılmaktadır. Ancak özellikle asidik pH değerlerinde tetrasiklin gideriminin daha iyi olduğu, alkali şartlarda ise pH değişimlerinin anodik oksidasyon verimini önemli ölçüde etkilemediği görülmektedir. Çözelti içerisindeki organik bileşikler çoğunlukla güçlü bir oksidant olan hidroksil radikalleri vasıtasıyla parçalanmaktadır ve hidroksil radikallerinin oksidasyon potansiyelleri pH ile önemli ölçüde etkilenmemektedirler.

pH araştırması sonuçlarına göre anodik oksidasyonla tetrasiklin giderimi için en iyi pH değerinin 3 olduğu görülmektedir (%25 tetrasiklin giderimi). Klidi ve arkadaşlarının (2018) kâğıt endüstrisi atıksularının

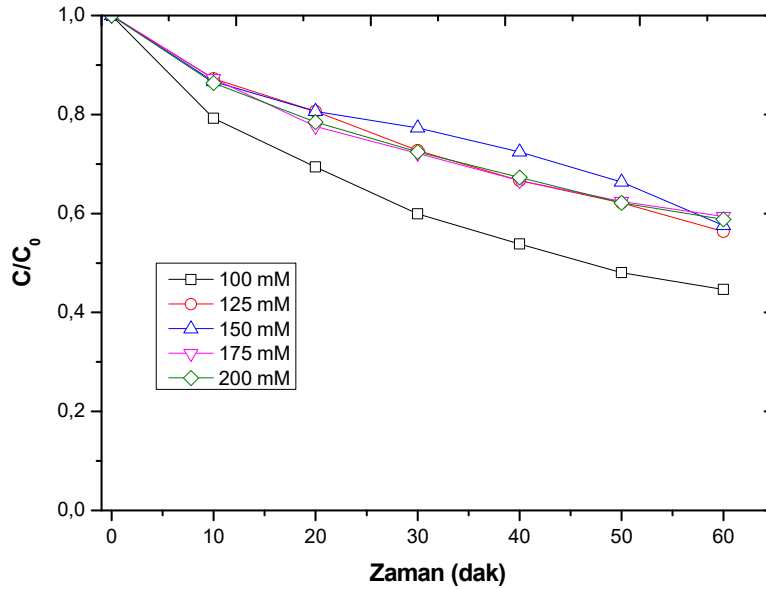
elektrooksidasyon prosesi ile arıtılabilirliğinin Ti/Ru/SnO₂ anot ve BDD anot ile karşılaştırıldığı bir çalışmada anodik oksidasyon için en iyi çözelti pH değeri 3 olarak rapor etmektedirler [16]. Diğer taraftan Dos Santos ve diğ. (2020) BDD elektrot kullanılarak Tartrazin azo boyasını anodik oksidasyonla gidermeye çalıştıkları farklı bir çalışmada çözelti pH değerini 3-9 arasında değiştirerek boya giderim performansını araştırmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre pH 3 ve pH 9 değerleri arasında önemli bir boya giderimi olmadığını (pH 3 ve 9 için sırasıyla %92 ve %94 boya giderimi) rapor etmektedirler [10].

Ansari ve Nematollahi (2020), 4mA/cm² akım yoğunluğu değerinde asidik (pH=3), nötr (pH=7) ve bazik (pH=10) çözeltilerde p-DNB'nin elektrokimyasal bozunması üzerine çözelti pH'ının etkisini inceledikleri bir çalışmada, asidik çözeltiler için elektrokimyasal bozunma verimliliğinin, nötr ve bazik çözeltilere göre daha iyi olduğunu belirtmektedir. Bazik çözeltilerdeki bozunma verimliliğindeki azalma, hidroksit iyonlarının kirletici ile reaksiyonu şeklinde açıklanmaktadır. Bu, elektrotun fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirmenin yanı sıra polimerik ara ürünlerin bozunmasına karşı direnç üretebilir. Ayrıca, pH'daki artış, oksijen oluşum oranını arttırmakta ve anot yüzeyinde oksijen üretim potansiyelini azaltmaktadır. Sonuç olarak, anot yüzeyine ulaşan kirletici miktarı azalmaktadır [28]. Sonuç olarak, bu çalışma için asidik pH değerleri (pH 3) tetrasiklin gideriminde daha iyi sonuçlar sağlamaktadır.

3.2. Destek Elektrolit Konsantrasyonunun Etkisinin İncelenmesi

Elektrooksidasyon çalışmalarında kullanılan yaygın destek elektrolit türleri genellikle sülfatlar, nitratlar, perkloratlar ve klorlu bileşiklerdir. Sülfatlar ve klorlu bileşikler genellikle sıvı çözeltilerdeki aktif elektrolitler olarak bilinmektedirler. Özellikle klorür ve sülfatların sulu çözeltide bulunması anodik oksidasyon gibi elektrokimyasal prosesler açısından avantajlı bir durumdur. Çünkü elektrokimyasal süreç içerisinde sülfat radikalleri (SO₄^{•-}) ve aktif klor gibi güçlü oksidanların oluşumuna sebep olmaktadır. Ancak yüksek klorür konsantrasyonları organik klorlu bileşiklerin oluşumu nedeniyle olumsuz sağlık etkilerine sahip olmakla birlikte elektrokimyasal çalışmalarında sülfatlar daha makul ve etkili elektrolitler olarak düşünülmektedirler [11].

Çalışma kapsamında ilk aşama deneysel çalışmalar sonucunda optimum pH değeri 3 olarak belirlendikten sonra, deneysel çalışmalar kapsamında araştırılan ikinci parametre destek elektrolit konsantrasyonudur. Bu amaçla destek elektrolit konsantrasyonu 100 – 200 mM aralığında değişen destek elektrolit konsantrasyonlarının (Na₂SO₄) tetrasiklin giderim verimine ilişkin bulgular Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Bu deneylerde ilk kısımda optimize edilen pH değeri 3 olarak belirlenmiş ve uygulanmış, diğer etkin parametreler ise 10 mg/L başlangıç tetrasiklin konsantrasyonu, 50 mA akım şiddeti olarak sabit tutulmuştur.



Şekil 3.2. Tetrasiklin gideriminde destek elektrolit konsantrasyonunun anodik oksidasyon verimi üzerine etkisinin araştırılması. Deneysel çalışmada uygulanan işletme koşulları, 10 mg/L tetrasiklin konsantrasyonu, çözelti başlangıç pH=3, 20 mA akım şiddeti ve elektroliz süresi 60 dakika.

Şekil 3.2'ye bakıldığında 60 dakikalık elektroliz süresinde en iyi giderim veriminin 100 mM Na₂SO₄ destek elektrolit konsantrasyonu ile sağlandığı anlaşılmaktadır. Optimum destek elektrolit konsantrasyonu olan 100 mM

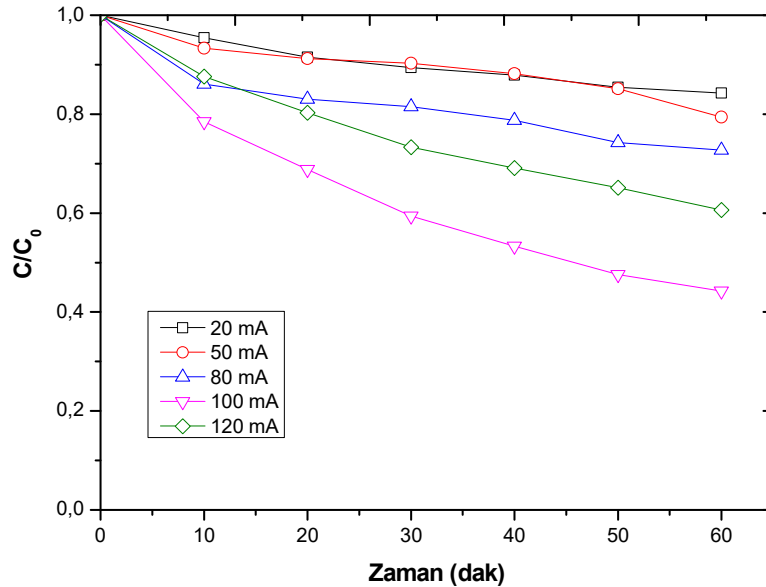
Na_2SO_4 konsantrasyonu ile yürütülen deneysel çalışmada, 10 ppm başlangıç tetrasiklin konsantrasyonu için %26,62 oranında giderim sağlanmıştır. Uygulanan diğer destek elektrolit konsantrasyonlarında ise benzer arıtım verimleri elde edildiği görülmektedir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre 100 mM üzerindeki destek elektrolit konsantrasyonları arıtım verimini önemli ölçüde etkilememektedir. Destek elektrolit konsantrasyonundaki artış ile birlikte hücre potansiyelinde de küçük bir artış meydana gelmektedir. Diğer bir ifadeyle, destek elektrolit doğrudan elektrot potansiyelini etkilemektedir [29]. Bu sonuç yüksek elektrolit konsantrasyonlarında elektrot yüzey üzerinde bir tuz filminin oluşması ile açıklanabilir. Oluşan tuz filmi, elektrot yüzeyinde hidroksil radikal miktarının azalmasına ve dolayısıyla da tetrasiklin gideriminde küçük bir azalışa neden olmaktadır. Elde edilen sonuçlar literatürde benzer çalışma sonuçları ile paralellik göstermektedir [13].

3.3. Akım Şiddetinin Etkisinin İncelenmesi

Tüm elektrokimyasal proseslerde olduğu gibi anodik oksidasyon prosesi için de uygulanan akım şiddeti proses verimliliği açısından oldukça önemli bir parametredir. Anodik oksidasyon prosesinde akım şiddeti parametresi çözelti içerisinde elektron transferini yönetmekte ve ayrıca proses esnasında üretilen reaktif oksidantların miktarını doğrudan etkilemektedir [12]. Türkay ve ark. (2018), akım şiddeti değerinin artması ile birlikte suyun oksidasyonu yoluyla üretilen OH^\bullet radikal miktarlarının da arttığını bildirmektedir [14]. Ancak uygulanan yüksek akım şiddetlerinden ileri gelebilecek çeşitli handikaplar da yine aynı zamanda çeşitli araştırmacılar tarafından bildirilmektedir. Bu mahsurlar ise şu şekilde verilebilir;

Yüksek akım şiddeti değerlerinde oluşan OH^\bullet radikallerinin oksijen gazı ile verdiği parazitik reaksiyonlar veya OH_2^\bullet gibi daha zayıf radikallerin oluşumu ile birlikte OH^\bullet radikalleri arasında gelişen rekabet neticesinde hedef kirleticinin gideriminde bir azalış meydana gelebilmektedir. Yine diğer bir olumsuz durum ise anodik oksidasyon elektrot yüzeyinde fiziko-adsorbe edilmiş OH^\bullet radikalleri ile heterojen bir şekilde gerçekleştiğinden, sınırlayıcı akım yoğunluğuna ulaştıktan sonra elektrokimyasal bozunma hızı, kirleticilerin elektrot yüzeyine doğru kütle aktarım hızı ile doğru orantılı bir şekilde gerçekleşmektedir [17].

Çalışmanın bu kısmında incelenmesi gereken diğer bir parametre olarak akım şiddeti seçilmiş ve 20-120 mA aralığında değişen akım şiddetlerinde deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen tetrasiklin giderim verimleri Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Bu deney setinde daha önce optimize edilen pH değeri ve destek elektrolit konsantrasyonu sırasıyla 3 ve 100 mM olarak uygulanmış ve diğer etkin parametre olan tetrasiklin konsantrasyonu 10 ppm olarak sabit tutulmuştur.



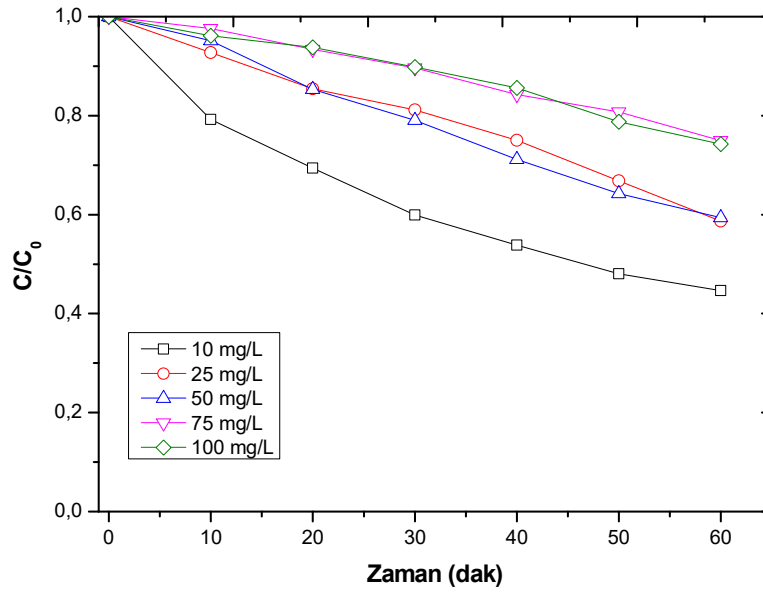
Şekil 3.3. Tetrasiklin gideriminde akım şiddetinin anodik oksidasyon verimi üzerine etkisinin araştırılması. Deneysel çalışmada uygulanan işletme koşulları, 10 mg/L tetrasiklin konsantrasyonu, çözelti başlangıç pH=3, 100 mM destek elektrolit (Na_2SO_4) konsantrasyonu ve elektroliz süresi 60 dakika.

Şekil 3.3'de görüldüğü gibi akım şiddetinin artması ile birlikte tetrasiklin gideriminde dikkate değer bir artış gözlemlenmektedir. Akım şiddeti değerinin 100 mA değerine ulaşması ile birlikte %55,35'lik bir tetrasiklin giderimi elde edilmiştir. Bu davranış artan akım şiddeti değerleri ile anotta meydana gelen oksijen gazının artışı ile açıklanabilir. Oluşan oksijen miktarındaki artış ile çıkış suyunda çözünmüş organik miktarda bir azalış

gözlemlenmektedir. Ancak oluşan oksijen miktarının da kullanılan anot malzemenin doğası ile ilgili olduğu unutulmamalıdır. BDD gibi aktif anot malzemelerin daha yüksek oksijen oluşturma potansiyellerine sahip olduğu bilinmektedir [18]. Ancak daha yüksek akım şiddeti değerleri uygulandığında ise (120 mA) tetrasiklin gideriminde bir azalış meydana gelmektedir. Daha önce de belirtilen parazitik reaksiyonlar gereğince akım şiddetinin belirli bir değerden yüksek olması halinde giderim verimlerinin düşmesi beklenen bir durumdur [30]. Bu sebeple anodik oksidasyon denemelerinde optimum akım şiddeti değerinin 100 mA olarak kullanılmasına karar verilmiştir.

3.4. Tetrasiklin Konsantrasyonunun Etkisinin İncelenmesi

Şekil 3.4'de başlangıç tetrasiklin konsantrasyonunun anodik oksidasyon verimi üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Bu deney setinde başlangıç konsantrasyonunun etkisini değerlendirmek amacıyla tetrasiklin konsantrasyonu 10 – 100 mg/L arasında değiştirilmiş ve daha önceki deney setlerinde belirlenmiş olan pH 3, 100 mA akım şiddeti ve 100 mM destek elektrolit konsantrasyonu deneysel koşullar olarak kullanılmıştır. Şekil 3.4'de görüldüğü üzere başlangıç tetrasiklin konsantrasyonundaki artış ile orantılı bir şekilde giderim verimlerinde bir azalış olduğu gözlemlenmiştir. Tetrasiklinin elektrooksidasyon ile mineralizasyon sürecinde anot yüzeyinde meydana gelen doğrudan elektron transferi ve radikal oluşumu, giderim mekanizmasının temelini oluşturmaktadır.



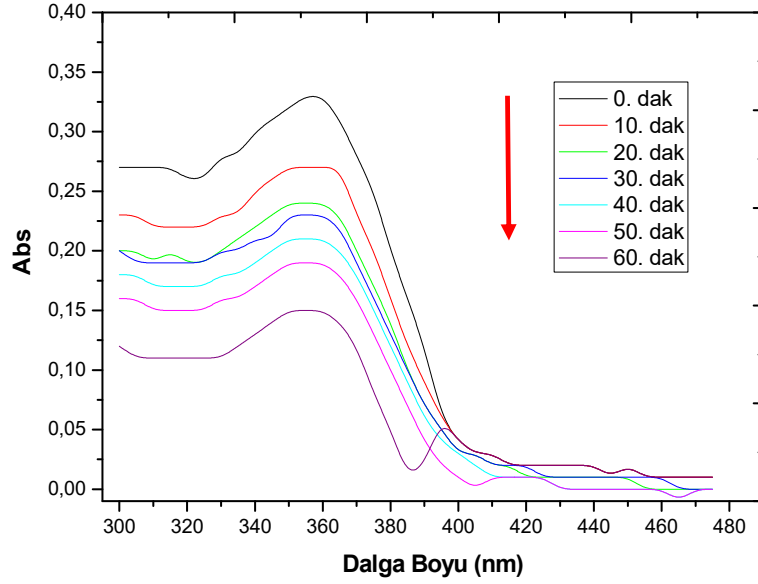
Şekil 3.4. Tetrasiklin gideriminde başlangıç etken madde konsantrasyonunun anodik oksidasyon verimi üzerine etkisinin araştırılması. Deneysel çalışmada uygulanan işletme koşulları, 100 mA akım şiddeti, çözelti başlangıç pH=3, 100 mM destek elektrolit (Na₂SO₄) konsantrasyonu ve elektroliz süresi 60 dakika.

Elektrokimyasal anodik oksidasyon prosesleri sulu çözeltilerde bulunan ilaç etken maddelerin geniş bir konsantrasyon aralığında başarılı sonuçlar sağlayabilmektedir. Çalışmalar, anodik oksidasyonun düşük akım yoğunluğu veya yüksek ilaç etken madde konsantrasyonu altında uygulanan akım tarafından kontrol edildiğini ve bu işlemin yüksek akım yoğunluğu veya düşük ilaç etken madde konsantrasyonu altında kütle transferi kontrollü bir yöne doğru eğilim gösterdiğini belirtmektedir [11]. Başlangıç tetrasiklin konsantrasyonunun 10 mg/L'den 100 mg/L'ye arttırılması ile 60 dakikalık elektroliz süreci sonunda %55,35'den %25,72'ye azalmaktadır. Başlangıç ilaç etken madde konsantrasyonunun bozunma verimi üzerindeki etkisi, ilaç etken madde ve güçlü oksitleyici türler arasındaki reaksiyon dengesinin elektrokimyasal anodik oksidasyon süreçlerinde oluşmasından kaynaklanması muhtemeldir. Yüksek ilaç etken madde konsantrasyonu anot yüzeyi üzerinde daha fazla ilaç etken madde molekülün difüzyonuna yol açabilirken düşük akım şiddeti değerlerinde anot yüzeyinde oluşan güçlü oksitleyici türler, etkili ilaç etken maddenin anodik oksidasyonu için yeterli olmadığında, ilaç etken madde anodik oksidasyon sürecini akım kontrollü hale getirmektedir. Tersine, kütle transferi kontrollü süreç, düşük ilaç etken madde konsantrasyon ve yüksek akım şiddeti koşulları altında gerçekleşebilir [11]. Çalışma kapsamında ayrıca optimum koşullarda tetrasiklin mineralizasyonunu değerlendirmek amacıyla 300 – 475 nm dalga boyu aralığında zamana bağlı absorbans azalışı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.5'de verilmektedir. Aynı zamanda anodik oksidasyon prosesi ile sulu çözeltilerden tetrasiklin giderimine ilişkin literatürden örnekler Tablo 3.1'de verilmektedir. Tablo 3.1'de özellikle pH, destek elektrolit türü ve konsantrasyonu, tetrasiklin konsantrasyonu gibi bu çalışmaya konu olan işletimsel parametreler için farklı araştırmalardaki çalışma aralıkları değerlendirilmiştir.

Tablo 3.1. Literatürde Anodik Oksidasyon ile Tetrasiklin Giderimi Çalışmaları ve Deneysel Koşullar

Uygulanan Akım	pH	Destek Elektrolit Türü	Destek Elektrolit Kons.	Anot Malzeme	Tetrasiklin Konsantrasyonu (mg/L)	Reaktör Hacmi (mL)	Elektroliz Süresi (dak)	Giderim Verimi (%)	Ref.
300 A cm ⁻²	2,00	Na ₂ SO ₄	5 g/L	BDD	200	20	360	% 93 KOI % 87 TOK % 99 Abs	[3]
25 mA cm ⁻²	3,00	-	-	Ti/Ru _{0.3} Ti _{0.7} O ₂	100	500	300	%36,7 *DOC	[2]
300 A m ⁻²	2,00	Na ₂ SO ₄	5 g/L	BDD	100	20	240	%100 TOK %100 KOI	[31]
25 mA cm ⁻²	-	Na ₂ SO ₄	30 mM	Ti/Ti ₄ O ₇	5	37,5	40	%95,8 Abs	[5]
15,9–63,5 mA/cm ²	3,90	Na ₂ SO ₄	0,05–0,20 mol/L	Ti/RuO ₂ –IrO ₂	47,6	200	60	>%90 Abs	[6]
100 mA cm ⁻²	1,00	-	-	DSA®/Pt	0,45 mM	100	180	%97,2 Abs	[4]
13.33 mA/cm ²	4,42	Na ₂ SO ₄	50 mM	Pt	50	250	240	%31,3 Abs	[7]
0,1 A cm ⁻²	7,60	Na ₂ SO ₄	0,1 M	BDD	100	100	150	%100 Abs	[8]
0,02 A cm ⁻²	7,00	Na ₂ SO ₄	1 g/L	Ti/IrO ₂	100	500	360	%99,3 Abs	[9]
3 mA cm ⁻²	6,00	Na ₂ SO ₄	100 mM	Ti ₄ O ₇	50	100	300	>%98,4 Abs	[15]
100 mA	2,00	Na ₂ SO ₄	25 mM	Ru/Graphite	0,2 mM	80	100	93,8	[32]

*DOC: Çözülmüş Organik Karbon



Şekil 3.5. Optimum koşullarda tetrasiklin gideriminin zamana bağlı spektrum tarama sonuçları

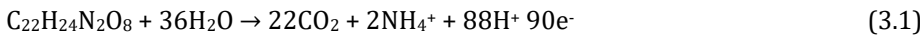
Tetrasiklin spektrumu, ultraviyole bölgesinde 275 ve 355 nm'de bulunan tepe noktalarına sahip iki ana bant ile karakterize edilmektedir. Sözü edilen iki tepe, tetrasen halkalarıyla ilgili Π - Π geçişinin absorpsiyonuna atfedilir [33]. Şekil 3.5'ten görüldüğü üzere özellikle tetrasiklinin maksimum absorbans verdiği 354 nm ana pik, zamana bağlı önemli bir azalış göstermektedir. Bunun dışında UV bölgede önemli başka bir pik gözlemlenmemiştir. Nunes ve diğ (2016), 354 nm'de 276 nm'ye göre daha yüksek bir düşüş olduğunu gözlemlemiş ve 354 nm'de absorbanstan sorumlu olan üç kaynaşmış halka tarafından oluşturulan yapının yok edilmesiyle başlayan bir bozunma mekanizmasını ve/veya absorbe eden metabolitlerin oluşumunu rapor etmişlerdir. Ayrıca 276 nm bölgesinde ve bu dalga boyunda absorbansta daha yavaş bir azalmaya katkıda bulunduğunu belirtmektedirler [34].

3.5. TOK Gideriminin ve Mineralizasyon Akım Verimi Değerlerinin İncelenmesi

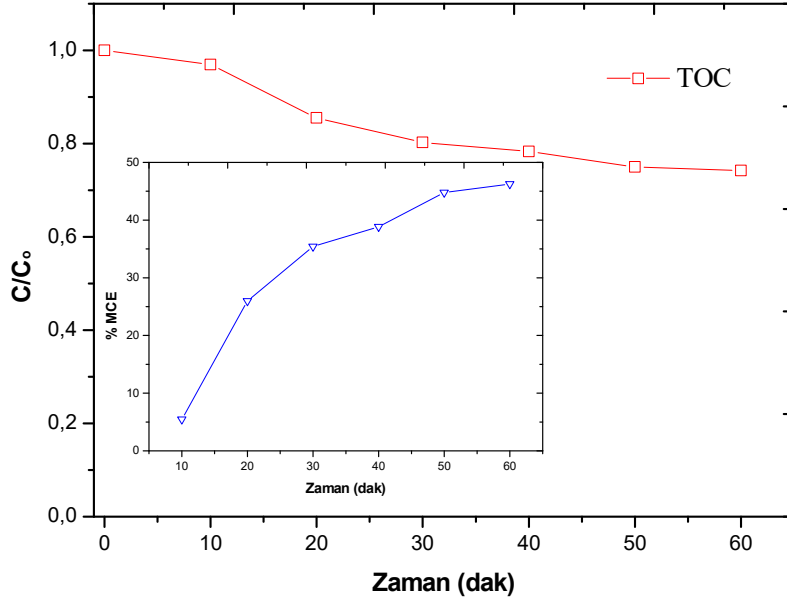
Optimum işletme koşullarında (pH=3, 100 mA akım şiddeti, 100 mM Na₂SO₄) yürütülen deneysel çalışmada zamana bağlı TOK azalışı ve mineralizasyon akım verimi değerlerindeki değişim incelenmiştir. Mineralizasyon akım verimi (MCE) belirtilen deney koşullarında sabit akım şiddeti (Amper cinsinden) ve 60 dakikalık deney süresinde TOK azalışına bağlı olarak Eşitlik 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\% MCE = \frac{nFV\Delta(TOC)_{exp}}{4,32 \times 10^7 mIt} \times 100 \quad (3.1)$$

Burada F Faraday sabiti (96.485 C/mol), m tetrasiklin molekülündeki karbon atom sayısını ($m=22$), n mineralizasyon prosesi esnasında Reaksiyon 3.1 gereğince transfer edilen elektron sayısını ($n=90$), I akım şiddetini ve t ise elektroliz süresini temsil etmektedir [10, 35]. Denklem içerisinde belirtilen V artırılan çözelti hacmini belirtmektedir (L cinsinden). ΔTOC değeri deneysel çalışma esnasında artım öncesi ve ham numuneye ait TOK değerlerindeki değişimi ifade etmektedir (mg/L olarak TOK cinsinden). Denklem içerisinde belirtilen $4,32 \times 10^7$ ise boyutsal birimli bir dönüşüm faktörüdür [36].



TOK giderimi ve %MCE için elde edilen sonuçlar Şekil 3.6'da verilmektedir.



Şekil 3.6. Optimum koşullarda tetrasiklin giderimi için zamana bağlı TOK Giderimi ve Mineralizasyon Akım Verimi Değerleri. Deneysel çalışmada uygulanan işletme koşulları, 100 mA akım şiddeti, çözelti başlangıç pH=3, 100 mM destek elektrolit (Na_2SO_4) konsantrasyonu ve elektroliz süresi 60 dakika.

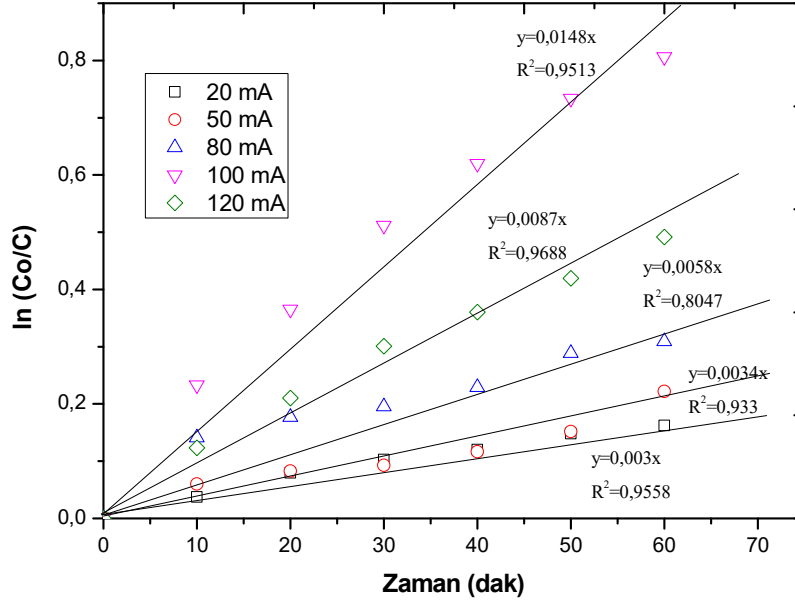
Şekil 3.6'ya bakıldığında TOK gideriminde zamana bağlı bir azalış olduğu görülmektedir. Optimum işletme koşullarında 60 dakikalık elektroliz süresinde yaklaşık olarak %25,8 giderim oranına ulaşılmıştır. Deneysel çalışma süresince ilk 30 dakikalık elektroliz süresinde hızlı bir TOK giderimi gerçekleşmesine rağmen son 30 dakikalık süre zarfında TOK gideriminde bir yavaşlama olduğu ve kararlı bir platoya ulaşıldığı dikkat çekmektedir. %MCE değerleri prosesin TOK giderim performansının bir göstergesi olarak kullanılmaktadır. Yüksek MCE değerleri anodik oksidasyon kabiliyetinin daha fazla olduğunu göstermektedir [10]. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi elektroliz süresinin artmasıyla birlikte MCE değerleri yavaş ancak kararlı bir ilerleyiş göstermektedir. Konu ile ilgili araştırmalar incelendiğinde en yüksek anodik oksidasyon verimliliğine sahip sistemlerde MCE değerleri elektroliz süresine bağlı olarak %35 – 50 arasında değişim gösterdiği görülmektedir [10]. TOK giderim veriminin artışı ile orantılı olarak %MCE değerleri de artış göstermektedir. %MCE değerlerine ise bakıldığında elektrolizin 10. dakikasında yaklaşık olarak %5,47 düzeylerinde iken 60 dakika sonunda yaklaşık olarak %46,3 değerine ulaştığı görülmektedir.

3.6. Enerji Tüketim Hesaplaması ve Kinetik Değerlendirme

3.6.1. Tetrasiklin Giderimi için Kinetik Değerlendirme

Çalışmanın bu bölümünde daha önceki bölümlerde akım şiddeti için yürütülen deneysel çalışma sonuçları esas alınarak anodik oksidasyon prosesi kullanılarak tetrasiklin giderimi için kinetik değerlendirme ve proses enerji tüketim hesaplamalarına yer verilmiştir.

Anodik oksidasyon prosesi ile tetrasiklin giderimi çalışmaları için yalancı (pseudo) birinci derece reaksiyon kinetiği kullanılarak reaksiyon hız sabitleri hesaplanmıştır. Farklı akım şiddeti değerlerinde tetrasiklin giderimi için elde edilen sonuçlar Şekil 3.7'de görülmektedir. Kinetik değerlendirme sonuçları ile reaksiyonun akıbeti ve elde edilen sonuçların güvenilirliği değerlendirilmektedir. Proses verimini etkileyen en baskın parametrelerden birisi olan akım şiddeti doğrudan proses kinetik verilerini etkileyeceği için bu parametre için yürütülen deney setinin verileri kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Farklı Akım Şiddeti Değerlerinde Anodik Oksidasyonla Tetrasiklin Giderimi için Kinetik Değerlendirme.

Şekil 3.7'den görüldüğü gibi 100 mA akım şiddeti değerinde en yüksek reaksiyon hız sabiti değerine ($k=0,0148$) ulaşıldığı anlaşılmaktadır. Bunu sırasıyla $k=0,0087$, $0,0058$, $0,0034$ ve $0,0030$ dak^{-1} değerleri ile 120 mA, 80 mA, 50 mA ve 20 mA akım şiddeti değerleri izlemektedir. Ayrıca kinetik değerlendirme için elde edilen R^2 değerlerine bakıldığında ise 100 mA akım şiddeti değerinde $0,9513$ ve 120 mA akım şiddeti değerlerinde ise $0,9688$ değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Diğer taraftan 80 mA akım şiddeti değerinde ise R^2 değerinin düşük olması tetrasiklin gideriminin kararlı bir platoya ulaşması ve doğrusallığın azalması ile açıklanabilir. Yüksek R^2 değerlerine sahip akım şiddetlerinde anodik oksidasyon prosesi ile zamana bağlı tetrasiklin giderimi çalışmalarında giderim verimlerinin halen devam ettiği ve zamana bağlı giderim yüzdelerinin artış gösterdiği görülmektedir.

3.6.2. Enerji Tüketimlerinin Hesaplanması

Bu bölümde anodik oksidasyon prosesi ile tetrasiklin giderimi çalışmasında uygulanan elektrokimyasal yöntem için enerji tüketimlerinin hesaplamaları ve karşılaştırılması verilmektedir. Organik kirleticinin mineralizasyonu için sistemin enerji gereksinimi Eşitlik 3.2. kullanılarak hesaplanmıştır.

$$ET (\text{kWh m}^{-3}) = \left[\frac{V \times I \times t}{v} \right] \quad (3.2)$$

ET = Enerji tüketimi (kWh/m^3)

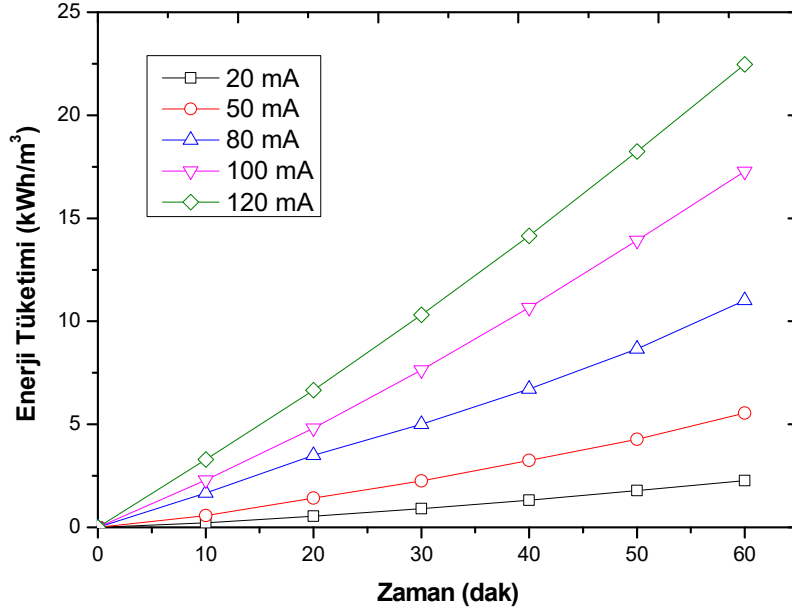
I = Akım şiddeti (A)

v = Çözelti hacmi (L)

V = Potansiyel fark (V)

t = Elektroliz süresi (saat)

Enerji tüketimi grafikleri elektrokimyasal sistemde enerji tüketimi açısından en önemli parametre olan akım şiddeti değerleri esas alınarak değerlendirilmektedir. Şekil 3.8'de anodik oksidasyon prosesi için 60 dakikalık elektroliz süresinde 20-120 mA değişken akım şiddeti değerlerinde hesaplanan sistem enerji tüketimleri verilmektedir.



Şekil 3.8. Farklı Akım Şiddeti Değerlerinde Anodik Oksidasyonla Tetrasiklin Giderimi için Enerji Tüketimleri.

Şekil 3.8'den de görüleceği üzere 60 dakikalık elektroliz süresinde sistem enerji tüketimleri 28,40 ile 46,80 kWh/m³ arasında değişiklik göstermektedir. Eşitlik 3.1'den de anlaşılacağı üzere elektrokimyasal sistemde uygulanan akım ile orantılı olarak sistem enerji tüketimleri de artış göstermektedir. Tetrasiklin ilaç etken maddesi için 10 mg L⁻¹ konsantrasyonu anodik oksidasyon prosesi ile giderebilmek için uygulanan akım şiddetleri için en yüksek 120 mA'lık akım şiddetinde 46,80 kWh/m³ lük bir enerji tüketimi söz konusudur. Ancak prosesin optimum giderim sağladığı 100 mA akım şiddeti için 43,20 kWh/m³ lük bir enerji gereksinimi duyulmaktadır. Elde edilen enerji tüketim verileri kullanılarak birim atıksu arıtımı için harcanacak enerji birim fiyatı aşağıda hesaplanmıştır.

1 kWh/m³ enerji birim fiyatı → 0,4463 TL ≈ 0,033 \$

43,20 kWh/m³ x 0,033 \$ ≈ 1,43 \$

Birim m³ atıksu arıtımı için harcanacak elektrik enerjisi tutarı 1,43 \$ şeklinde hesaplanmıştır ancak bu tutar içerisine başka bir maliyet dâhil edilmemektedir. Bu maliyete personel giderleri ve bakım onarım masraflarının ilave edilmesi ile birlikte birim atıksu arıtımı için enerji maliyetinin yaklaşık olarak 2 – 2,5 \$ düzeylerinde olacağı düşünülmektedir.

3.6.3. Tetrasiklin Giderimi için Toksikite Değerlendirmesi

Tetrasiklin, *Streptomyces rimosus* isimli bakteri tarafından üretilen bir antibiyotiktir. Birçok bakteriyel enfeksiyonlarda kullanılır. Tetrasiklinler bugün bir grup antibiyotiğe verilen genel isimdir, tetrasiklin de bu antibiyotiklerden birisidir. tetrasiklinler kullanma süresi dolduktan sonra kullanılmaları halinde zehirlenmeye yol açabilirler. Tetrasiklinler zamanla toksik olma özelliğine sahip nadir antibiyotiklerdendir, bu yüzden kullanım süresi dolduktan sonra kullanılırsa, özellikle böbreklere zarar verebilirler. Böbrek hastalarında, hamile kadınlarda ve küçük yaşta çocuklarda (8 yaş altı) kullanılmamalıdır [34].

Anodik oksidasyon prosesi uygulanarak yürütülen çalışmalarda arıtım öncesi ve arıtım sonrası örneklerle TÜBİTAK-MAM laboratuvarlarında toksite analizleri yaptırılmış olup belirtilen konsantrasyon için herhangi bir toksite özelliği belirlenmemiştir.

Arıtma öncesi ve arıtma sonrasında su örneklerinde ISO/EN/DIN 11348-3 metoduna uygun olarak Microtox 500 cihazı kullanılarak *bioluminesanas* bakterisi ile akut zehirlilik testi analizi yapılmış olup etkili konsantrasyonu yani EC50 değeri; herhangi bir ilacın maksimum etkisinin %50'sine eşit bir etki oluşturan molar ilaç konsantrasyonu arıtım öncesi %243,5 arıtım sonrası ise herhangi bir sonuca rastlanılmamıştır

4. Tartışma ve Sonuç

Sudaki antibiyotikler biyolojik etkileri, çevre ve insan sağlığı üzerindeki potansiyel riskleri gibi nedenlerle artan ilgi görmektedir. Ülkemizde birçok yerde herhangi bir ön giderime tabi tutulmadan kentsel atıksu arıtma sistemlerine erişen hastane atıksularının muhteva ettiği makro ve mikro kirleticilerin çoğu, metabolize olmadan alıcı ortamlara erişerek su kaynaklarında görünmeyen uzun vadeli ciddi problemler yaratmaktadır. Sözü edilen kirleticiler içerisinde önemli bir yer tutmakta olan ve büyük terapötik değerleri nedeniyle hastalıkların tedavisinde oldukça yaygın bir kullanım alanı olan tetrasiklin, insan sağlığı üzerinde önemli etkileri olan antibiyotiklerden biridir ve bu nedenle giderilmesi için uygun yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Yapılan çalışmada tetrasiklin ilaç etken maddesinin anodik oksidasyon yöntemi ile giderimi üzerine yürütülen çalışmalar sonucunda klasik yöntem ile giderilmesi oldukça güç olan bu ilaç etken maddenin %55,35 oranında giderilebildiği tespit edilmiştir. Tetrasiklin için değişen pH, destek elektrolit konsantrasyonu, akım şiddeti ve başlangıç ilaç etken madde konsantrasyonu değerlerini içeren bulgular neticesinde maksimum giderim veriminin gerçekleştiği değişik koşullarda ve seri deneyler neticesinde belirlenmiş olan optimum koşullar sırasıyla 10 mg/l tetrasiklin, uygun pH 3, akım şiddeti 20 mA, destek elektrolit konsantrasyonu ise 100mM olarak neticelendirilmiştir. Tetrasiklin konsantrasyonu 10 – 100 mg/L arasında değiştirilmiş ve daha önceki deney setlerinde belirlenmiş olan pH 3, 100 mA akım şiddeti ve 10 mM destek elektrolit konsantrasyonu deneysel koşullar olarak kullanılmıştır. Başlangıç tetrasiklin konsantrasyonunun 10 mg/L'den 100 mg/L'ye artırılması ile 60 dakikalık elektroliz süreci sonunda %55,35'den %25,72'ye azalmaktadır. Başlangıç ilaç etken madde konsantrasyonunun bozunma verimi üzerindeki etkisi, ilaç etken madde ve güçlü oksitleyici türler arasındaki reaksiyon dengesinin elektrokimyasal anodik oksidasyon süreçlerinde oluşmasından kaynaklanması muhtemeldir. Akım şiddeti ise 20-120 mA aralığında değişen akım şiddetlerinde çalışılmış olup, akım şiddeti değerinin 100 mA değerine ulaşması ile birlikte %55,35'lik bir tetrasiklin giderimi elde edilmiştir. Optimum destek elektrolit konsantrasyonu ise 100 mM Na₂SO₄ belirlenmiş olup 100mM konsantrasyonu ile yürütülen deneysel çalışmada ise 10 ppm başlangıç tetrasiklin konsantrasyonunun %26,62 oranında giderimi sağlanmıştır. pH ise 2-10 arasında farklı değerler uygulanmak suretiyle en uygun pH değeri araştırılmıştır. Optimum pH değeri 3 olarak belirlenmiş olup ortam koşullarında %25 tetrasiklin giderimi elde edilmiştir. İlave yürütülen çalışmalarda tetrasiklin için belirtilen konsantrasyon için herhangi bir toksite özelliğine rastlanılmamıştır. Tablo 4.1'de deney sonuçlarına ait giderim verimleri ve ortam koşulları yer almaktadır.

Tablo 4.1. Anodik Oksidasyon Prosesi ile Tetrasiklin Giderimi için İdeal İşletme Koşulları

Elektroliz Süresi (dak)	pH	Akım Şiddeti (mA)	Destek Elektrolit (mM)	Tetrasiklin Kons. (mg/L)	Tetrasiklin Giderimi (%)	TOK Giderimi (%)
60	3	100	100	10	52,6	25,8

Ülkemizde enerji birim maliyetlerinin yüksek olması, anodik oksidasyon ve buna benzer elektrokimyasal sistemlerin kullanımını önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. Ancak bu tür sistemlerin güneş enerjisi panelleri ile entegre edilmesi veya enerji giderlerinin minimize edilebilmesi için yakıt hücresi kullanımı gibi alternatif çözümler, elektrokimyasal sistemlerin en dezavantajlı yönü olan elektrik enerjisi kullanımı noktasında sistemi daha makul hale getirebilecektir.

Teşekkür

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-2021-10724 nolu Yüksek Lisans tez projesi ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Erciyes Üniversitesine teşekkür ederiz.

Kaynakça

[1] C. Brinzila, N. Monteiro, M. Pacheco, L. Cirfaco, I. Siminiceanu, A. Lopes, Degradation of tetracycline at a boron-doped diamond anode: influence of initial pH, applied current intensity and electrolyte, Environ Sci Pollut Res, 21 (2014) 8457-8465.

[2] I. Yahiaoui, F. Aissani-Benissad, F. Fourcade, A. Amrane, Removal of tetracycline hydrochloride from water based on direct anodic oxidation (Pb/PbO₂ electrode) coupled to activated sludge culture, Chemical Engineering Journal, 221 (2013) 418-425.

- [3] C.I. Brinzila, M.J. Pacheco, L. Ciríaco, R.C. Ciobanu, A. Lopes, Electrodegradation of tetracycline on BDD anode, *Chemical Engineering Journal*, 209 (2012) 54-61.
- [4] J.P.T. da Silva Santos, J. Tonholo, A.R. de Andrade, V. Del Colle, C.L.d.P. e Silva, The electro-oxidation of tetracycline hydrochloride in commercial DSA® modified by electrodeposited platinum, *Environ Sci Pollut Res*, 28 (2021) 23595-23609.
- [5] J. Wang, D. Zhi, H. Zhou, X. He, D. Zhang, Evaluating tetracycline degradation pathway and intermediate toxicity during the electrochemical oxidation over a Ti/Ti407 anode, *Water Research*, 137 (2018) 324-334.
- [6] H. Zhang, F. Liu, X. Wu, J. Zhang, D. Zhang, Degradation of tetracycline in aqueous medium by electrochemical method, *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 4 (2009) 568-573.
- [7] J. Liu, S. Zhong, Y. Song, B. Wang, F. Zhang, Degradation of tetracycline hydrochloride by electro-activated persulfate oxidation, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 809 (2018) 74-79.
- [8] T.-S. Chen, R.-W. Tsai, Y.-S. Chen, K.-L. Huang, Electrochemical degradation of tetracycline on BDD in aqueous solutions, *Int. J. Electrochem. Sci*, 9 (2014) e8434.
- [9] M. Miyata, I. Ihara, G. Yoshid, K. Toyod, K. Umetsu, Electrochemical oxidation of tetracycline antibiotics using a Ti/IrO₂ anode for wastewater treatment of animal husbandry, *Water Science and Technology*, 63 (2011) 456-461.
- [10] A.J. dos Santos, E. Brillas, P.L. Cabot, I. Sirés, Simultaneous persulfate activation by electrogenerated H₂O₂ and anodic oxidation at a boron-doped diamond anode for the treatment of dye solutions, *Science of The Total Environment*, 747 (2020) 141541.
- [11] J. Zhang, Y. Zhou, B. Yao, J. Yang, D. Zhi, Current progress in electrochemical anodic-oxidation of pharmaceuticals: Mechanisms, influencing factors, and new technique, *Journal of Hazardous Materials*, 418 (2021) 126313.
- [12] K. Zhu, H. Qi, X. Sun, Z. Sun, Anodic oxidation of diuron using Co₃O₄/graphite composite electrode at low applied current, *Electrochimica Acta*, 299 (2019) 853-862.
- [13] S. Belkacem, S. Bouafia, M. Chabani, Study of oxytetracycline degradation by means of anodic oxidation process using platinized titanium (Ti/Pt) anode and modeling by artificial neural networks, *Process Safety and Environmental Protection*, 111 (2017) 170-179.
- [14] O. Turkyay, S. Barışçı, E. Ulusoy, M.G. Şeker, A. Dimoglo, Anodic oxidation of anti-cancer drug Imatinib on different electrodes: Kinetics, transformation by-products and toxicity assessment, *Electrochimica Acta*, 263 (2018) 400-408.
- [15] S. Liang, H. Lin, X. Yan, Q. Huang, Electro-oxidation of tetracycline by a Magnéli phase Ti₄O₇ porous anode: Kinetics, products, and toxicity, *Chemical Engineering Journal*, 332 (2018) 628-636.
- [16] N. Klidi, D. Clematis, M. Delucchi, A. Gadri, S. Ammar, M. Panizza, Applicability of electrochemical methods to paper mill wastewater for reuse. Anodic oxidation with BDD and TiRuSnO₂ anodes, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 815 (2018) 16-23.
- [17] K. Gurung, M.C. Ncibi, M. Shestakova, M. Sillanpää, Removal of carbamazepine from MBR effluent by electrochemical oxidation (EO) using a Ti/Ta₂O₅-SnO₂ electrode, *Applied Catalysis B: Environmental*, 221 (2018) 329-338.
- [18] E.M.S. Oliveira, F.R. Silva, C.C.O. Morais, T.M.B.F. Oliveira, C.A. Martínez-Huitle, A.J. Motheo, C.C. Albuquerque, S.S.L. Castro, Performance of (in)active anodic materials for the electrooxidation of phenolic wastewaters from cashew-nut processing industry, *Chemosphere*, 201 (2018) 740-748.
- [19] E.A. Serna-Galvis, J. Silva-Agredo, A.L. Giraldo-Aguirre, O.A. Flórez-Acosta, R.A. Torres-Palma, High frequency ultrasound as a selective advanced oxidation process to remove penicillinic antibiotics and eliminate its antimicrobial activity from water, *Ultrasonics sonochemistry*, 31 (2016) 276-283.

- [20] O.A. Abafe, J. Späth, J. Fick, S. Jansson, C. Buckley, A. Stark, B. Pietruschka, B.S. Martincigh, LC-MS/MS determination of antiretroviral drugs in influents and effluents from wastewater treatment plants in KwaZulu-Natal, South Africa, *Chemosphere*, 200 (2018) 660-670.
- [21] D. Abhijit, K. Lokesh, R. Bejankiwar, T. Gowda, Electrochemical oxidation of pharmaceutical effluent using cast iron electrode, *Journal of Environmental Science & Engineering*, 47 (2005) 21-24.
- [22] A.T. Besha, A.Y. Gebreyohannes, R.A. Tufa, D.N. Bekele, E. Curcio, L. Giorno, Removal of emerging micropollutants by activated sludge process and membrane bioreactors and the effects of micropollutants on membrane fouling: A review, *Journal of environmental chemical engineering*, 5 (2017) 2395-2414.
- [23] Y. Aminot, K. Le Menach, P. Pardon, H. Etcheber, H. Budzinski, Inputs and seasonal removal of pharmaceuticals in the estuarine Garonne River, *Marine Chemistry*, 185 (2016) 3-11.
- [24] Y. Aminot, X. Litrico, M. Chambolle, C. Arnaud, P. Pardon, H. Budzinski, Development and application of a multi-residue method for the determination of 53 pharmaceuticals in water, sediment, and suspended solids using liquid chromatography-tandem mass spectrometry, *Analytical and bioanalytical chemistry*, 407 (2015) 8585-8604.
- [25] C. Akarsu, F. Taner, A. Ayol, Sızıntı Suyunun Elektrokimyasal Oksidasyon Prosesi ile Arıtılması, 2nd International Symposium on Environment and Morality ISEM, (2014) 914-920.
- [26] A. APHA, Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th ed. American Public Health Association, Washington DC, (1998).
- [27] M. Panizza, I. Sirés, G. Cerisola, Anodic oxidation of mecoprop herbicide at lead dioxide, *Journal of Applied Electrochemistry*, 38 (2008) 923-929.
- [28] A. Ansari, D. Nematollahi, Convergent paired electrocatalytic degradation of p-dinitrobenzene by Ti/SnO₂-Sb/β-PbO₂ anode. A new insight into the electrochemical degradation mechanism, *Applied Catalysis B: Environmental*, 261 (2020) 118226.
- [29] İ.Y. Köktaş, Ö. Gökkuş, Removal of salicylic acid by electrochemical processes using stainless steel and platinum anodes, *Chemosphere*, 293 (2022) 133566.
- [30] Ö. Gökkuş, Y.Ş. Yıldız, Application of electro-Fenton process for medical waste sterilization plant wastewater, *Desal. Water Treat.*, (2016) 1-12.
- [31] C. Brinzila, N. Monteiro, M. Pacheco, L. Ciríaco, I. Siminiceanu, A. Lopes, Degradation of tetracycline at a boron-doped diamond anode: influence of initial pH, applied current intensity and electrolyte, *Environ Sci Pollut Res*, 21 (2014) 8457-8465.
- [32] İ.Y. Köktaş, Ö. Gökkuş, İ.A. Kariper, A. Othmani, Tetracycline removal from aqueous solution by electrooxidation using ruthenium-coated graphite anode, *Chemosphere*, (2023) 137758.
- [33] S. Liu, X.-r. Zhao, H.-y. Sun, R.-p. Li, Y.-f. Fang, Y.-p. Huang, The degradation of tetracycline in a photo-electro-Fenton system, *Chemical Engineering Journal*, 231 (2013) 441-448.
- [34] M.J. Nunes, N. Monteiro, M.J. Pacheco, A. Lopes, L. Ciríaco, Ti/β-PbO₂ versus Ti/Pt/β-PbO₂: influence of the platinum interlayer on the electrodegradation of tetracyclines, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 51 (2016) 839-846.
- [35] N. Barhoumi, N. Oturan, S. Ammar, A. Gadri, M.A. Oturan, E. Brillas, Enhanced degradation of the antibiotic tetracycline by heterogeneous electro-Fenton with pyrite catalysis, *Environmental Chemistry Letters*, 15 (2017) 689-693.
- [36] O.M. Cornejo, I. Sirés, J.L. Nava, Characterization of a flow-through electrochemical reactor for the degradation of ciprofloxacin by photoelectro-Fenton without external oxygen supply, *Chemical Engineering Journal*, 455 (2023) 140603.

Güçlü S-box Yapıları Üretmek İçin Yeni Bir Yaklaşım

Fırat Artuğer*¹ 

*¹ Munzur Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği, TUNCELİ

(Alınış / Received: 20.02.2023, Kabul / Accepted: 25.04.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 02.05.2023)

Anahtar Kelimeler

S-box
Lineer olmama
Simetrik şifreleme
Kaotik harita

Öz: S-box, kriptografik yapılar için hayati öneme sahiptir. Çünkü bir simetrik şifreleme algoritmasında karıştırma olarak adlandırdığımız gereksinimi yerine getirmektedir. Bu yüzden geliştirilecek olan simetrik şifreleme algoritmasının başarımı önemli ölçüde s-box yapısına bağlı olacaktır. Bir s-box yapısı olabildiğince lineer bir yapıya sahip olmamalıdır. Yani bir s-box yapısının bakılması gereken en önemli kriteri yüksek lineer olmama değeridir. Lineer olmama değeri ne kadar yüksek olursa algoritmanın kırılması o kadar zor olacaktır. Bir s-box elde etmek için genellikle kaotik yöntemler kullanılmaktadır. Ancak bu şekilde elde edilen s-box yapılarında lineer olmama değeri düşüktür. Bu çalışmada özellikle bu şekilde üretilen s-box yapılarının lineer olmama değerini hızlı bir şekilde arttıran bir yöntem önerilmektedir. Bu yöntemde rastgele elde edilmiş bir s-box yapısında ilk değer sırasıyla diğer tüm elemanlarla yer değiştirilir. Bu şekilde s-box yapısının lineer olmama değeri artar veya eşit kalırsa s-box güncellenir. Bu şekilde sadece 255 iterasyon ile lineer olmama değeri 102.25 'den 107.5 'e kadar arttırılmıştır. Bir diğer s-box 'da ise lineer olmama değeri 103.75 'den 107.25 'e çıkmıştır.

A New Approach to Generation Strong S-box Structures

Keywords

S-box
Nonlinearity,
Symmetric encryption
Chaotic map

Abstract: The s-box is vital for cryptographic structures. Because it fulfills the requirement we call confusion in a symmetric encryption algorithm. Therefore, the performance of the symmetric encryption algorithm to be developed will depend significantly on the s-box structure. An s-box structure should not be as linear as possible. In other words, the most important criterion for an s-box structure is its high nonlinearity value. The higher the nonlinearity value, the more complex the algorithm will be to break. Chaotic methods are generally used to obtain an s-box. However, the nonlinearity value of the s-box structures obtained this way is low. In this study, a method that rapidly increases the nonlinearity value of s-box structures produced in this way is proposed. In this method, the first value in a randomly generated s-box structure is replaced with all other elements, respectively. In this way, if the nonlinearity of the s-box structure increases or remains equal, the s-box is updated. In this way, the nonlinearity value was increased from 102.25 to 107.5 with only 255 iterations. In another s-box, the nonlinearity value increased from 103.75 to 107.25.

*İlgili Yazar, email: firatartuger@munzur.edu.tr

1. Giriş

Bilimin hızlı bir şekilde gelişmesiyle birlikte birçok gereksinim ortaya çıkmaktadır. Bu gereksinimlerden bir tanesi verileri gizliliğinin sağlanmasıdır. Özellikle kablosuz ağlar üzerinden verilerin güvenli bir şekilde iletilmesi önemli bir gereksinimdir. Günümüzde verilerin gizliliği genellikle kriptografik yapılar ile sağlanmaktadır [1]. Özellikle verinin gizliliği söz konusu olduğunda şifreleme algoritmaları karşımıza çıkmaktadır. Yani özetle; verilerin gizliliğini sağlamak için günümüzde şifreleme algoritmaları kullanılmaktadır. Bu yapılar temel olarak iki mimariye sahiptirler. Bunlardan bir tanesi asimetrik şifrelemedir. Bu şifreleme mimarileri genellikle verinin gizliliğinden

ziyade anahtar değişimi sürecinde kullanılmaktadır. Çünkü bu algoritmalarda mantık, büyük asal sayıları çarpımına dayanmaktadır. Verinin boyutu arttıkça gizlilik için uygulanması imkânsız hale gelmektedir. Ancak bunlar çok güvenli algoritmalarıdır. Bu yüzden hibrit sistemlerde anahtar değişimini sorunsuz bir şekilde yerine getirebilmektedirler. Bir diğer şifreleme mimarisi simetrik şifreleme yapılarıdır. Bu yapılar verinin şifrenmesi için kullanılmaktadır. Bu algoritmalar genellikle hızlı ve çoğu zaman güvenlidirler. Bu mimari de yine kendi içinde iki bölüme ayrılmaktadır. Bunlar akış ve blok şifreleme yapılarıdır. Akış şifreleme de bitler tek tek şifrelenir. Bu algoritmalar mantığı gereği oldukça hızlı ve güvenli yapılardır. Ancak daha az verinin olduğu alanlarda etkili bir şekilde çalışabilirler. Verinin uzunluğu arttıkça bu mimariyi uygulamak zor hale gelecektir. Bu yüzden bu algoritmalar daha hafif uygulamalar için kullanılmaktadırlar. Diğer simetrik şifreleme yapısı blok şifrelemedir. Günümüzde verinin şifrenmesi için en çok bu algoritmalar kullanılmaktadır. Bu algoritmaların temel yapısı veriyi eşit uzunluktaki bloklara ayırmaktır. Bu şekilde veri ne kadar büyük olursa olsun eşit bloklara ayrılır ve bu şekilde her bir blok kendi içinde şifrelenir. Daha sonra bütün bloklar bir araya getirilerek şifreli veri elde edilir. Bu mimari, verinin aynı zamanda hem güvenli hem de hızlı bir şekilde şifrenmesini sağlamaktadır. Günümüz simetrik blok şifreleme standardı AES [2] algoritmasıdır. Bunun yanında en çok DES [3] algoritması kullanılmaktadır. AES algoritması farklı anahtar uzunluklarına sahip esnek ve oldukça güvenilir bir algoritmadır. Bir blok şifreleme algoritmasında güvenliğin sağlanabilmesi için temelde iki gereksinimin sağlanması istenir. Bunlar difüzyon ve konfüzyon olarak adlandırılır. Difüzyon özelliğinde verilerin etkili bir şekilde yayılması amaçlanmaktadır. Bu özellik bir nevi permütasyon sürecidir. Diğer ise en önemli gereksinimlerden biri olan konfüzyon özelliği, veriyi etkili bir şekilde karıştırmayı amaçlamaktadır. Veri ne kadar etkili bir şekilde karıştırılırsa saldırganlar tarafından şifrenin çözülmesi o kadar zor olacaktır. Bu yüzden karıştırma sürecinde bu işlemin lineer olmayan bir yapıyla yapılması gerekir. Aksi takdirde bu yapı lineer olursa saldırganlar tarafından çıkarım yapılması kolaylaşacaktır [4]. Blok şifreleme algoritmalarında bu lineer olmayan yapı s-box yapısıdır. Yani algoritmadaki konfüzyon adımı genellikle lineer olmayan bir s-box yapısı ile gerçekleştirilir. S-box temel olarak bir tablodan oluşmaktadır. Veriyi bir formdan alır başka bir forma çevirir. Yani s-box tablosundaki değerlere göre veride bir değer yerine başka bir değer yazılır [5]. Bu özelliklere bakıldığında; bir blok şifreleme algoritması tasarlanmak istenildiğinde güçlü bir s-box olmazsa olmaz yapılardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Güçlü, yani yüksek lineer olmama değerine sahip bir s-box üretmek aslında bir optimizasyon problemidir. Çünkü AES benzeri bir s-box yapısı 256 değer içermektedir. Bu da güçlü bir s-box elde etmek için 256! durumun olduğunu ifade eder. Bu problemin belirli bir birim zamanda çözülmesi imkansızdır. Yani bu bir NP problemidir. Bu yüzden bu problem, geçmişten günümüze kadar araştırmacıların üzerinde çalıştığı sıcak bir konu olarak gelmiştir. Buda çalışmanın en önemli motivasyonlarından bir tanesidir. Bu problemin çözümü için literatürde onlarca yöntem önerilmiş olup çalışmalar devam etmektedir. Çünkü en iyi sonuçlar elde edilememektedir. Bazı çalışmalar optimum sonuçlara ulaşmış olsa da bu yapıların elde edilme şeklinde çeşitli zayıflıklar olabilmektedir. Güçlü bir s-box geliştirmek için günümüze kadar kaos, optimizasyon yöntemleri ve matematiksel dönüşümler en çok kullanılan yaklaşımların başında gelmektedir.

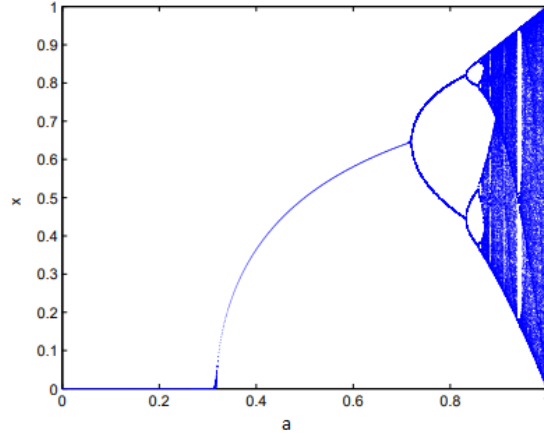
Sadece kaos kullanarak geliştirilen yöntemler genellikle düşük lineer olmama değerlerine sahip s-box yapılarıdır. Bu nokta çalışmanın bir diğer motivasyon kaynağıdır. Bu yapıları hızlı bir şekilde iyileştiren yöntemlerin geliştirilmesi araştırmacıların her zaman ilgisini çekmiştir. Bu şekilde elde edilen s-box yapılarında genellikle bir kaotik harita kullanılmaktadır. Kaotik haritanın parametrelerine göre bir değer elde edilir ve s-box tablosunda bu değer yoksa tabloya eklenir. Bu şekilde bir s-box elde etmek oldukça kolay ve hızlı olacaktır. Ancak lineer olmama değerlerinin düşük olması büyük bir dezavantaj oluşturmaktadır. Günümüze kadar kaos ile elde edilen s-box yapılarında kesirli sıralı kaotik Chen sistemi [6], kaotik kısmi diferansiyel denklem [7], lojistik harita [8], yeni bir ayrık zamanlı kaotik harita [9], tek boyutlu ayrık bir kaotik harita [10], baker harita [11], çadır harita [12], kaotik Lorenz sistemi [13], kaotik labirent rene Thomas sistemi [14], kesirli Lorenz-Duffing sistemi [15], kaotik ölçekli Zhongtang sistemi [16], kaotik sinüs harita [17] ve daha birçok farklı kaotik harita kullanılmıştır.

Bir diğer çok kullanılan yaklaşım optimizasyondur. Optimizasyon yöntemleri özellikle çözülmesi zor problemlerin çözümünde uzun yıllardır kullanılmaktadır. S-box üretme problemi içinde kullanımları oldukça uygundur. Bu yöntemlerde hesaplama maliyetleri genellikle yüksek olsa da lineer olmama değerleri yüksek s-box yapıları elde edilmektedir. Bu yöntemlerin bir diğer avantajı ise gün geçtikçe yeni optimizasyon algoritmalarının tasarlanmasıdır. Bu yeni algoritmalar da kullanılarak güçlü s-box yapıları elde edilebilir. Özellikle son yıllarda s-box üretme probleminde parçacık sürüsü optimizasyonu [18], bakteriyel yiyecek arama optimizasyonu [19], genetik algoritma [20, 21], tavlama algoritması [22], öğretim-öğrenme optimizasyonu [23], ateş böceği optimizasyonu [24], karınca kolonisi optimizasyonu [25], çıplak köstebek faresi algoritması [26], gri kurt optimizasyonu [27] ve daha birçok optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Bir diğer yaklaşım olan matematiksel dönüşümler ile farklı s-box yapıları elde edilmektedir. Bu yaklaşım ile genellikle güçlü s-box yapıları üretilmektedir. Ancak bu s-box yapıları çeşitli durumlarda uygulama saldırılarına karşı çeşitli zayıflıklar göstermektedir [28]. Bunun yanı sıra karmaşık matematiksel denklemlere dayandıkları için hesaplama maliyetleri yüksektir. Bu yaklaşımla son yıllarda mobius grubu ve sonlu alan ile [29], dönme matrisleri ile [30], modüler bir grup eylemi ile [31], simetrik bir grup ile [32], boole fonksiyonları ile [33, 34] ve daha birçok dönüşüm yardımıyla güçlü s-box yapıları elde edilmiştir.

Bu çalışmada bu yöntemlerden farklı olarak hızlı, basit ama etkili bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemde herhangi bir şekilde elde edilen bir s-box yapısında ilk eleman sırasıyla diğer elemanlarla yer değiştirilir. Yer değiştirme sonrasında lineer olmama değeri artar veya eşit kalırsa s-box güncellenmektedir. Bu şekilde sadece 256 yineleme sonucunda etkili sonuçların elde edilebileceği yapılan analizler sonucunda gösterilmiştir. Esasen önerilen yöntem yukarıda bahsedilen tüm mantıklarla elde edilen s-box yapılarını da iyileştirebilecek bir yapıya sahiptir. Bu çalışma, özellikle kaos tabanlı s-box yapılarının iyileştirilmesi için düşünülmüştür. Ancak diğer felsefelerle üretilen s-box yapılarına da kolaylıkla uygulanabilir. Çalışmanın geri kalan kısmında ikinci bölümde önerilen yaklaşım sözde kodu ile verilmiştir. Üçüncü bölümde analiz sonuçları değerlendirilmiş olup diğer yöntemlerle performans karşılaştırması yapılmıştır. Dördüncü bölümde ise sonuçlar tartışılmıştır.

2. Önerilen Yöntem

Önerilen yaklaşımda öncelikle kaotik bir harita kullanılarak lineer olmama değeri düşük bir s-box elde edilir. Bu çalışmada kaotik sinüs harita ile başlangıç parametreleri ayarlanarak s-box yapıları elde edilmiştir. Kaotik sinüs haritasının matematiksel modeli denklem 1 'de verilmiştir. Ayrıca sinüs haritasının çatallanma diyagramı şekil 1 'de gösterilmiştir. Çatallanma diyagramı sayesinde sistemin kaotikliği, kararlılığı vb. davranışsal özellikleri hakkında yorum yapılabilmektedir. Kullanılan sinüs haritanın verilen parametrelerle kaotik davranış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 1. Sinüs haritasının çatallanma diyagramı

$$x_{n+1} = a \sin(\pi x_n), \quad x_n \in [0,1], \quad a \in [0.85,1] \quad (1)$$

Denklem 1 'de verildiği gibi kaotik bir harita kullanılarak aşağıdaki adımlara göre kolaylıkla bir s-box elde edilebilir.

Adım 1. Kaotik haritanın başlangıç parametreleri girilir.

Adım 2. Bu başlangıç değerlerine göre rastgele bir sayı (x_{n+1}) üretilir.

Adım 3. Üretilen bu değer 3 veya daha fazla basamaklı bir tamsayıya dönüşmesi için 1000000 ile çarpılır.

Adım 4. Bu değer 0 ile 256 arasındaki bir değere dönüşmesi için mod256 işlemi uygulanır.

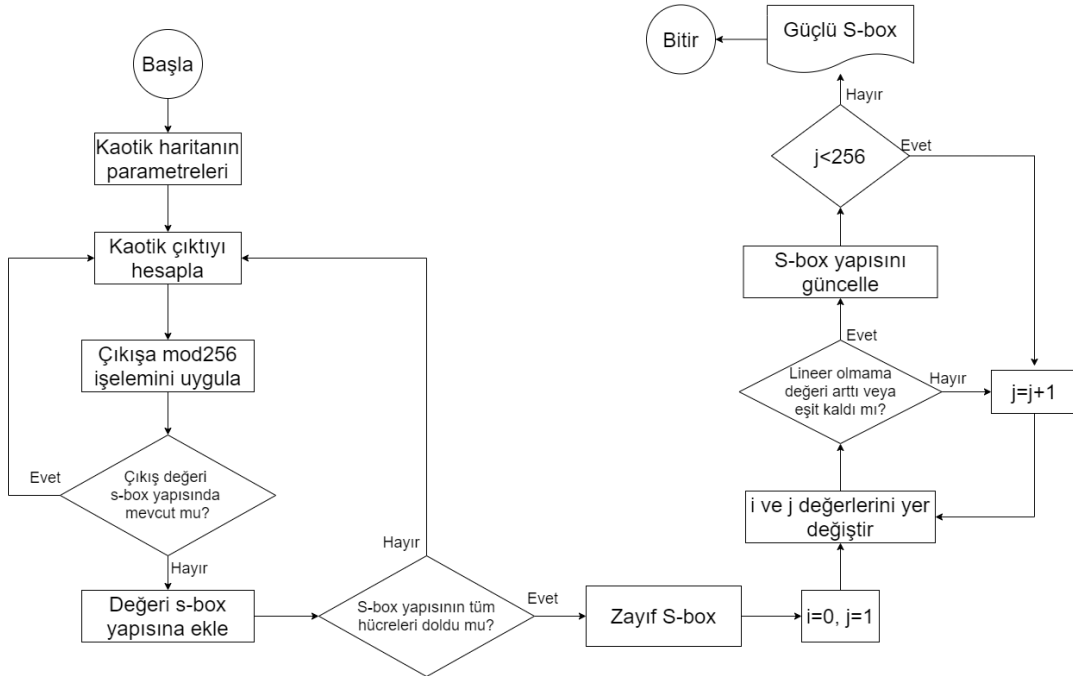
Adım 5. Elde edilen bu değer, s-box yapısında yoksa eklenir, varsa yeni bir değer üretilir. Bu şekilde s-box dolana kadar bu adımlar devam eder.

Yukarıdaki adımlar ile elde edilen s-box yapılarında lineer olmama değeri neredeyse her zaman düşük kalmaktadır. Bunun için bu s-box yapılarının sadece ilk değerini diğer değerlerle karşılaştırılıp lineer olmama değerini kontrol edilmektedir. Bu değer arttığında ya da eşit kaldığında s-box yapısını güncellenir. Bu sayede lineer olmama değeri hızlı bir şekilde arttırılmış olur. Ayrıca önerilen yöntem Python programlama dili ile uygulanmıştır. Ancak, kullanıcıların tercihine göre diğer dillerde de kolayca uygulanabilecek bir yapıya sahiptir. Önerilen yöntemin araştırmacılar için daha iyi anlaşılması ve uygulanabilmesi için sözde kodu tablo 1 'de, akış diyagramı ise şekil 2 'de verilmiştir.

Tablo 1. Önerilen algoritmanın akış sözde kodu

1.	Başla
2.	SboxUretme ()
3.	KaotikSbox= []
4.	YeniSbox = []
5.	EskiLineerOlmama= KaotikSbox yapısının lineer olmama değeri
6.	for(int i=1; i<256; i++)
7.	YerDeğiştir (KaotikSbox[0], KaotikSbox[i])
8.	YeniLineerOlmama =YeniSbox yapısının lineer olmama değeri
9.	if (YeniLineerOlmama >= EskiLineerOlmama)
10.	Sbox yapısını güncelle
11.	end if
12.	else
13.	KaotikSbox = YeniSbox
14.	end else
15.	end for
16.	Bitir

Tablo 1 'de gösterildiği gibi önerilen algoritma oldukça basit ve uygulanabilir bir yapıdadır. Satır 6 'da görüldüğü üzere sadece 256 iterasyon ile etkili sonuçlar alınabilmektedir.



Şekil 2. Önerilen algoritmanın akış diyagramı

3. Analiz Sonuçları

Önerilen yöntem ile iki farklı s-box yapısı iyileştirilmiştir. Bu sayede algoritmanın başarımı daha iyi değerlendirilebilir. Başlangıçta kaotik sinüs harita ile elde edilen güçsüz s- box yapıları sırasıyla tablo 2 ve tablo 3 'de verilmiştir. Bu s-box yapılarının önerilen algoritma ile iyileştirildikten sonraki halleri ise tablo 4 ve tablo 5 'de verilmiştir. Elde edilen s-box yapılarında önerilen algoritma neredeyse aynı başarıyı sergilemiştir. Önerilen bu s-box yapılarını test etmek için literatürde en çok kullanılan metrikler kullanılmıştır. Bunların ilki lineer olmama metriğidir. Bu metrik aynı zamanda uygunluk değeri olarak kullanılmıştır. Çünkü s-box yapıları lineer olmayan yapılardır ve en önemli özellikleri budur [35]. Bu yüzden bu değerin yüksek olması, algoritmanın performansını önemli ölçüde etkileyecektir. Önerilen s-box yapılarında lineer olmama değerleri sırasıyla 107.25, 107.5 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler yüksek olarak kabul edilebilir. Bu sayede önerilen s-box yapıları lineer olmama özelliğini sağlamaktadır. Ayrıca bu değerler literatürdeki çoğu çalışmayı geride bırakmaktadır. Bir diğer önemli s-box değerlendirme kriteri SAC değeridir. Bu değer giriş bitlerinde yapılan bir değişikliğe göre çıkıştaki bitlerin değişimini hesaplamaktadır [36]. Şöyle ki; bir şifreleme algoritmasında girişteki bir bitte değişiklik yapıldığında çıkıştaki bitlerin yarısına yakınının değişmesi istenmektedir. Bu durum, saldırganların bir çıkarımda bulunmalarını engellemektedir. Bu yüzden SAC değerinin 0.5 değerine yakın bir değerde olması istenir. Önerilen s-box yapılarının ikisinde de bu değer 0.5 değerine oldukça yakındır. Yani önerilen s-box yapıları bu metriği de

sağlamaktadır. Bir diğer değerlendirme metriği BIC değeridir. Bu değerde yine literatürde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu değer bitlerin birbirinden bağımsız olması gerektiğini ifade eder [36]. Yani bir bitte yapılacak olan değişikliklerle diğer bitler hakkında çıkarım yapılamamalı. Bu metrikte hem lineer olmama değeri hem de SAC değeri hesaplanmaktadır. Lineer olmama değerinin yüksek, SAC değerinin ise yine 0.5 'e yakın bir değer olması beklenmektedir. Önerilen s-box yapıları bu metriği de sağlamaktadır. Bir diğer değerlendirme kriteri s-box yapısının XOR değerlerinin hesaplanmasıdır. Bu metrik, bir s-box yapısının giriş ve çıkış değerlerinde olasılık dağılımlarına izin verilmemesini sağlar [37]. Bu değer tüm s-box yapısı için düşük değerlerde olması istenir. Önerilen s-box yapıları bu metriği de sağlamaktadır. Bir diğer istenilen metrik ise s-box yapısının bijektif olmasıdır. Yani her bir değer sadece bir kez kullanılması gerekmektedir. 8 bit bir s-box yapısında 256 değer olduğundan 0 ile 256 arasındaki sayılarla s-box elde edilir. Önerilen s-box yapılarında değerler sadece bir kere kullanıldığı için ikisi de bijektiftir.

Tablo 2. Kaotik s-box-1

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	77	103	131	166	7	2	72	224	189	205	146	201	11	226	229	137
1	49	108	55	23	44	215	71	178	27	51	247	231	192	62	79	81
2	12	39	87	36	246	194	183	249	179	40	206	107	78	115	74	151
3	126	147	176	119	210	145	22	156	207	58	216	244	85	248	48	91
4	195	177	218	153	168	118	237	184	110	106	227	95	14	123	19	171
5	1	211	80	174	221	188	10	243	52	223	28	57	225	24	208	193
6	31	3	54	135	50	160	30	234	149	136	66	245	88	157	220	198
7	84	75	114	18	41	29	89	64	180	213	134	46	42	59	139	144
8	228	8	170	21	187	25	242	15	43	34	132	130	197	56	37	169
9	33	20	122	113	45	233	159	73	230	235	186	217	117	254	140	185
10	150	199	253	32	148	212	182	120	94	109	68	112	111	209	232	13
11	83	96	164	0	214	204	98	60	155	92	93	97	238	138	101	99
12	240	4	86	67	236	125	252	142	121	181	105	175	241	17	219	124
13	143	26	128	104	16	163	239	38	165	35	255	9	222	47	167	129
14	133	100	90	158	5	203	250	162	116	53	61	69	173	251	6	127
15	196	152	82	154	161	63	70	65	141	102	172	191	200	190	76	202

Tablo 3. Kaotik s-box-2

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	42	166	55	209	78	85	0	10	90	218	245	238	149	174	71	138
1	185	196	131	128	144	86	151	254	99	11	165	5	216	27	222	30
2	80	214	26	251	112	162	163	73	192	75	126	141	108	100	205	199
3	197	187	190	65	211	206	109	188	118	179	84	28	83	31	61	239
4	175	169	247	232	137	70	12	142	94	213	176	224	34	135	202	125
5	77	156	50	91	40	180	170	114	250	29	14	79	226	88	201	204
6	219	189	203	132	96	133	53	117	121	9	116	207	184	95	51	172
7	244	155	153	37	243	158	233	236	47	111	74	147	235	8	237	255
8	241	58	60	102	39	46	249	139	38	186	32	227	101	193	44	97
9	93	120	154	106	215	33	23	25	2	43	161	105	92	89	210	167
10	123	150	13	178	64	68	62	200	67	145	191	57	231	164	36	115
11	59	3	148	159	217	157	54	129	181	229	82	225	18	87	81	124
12	152	21	253	35	240	119	19	208	242	195	15	177	110	140	107	182
13	103	16	6	22	220	1	66	194	17	234	143	98	48	252	221	212
14	183	248	146	76	52	49	136	69	198	7	228	63	72	171	246	173
15	134	41	230	160	223	127	104	168	45	20	130	24	113	56	4	122

Tablo 4. Kaotik s-box-1 yapısının iyileştirilmiş hali

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
--	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----

0	120	77	131	166	103	2	72	224	7	189	146	205	11	226	229	201
1	137	108	55	23	44	215	71	178	49	27	51	231	192	62	79	81
2	12	39	87	36	246	247	194	249	183	179	206	107	40	78	115	74
3	126	151	147	119	210	176	22	145	207	58	156	244	85	216	248	91
4	48	195	218	177	153	118	237	168	110	106	227	95	184	123	19	14
5	1	171	211	80	174	221	10	243	52	188	223	57	225	28	208	193
6	31	3	54	135	50	160	30	234	149	24	66	245	136	88	157	198
7	220	75	114	18	41	84	29	89	180	64	213	134	46	42	139	59
8	228	8	170	21	144	187	242	15	43	34	132	130	197	56	37	169
9	33	25	122	20	45	233	159	73	230	235	186	113	117	254	140	217
10	185	199	253	150	148	212	182	32	94	109	68	112	111	209	232	13
11	83	96	164	0	214	204	98	60	155	92	93	97	238	138	101	99
12	240	4	86	67	236	125	252	142	121	181	105	175	241	17	219	124
13	143	26	128	104	16	163	239	38	165	35	255	9	222	47	167	129
14	133	100	90	158	5	203	250	162	116	53	61	69	173	251	6	127
15	196	152	82	154	161	63	70	65	141	102	172	191	200	190	76	202

Tablo 5. Kaotik s-box-2 yapısının iyileştirilmiş hali

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	191	42	55	209	166	85	0	78	10	90	218	245	149	238	71	138
1	185	196	131	128	174	144	151	86	99	254	11	5	165	27	222	30
2	80	214	26	251	216	112	162	163	192	75	126	73	108	100	141	205
3	199	187	190	197	65	211	206	188	118	109	84	28	83	31	179	239
4	61	175	247	232	169	70	12	142	94	213	176	224	34	137	202	125
5	77	156	50	91	135	40	170	114	250	29	180	79	14	88	201	204
6	226	219	189	203	96	133	53	117	121	9	116	132	184	95	51	172
7	207	155	153	244	243	37	158	233	47	111	236	147	235	8	237	74
8	241	255	58	102	60	46	249	139	39	186	32	227	101	193	44	97
9	93	120	154	106	215	33	23	25	2	38	161	105	92	89	210	43
10	123	150	13	178	64	68	62	200	67	145	167	57	231	164	36	115
11	59	3	148	159	217	157	54	129	181	229	82	225	18	87	81	124
12	152	21	253	35	240	119	19	208	242	195	15	177	110	140	107	182
13	103	16	6	22	220	1	66	194	17	234	143	98	48	252	221	212
14	183	248	146	76	52	49	136	69	198	7	228	63	72	171	246	173
15	134	41	230	160	223	127	104	168	45	20	130	24	113	56	4	122

Başlangıçta kaotik sinüs harita ile elde edilen zayıf s-box yapıları ve bu yapıların önerilen algoritma ile iyileştirildikten sonraki performans değerleri tablo 6 'da verilmiştir. Bu tablo incelendiğinde s-box-1 yapısının lineer olmama değerinin 103.75 'den 107.25 'e, s-box-2 yapısının lineer olmama değerinin ise 102.25 'den 107.5 'e yükseldiği görülmektedir. Bu değerlere sadece 255 yineleme ile hızlı bir şekilde ulaşılmıştır.

Tablo 6. Giriş olarak alınan ve iyileştirildikten sonraki s-box yapılarının performans değerleri

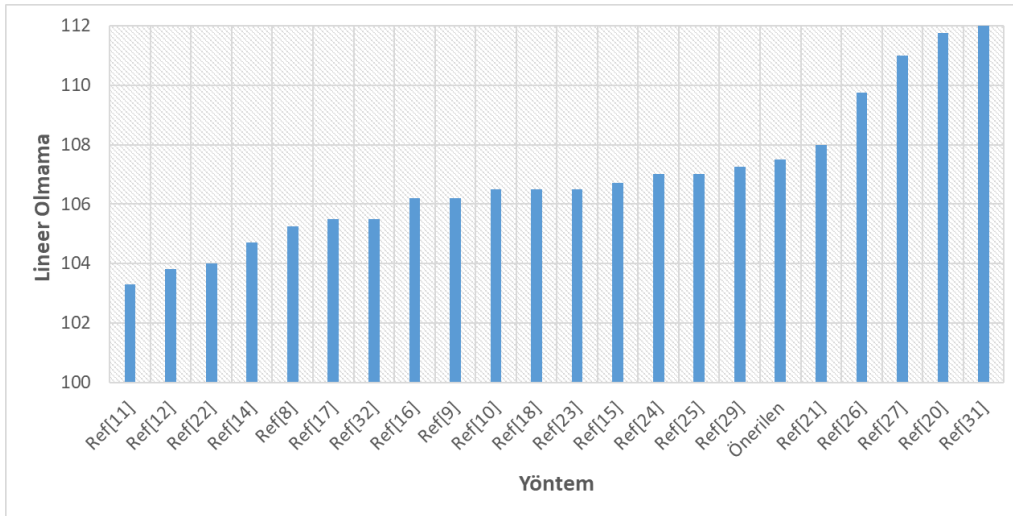
S-BOX	Lineer Olmama			SAC	BIC		En Yüksek XOR
	ort	min	max	ort	SAC	Lineer Olmama	
S-box-1	103.75	100	106	0.5081	0.4954	103.5	10
S-box-2	102.25	98	106	0.5022	0.4996	103.5	10
İyileştirilmiş S-box-1	107.25	106	110	0.5078	0.4954	103.14	10
İyileştirilmiş S-box-2	107.5	104	110	0.5073	0.5048	103.43	12

Önerilen s-box yapıları literatürdeki birçok s-box ile karşılaştırılmış olup karşılaştırma sonuçları tablo 7 'de verilmiştir. Bu tablodan da anlaşılacağı gibi önerilen yöntem literatürdeki birçok yöntemi geride bırakmıştır. Ancak özellikle optimizasyon ve matematiksel dönüşüm tabanlı yöntemlerin gerisinde kalmıştır. Bunun temel sebebi, önerilen yöntemin bu yöntemlere göre çok daha hızlı bir sonuç elde etmesidir. Ayrıca önerilen yöntemin karmaşıklığı diğer algoritmalarla karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Bu da algoritmanın bir diğer avantajı olarak kabul edilebilir.

Tablo 7. Önerilen yöntemin diğer yöntemlerle performans karşılaştırması

S-BOX	Ortalama Lineer Olmama	BIC		SAC	En Yüksek XOR
		SAC	Lineer Olmama		
Ref[11]	103.3	0.4995	103.3	0.4987	10
Ref[12]	103.8	0.4958	102.6	0.5058	14
Ref[22]	104	0.4971	103.2	0.4980	10
Ref[14]	104.7	0.4972	103.3	0.5034	10
Ref[8]	105.25	0.4994	102.6	0.5037	10
Ref[17]	105.5	0.4988	104.3	0.5010	12
Ref[32]	105.5	0.4994	105.7	0.4926	32
Ref[16]	106.2	0.5023	102.3	0.5039	10
Ref[9]	106.2	0.5288	100	0.501	10
Ref[10]	106.5	0.5003	104.2	0.4978	10
Ref[18]	106.5	0.4995	105.85	0.5036	10
Ref[23]	106.5	0.4984	105.2	0.5120	10
Ref[15]	106.7	0.504	103.5	0.4976	10
Ref[24]	107	0.4974	104.6	0.496	10
Ref[25]	107	0.5010	105.5	0.5015	10
Ref[29]	107.25	-	107	0.501	6
Önerilen	107.5	0.5048	103.43	0.5073	12
Ref[21]	108	-	-	-	-
Ref[26]	109.75	0.5041	104.14	0.4998	10
Ref[27]	111	0.4994	113.35	0.5	-
Ref[20]	111.75	0.5033	104	0.4968	12
Ref[31]	112	-	112	0.4951	-

Performans sonuçlarının daha iyi değerlendirilebilmesi için lineer olmama değerlerinin karşılaştırıldığı grafik şekil 3 'de verilmiştir.



Şekil 3. Performans karşılaştırma grafiği

4. Sonuçlar

Geçmişten günümüze güçlü s-box yapıları elde etmek oldukça zor bir problem olarak gelmiştir. Bu problemi çözmek için kaos, matematiksel dönüşümler ve optimizasyon algoritmaları başta olmak üzere pek çok yöntem

geliştirilmiştir. Ancak halen optimum çözümler elde edilememiştir. Çünkü tüm bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları vardır. Bu çalışmada bu problemin çözümü için yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemde öncelikle kaotik bir harita yardımıyla zayıf bir s-box elde edilmektedir. Daha sonra bu s-box yapısında ilk eleman diğer 255 elemanla sırasıyla yer değiştirilerek lineer olmama değeri kontrol edilir. Bu değer artar ya da eşit kalırsa s-box güncellenir. Bu şekilde sadece 255 iterasyon sonunda lineer olmama değeri önemli ölçüde arttırılabilmektedir. Bu çalışmada bu felsefe ile iki farklı s-box üretilmiştir. Bu s-box yapıları 107.25 ve 107.5 lineer olmama değerleri ile literatürdeki birçok çalışmayı geride bırakmıştır. Bu sonuçların özellikle gelecekte inşa edilecek olan simetrik şifreleme algoritmaları için faydalı olacağı düşünülmektedir. Önerilen yöntemin hızlı ve basit olmasının yanı sıra en önemli avantajlarından bir tanesi ise; diğer yöntemler ile elde edilen nispeten zayıf s-box yapılarının tamamını iyileştirebilecek etkinlikte olmasıdır. Bu algoritmanın lineer olmama değerini belli bir seviyeye kadar arttırabilmesi bir dezavantaj olarak görülebilir. Ancak kullanıcılar daha fazla elemanın yerini değiştirip daha yüksek lineer olmama değerlerine ulaşabilirler.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

Kaynakça

- [1] Van Oorschot, P. C., Menezes, A. J., & Vanstone, S. A. (1996). Handbook of applied cryptography. CRC press.
- [2] J. Daemen and V. Rijmen, "AES proposal: Rijndael," in Proc. 1st Adv. Encryption Conf., CA, USA, 1998, pp. 1-45.
- [3] Standard, D. E. (1999). Data encryption standard. Federal Information Processing Standards Publication, 112.
- [4] Artuğer, F., & Özkaynak, F. (2020). A novel method for performance improvement of chaos-based substitution boxes. *Symmetry*, 12(4), 571.
- [5] Artuğer, F., & Özkaynak, F. (2022). A method for generation of substitution box based on random selection. *Egyptian Informatics Journal*, 23(1), 127-135.
- [6] Özkaynak, F., Çelik, V., & Özer, A. B. (2017). A new S-box construction method based on the fractional-order chaotic Chen system. *Signal, Image and Video Processing*, 11(4), 659-664.
- [7] Khan, M., Shah, T., & Gondal, M. A. (2013). An efficient technique for the construction of substitution box with chaotic partial differential equation. *Nonlinear Dynamics*, 73(3), 1795-1801.
- [8] Özkaynak, F. (2020). On the effect of chaotic system in performance characteristics of chaos based s-box designs. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 550, 124072.
- [9] Lambić, D. (2020). A new discrete-space chaotic map based on the multiplication of integer numbers and its application in S-box design. *Nonlinear Dynamics*, 100(1), 699-711.
- [10] Lambić, D. (2018). S-box design method based on improved one-dimensional discrete chaotic map. *Journal of Information and Telecommunication*, 2(2), 181-191.
- [11] Tang, G., Liao, X., & Chen, Y. (2005). A novel method for designing S-boxes based on chaotic maps. *Chaos, Solitons & Fractals*, 23(2), 413-419.
- [12] Tang, G., & Liao, X. (2005). A method for designing dynamical S-boxes based on discretized chaotic map. *Chaos, solitons & fractals*, 23(5), 1901-1909.
- [13] Khan, M., Shah, T., Mahmood, H., Gondal, M. A., & Hussain, I. (2012). A novel technique for the construction of strong S-boxes based on chaotic Lorenz systems. *Nonlinear Dynamics*, 70(3), 2303-2311.
- [14] Özkaynak, F. (2020). An analysis and generation toolbox for chaotic substitution boxes: A case study based on chaotic labyrinth rene thomas system. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, 44(1), 89-98.
- [15] Ye, T., & Zhimao, L. (2018). Chaotic S-box: Six-dimensional fractional Lorenz-Duffing chaotic system and O-shaped path scrambling. *Nonlinear Dynamics*, 94(3), 2115-2126.
- [16] Çavuşoğlu, Ü., Zengin, A., Pehlivan, I., & Kaçar, S. (2017). A novel approach for strong S-Box generation algorithm design based on chaotic scaled Zhongtang system. *Nonlinear dynamics*, 87(2), 1081-1094.
- [17] Belazi, A., & Abd El-Latif, A. A. (2017). A simple yet efficient S-box method based on chaotic sine map. *Optik*, 130, 1438-1444.
- [18] Hematpour, N., & Ahadpour, S. (2021). Execution examination of chaotic S-box dependent on improved PSO algorithm. *Neural Computing and Applications*, 33(10), 5111-5133.
- [19] Tian, Y., & Lu, Z. (2017). Chaotic S-box: Intertwining logistic map and bacterial foraging optimization. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017.

- [20] Artuğer, F., & Özkaynak, F. (2022). SBOX-CGA: substitution box generator based on chaos and genetic algorithm. *Neural Computing and Applications*, 34(22), 20203-20211.
- [21] Kang, M., & Wang, M. (2022). New Genetic Operators for Developing S-Boxes With Low Boomerang Uniformity. *IEEE Access*, 10, 10898-10906.
- [22] Chen, G. (2008). A novel heuristic method for obtaining S-boxes. *Chaos, Solitons & Fractals*, 36(4), 1028-1036.
- [23] Farah, T., Rhouma, R., & Belghith, S. (2017). A novel method for designing S-box based on chaotic map and teaching-learning-based optimization. *Nonlinear dynamics*, 88(2), 1059-1074.
- [24] Alhadawi, H. S., Lambić, D., Zolkipli, M. F., & Ahmad, M. (2020). Globalized firefly algorithm and chaos for designing substitution box. *Journal of Information Security and Applications*, 55, 102671.
- [25] Ahmad, M., Bhatia, D., & Hassan, Y. (2015). A novel ant colony optimization based scheme for substitution box design. *Procedia Computer Science*, 57, 572-580.
- [26] Zamli, K. Z., Din, F., & Alhadawi, H. S. (2023). Exploring a Q-learning-based chaotic naked mole rat algorithm for S-box construction and optimization. *Neural Computing and Applications*, 1-23.
- [27] Khan, H., Hazzazi, M. M., Jamal, S. S., Hussain, I., & Khan, M. (2023). New color image encryption technique based on three-dimensional logistic map and Grey wolf optimization based generated substitution boxes. *Multimedia Tools and Applications*, 82(5), 6943-6964.
- [28] Örs, S. B., Preneel, B., & Verbauwhede, I. (2007). Side-channel analysis attacks on hardware implementations of cryptographic algorithms. *Wireless Security and Cryptography-Specifications and Implementations*, 213-247.
- [29] Arshad, B., Siddiqui, N., Hussain, Z., & Ehatisham-ul-Haq, M. (2022). A Novel Scheme for Designing Secure Substitution Boxes (S-Boxes) Based on Mobius Group and Finite Field. *Wireless Personal Communications*, 1-22.
- [30] Malik, M. S. M., Ali, M. A., Khan, M. A., Ehatisham-Ul-Haq, M., Shah, S. N. M., Rehman, M., & Ahmad, W. (2020). Generation of highly nonlinear and dynamic AES substitution-boxes (S-boxes) using chaos-based rotational matrices. *IEEE Access*, 8, 35682-35695.
- [31] Siddiqui, N., Yousaf, F., Murtaza, F., Ehatisham-ul-Haq, M., Ashraf, M. U., Alghamdi, A. M., & Alfakeeh, A. S. (2020). A highly nonlinear substitution-box (S-box) design using action of modular group on a projective line over a finite field. *Plos one*, 15(11), e0241890.
- [32] Khan, M., & Shah, T. (2014). A novel image encryption technique based on Hénon chaotic map and S8 symmetric group. *Neural Computing and Applications*, 25(7), 1717-1722.
- [33] Bakunina, E. V., & Dykyi, O. V. (2022). Synthesis method for S-boxes satisfying the criterion of correlation immunity of Boolean and 4-functions. *Journal of Discrete Mathematical Sciences and Cryptography*, 1-13.
- [34] Sokolov, A. V., & Radush, V. V. (2022). A method for synthesis of S-boxes with good avalanche characteristics of component Boolean and quaternary functions. *Journal of Discrete Mathematical Sciences and Cryptography*, 1-12.
- [35] Artuğer, F., & Özkaynak, F. (2021). An effective method to improve linear olmama value of substitution boxes based on random selection. *Information Sciences*, 576, 577-588.
- [36] Webster, A. F., & Tavares, S. E. (1985, August). On the design of S-boxes. In *Conference on the theory and application of cryptographic techniques* (pp. 523-534). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [37] Biham, E., & Shamir, A. (1991). Differential cryptanalysis of DES-like cryptosystems. *Journal of CRYPTOLOGY*, 4(1), 3-72.

Primary Culture of Cancer Cells Derived from Human Lung Tumors

Seçil Yılmaz*¹, Medine DOĞAN SARIKAYA¹, Esra ATAR¹, Burcu Şen BAĞCI¹,
Sercan KENANOĞLU¹, Nilhan MUTLU¹, Elif YAŞAR¹, Ömer ÖNAL², Özlem CANÖZ³, Yusuf ÖZKUL¹

*¹ Erciyes Üniversitesi Betül-Ziya Eren Genom ve Kök Hücre Merkezi, KAYSERİ

² Erciyes Üniversitesi Tıp Fakültesi, Cerrahi Tıp Bilim, Göğüs Cerrahisi Anabilim Dalı, KAYSERİ

³ Erciyes Üniversitesi Tıp Fakültesi, Cerrahi Tıp Bilimleri Bölümü, Patoloji Anabilim Dalı, KAYSERİ

(Alınış / Received: 23.03.2023, Kabul / Accepted: 13.04.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 02.05.2023)

Keywords

Lung Cancer,
Non-Small Cell Lung Cancer,
Primary Culture

Abstract: Primary cell culture is an important research platform for studying the biochemistry and molecular biology relevant to individual cancer types and understanding cancer cell physiology. Therefore, in this study, it was aimed to perform primary cell culture from tissues of non-small cell lung cancer (NSCLC) patients with different clinical course in our own laboratory conditions. Thus, it will throw light on future studies on tumor biology and pathogenesis in NSCLC, the most common subtype of lung cancer, which is the most malignant type of cancer. **Materials and Methods:** Patients diagnosed with NSCLC who required surgical intervention as a result of pulmonary function tests and thorax computed tomography and gave written consent were included in the study. After the pathologically confirmed tumor tissue was removed by surgical resection, the cells obtained by mechanical and enzymatic digestion with collagenase/hyaluronidase were cultured in Dulbecco's Modified Eagle Medium (DMEM) under sterile conditions. **Results:** In this study, cancer cells were successfully isolated and cultured from the tumor tissues of 3 patients diagnosed with NSCLC, whose tumor diameters were 2*1.5*1.2, 8*7*6, 4*3.7*3, without metastasis and aged between 43-70 years. **Conclusions:** This study presents a successful primary cell culture protocol that includes important steps for obtaining patient-derived tumor cells in lung cancer based on information in the literature and personal experience on the subject. Primary cell culture is an *in vitro* model that is thought to contribute to the development of personalized treatments in future studies for the effective treatment of lung cancer by bridging the gap between the laboratory and the clinical decision process of the physician.

İnsan Akciğer Tümörlerinden Elde Edilen Kanser Hücrelerinin Primer Kültürü

Anahtar Kelimeler

Akciğer Kanseri
Küçük Hücreli Dışı Akciğer
Kanseri
Primer Hücre Kültürü

Özet: Primer hücre kültürü bireysel kanser türleri ile ilişkili biyokimya ve moleküler biyolojiyi inceleme ve kanser hücresi fizyolojisini anlamak için kullanılan önemli bir araştırma platformudur. Bu nedenle bu çalışmada en ölümcül kanser türü olan akciğer kanserinin en sık görülen alt tipi olan küçük hücreli dışı akciğer kanserinde (KHDAK) tümör biyolojisi ve patogenezi ile ilgili ileride yapılacak olan çalışmalara ışık tutması için farklı klinik seyir gösteren KHDAK hastalarına ait dokulardan kendi laboratuvar koşullarımızda primer hücre kültürü yapılması amaçlanmıştır. **Gereç ve Yöntem:** KHDAK tanısı alan solunum fonksiyontestleri ve toraks bilgisayarlı tomografisi cerrahi müdahaleye uygun olan ve yazılı olarak onay veren hastalar çalışmaya dahil edilmiştir. Patolojik olarak doğrulanan tümör dokusu cerrahi rezeksiyon ile çıkarıldıktan sonra steril şartlarda mekanik ve kollajenaz/hyaluronidaz ile enzimatik parçalanmasıyla elde edilen hücreler Dulbecco's Modified Eagle Medium (DMEM) içerisinde kültüre edilmiştir. **Bulgular:** Bu çalışmada tümör çapları 2*1.5*1.2, 8*7*6, 4*3.7*3 olan, metastazı olmayan ve yaşları 43-70 arasında değişen KHDAK tanısı alan 3 hastanın tümör dokularından kanser hücreleri başarılı bir şekilde izole edilip kültüre edilmiştir. **Sonuç:** Bu çalışma, literatürdeki bilgilere ve konuyla ilgili kişisel deneyimlere dayanarak akciğer kanserinde hasta kaynaklı tümör hücrelerinin elde edilebilmesi için önemli adımları içeren başarılı bir primer hücre kültürü protokolü sunmaktadır. Primer hücre kültürü laboratuvar ile hekimin klinik karar süreci arasında köprü oluşturarak akciğer kanserinin etkili bir şekilde tedavi edilebilmesi için ileride yapılacak çalışmalarla kişiselleştirilmiş tedavilerin geliştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülen *in vitro* bir modeldir.

1. Introduction

Among all cancers, lung cancer is the cause of cancer-related deaths worldwide, with a rate of 18.4% [1]. Although there are many subtypes of lung cancer, non-small cell lung cancer (NSCLC) [2]. Nevertheless NSCLC is one of the leading causes of cancer deaths worldwide [3]. Despite significant progress in many areas, such as cancer initiation, progression, metastasis, and tumor microenvironment, clinical success in long-term studies of lung cancer is still limited. The most important reason for this situation is the heterogeneous nature of cancer, resulting in multiple disease manifestations. The different variations between patients (intertumoral heterogeneity), the primary tumor mass of the patient, and the large diversity of cell populations in individual metastases (intratumoral heterogeneity) have a great impact on patient prognosis and treatment options [4].

In vivo animal models and *in vitro* studies, which are widely used in cancer research, are of extraordinary importance for elucidating the molecular mechanisms underlying cancer development and for developing new treatment strategies. However, *in vivo* models are quite expensive in terms of infrastructure and maintenance and cannot be organized as easily as *in vitro* models [5]. In this context, immortalized cancer cell lines have been an accessible, easy-to-use biological model for studying cancer biology and potential anticancer drug efficacy for many years. However, there are genetic and epigenetic differences between cell lines and cancer cells derived from patient tissues. In this context, this appears to be a parameter that makes it difficult to assess how much of the original tumor biology is reflected in established cell line models that are maintained *in vitro* for long periods of time. Therefore, cell lines do not adequately represent the diversity, heterogeneity, and drug-resistant tumors that occur in patients [6,7]. On the other hand, *in vivo* animal models may not be able to predict clinical outcomes because they are not fully adequate to show cancerogenesis with intertumoral heterogeneity and basic aspects such as invasion and metastasis that involved in cancer development. Moreover previous studies, have shown that the conversion rate of results from animal model studies to clinical trials is less than 8% [8]. Cell cultures prepared from patient tissues are particularly important for studies aimed at better preserving the molecular characteristics of patient tumors and supporting clinical decision-making and counseling as a better alternative to studying cancer biology and drug sensitivity [9,10]. Therefore, primary culture plays a critical role in better mimicking patient-specific tumor behavior, detecting differences between patients and, developing personalized treatments.

The aim of this study was to generate a primary cell culture model under our laboratory conditions from tissues of NSCLC patients with different clinical courses, and it is expected to contribute to future studies on the biology and pathogenesis of lung cancer in this model.

2. Material and Method

2.1. The selection and determination of patients

Patients with NSCLC who presented to the Hospital of Erciyes University Faculty of Medicine, Department of Thoracic Surgery and whose pulmonary function tests and thoracic computed tomography were suitable for surgical intervention were included in the study. This work programme is in accordance with the Declaration of Helsinki. This research was supported by TUBITAK 1001 project number 215S849. Patients included in the study were informed of the purpose of the study and asked to read the "Voluntary Informed Consent Form", after which verbal and written consents were obtained from the patients.

2.2. Pathological confirmation of the tumor

After the tumor margins were determined by a pathologist at Erciyes University Pathology, hematoxylin-eosin (H&E) and immunostaining were performed for diagnosis and accurate subtyping, and it was finally determined to be NSCLC.

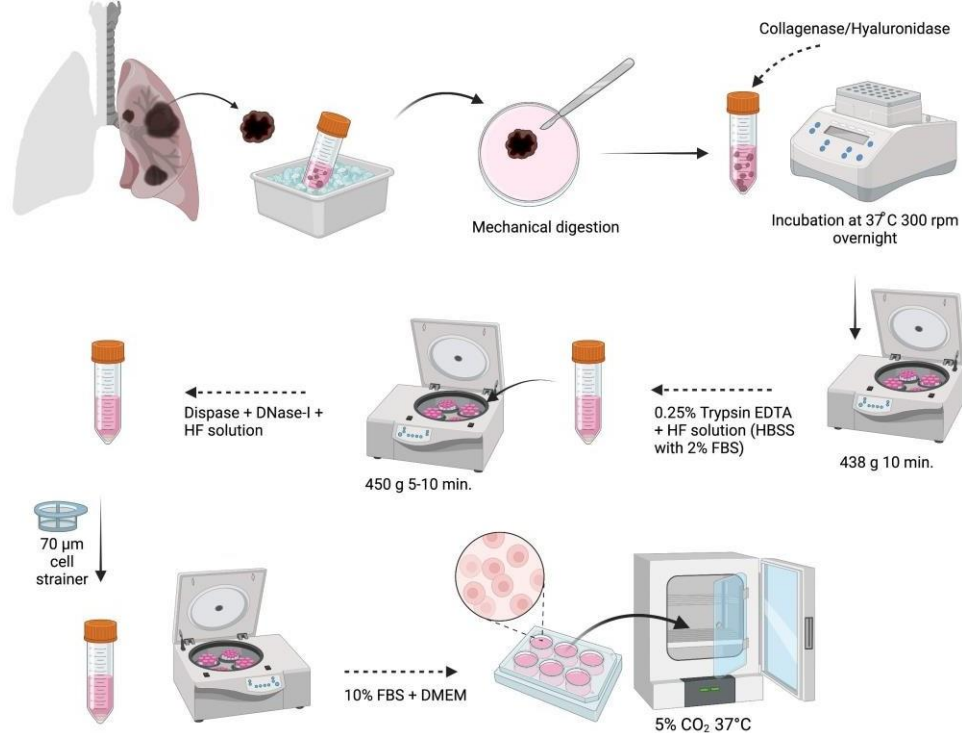


Figure 1. Schematic representation of the experimental procedure in the study. Tumor tissues from patients diagnosed with NSCLC were transferred from Erciyes University Pathology Department to Erciyes University Genome and Stem Cell Center in a cold environment. After mechanical lysis of the transferred tumor tissues, enzymatic lysis with collagenase/hyaluronidase was performed. The obtained cells were cultured in a 37°C incubator with 5% CO₂.

2.3. Transport procedure of tumor tissues

According to the required procedures in the Pathology Department of Erciyes University, 0.5-1 cm³ of tumor tissue was transported to the Genome and Stem Cell Center under cold and sterile conditions in a Dulbecco's Modified Eagle Medium (DMEM) (STEM CELL, #5630) containing 10% Fetal Bovine Serum (FBS) (Thermo Fisher, #10270106), 1% Penicillin-Streptomycin (Pen-Strep) (Thermo Fisher, #15070063), 1% Amphotericin (Thermo Fisher, #15290026), and 1% L-Glutamine (STEMCELL, #7100). This provided minimal conditions for performing primary cell culture studies.

2.4. Obtaining a single-cell suspension for primary cell culture

2.4.1. Mechanical digestion

Tissues transferred to the Genome and Stem Cell Center were transferred to a Petri dish under sterile conditions, and non-tumor tissues such as vascular fragments, necrotic structures, and tar were removed with a scalpel and forceps. After washing with Hanks Balanced Salt Solution (HBSS) (STEM CELL, #37150) containing 1% Pen-strep, mechanical digestion was performed.

2.4.2. Enzymatic digestion

Tissues cut into small pieces for enzymatic lysis were transferred to a centrifuge tube and incubated overnight with the enzyme Collagenase/Hyaluronidase (STEM CELL, #7912) at 37°C in a shaking incubator at 300 rpm. It was then centrifuged at 438 g for 10 minutes to remove the supernatant from the suspended cells. To obtain a single-cell suspension, the following procedures were carried out:

First, 0.25% Trypsin-EDTA (Thermo Fisher, 25200056) was added, followed by HBSS (HF solution) containing 2% FBS and centrifuged at 450 g for 5-10 minutes, then 2 ml Dispase (STEM CELL, 7913) and 1mg/1mL DNase- I (STEM CELL, 7900) were added and allowed to stand for 3-5 minutes. Then 10 mL of cold HF solution (HBSS with 2% FBS) was added, filtered, and centrifuged again, then cultured in a 37°C incubator with 5% CO₂ and inoculated with DMEM with 5% FBS.

2.5. Cryopreservation of cells

To preserve and stock the cells obtained, cells were frozen with Dimethyl Sulfoxide (DMSO) (AppliChem, A3672,0100) in cryogenic vials and stored at -80°C/Liquid Nitrogen tank. After formation of the cell pellet, cells were resuspended with medium containing 5% FBS. After calculating the cell number, 10% DMSO was added to the cell suspension, transferred to the cryogenic vials, brought to -20°C and then stored at -80°C.

3. Results

Clinical outcomes of patients with Non-Small Cell Lung Cancer

The tumor diameter, metastasis status, and adjuvant treatment status of NSCLC patients used within the scope of this project are given in Table 1. According to information obtained from the Erciyes University Department of Thoracic Surgery, no metastases were detected in the patients, and only Patient 2 was reported to have received chemotherapy.

Table 1. Clinical outputs of patients with Non-Small Cell Lung Cancer

Patient Numbers	Age	Tumor Diameter	Metastasis	Adjuvan Treatment
Patient 1	64	2*1.5*1.2	-	-
Patient 2	43	8*7*6	-	Chemotherapy
Patient 3	70	4*3.7*3	-	-

Immunostaining of Non-Small Cell Lung Cancer Patients

The immunostaining of patient tissues diagnosed with NSCLC in the Department of Pathology, Erciyes University, is shown in Table 2. H&E staining for diagnosis and subtyping of tumor cells from patients with non-small cell lung cancer is shown in Figure 2, and immunohistochemical staining is shown in Figure 3.

Table 2. The immunostaining of patient tissues diagnosed with Non-Small Cell Lung Cancer

Patient Numbers	Immunostaining
Patient 1	Napsin A+, TTF-1+, CK7+, Musin-
Patient 2	TTF-1 +, β -catenin +, Synaptophysin +, Chromogranin-, Ostrogen-, Glypican 3 -
Patient 3	P40-, P63-, TTF-1+, Napsin A-, CD56-, Synaptophysin-, Chromogranin-, Musin +

*TTF-1: Thyroid transcription factor 1; CK7: Cytokeratin 7

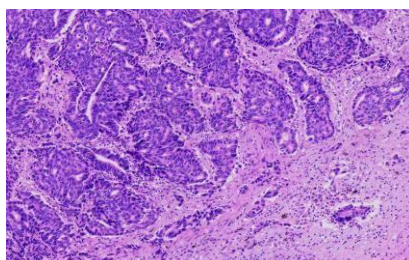


Figure 2. H&E staining of primary tumor cells from a patient with Non-Small Cell Lung cancer. Groups of malignant epithelial cells with marked atypia forming adenoid structures and occasionally solid islands were observed in the fibrotic stroma (x200).

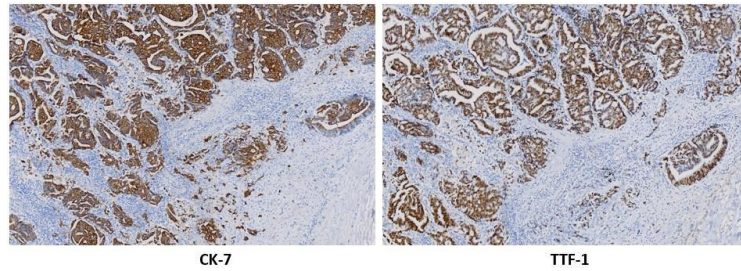


Figure 3. Immunohistochemical staining of tumor cells in the primary tumor in a patient with non-small cell lung cancer. CK7 and TTF1 immunostaining model in a patient with non-small cell lung cancer. NSCLC tumor cells are positive for CK7 and TTF1 (x200).

Retrieval and mechanical fragmentation of tumor tissue from Non-Small Cell Lung Cancer patients

Figure 4 shows images of the tissue removed by surgical resection and submitted to the Department of Pathology. The resection was performed in the Thoracic Surgery Department of the Hospital of the Faculty of Medicine of Erciyes University. Subsequently, cancer diagnosis and subtyping of the tissues brought to the Pathology Department was performed by the pathologist. Confirmed samples were forwarded to the Genome and Stem Cell Centre. Figure 5 shows the representation of the mechanical digestion process.



Figure 4. Tissue images removed by surgical resection and submitted to the Department of Pathology. Resection was performed at the Hospital of Erciyes University Faculty, Thoracic Surgery. Cancer diagnosis and subtyping of the tissues submitted to the Department of Pathology was performed by a pathologist.

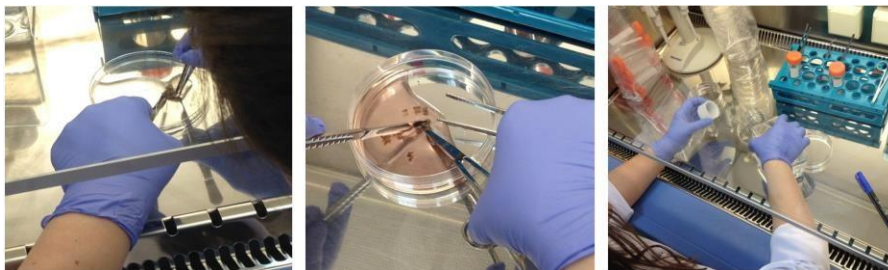


Figure 5. Images of tissues transferred from the Department of Pathology to the Genome and Stem Cell Center. Mechanical disruption is demonstrated by removal of blood vessels and necrotic parts from the transferred tissues.

Primary cell culture images of Non-Small Cell Lung Cancer patients

Figure 6 shows images of primary cell culture of all patients at day 1, day 5, and day 10.

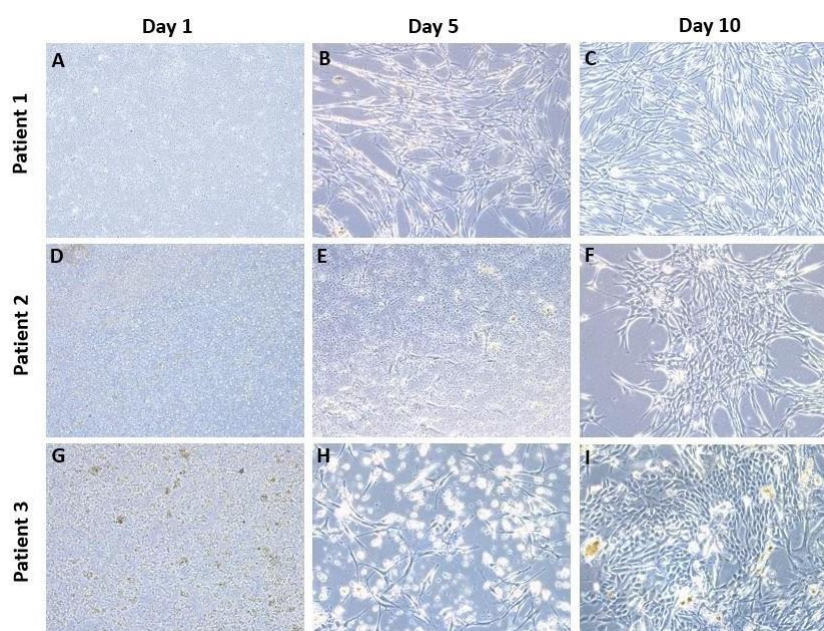


Figure 6. Images of primary cell cultures, from all patients. (A-C) Patient 1, 1st, 5th, and 10th days in passage 0, (D-F) Patient 2, 1st, 5th, and 10th days in passage 0, (G-I) Patient 3, 1st, 5th, and 10th days in passage 0 were recorded with a 10X objective under a Leica inverted light microscope.

4. Discussion and Conclusion

Despite advances in early cancer detection and multimodality therapy, the vast majority of lung cancer patients are locally advanced or metastatic at the time of diagnosis, suggesting that lung cancer cells are very aggressive. The mechanisms underlying the invasiveness and metastasis of the lung cancer are not fully understood [11]. To elucidate this mechanism, it is very important to perform a successful primary cell culture and consider the specific characteristics of the tumor in each patient. Therefore, a pilot study was performed with 3 patients, in which primary cell cultures were established from the tissues of patients with NSCLC, the most common subtype of lung cancer.

Isolation and cultivation of solid tumor cells *in vitro* that resemble the microenvironment of the patient-specific tumor has always been considered challenging and requires special techniques in this context. Although there are several methods for primary cell culture, each method has its advantages and disadvantages [6]. Although primary cell culture is considered the best method for studying tumor tissues, it is difficult to control due to the heterogeneity of cellular, genetic, and epigenetic composition among patients and the high risk of contamination [12,13]. For this reason, the risk of contamination is controlled with antibiotics and antifungals added to the transport medium used for tissue transfer to successfully harvest cancer cells. In addition, it should be emphasized that tumor tissue must be cleared of necrosis or fibrous lesions as soon as possible to obtain parenchymal tumor cells in primary culture [14]. Therefore, as shown in Figure 5, the tar, blood vessels, and necrotic parts were excised and removed from the incoming tumor tissue, and then mechanical fragmentation was performed (Figure 5).

Lung cancer tissue with epithelial phenotype is rich in stromal cells, and fibroblast contamination must be removed for successful lung cancer cell culture [15,16]. Cleavage of cancer cells by collagenase has been shown to be less harmful to epithelial cells than lysis by other enzymes [17]. In this study, collagenase/hyaluronidase was used to isolate primary lung cancer cells (Figure 1). It has been shown that overnight incubation with collagenase/hyaluronidase can successfully obtain and culture cancer cells without affecting the adhesion or proliferation ability of the isolated cells (Figure 6). The choice of culture medium for primary culture of lung cancer cells is a key factor. Media such as DMEM, RPMI-1640, HITES, and ACL-4 can be used for adenocarcinoma culture [14,18]. In the study of Ho et al, the enzyme collagenase was used to isolate cancer cells from NSCLC patients and the cells were successfully cultured in DMEM medium [19]. In view of these studies, we used DMEM with penicillin and streptomycin as culture medium in this study. Another important factor to be considered in primary culture is the use of extracellular matrix (ECM). ECM proteins such as collagen and fibronectin are used in many studies because they allow cells to adhere better to the culture dish [15]. However, ECM proteins can also cause cell differentiation [20]. For this reason, our study demonstrated that isolated cancer cells can be cultured without the use of ECM proteins.

While no adherent cells were observed on the first day after primary culture, they were observed to adhere and proliferate in the following days. With increasing culture time, the number of adherent cells increased. Cells from patient 1 were observed to adhere and proliferate earlier compared to other patients. Cells that appeared spindle-shaped or polygonal gradually aggregated into clumps and filled the culture dish. After an average of 5 days, the cells grew rapidly, and by day 10, cells from patients 1 and 3 were 70-80% confluent. This shows us that the culture times required for attachment of cancer cells from different patients are different (Figure 6).

This suggests that each patient has a specific phenotype of cell behavior for their tumor tissue. Therefore, the creation of an *in vitro* model using patient tissue can help clinicians perform individual drug screening for personalized cancer treatment, test potential drug candidates, and thus determine the clinician decision for predictive oncology, based on the fact that each patient's response to therapy is unique [21-23].

Primary cell culture is an important research platform to explore the biological characteristics of patient-specific lung cancer cells. For this reason, it is considered a method that can bridge the gap between the laboratory and the clinician's clinical decision-making process. Consequently, the successful implementation and development of primary cell culture method is expected to contribute the understanding of tumor biology and future studies of personalized treatments.

Acknowledgment

We would like to thank TUBITAK for their financial support. This study was approved by the Clinical Research Ethics Committee of the Faculty of Medicine of Erciyes University on August 26, 2015, under approval number 2015/372.

References

1. de Koning, H. J., van der Aalst, C. M., de Jong, P. A., Scholten, E. T., Nackaerts, K., Heuvelmans, M. A., Lammers, J. J., Weenink, C., Yousaf-Khan, U., Horeweg, N., van 't Westeinde, S., Prokop, M., Mali, W. P., Mohamed Hoessein, F. A. A., van Ooijen, P. M. A., Aerts, J. G. J. V., den Bakker, M. A., Thunnissen, E., Verschakelen, J., Vliegthart, R., ... Oudkerk, M. 2020. Reduced Lung-Cancer Mortality with Volume CT Screening in a Randomized Trial. *The New England Journal of Medicine*, 382(6), 503–513.
2. Nooreldeen, R., & Bach, H. 2021. Current and Future Development in Lung Cancer Diagnosis. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(16), 8661.
3. Reck, M., Heigener, D. F., Mok, T., Soria, J. C., & Rabe, K. F. 2013. Management of Non-Small-Cell Lung Cancer: Recent Developments. *Lancet*, 382(9893):709-19.
4. Dagogo-Jack, I., & Shaw, A. T. 2018. Tumour Heterogeneity and Resistance to Cancer Therapies. *Nature reviews. Clinical Oncology*, 15(2), 81–94.
5. Kohl, C., Aung, T., Haerteis, S., Ignatov, A., Ortmann, O., & Papatthemelis, T. 2022. The 3D *in vivo* Chorioallantoic Membrane Model and Its Role in Breast Cancer Research. *Journal of Cancer Research and Clinical Oncology*, 148(5), 1033–1043.
6. Mitra, A., Mishra, L., & Li, S. 2013. Technologies for Deriving Primary Tumor Cells for Use in Personalized Cancer Therapy. *Trends in Biotechnology*, 31(6), 347–354.
7. Gazdar, A. F., Girard, L., Lockwood, W. W., Lam, W. L., & Minna, J. D. 2010. Lung Cancer Cell Lines as Tools for Biomedical Discovery and Research. *Journal of the National Cancer Institute*, 102(17), 1310–1321.
8. Mak, I. W., Evaniew, N., & Ghert, M. 2014. Lost in Translation: Animal Models and Clinical Trials in Cancer Treatment. *American Journal of Translational Research*, 6(2), 114–118.
9. Huo, K. G., D'Arcangelo, E., & Tsao, M. S. 2020. Patient-Derived Cell Line, Xenograft and Organoid Models in Lung Cancer Therapy. *Translational Lung Cancer Research*, 9(5), 2214–2232.
10. Naipal, K. A., Verkaik, N. S., Sánchez, H., van Deurzen, C. H., den Bakker, M. A., Hoeijmakers, J. H., Kanaar, R., Vreeswijk, M. P., Jager, A., & van Gent, D. C. 2016. Tumor Slice Culture System to Assess Drug Response of Primary Breast Cancer. *BMC Cancer*, 16, 78.
11. Hu, W., Liu, Y., Zhou, W., Si, L., & Ren, L. 2014. CXCL16 And CXCR6 Are Coexpressed in Human Lung Cancer *in vivo* and Mediate The Invasion of Lung Cancer Cell Lines *in vitro*. *PloS One*, 9(6), e99056.
12. Neve, R. M., Chin, K., Fridlyand, J., Yeh, J., Baehner, F. L., Fevr, T., Clark, L., Bayani, N., Coppe, J. P., Tong, F., Speed, T., Spellman, P. T., DeVries, S., Lapuk, A., Wang, N. J., Kuo, W. L., Stilwell, J. L., Pinkel, D., Albertson,

- D. G., Waldman, F. M., ... Gray, J. W. 2006. A Collection of Breast Cancer Cell Lines For The Study of Functionally Distinct Cancer Subtypes. *Cancer Cell*, *10*(6), 515–527.
13. Stacey G. N. 2011. Cell Culture Contamination. *Methods in Molecular Biology (Clifton, N.J.)*, *731*, 79–91.
 14. Si, L. L., Lv, L., Zhou, W. H., & Hu, W. D. 2015. Establishment and Identification of Human Primary Lung Cancer Cell Culture in vitro. *International Journal of Clinical and Experimental Pathology*, *8*(6), 6540–6546.
 15. Xi, K. X., Wen, Y. S., Zhu, C. M., Yu, X. Y., Qin, R. Q., Zhang, X. W., Lin, Y. B., Rong, T. H., Wang, W. D., Chen, Y. Q., & Zhang, L. J. 2017. Tumor-Stroma Ratio (TSR) In Non-Small Cell Lung Cancer (NSCLC) Patients After Lung Resection is a Prognostic Factor for Survival. *Journal of Thoracic Disease*, *9*(10), 4017–4026.
 16. Nazareth, M. R., Broderick, L., Simpson-Abelson, M. R., Kelleher, R. J., Jr, Yokota, S. J., & Bankert, R. B. 2007. Characterization of Human Lung Tumor-Associated Fibroblasts and Their Ability to Modulate The Activation of Tumor-Associated T Cells. *Journal of Immunology (Baltimore, Md.: 1950)*, *178*(9), 5552–5562.
 17. Valente, M. J., Henrique, R., Costa, V. L., Jerónimo, C., Carvalho, F., Bastos, M. L., de Pinho, P. G., & Carvalho, M. 2011. A Rapid and Simple Procedure for The Establishment of Human Normal and Cancer Renal Primary Cell Cultures from Surgical Specimens. *PloS One*, *6*(5), e19337.
 18. Saforo, D., Omer, L., Smolenkov, A., Barve, A., Casson, L., Boyd, N., Clark, G., Siskind, L., & Beverly, L. 2019. Primary Lung Cancer Samples Cultured Under Microenvironment-Mimetic Conditions Enrich for Mesenchymal Stem-Like Cells that Promote Metastasis. *Scientific Reports*, *9*(1), 4177.
 19. Morgan, M. M., Johnson, B. P., Livingston, M. K., Schuler, L. A., Alarid, E. T., Sung, K. E., & Beebe, D. J. 2016. Personalized in vitro Cancer Models to Predict Therapeutic Response: Challenges and a Framework for Improvement. *Pharmacology & Therapeutics*, *165*, 79–92.
 20. Ho, M. M., Ng, A. V., Lam, S., & Hung, J. Y. 2007. Side Population in Human Lung Cancer Cell Lines and Tumors is Enriched with Stem-Like Cancer Cells. *Cancer Research*, *67*(10), 4827–4833.
 21. Järveläinen, H., Sainio, A., Koulu, M., Wight, T. N., & Penttinen, R. 2009. Extracellular Matrix Molecules: Potential Targets in Pharmacotherapy. *Pharmacological Reviews*, *61*(2), 198–223.
 22. Cree, I. A., Glaysher, S., & Harvey, A. L. 2010. Efficacy of Anti-Cancer Agents in Cell Lines Versus Human Primary Tumour Tissue. *Current Opinion in Pharmacology*, *10*(4), 375–379.
 23. Esparza-López, J., Martínez-Aguilar, J. F., & Ibarra-Sánchez, M. J. 2019. Deriving Primary Cancer Cell Cultures for Personalized Therapy. *Revista de investigacion clinica; organo del Hospital de Enfermedades de la Nutricion*, *71*(6), 369–380.

An Evaluation of the Environmental Problems of Burdur Lake Basin

Mehmet SOYLU¹, Meltem KAÇIKOÇ², Filiz DADAŞER-ÇELİK^{*3}

¹Department of Medical Services and Techniques, Cappadocia University, NEVSEHIR

²Department of Environmental Engineering, Suleyman Demirel University, ISPARTA

^{*3}Department of Environmental Engineering, Erciyes University, KAYSERI

(Alınış / Received: 14.01.2023, Kabul / Accepted: 26.02.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 02.05.2023)

Keywords

Burdur Lake,
Burdur Lake Basin,
Environmental Problems,
Climate Change

Abstract: Burdur Lake is a closed-basin lake, located in the Mediterranean region of Türkiye. In this study, the studies conducted in the Burdur Lake and Burdur Lake Basin were examined in an attempt to determine major environmental problems in the region. Research directions for solving environmental problems were also evaluated. This study examined 150 studies published between 1976 and 2022. The studies were classified into seven categories based on the research topics: Biodiversity/Ecology, Hydrology/Hydrological Change, Land Cover Change, Water Quality, Climate Change, Socio-Economic Impact, Environmental Policies/Recreation. Majority of the studies were related to Biodiversity/Ecology topic. This was followed by the Hydrology/Hydrological Change and Environmental Policies/Recreation studies. There is a consensus that the major threat toward Burdur Lake is the alteration of its flow regime. Ecological and land cover changes were also mentioned. The number of studies about Burdur Lake has increased rapidly in the last ten years. The increase in environmental problems in the Burdur Lake is most probably responsible for this trend. Climate change, which can be among the future pressure factors for Burdur Lake, has not received sufficient attention yet. We recommend that the future studies consider climate change effects on the hydrologic and ecological system.

Burdur Gölü Havzası'nın Çevresel Sorunlarının Değerlendirilmesi

Anahtar Kelimeler

Burdur Gölü,
Burdur Gölü Havzası,
Çevresel Problemler
İklim Değişikliği.

Öz: Burdur Gölü, Türkiye'nin Akdeniz Bölgesi'nde yer alan bir kapalı havza gölüdür. Bu çalışmada Burdur Gölü ve Burdur Gölü Havzası'nda yapılan çalışmalar bölgedeki başlıca çevre sorunlarını belirlemek amacıyla incelenmiştir. Çevre sorunlarının çözümüne yönelik araştırma ihtiyaçları değerlendirilmiştir. 1976 ile 2022 yılları arasında yayınlanan 150 çalışma incelenmiştir. Çalışmalar, araştırma konularına göre yedi kategoride sınıflandırılmıştır: Biyoçeşitlilik/Ekoloji, Hidroloji/Hidrolojik Değişim, Arazi Örtüsü Değişimi, Su Kalitesi, İklim Değişikliği, Sosyo-Ekonomik Etki, Çevre Politikaları/Rekreasyon. Çalışmaların çoğu Biyoçeşitlilik/Ekoloji konusuyla ilişkilidir. Bunu Hidroloji/Hidrolojik Değişim ve Çevre Politikaları/Rekreasyon çalışmaları izlemiştir. Çalışmalar Burdur Gölü'nün doğal akış rejime yapılan müdahaleleri en önemli problem olarak belirlemiştir. Ekolojik ve arazi örtüsü değişimlerinden de bahsedilmiştir. Ayrıca araştırma sayısının son on yılda hızla arttığı tespit edilmiştir. Burdur Gölü'ndeki çevre sorunlarındaki artış, büyük olasılıkla bu eğilimden sorumludur. Burdur Gölü için gelecekteki baskı faktörlerinden biri olabilecek iklim değişikliği ise literatürde henüz yeterince ilgi görmemiştir. Gelecekte yapılacak çalışmaların iklim değişikliğinin, hidrolojik ve ekolojik sistem üzerindeki etkilerini dikkate alması önerilmektedir.

*Corresponding Author, email: fdadaser@erciyes.edu.tr

1. Introduction

Lakes have important aesthetic, cultural, economical, and ecological values [1, 2]. They are critical elements of the water cycle at the basin scale. Freshwater lakes provide water supply for human activities. Both freshwater or salt-water lakes sustain terrestrial and aquatic biodiversity and provide recreation services. Lakes provide income for the local communities through fishing, ecotourism, etc.

The pressure on lakes has been increasing in recent decades due to anthropogenic impacts. Impacts, such as diversions of surface inflows, salinization, mining activities, pollution, and climate changes, are threatening lakes. Diversion of water from rivers, which are supporting lakes, caused changes in the water level of many lakes worldwide. Global warming and climate change pose additional threats, affecting both water availability and ecological processes. The changes in the water availability and water quality in lakes can cause critical problems for humanity [3-5].

There are 302 lakes and wetlands present in Türkiye's lake database [6]. The surface area of these lakes change between 8 ha to 357,269 ha. 27 of these lakes have surface areas over 2000 ha [7]. Among these lakes Burdur Lake Burdur Lake is one of the deepest and largest lakes. In this study, the studies conducted in the Burdur Lake and Burdur Lake Basin were examined in an attempt to determine major environmental problems in the region. Research directions for solving environmental problems were also evaluated.

2. Material and Methods

2.1. Study Area

Burdur Lake is situated in the Burdur Basin located between the Burdur and Isparta provinces. The lake is located between 37° 80' and 38° 20' north latitudes and 29° 39' and 30° 33' east longitudes (Figure 1). It covers a surface area of 184.52 km². Due to its natural structure, Burdur Lake's water quality is not suitable for drinking, domestic, industrial, and agricultural uses. However, it is an ecologically important area, as it provides shelter and breeding habitat to a large number of bird species, including the endangered White Headed Duck (*Oxyura leucocephala*), and has a special importance in terms of wetland plant species. Due to these features, Burdur Lake was declared a Ramsar Site, based on the Convention on Wetlands of International Importance. The lake has strong conservation status and was declared a Nature Conservation Area and Wildlife Development Area.

The water level of Burdur Lake is of great importance in terms of protecting the littoral regions of the lake. Although there is water loss by evaporation, the water level of Burdur Lake has remained in balance for many years with the water inflows coming from the surface and ground waters. However, in recent years, this balance has been altered due to the fact that the surface waters feeding Burdur Lake are kept in dams and ponds, which prevented water reaching the lake. Alterations in hydrologic characteristics has also caused changes in its ecological features.

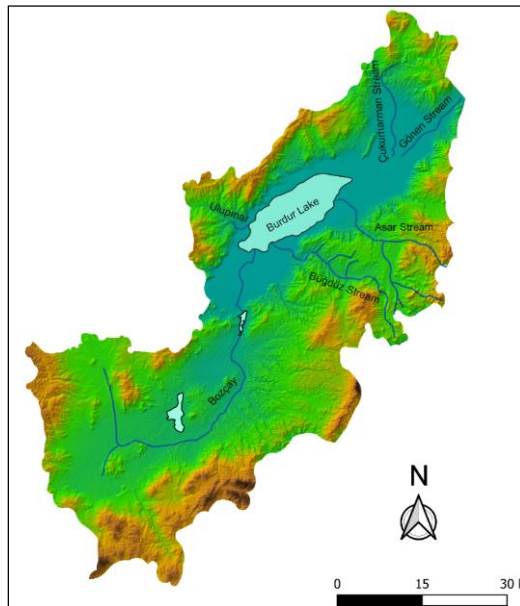


Figure 1. Burdur Lake Basin

2.2. Methodology

This study examined previous national and international research in the Burdur Lake and Burdur Lake Basin to determine major environmental problems in the region. We included 150 studies published between 1976 and 2022 in our analyses. Journal papers, conference papers, scientific reports, and masters’ and Ph.D. thesis were included. The studies were classified into seven categories based on research topics. These categories were Biodiversity/Ecology, Hydrology/Hydrological Change, Land Cover Change, Water Quality, Climate Change, Socio-Economic Impact, Environmental Policies/Recreation (Figure 2). We identified major environmental problems and proposed research directions for further research.

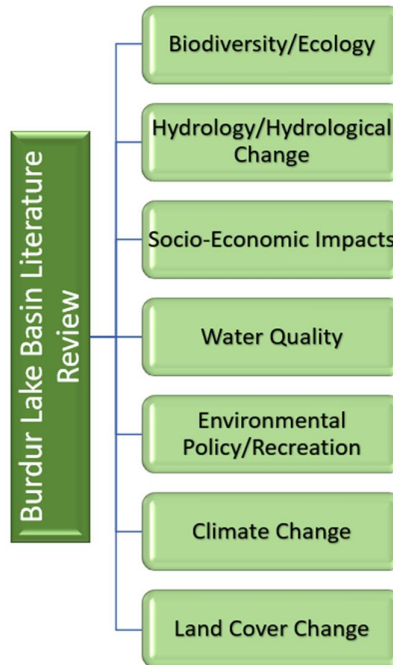


Figure 2. Review Categories

3. Results

In this study, 150 studies were examined. 50 (33%) of the studies were related to Biodiversity/Ecology topic. 32 studies (21%) were listed in the Hydrology/Hydrological Change category. The Water Quality category included 21 studies (14%) and Environmental Policy/Recreation category included 15 studies (10%). 22 studies (15%) were related to land use/cover changes. Socio-economic impacts and climate change categories had the least number of studies. Among 150 studies, 27 (18%) were masters’ or Ph.D. thesis, 123 (82%) were journal papers, conference papers, or scientific reports (Table 1).

Table 1. Characteristics of Studies Conducted in the Burdur Lake Basin

Categories	Thesis	Others	Total
Hydrology/Hydrological Change	2	30	32
Biodiversity/Ecology	15	35	50
Socio-Economic Impacts	2	4	6
Water Quality	2	19	21
Environmental Policy/Recreation	4	11	15
Climate Change	0	4	4
Land Cover Change	2	20	22
Total	27	123	150

The majority of the studies were classified within the Biodiversity/Ecology category (Figure 3). These studies covered ecological characterization of the basin (including flora-fauna studies) [8-37], basin planning and basin protection issues [38-41], and studies on the White-Headed Duck [29, 30, 42-49]. The studies also analyzed

ecological problems in the basin and produced management alternatives [50-52]. The features and structure of aquatic ecosystems were also analyzed [53-62]. The studies listed within the Biodiversity/Ecology category aimed to determine the ecological characteristics of the Burdur Lake and its basin. They addressed the ecological importance of the region and emphasized that ecological characteristics of the Burdur Lake would be damaged due to the alterations in the lake hydrologic characteristics. Possible negative impacts on migrating bird species were also discussed.

Hydrology/Hydrological Changes category hold the second most studies (Figure 3). The general subjects of the studies carried out in this category included water level changes in the Burdur Lake [63-73] and spatial and temporal changes in lake physical characteristics [74-87] and geomorphological and hydrogeological characteristics [10, 59, 74, 88-96]. In the Hydrology/Hydrological Changes category, the decrease in lake water levels and the possibility of the lake reaching to critical water levels were mentioned. It was also stated that the lake has been experiencing problems due to excessive use of water resources in the basin. Finally, the possible water level changes of Burdur Lake in the coming years and the water demands in the coming years were estimated through modelling studies.

The third mostly studied subject area is Land Cover Change (Figure 3). In this category, land use/cover changes in and around Burdur Lake was analyzed [62, 97-112]. In the category of Land Cover Change, changes in urban areas in Burdur Lake Basin and its surroundings were mentioned. The possible negative impacts (such as pollutant transport) originating from land cover changes were also mentioned.

In other study categories, there were fewer studies compared to the first three categories. In the Water Quality category, we see studies that examine the changes in the physicochemical characteristics of Burdur Lake and factors affecting these parameters [87, 113-123]. Some other studies reported results from water quality monitoring campaigns [124-128] and used modelling tools for analyzing water quality data [127, 129-132]. In the studies listed within the Water Quality category, it was stated that the water quality would be directly affected by the pollution discharges originating from agriculture and livestock activities in the basin. These studies also mentioned that further water quality deterioration could be possible due to the decreases in water levels and volumes in the Burdur Lake. Eutrophication problem was mentioned due to the increases in nitrogen and phosphorus loads.

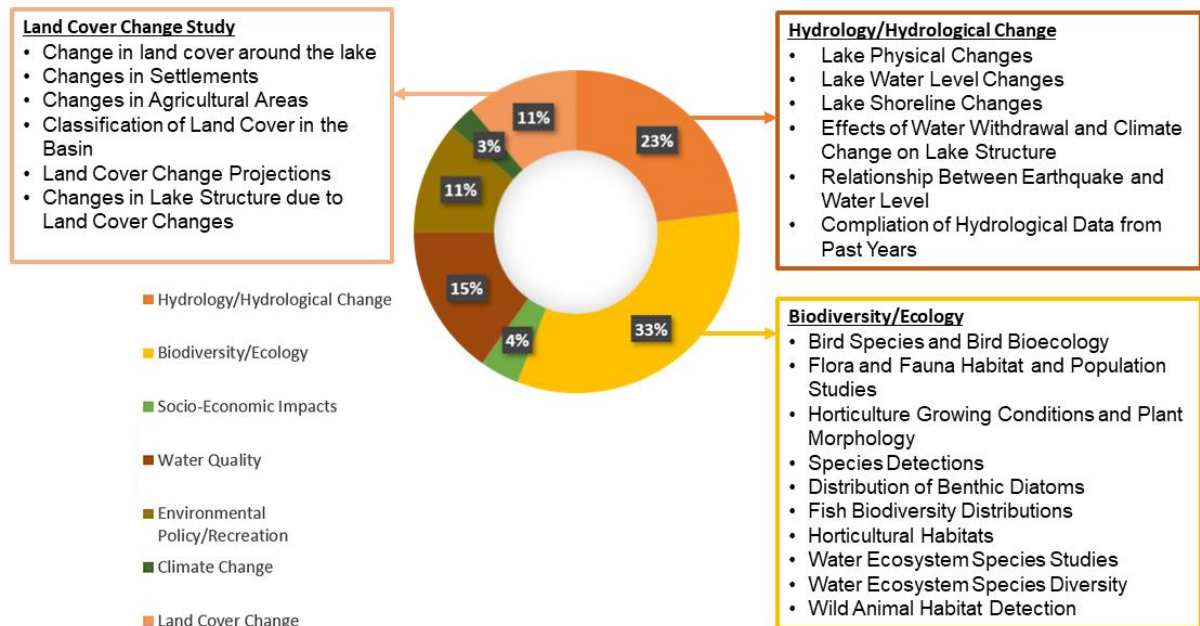


Figure 3. Percent Distribution of Studies Conducted in the Burdur Lake Basin

In the Environmental Policies and Recreation category, the management approaches for Burdur Lake and its basin [133-138] and the recreational services of Burdur Lake and the economic impacts of these services [139-146] were examined. In addition, in the Socio-Economic Impacts category, the factors affecting the social characteristics of the Burdur Basin are listed [147-153].

The studies related to Climate Change included the analysis of climate projections with temperature and precipitation regime changes [154], the examination of the effects of climate change on water resources with satellite images [155], the examination of the ecological effects of climate change on lakes [156], the effects of climate change effects on lake water quality and hydrology [157].

When the distribution of thesis studies within years is examined, a significant increase can be seen in the number of studies in the last three years. Approximately 30% of the studies were conducted in the last three years and 65% of the studies in the last ten years. The reason for this situation is due to the increase in environmental problems in the region (Table 2).

Table 2. Distribution of the Number of Studies by Years in the Burdur Lake Basin

Period	Amount
.....-2000	11
2001-2011	39
2012-2022	100
2019-2022	94
Total	150

4. Discussion and Conclusion

In this study, 150 previous studies were examined related to Burdur Lake and Burdur Lake Basin. The studies examined were grouped under seven categories: Biodiversity/Ecology, Hydrology/Hydrological Change, Environmental Policy/Recreation, Climate Change, Socio-Economic Impacts, Water Quality and Land Cover Change. Biodiversity/Ecology, Environmental Policy/Recreation and Hydrology/Hydrological Change categories hold the majority of the studies. Previous studies paid attention to the hydrologic changes going on in the basin. These changes were partly connected with agricultural development in the basin. They also emphasized the ecological outcomes of hydrologic changes. The changes in number of birds and bird species received significant attention. Land use/cover changes and their implications for water quality were also studied. The least studied categories were Climate Change and Socio-economic Impacts. The number of studies conducted in the basin has increased in recent years.

The review of the available literature showed that Burdur Lake is facing environmental problems due to alterations in its flow regime. Human activities in the basin such as agriculture create both hydrologic and water quality problems. In the future these problems can become more pronounced with climatic changes. It is, therefore, necessary to conduct studies that focus on climate change impacts in the basin and how sustainability of the lake can be provided under these impacts.

Acknowledgement

This study is supported by Erciyes University Research Fund (Project Number: FDK-2022-12202).

References

- [1] Sterner, R. W., Keeler, B., Polasky, S., Poudel, R., Rhude, K., Rogers, M. 2020. Ecosystem Services of Earth's Largest Freshwater Lakes. *Ecosystem Services*, 41(2020), 101046.
- [2] Schallenberg, M., de Winton, M. D., Verburg, P., Kelly, D. J., Hamill, K. D., Hamilton, D. P. 2013. Ecosystem Services of Lakes. *Ecosystem services in New Zealand: conditions trends*. Manaaki Whenua Press, Lincoln, 203-225.
- [3] Gleick, P. H. 2000. A Look at Twenty-First Century Water Resources Development. *Water International*, 25(1), 127-138.
- [4] Koutsoyiannis, D. 2011. Scale of Water Resources Development and Sustainability: Small is Beautiful, Large is Great. *Hydrological Sciences Journal*, 56(4), 553-575.
- [5] Silanikove, N. 1992. Effects of Water Scarcity and Hot Environment on Appetite and Digestion in Ruminants: A Review. *Livestock Production Science*, 30(3), 175-194.
- [6] OSIB. 2017. Action Plan for Lakes and Wetlands in Turkey. Ministry of Forestry and Water Works, Ankara.

- [7] Firatli, E., Dervisoglu, A., Yagmur, N., Musaoglu, N., Tanik, A. 2022. Spatio-Temporal Assessment of Natural Lakes in Turkey. *Earth Science Informatics*, 15(2), 951-964.
- [8] Altındağ, A., Yiğit, S. 2002. The Zooplankton Fauna of Lake Burdur. *Su Ürünleri Dergisi*, 19(1).
- [9] Avcı, M. 1996. Göller Yöresi Batı Kesiminde Bitki Toplulukları ve Dağılımları. *İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü Coğrafya Dergisi*, 0(4), 227-264.
- [10] Altunbas, S. 2019. Pedogeomorphology of the Burdur-Golhisar basin, SW Anatolia, Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*, 28(1), 139-149.
- [11] Çetin, A., Erdoğan, N., Genç, H. 2013. Flora of The Burdur Lake Surroundings (Türkiye). *Diversity and Conservation* 6(2), 55-76.
- [12] Çetin, A., Erdoğan, N., Genç, H. 2013. Burdur Gölü Çevresi Florası. *Biyolojik Çeşitlilik ve Koruma*, 6(2), 55-76.
- [13] Çetin, A., Erdoğan, N., Genç, H. 2012. Burdur Gölü Çevresinin Tıbbi ve Aromatik Bitkilerine Bir Bakış. *Tıbbi ve Aromatik Bitkiler Sempozyumu*, pp. 13-15.
- [14] Demirel, F. A., Mayda, S. 2014. A New Early Pleistocene Mammalian Fauna from Burdur Basin, Sw Turkey. *Russian Journal of Theriology. Русский териологический журнал*, 13(2), 55-63.
- [15] Ertuğrul, E. T., Ahmet, M., Oğurlu, İ. 2017. Mapping Habitat Suitabilities of Some Wildlife Species in Burdur Lake Basin. *Turkish Journal of Forestry*, 18(2), 149-154.
- [16] Ertuğrul, E., Mert, A., Oğurlu, İ. 2017. Burdur Gölü Havzasında Bazı Yaban Hayvanlarının Habitat Uygunluk Haritalaması. *Türkiye Ormanlık Dergisi*, 18(2), 149-154.
- [17] Güllü, İ., Küçük, F., İnal, D., Güçlü, S. S. 2016. Burdur İli Balıkları: Biyoçeşitlilik Envanteri, Popülasyon ve Habitat Durumları. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(Ek (Suppl.) 1), 232-239.
- [18] Kazancı, G., Girgin, S., Dügel, M., Gökçe, D. 1998. Türkiye İç Suları Araştırmaları Dizisi III Burdur Gölü ve Acıgölün Limnolojisi Çevre Kalitesi ve Biyolojik Çeşitliliği.
- [19] Kaya, L. G., Yücedağ, C., Duruşkan, Ö. 2015. Burdur Gölü Havzasının Çevresel Açından İrdelenmesi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(1), 6-10.
- [20] Negiz, M. G., Eser, Y., Kuzugüdenli, E., Özkan, K. 2015. Indicator Species of Essential Forest Tree Species in the Burdur District. *Journal of Environmental Biology*, 36(1), 107.
- [21] Yıldız, S., Balık, S. 2005. The Oligochaeta (Annelida) Fauna of the Inland Waters in the Lake District (Turkey). *Su Ürünleri Dergisi*, 22(1), 165-172.
- [22] Yıldırım, M. Z., Güllü, İ., Kebapçı, Ü., Küçük, F. 2007. Faunal Diversity of Lake Burdur and Its Vulnerability. *Natura Montenegrina*, 7(2), 393-400.
- [23] Altunbaş, S. 2019. Burdur-Göhlisar havzasında serpantin kayası üzerinde gelişen toprakların bitki besleme kapasiteleri. *Mediterranean Agricultural Sciences*, 32(141-146).
- [24] Aktay, L. 2011, Burdur Gölü Yırtıcı Kuşları; Yayılışı, Habitat Kullanımı ve Davranışları. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Master Thesis, p. 125, Isparta
- [25] Çetin, A. 2011, Burdur Gölü Çevresi Florası. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Master's Thesis, p. 223, Isparta
- [26] Erdoğan, F. 2016, Göller Bölgesinde Yerel Kavun Genotiplerin Toplanması ve Morfolojik Karakterizasyonu. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Master Thesis, p. 146, Konya
- [27] Ertuğrul, T. E. 2016, Burdur Gölü Havzasında Bazı Yaban Hayvanlarının Habitat Uygunluk Haritalaması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doctorate Thesis, p. 131, Isparta

- [28] Nergiz, H. 2010, Türkiye (Burdur Gölü, Van Gölü, Sultan Sazlığı) Dikkuyruk Ördek (*Oxyura Leucocephala*) Populasyonlarının Biyolojisi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doctorate Thesis, p. 125, Isparta
- [29] Tabur, M. A. 1996, Burdur Gölü Su Kuşları. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Master's Thesis, Isparta
- [30] Tabur, M. A. 2002, Göller Bölgesi (Göhlisar Gölü, Burdur Gölü, Eğirdir Gölü, Kovada Gölü, Beyşehir Gölü) Kuşlarının Biyoekolojisi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ph.D. Thesis, p. 114, Isparta
- [31] Uysal, S. 2004, Bahçe Bitkilerinin Bazı Eko-Biyolojik Özellikleri ile Burdur Gölü Havzası Arasındaki ilişkilerin Araştırılması. Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Master's Thesis, p. 106, Mersin
- [32] Eser, Y. 2014, Burdur Gölü Havzası'nın Hiyerarşik Yetiştirme Ortamı Sınıflandırması ve Haritalanması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ph.D. Thesis, p. 178, Isparta
- [33] Atalay, İ., Altunbaş, S., Siler, M. 2019. Türkiye'de Akdeniz Bölgesinin Göller Yöresinde bulunan Burdur-Göhlisar havzasının jeobiyomları. 1st Istanbul International Geography Congress, 20-22 June 2019, Istanbul.
- [34] Avcı, M. B., Melike. 2016. Reçine kelebeği *Dioryctria sylvestrella* (Ratzeburg) (Lepidoptera: Pyralidae)'nın Göller Bölgesi ormanlarında zararı, biyolojisi ve doğal düşmanları. Türkiye Entomoloji Bülteni, 6(2), 131-141.
- [35] Bilener, M. 2015, Reçine kelebeği *Dioryctria sylvestrellanın* Göller bölgesi ormanlarında zararı, biyolojisi ve doğal düşmanları. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Master's Thesis, p. 71, Isparta
- [36] Bayar, E., Türker, H., Genç, M. 2012. Göhlisar-Burdur Anıt Ağaçları: Göller Bölgesi Anıt Ağaç Varlığına Yeni İlaveler. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 14(22), 83-95.
- [37] Bingöl, B. 2017. Determination of Forest Fire Risk Areas in Burdur Province Using Geographical Information Systems. Turkish Journal Of Forest Science, 1(2), 169-182.
- [38] Özçelik, H., Çinbilgel, İ., Muca, B., Koca, A., Tavuç, İ., Bebekli, Ö. 2014. Burdur İli Karasal ve İç Su Ekosistem Çeşitliliği, Koruma ve İzleme Çalışmaları. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi, 9(2), 12-43.
- [39] Bozduman, M. M. 2019, Sulak Alanlarda Koruma Kullanma Dengesinin Sağlanması: Burdur Gölü Örneği. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Master's Thesis, p. 144, Isparta
- [40] Evcı, A. 2021, Salda Gölü (Burdur) Havzası Ekolojik Risk Değerlendirmesi Üzerine Bir Çalışma. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doctorate Thesis, p. 189, Isparta
- [41] Işıldar, H. T., Yalçın Ercoşkun, Ö. 2021. Göller Yöresinde Sürdürülebilirlik ve Dirençlilik. Journal of Management Theory Practices Research, 2(2), 89-116.
- [42] Gürsoy-Ergen, A. 2019. Hope for the White-Headed Duck, *Oxyura Leucocephala* (Aves: Anatidae) in Turkey Despite a Declining Breeding Population and Abandonment of its Traditional Wintering Area? Zoology in the Middle East, 65(2), 116-127.
- [43] Green, A. J., Fox, A., Hilton, G., Hughes, B., Yarar, M., Salathé, T. 1996. Threats to Burdur Lake Ecosystem, Turkey and its Waterbirds, Particularly the White-Headed Duck *Oxyura leucocephala*. Biological Conservation, 76(3), 241-252.
- [44] Green, A. J., Fox, A. D., Hughes, B., Hilton, G. 1999. Time-Activity Budgets and Site Selection of White-Headed Ducks *Oxyura leucocephala* at Burdur Lake, Turkey in Late Winter. Bird Study, 46(1), 62-73.
- [45] Nergiz, H., Tabur, M. A., Ayvaz, Y. 2013. Microhabitat Use and Diurnal Time-Activity Budgets of White-Headed Ducks (*Oxyura Leucocephala Scopoli, 1769*) Wintering at Burdur Lake, Turkey. Pakistan Journal of Biological Sciences: PjBS, 16(15), 739-742.
- [46] Yavuz, N., Yavuz, K. E., Karataş, A. 2021. Türkiye'nin Küresel Ölçekte Soyu Tehlike Altındaki Kuş Türleri. Doğanın Sesi, 7(1), 19-39.

- [47] Uzun, A., Tabur, M. A., Ayvaz, Y. 2001. Gölhisar Gölü (Burdur) Kuşlarının Biyokolojisi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5(1), 191-204.
- [48] Bilener, M. 2015, Reçine Kelebeği *Dioryctria sylvestrella*'nın Goller Bölgesi Ormanlarında Zararı, Biyolojisi ve Doğal Düşmanları. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Master's Thesis, p. 71, Isparta
- [49] Özkoç, R. 2012, Burdur Gölü Flamingo (*Phoenicopterus roseus*) Populasyon Biyolojisi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Master's Thesis, p. 67, Isparta
- [50] Tabur, M., Ayvaz, Y. 2005. Burdur Gölü Su Kuşlarının Biyokolojisi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 13(1), 26-145.
- [51] Mutlu, A., Çağlar, Y. 2004. Goller Bölgesi'nde Ekolojik Sorunlar. Çorum.
- [52] Kızıroğlu, İ., Turan, L., Erdoğan, A. 1995. Burdur Gölü Havzasının Entegre Koruma ve Kullanım Planlaması Üzerine Bir Araştırma. Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi, 11(11), 37-48.
- [53] Yıldırım, M. Z., Karasahin, B., Kalyoncu, H. 2001. Burdur ve Civarı Tatlısularında Yayılış Gösteren Gastropoda (Salyangozlar) Türleri. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5(3), 237-256.
- [54] Oğuz, A., Kaleli, M. A., Albay, R. A., Demo, L. K., Dorak, Z., Gaygusuz, Ö., Aydın, F., Çetin, T., Karaaslan, Y., Albay, M. 2020. Composition and Distribution of Benthic Diatoms in Different Habitats of Burdur River Basin. Turkish Journal of Water Science Management, 4(1), 31-57.
- [55] Güçlü, S. S., Turna, İ. İ., Güçlü, Z., Gulle, İ. 2007. Population Structure and Growth of *Aphanius anatoliae* Sureyanus Neu, 1937 (Osteichthyes: Cyprinodontidae), Endemic to Burdur Lake, Turkey. Zoology in the Middle East, 41(1), 63-69.
- [56] Gulle, İ., Turna, İ. İ., Güçlü, S. S., Gulle, P., Güçlü, Z. 2010. Zooplankton Seasonal Abundance and Vertical Distribution of Highly Alkaline Lake Burdur, Turkey. Turkish Journal of Fisheries Aquatic Sciences, 10(2), 245-254.
- [57] Kocasari, F. S., Gulle, İ., Kocasari, S., Pekkaya, S., Mor, F. 2015. The Occurrence and Levels of Cyanotoxin Nodularin From *Nodularia spumigena* in the Alkaline and Salty Lake Burdur, Turkey. Journal of Limnology, 74(3), 530-536.
- [58] Tunoğlu, C., Bayhan, E. 1996. Micropaleontological Investigation and Environmental Interpretation (Ostracoda) of The Pliocene Sequence of Burdur Basin. Bulletin of the Mineral Research Exploration, 118(118), 7-8.
- [59] Atalay, İ., Altunbaş, S., Siler, M. 2019. The Effects of the Geomorphology and Geologic Parent Materials on the Natural Environment Assessment In the Burdur-Gölhisar Basin, Sw Anatolia. 1st Istanbul International Geography Congress İstanbul, pp. 833-855.
- [60] Atalay, İ., Altunbaş, S., Siler, M. 2019. Geobiomes of Burdur-Gölhisar Basin in the Lakes Subregion of the Mediterranean Region in Turkey. 1st Istanbul International Geography Congress pp. 812-832.
- [61] Yavuz, O. 2017, Burdur Gölü'nden İzole Edilen Mikroorganizmaların Ağır Metal ve Antibiyotik Dirençliliğinin Kültürel ve Moleküler Yöntemlerle Belirlenmesi. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Master's Thesis, p. 84, Isparta
- [62] Çelikkol, H. 2022, Burdur Gölü'nün Çekilen Kıyı Alanlarında Oluşan Geçici Sulak Alan Zooplankton Komünitesinin İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Master's Thesis, p. 69, Isparta
- [63] Ataoğlu, M. 2010. Burdur Gölü'nde Seviye Değişimleri. Coğrafi Bilimler Dergisi, 8(1), 77-92.
- [64] Kahraman, N. 2013. Water Receding in Burdur Lake and Solution Proposals/Burdur Gölü'nde Su Çekilmesi ve Çözüm Önerileri. 3rd International Geography Symposium - GEOMED 2013, Antalya, pp. 111-122.
- [65] Şener, E., Morova, N. 2011. Determination of Water Level Changing of Burdur Lake With Fuzzy Logic and Linear Regression Analysis. Journal of Natural Applied Sciences, 15(1).

- [66] Göncü, S., Albek, E. A., Albek, M. 2017. Burdur, Eğirdir, Sapanca ve Tuz Gölleri Su Seviyelerinin Nonparametrik İstatistik Yöntemler İle Eğilim Analizi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17(2), 555-570.
- [67] Gözükara, G., Altunbaş, S., Sari, M. 2019. Burdur Gölü'ndeki Seviye Değişimi Sonucunda Ortaya Çıkan Lakustrin Materyalin Zamansal ve Mekansal Değişimi. Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi, 34(3), 386-396.
- [68] Erdoğan, M., Karagüzel, R. 2016. A New Hydrogeologically Based Approach to Determining Protected Areas in Drinking Water Supply Reservoirs: a Case Study in the Ağlasun Sub-Basin (Burdur, Turkey). Environmental Earth Sciences, 75(2), 1-14.
- [69] Şener, E., Morova, N. 2014. Bulanık Mantık ve Doğrusal Regresyon Analizleri ile Burdur Gölü Su Seviyesi Değişimlerinin Modellenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 15(1), 60-66.
- [70] Taş, M. A., Akpınar, E. 2021. Burdur Havzası'ndaki Göllerde Yaşanan Seviye Değişikliklerinin Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Uzaktan Algılama (UA) ile Tespiti. Eastern Geographical Review, 26(46), 37-54.
- [71] Abujayyab, S. K., Almotairi, K. H., Alswaiti, M., Amr, S. S. A., Alkarkhi, A. F., Taşoğlu, E., Hussein, A. M. 2021. Effects of Meteorological Parameters on Surface Water Loss in Burdur Lake, Turkey over 34 Years Landsat Google Earth Engine Time-Series. Land, 10(12), 1301.
- [72] İbiş, A. 2021. Burdur Gölü Su Seviyesi Değişiminin İstatistiksel Analizi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Master's Thesis, p. 104, Ankara
- [73] Ataoğlu, M. 2010. Burdur Gölü Havzası için Yeni Bir Su Yönetim Modeli Önerisi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ph.D. Thesis, p. 117, Ankara
- [74] Kazancı, N., Roberts, N. 2019. The Lake Basins of South-West Anatolia. Landscapes and Landforms of Turkey, Springer, pp. 325-337.
- [75] Şener, E., Şener, Ş. 2021. SPI ve CZI Kuraklık İndislerinin CBS Tabanlı Zamansal ve Konumsal Karşılaştırması: Burdur Gölü Havzası Örneği. Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 7(1), 41-58.
- [76] Keskin, M. E., Taylan, E. D., Aslanbaş, T. 2015. Eğirdir ve Burdur Gölleri Su Seviyelerinde Olası Azalma Eğilimleri. 4. Su Yapıları Sempozyumu. Antalya.
- [77] Tudryn, A., Tucholka, P., Özgür, N., Gibert, E., Elitok, O., Kamaci, Z., Massault, M., Poisson, A., Platevoet, B. 2013. A 2300-Year Record of Environmental Change from SW Anatolia, Lake Burdur, Turkey. Journal of paleolimnology, 49(4), 647-662.
- [78] Sarp, G., Ozcelik, M. 2017. Water Body Extraction and Change Detection Using Time Series: A Case Study of Lake Burdur, Turkey. Journal of Taibah University for Science, 11(3), 381-391.
- [79] Özüpekçe, S. 2019. Temporal Change of Burdur Province Lakes Due to the Effect of Anthropogenic Pressure in The Last 43 Years (1975-2018). International Review of Basic Applied Sciences, 7(11), 85-92.
- [80] Çolak, M. A., Öztaş, B., Özgencil, İ. K., Soyluer, M., Korkmaz, M., Ramírez-García, A., Metin, M., Yılmaz, G., Ertuğrul, S., Tavşanoğlu, Ü. N. 2022. Increased Water Abstraction and Climate Change Have Substantial Effect on Morphometry, Salinity, and Biotic Communities in Lakes: Examples from the Semi-Arid Burdur Basin (Turkey). Water, 14(8), 1241.
- [81] Elçi, A. 2019. Analysis of Satellite Imagery to Determine Spatial-Temporal Changes of Surface Water Bodies: A Case Study of Burdur River Basin, Turkey. 38th IAHR World Congress, Panama.
- [82] Albarqouni, M. M., Yagmur, N., Bektas Balcik, F., Sekertekin, A. İ. 2022. Assessment of Spatio-Temporal Changes in Water Surface Extents and Lake Surface Temperatures Using Google Earth Engine for Lakes Region, Türkiye. ISPRS International Journal of Geo-Information, 11(7), 407.
- [83] Firatli, E., Dervisoglu, A., Yagmur, N., Musaoglu, N., Tanik, A. 2022. Spatio-Temporal Assessment of Natural Lakes in Turkey. Earth Science Informatics, 1-14.

- [84] Dervişoğlu, A., Yağmur, N., Firatlı, E., Musaoğlu, N., Tanik, A. 2022. Spatio-Temporal Assessment of the Shrinking Lake Burdur, Turkey. *International Journal of Environment Geoinformatics*, 9(2), 169-176.
- [85] Mutlu, S. 2021, Göller Bölgesi Su Kaynaklarının Tarımsal Açından Yeterliliğinin Su Bütçesi Yöntemiyle İrdelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ph.D. Thesis, p. 146, Isparta
- [86] Aslanbaş, T. 2012, Göller Bölgesi Su Potansiyelinin Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Master's Thesis, p. 154, Isparta
- [87] Price, S. P., Scott, B. 1991. Pliocene Burdur Basin, Sw Turkey: Tectonics, Seismicity and Sedimentation. *Journal of the Geological Society*, 148(2), 345-354.
- [88] Davraz, A., Karaguzel, R., Soyaslan, I. 2003. The Importance of Hydrogeological and Hydrological Investigations in the Residential Area: A Case Study in Burdur, Turkey. *Environmental Geology*, 44(7), 852-861.
- [89] Sahin, S., Beyhan, M., Keskin, M. E. 2004. Investigation of Relationship between the Burdur Earthquake and the Level of Lake Burdur. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2004*, pp. 1174-1180.
- [90] Atayeter, Y. 2013. The Common Evaluation About Burdur Lake Reservoir's Geological and Geomorphological. in: Drujinin, A., Kostova, Z., Sharuho, I., Atasoy, E. (Eds.). *The Science and Education at The Beginning Of The 21st Century In Turkey*, p. 82.
- [91] Dolmaz, M. N. 2007. An Aspect of The Subsurface Structure of The Burdur-Isparta Area, Sw Anatolia, Based on Gravity and Aeromagnetic Data, and Some Tectonic Implications. *Earth, Planets, Space*, 59(1), 5-12.
- [92] Alcicek, M. C., Mayda, S., Titov, V. V. 2013. Lower Pleistocene Stratigraphy of the Burdur Basin of Sw Anatolia. *Comptes Rendus Palevol*, 12(1), 1-11.
- [93] Kazancı, N., Erol, O. 1987. Sedimentary Characteristics of a Pleistocene Fan-Delta Complex from Burdur Basin, Turkey. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 31(3), 261-275.
- [94] Küçük, C., Sarp, G. 2021. Evaluation of Formation Mechanism of Lakes In Terms of Morphometric Aspect; Lakes Region and Their Vicinity, Sw of Turkey. *Episodes Journal of International Geoscience*, 44(3), 285-297.
- [95] Yarıcı, M. A., Yağbasan, Ö. 2018. Burdur Gölleri Havzası'nın Morfolojik Özelliklerinin Belirlenmesinde Coğrafi Bilgi Sistemlerinin Kullanımı. *TÜCAUM 30. Yıl Uluslararası Coğrafya Sempozyumu*, Ankara.
- [96] Erbaş, F. 2013, Senirce Köyü (Isparta) ile Burdur Gölü Arasındaki Pliyo-Kuvaterner Göl Çökellerindeki Fosil Bulguların Biyofabrik Dokuları. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Master Thesis, p. 95, Isparta
- [97] Kaya, Ö. A., Kaplan, G. 2021. Uzaktan Algılama Yöntemleri ile Burdur Gölü'ndeki Alansal Değişiminin Belirlenmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 7(1), 1-12.
- [98] Girgin, S., Kazancı, N., Dügel, M. 2004. On The Limnology of Deep and Saline Lake Burdur in Turkey. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 32(3), 189-200.
- [99] Yıldırım, Ü., Uysal, M. 2011. Changes in the Coastline of the Burdur Lake Between 1975 and 2010. *International symposium on environmental protection and planning: Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS) Applications (ISEPP)*, p. 29.
- [100] Temiz, F., Bozdağ, A., Durduran, S. S., Gumus, M. G. 2017. Monitoring Coastline Change Using Remote Sensing and Gis Technology: A Case Study of Burdur Lake, Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*, 26(12), 7235-7242.
- [101] Hepdeniz, K. 2020. Determination of Burdur Lake's Areal Change in Upcoming Years Using Geographic Information Systems and the Artificial Neural Network Method. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(21), 1-8.
- [102] Sabuncu, A. 2020. Burdur Gölü Kıyı Şeridindeki Değişiminin Uzaktan Algılama ile Haritalanması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(4), 623-633.

- [103] Şener, E. 2016. Burdur Gölü Yüzey Suyu Sıcaklığı Mevsimsel Değişiminin Landsat 8 Uydu Görüntüleri Kullanılarak Belirlenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 4(2), 67-73.
- [104] Çoşlu, M., Türkkan, H. R., Sönmez, N. K. 2018. Görüntü Füzyonu ve Sınıflandırma Teknikleri Kullanarak Su Yüzeyindeki Alansal Değişimin Belirlenmesi. VII. Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu, Eskişehir.
- [105] Kazancı, N. 2009. Türkiye Göllerinin Son Yüzyılda Uğradığı Fiziksel Değişmeler. 62. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Ankara, pp. 292-293.
- [106] Sabuncu, A. 2020. Monitoring Shoreline Change of Acıgöl and Burdur Lakes in Turkey Over 44 Years Using Remote Sensing and GIS Approaches. *Fresenius Environmental Bulletin*, 29(9), 7877-7890.
- [107] Kılıç, E. 2022, Burdur Havzasında Kentsel ve Kırsal Altyapıların Uydu Görüntüleri Kullanılarak Analizi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Master Thesis, p. 74, Isparta
- [108] Yigitbaşıoğlu, H., Uğur, A. 2010. Burdur Gölü Havzasında Arazi Kullanım Özelliklerinden Kaynaklanan Çevre Sorunları. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 2(2), 129-143.
- [109] Ceylan, S. 2001. Burdur Gölü Kıyılarında Kışla Yerleşmeleri. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 7(6), 7-26.
- [110] Aşık, Y., Kaçmaz, G. 2021. Kentsel Peyzaj Değişiminin Zamansal ve Mekansal Analizi: Burdur Kenti Örneği. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 23(2), 422-432.
- [111] Benliay, A. 2017. Evaluation of Landscape Change Using Remote Sensing: A Case Study of Burdur Lake Basin. *European Journal of Multidisciplinary Studies*, 2(6), 31-36.
- [112] Şener, E., Şener, Ş. 2020. Landfill Site Selection Using Integrated Fuzzy Logic and Analytic Hierarchy Process (AHP) in Lake Basins. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(21), 1-16.
- [113] Görçelloğlu, E. 1975. Anadolu Goller Bölgesinde Özellikle Burdur Gölü Çevresindeki Sedimentasyonun Yaygınlığı ve Önemi. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 26(1).
- [114] Güçlü, Z. 2008. Burdur Gölü'ndeki Sıcaklık, Çözünmüş Oksijen, pH ve Elektriksel İletkenlik Değerlerinin Dikey Yönde Değişimi. *Ege Journal of Fisheries Aquatic Sciences*, 25(4), 283-287.
- [115] Arslan, Y., Trak, D., Bulgök, U., Bodur, S., Kendüzler, E. 2016. Burdur Göl Suyu ve Çamurunda Metal Tayini. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(2), 144-156.
- [116] Ayaz, S., Erdoğan, N. 2021. Bozçay Havzası Su Kalitesi Özelliklerinin Belirlenmesi ve Çevresel Baskılar Açısından Değerlendirilmesi. *Journal of Natural Applied Sciences*, 25(2), 441-451.
- [117] Semiz, G. D., Aksit, C., Aksit, C. 2013. Water Quality, Surface Area, Evaporation and Precipitation of Lake Burdur. *Journal of Food Agriculture Environment*, 11(1), 751-753.
- [118] Gozukara, G., Zhang, Y., Hartemink, A. E., Altunbas, S., Sari, M. 2021. Soil Chronosequence and Biosequence on Old Lake Sediments of The Burdur Lake in Turkey. *Pedosphere*, 31(6), 882-891.
- [119] Gedik, F., Karadenizli, L. 2021. Oligocene Larger Benthic Foraminifera and Sedimentation of the Burdur Basin, SW Anatolia, Turkey. *Geodiversitas*, 43(13), 377-389.
- [120] Dişli, E. 2015. Hydrology and Water Chemistry of Lake Burdur, South-West Anatolia, Turkey. *International Journal of Ecosystems Ecology Science*, 5(4), 525-536.
- [121] Helvacı, C., Mordogan, H., Çolak, M., Gündogan, I. 2004. Presence and Distribution of Lithium in Borate Deposits and Some Recent Lake Waters of West-Central Turkey. *International Geology Review*, 46(2), 177-190.
- [122] Oksum, E., Dolmaz, M. N., Pham, L. T. 2019. Inverting Gravity Anomalies Over the Burdur Sedimentary Basin, SW Turkey. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 54(4), 445-460.
- [123] Yıldız, H. F. 2016, Burdur Gölü Kuvaterner Tortularının Paleontolojisi ve Gastropoda-Bivalvia Faunası ile Paleoeolojik. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Master Thesis, p. 90, Çanakkale

- [124] Beyhan, M., Şahin, Ş., Keskın, M., Harman, B. 2009. Burdur Gölü Uzun Periyotlu Seviye Degisiminin Su Kalitesi ve Ağır Metaller Üzerindeki Etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(2), 173-179.
- [125] Baydoğan, E., Sarp, G. 2016. 1987-2010 Yılları Arasında Burdur Gölü Yüzey Sıcaklık Değişiminin Mekânsal Analizi. Dünya CBS Günü Isparta.
- [126] Şener, Ş., Şener, E., Davraz, A., Varol, S. 2020. Hydrogeological and Hydrochemical Investigation in the Burdur Saline Lake Basin, Southwest Turkey. *Geochemistry*, 80(4), 125592.
- [127] Varol, S., Davraz, A. 2015. Evaluation of the Groundwater Quality with WQI (Water Quality Index) and Multivariate Analysis: A Case Study of the Tefenni Plain (Burdur/Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 73(4), 1725-1744.
- [128] Oruçluoğlu, K. 2018, Göller Bölgesi Göllerinde Ağır Metal Kirliliğinin Değerlendirilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Master's Thesis, p. 140, Isparta
- [129] Aslan, N., Koc-San, D. 2021. Investigation of the Changes of Lake Surface Temperatures and Areas: Case Study of Burdur and Egirdir Lakes, Turkey. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing Spatial Information Sciences*.
- [130] Salgut, S., Tuygun, G. T., Elçi, A. 2022. Long-Term Spatial-Temporal Monitoring of Eutrophication in Lake Burdur Using Remote Sensing Data. 4th Regional Conference on Diffuse Pollution & Eutrophication, İstanbul.
- [131] Şener, E. 2022. Appraisal of Groundwater Pollution Risk by Combining the Fuzzy Ahp and Drastic Method in the Burdur Saline Lake Basin, SW Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-25.
- [132] Biçer, C. A. 2011, Göl Alt Havzaları Bazında Yayılı Kaynaklardan Oluşan N ve P Yükünün Tahmini: Burdur Havzası Örneği. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Master's Thesis, p. 123, İstanbul
- [133] Özçelik, H. 2018. Burdur Gölü Sulak Alanı Üzerine Tehditler ve Yönetim Planı Üzerine Öneriler. *ISNOS-MED 2018*, Isparta, pp. 294-323.
- [134] Selek, Z., Arslan, C. 2019. Yarı Kurak Bölgelerde Entegre Su Kaynakları Yönetimi: Burdur Gölü Havzası Örneği. 1. Ulusal Mühendislik ve Teknoloji Kongresi, Karaman, pp. 68-75.
- [135] Aksoy, T., Sarı, S., Çabuk, A. 2019. Sulak Alanların Yönetimi Kapsamında Su İndeksinin Uzaktan Algılama ile Tespiti, Göller Yöresi. *GSI Journals Serie B: Advancements in Business Economics*, 2(1), 35-47.
- [136] Evered, K. 2012. Political Ecologies of Turkey's Wetlands and Lake Burdur: The Case of Demirel and The Duck. *The Arab World Geographer*, 15(1), 45-71.
- [137] Arslan, C., Selek, Z. 2019. Entegre su kaynakları yönetiminde WEAP modelinin kullanılması: Burdur gölü havzası örneği. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(1), 54-64.
- [138] Adaman, F., Hakyemez, S., Özkaynak, B. 2009. The Political Ecology of a Ramsar Site Conservation Failure: The Case of Burdur Lake, Turkey. *Environment Planning C: Government Policy*, 27(5), 783-800.
- [139] Yildirim, H., Aşikkutlu, H. S., Kaya, L. G. 2020. Arazi Sanatı Sanal Uygulaması ile Farkındalık Yaratma: Burdur Gölü Örneği. *Journal of the Institute of Science Technology*, 10(3), 2037-2046.
- [140] Kayıkçı, M. 2015. Çevre Hakkının Öznesi Olarak Yerel Basın: Burdur Örneği. *Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 15(2), 175-188.
- [141] Tulan, H., Yalçın Ercoşkun, Ö. 2021. Göller Yöresinde Sürdürülebilirlik ve Dirençlilik. *Journal of Management Theory Practices Research*, 2(2), 89-116.
- [142] Aytülkasapoğlu, M., Ecevit, M. C. 2002. Attitudes and Behavior Toward the Environment: The Case of Lake Burdur in Turkey. *Environment Behavior*, 34(3), 363-377.
- [143] Akay, B. 2020. Examining the Rural Tourism Experiences of Tourists in Emerging Rural Tourism Destination: Burdur Province, Turkey. *Geo Journal of Tourism Geosites*, 29(2), 534-544.

- [144] Temurçin, K., Tozkoparan, U. 2021. A Study on the Potential of Cultural Tourism: The Case of Burdur Province. in: V. Krystev, S.Ç.U., E. Efe, E. Kaplıhan (Ed.) *Tourism Studies and Social Sciences*, pp. 353-375.
- [145] Ongun, U., Gövdere, B., Durgun Kaygısız, A. 2015. Burdur İlinin Kırsal Turizm Potansiyelinin Değerlendirilmesi: Sorunları ve Çözüm Önerileri-Rural Tourism Potential Evaluation Of Burdur Province: Problems and Solution Proposals. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 7(12), 99-116.
- [146] Arslan, E. S. 2019. Burdur'da Doğa Turizmi İle İlişkili Alternatif Rotaların Belirlenmesi. *International Journal of Geography Education*, 40), 332-346.
- [147] Demirkaya, H., Tomal, N. 2008. Öğretmen adaylarının Burdur Gölü algılamaları: fenomenografik bir araştırma. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 25), 1-11.
- [148] Vanhaverbeke, H. 2005. Territoriality and Social Change in Prehistoric Communities. a Case-Study from the Burdur Plain (Anatolian Lake District). *Aegean Archaeology*, 7(13-37).
- [149] Selçuk, H. 2019, Göller Bölgesinde Bulunan Sulak Alanların Tahribi ve Çevre Eğitimi Açısından Önemi. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Master's Thesis, p. 78, Isparta
- [150] Kaplan, A., Örucü, Ö. K. 2019. Burdur Gölü ve Çevresinin Peyzaj Değerleri Açısından Turizm Potansiyelinin Belirlenmesi. *Journal of Architectural Sciences Applications*, 4(2), 105-121.
- [151] Kirbaş, İ., Çifci, A. 2019. Feasibility Study of a Solar Power Plant Installation: a Case Study of Lake Burdur, Turkey. *El-Cezeri*, 6(3), 830-835.
- [152] Çatal, Ö. 2011, Avrupa Birliği Fon Kaynaklarının Kullanımında Etkinlik Sorunu: Göller Bölgesinde Bir Araştırma. Süleyman Demirel Üniversitesi, Sosyal Bilimleri Enstitüsü, Master's Thesis, p. 115, Isparta
- [153] Doğançili, O. S. 2017, Alternatif Turizm Bağlamında Göller Bölgesi Eko Turizm Değişim Planının Değerlendirilmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ph.D. Thesis, p. 138, Ankara
- [154] Cengil, B., Ayan, H. Y. 2022. Burdur Havzasında Sıcaklık ve Yağış Değişimleri ile İklim Projeksiyonları. 5 th International Symposium on Innovative Approaches in Smart Technologies, Turkey, pp. 35-37.
- [155] Doğrul, G., Alkan, M. 2022. İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarına Etkisinin Çok Zamanlı Uydu Görüntüleri ile İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 25(3), 1349-1358.
- [156] Kantarcı, M. 2008. Isınma-Kuraklaşma Sürecinin Göller Bölgesindeki Durumu ve Etkileri Üzerine Ekolojik Bir Değerlendirme. *Turkish Journal of Forestry*, 9(2), 1-34.
- [157] Davraz, A., Sener, E., Sener, S. 2019. Evaluation of Climate and Human Effects on The Hydrology and Water Quality of Burdur Lake, Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, 158(103569).

Yeşil Üretim için Çevresel Etki Temelli Termoplastik Malzeme Seçimi: Karşılaştırmalı Bir Hibrit ÇKKV Yaklaşımı

Muhammed Ordu^{*1}, Oğuzhan Der²

^{*1} Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği, OSMANİYE

²Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Gemi Makineleri İşletme Mühendisliği, BALIKESİR

(Alınış / Received: 19.04.2023, Kabul / Accepted: 30.04.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 02.05.2023)

Anahtar Kelimeler

Termoplastik,
Malzeme Seçimi,
Yeşil Üretim,
Çevresel Etki,
Sürdürülebilirlik,
Çok Kriterli Karar Verme

Öz: Yeşil üretim için çevreci termoplastik malzeme seçimi imalat sektörü için çeşitli cihazların tasarlanmasında ve üretilmesinde hayati bir rol oynar. Kabul edilebilir bir polimerik malzeme seçme kararı çeşitli değerlendirme kriterleri gerektirir çünkü günümüzde her biri kendi özelliklerine, uygulamalarına, faydalarına ve dezavantajlarına sahip çok sayıda alternatif malzeme mevcuttur. Bu çalışmada, yeşil üretim için çevresel etki temelli uygun termoplastik malzemelerin seçimi için karşılaştırmalı bir hibrit çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımı önerilmektedir. Karar modeli üç ana başlık altında dokuz değerlendirme kriteri ve altı alternatif malzemeden oluşmaktadır. Bu amaçla, malzeme seçim problemlerini çözmek için üç farklı hibrit ÇKKV yöntemi uygulanmıştır (AHP-CoCoSo, AHP-COPRAS ve AHP-WASPAS). Elde edilen sonuçlara göre PP, PVC ve de ABS umut verici özellikler göstermiştir. Ayrıca Spearman'ın sıralama korelasyon analizi yapılmış ve kullanılan hibrit yöntemler birbirleriyle tutarlı sıralamalar üretmiştir. Sonuç olarak, PP'nin yeşil üretim için çevresel etki temelli en uygun termoplastik olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, PVC ve ABS'nin de PP'den sonra önerilebilecek en iyi alternatifler arasında yer aldığı sonucuna varılmıştır. Çalışma, malzeme seçeneklerini sıralamak ve seçim prosedürünü geliştirmek için ÇKKV tekniklerinin kullanımını desteklemektedir. Araştırma, polimerik malzemelerin yeşil üretim süreçleri için seçim mekanizmasına dahil olan endüstriyel yöneticilere ve akademisyenlere büyük ölçüde yardımcı olacaktır.

Environmental Impact-Based Thermoplastic Material Selection for Green Manufacturing: A Comparative Hybrid MCDM Approach

Keywords

Thermoplastic,
Material Selection,
Green Manufacturing,
Environmental Impact,
Sustainability,
Multi Criteria Decision
Making

Abstract: The choice of environmentally friendly thermoplastic materials for green manufacturing plays a vital role in the design and manufacture of various devices for the manufacturing sector. The decision to select an acceptable polymeric material requires a variety of evaluation criteria because there are many alternative materials available today, each with its own characteristics, applications, benefits and drawbacks. In this study, a comparative hybrid multi-criteria decision making (MCDM) approach is proposed for the selection of suitable thermoplastic materials for green manufacturing based on environmental impact. The decision model consists of six alternative materials and nine evaluation criteria under three main categories. For this purpose, three different hybrid MCDM methods are applied to solve material selection problems (i.e., AHP-CoCoSo, AHP-COPRAS and AHP-WASPAS). According to the results obtained, PP, PVC and ABS showed the promising properties. In addition, Spearman's rank correlation analysis is performed, and the hybrid methods used produce consistent rankings with each other. As a result, it is concluded that PP is the most suitable thermoplastic for green manufacturing based on environmental impact. In addition, it is concluded that PVC and ABS are among the best alternatives to be recommended after PP. The study supports the use of

MCDM techniques to rank material options and improve the selection procedure. The research will greatly assist industrial managers and academics involved in the selection mechanism for green manufacturing processes of polymeric materials.

*İlgili Yazar, email: muhammedordu@osmaniye.edu.tr

1. Giriş

Yeşil üretim ve sürdürülebilirlik, çevre üzerindeki olumsuz etkileri minimize etmeye ve doğal kaynakları korumaya odaklanan ve birbirleriyle yakından ilişkili kavramlardır. Yeşil üretim, çevreye olumsuz etkisi en az olan ürünler üretebilmek amacıyla sürdürülebilir malzemelerin, enerji-etkin teknolojik ürün ve ekipmanların ve aynı zamanda daha az atık üretimini sağlayabilen politikaların kullanılmasını içermektedir. Bu yaklaşım, bir ürünün bütün yaşam döngüsünün (yani üretilmesinden bertaraf edilmesine/geri dönüştürülmesine kadar) dikkate alınmasını gerektirmektedir. Sürdürülebilirlik ise sosyal, ekonomik ve çevresel özellikleri kapsayan daha geniş bir kavramı ifade ederken gelecek nesillerin ihtiyaçlarını rahatlıkla karşılarken bugünün ihtiyaçlarını da karşılayabilmek anlamına gelmektedir. Bu da ekonomik büyüme, sosyal gelişim ve çevrenin korunması arasında bir dengeyi zorunlu kılmaktadır. Hem yeşil üretim hem de sürdürülebilirlik, kaynakların sorumlu ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını sağlamada destek sağladıkları için çok büyük bir önem arz etmektedir. İşletmeler ve toplumlar çevreye olan negatif etkilerini azaltmada, doğal kaynakları korumada ve herkes için daha sürdürülebilir bir gelecek inşa etmede yardımcı olabilmeleri için bu uygulamaları benimsemelilerdir [1, 2].

Yeşil üretimin birtakım faydaları (Çevresel fayda, maliyet tasarrufu, geliştirilmiş saygınlık, mevzuata uygunluk ve yenilikçilik gibi) bulunmaktadır. Örneğin, yeşil üretim doğal kaynakların etkin bir şekilde kullanımını, enerji tüketiminde ve atık üretiminde daha çevre dostu olmayı amaçlayarak, kirliliğin ve sera gazı emisyonlarının azalmasını sağlayabilmektedir. Bu yaklaşım iklim değişikliğinin etkilerini daha az hissetmede ve çevreyi korumada yardımcı olarak *Çevresel Fayda* sunmaktadır. Diğer yandan, doğal kaynakları daha az kullanarak ve üretim sürecini optimize ederek enerji tüketimi, hammadde elde edilmesi ve atık bertarafı ile ilgili maliyetleri azaltmaya yardımcı olup *Maliyet Tasarrufu* sağlamaktadır. Ayrıca, yeşil üretim uygulamaları, işletmelerin sürdürülebilirlik ve çevresel sorumluluk konusundaki kararlı duruşunu da göstermektedir. Bu durum, işletmelerin saygınlığını ve müşteri sadakatini artırabilir ve çevreye duyarlı yeni müşterilerin ilgilerini çekerek *Geliştirilmiş Saygınlık* kazandırmaktadır. Bununla birlikte, birçok ülke sürdürülebilir üretim uygulamalarının artmasını teşvik etmek için yasal düzenlemeler ve politikalar geliştirmiştir. Yeşil üretimi benimseyen işletmelerin bu düzenlemelere uyarak yasalara aykırı hareket etmeyip ceza almamaları ile *Mevzuata Uygun* bir işletme olabilmek fırsatını yakalayabilmektedirler. Yeşil üretimin bir diğer faydası ise, işletmelerin üretim süreçlerini optimize etmek ve çevreye olan olumsuz etkilerini minimize etmek için yeni ve yenilikçi yollar bulmaya teşvik etmektedir. Bu, yeni teknolojilerin ve süreçlerin geliştirilmesine yol açarak işletmelerin *Yenilikçi* yönlerini keşfetmelerini sağlamaktadır [3].

Yeni ürünler tasarlanırken ve geliştirilirken uygun bir malzemenin seçilmesi zor bir karar verme problemi haline gelebilmektedir. Bunun nedeni ise alternatiflerinin sıralanmasında veya en uygun alternatifin belirlenmesinde kullanılan kriterlerin birbirleriyle çelişen özelliklere sahip olmasıdır. Malzeme seçimi sürecinde karar vericileri teşvik eden faktör ise üretim sürecinde performans iyileştirilmesi ve maliyetin en aza indirilmesidir. Ancak kullanım alanlarına bağlı olarak yüksek ısı iletkenliği ve ağırlık azaltma gibi kriterler de uygun malzeme seçimi yapılabilmesi açısından geçerli nedenler arasındadır. Örneğin, havacılık sektöründe ağırlık azaltma, tasarım iyileştirmeleri için en önemli hedeflerden birisi iken ısı transferi cihazlarında ise termal iletim katsayısının mümkün olduğunca yüksek olması istenmektedir. Uygun olmayan malzeme seçimi, müşterilerin ve üreticilerin gereksinimlerinin karşılanamamasına neden olabilmektedir. Ayrıca bir montajın aksamasına ve ürün performansının düşmesine yol açabilmektedir. Bundan dolayı verimlilik ve karlılık olumsuz etkilenmekte ve ileri aşamalarda kurumun itibarının zedelenmesine dahi yol açabilmektedir [4].

Termoplastik polimerler, işletmelerde maliyetlerin azaltılması için endüstriyel ürünlerin üretiminde özellikle son kırk yılda hammadde olarak kullanılmaktadır. Maliyetin yanı sıra ağırlık tasarrufu, esneklik ve ısı yalıtım özellikleri de termoplastiklerin seçilmesinde önemli bir yer tutar hale gelmiştir [5]. Bugün, dünyanın en büyük ekonomisi konumunda bulunan Amerika Birleşik Devletleri'nde plastik endüstrisi, üçüncü en büyük imalat sektörünü temsil etmektedir. Buna ek olarak, dünya genelinde Polimer Kimyası ve Plastik Mühendisliği dereceleri sunan yüzlerce üniversite bulunmaktadır. Plastik teknolojisinin çeşitli alanlarına adanmış yüzlerce farklı profesyonel meslek topluluğu ve de bunlarla birlikte pek çok sayıda bilim insanı vardır [6]. Bu bahsedilen gerçekler dahi termoplastiklerin modern yaşamın vazgeçilmez bir parçasını oluşturduğunun en önemli kanıtlarından birkaçıdır. Plastik şişelerden çocukların oynadıkları oyuncaklara, market poşetlerinden plastik içecek şişelerine kadar günlük hayatta çoğu yerde karşımıza farklı türlerde termoplastikler çıkmaktadır [7].

Termoplastiklerin diğer malzemelere göre sahip olduğu en önemli avantajlardan birisi de maliyet kalemleridir. Hammadde maliyetleri diğer malzemelere göre önemli ölçüde daha düşük olmakla birlikte, işleme maliyetleri de genellikle daha düşüktür. Bir termoplastikten bir parça veya ara ürün imal edilirken başka tür bir malzemeden benzer türde bir parça veya ürün imal etmekte kullanılan işlem adımlarından daha az prosese ihtiyaç duyulmaktadır [8]. Bu sayılan özelliklerin hepsi plastiklerin kullanımından kaçınılamayacak olmasının nedenleri arasındadır.

Hızlı kentleşme ve sanayileşme, dünya genelinde kaynak kıtlığı ile birlikte çevre kirliliği oranını da artırırken, sürdürülebilirliğin önemini de ortaya koymaktadır. Başta G8 ülkeleri olmak üzere gelişmekte olan ülkelerle birlikte, küresel ekonomide sürdürülebilirlik, en çok dikkat edilen konulardan birisi haline gelmiş olup sürdürülebilir kalkınma ile ilgili toplu eylem planları geliştirilmiştir. Ayrıca, son yıllarda ilgili uzmanlar ve araştırmacılar tarafından sürdürülebilirlik konusunda, özellikle yeşil üretim için malzeme seçimini içeren, geniş bir literatür ve araştırma çalışmaları detaylı bir şekilde oluşturulmaktadır [9].

Yukarıda bahsedilen nedenler yeşil malzeme seçimini çok önemli hale getirmektedir. Sürdürülebilir malzeme seçimi olarak da adlandırılan yeşil malzeme seçimi, ürün performansını garanti etmeyi ve yaşam döngüsü boyunca çevreye ve insan sağlığına olan etkiyi azaltmayı amaçlamaktadır [10]. Son yıllarda çevrenin korunması özel ve kamu sektörlerince önem kazanmakta ve imalat sektöründe bulunan firmalar çevre konularını üretim süreçlerine yansıtmaya başlamaktadır. Yeşil malzeme seçme problemi, kirlilik, küresel ısınma ve halk sağlığına zararı gibi çevreyi etkileyen faktörleri en aza indirmeyi amaçlamaktadır. İşletmeleri ekonomik ve çevresel performanslar arasında bir denge kurmaya teşvik eder. Bu nedenle, malzemelerin yeşil kriterleri başarıyla karşıladığını dikkate almak gerekmektedir [10]. Bu durum günlük yaşamımızda pek çok farklı alanda karşımıza çıkan termoplastiklerin seçimini de etkilemektedir.

Malzemelerin çevresel, fiziksel, mekanik ve de ekonomik performanslarına göre seçilmesi için çok kriterli karar verme (ÇKKV) metodolojisinin kullanılmasına ihtiyaç vardır. Son zamanlarda araştırmacılar tarafından yeşil malzeme seçim problemlerine çözüm bulabilmek için birkaç farklı ÇKKV yöntemi kullanmışlardır. Bunların arasında dikkat çeken çalışmalardan bazıları, AHP yöntemi kullanılarak bina projeleri için sürdürülebilir malzemelerin seçiminde kullanılması amacı ile çok kriterli bir değerlendirme modeli sunulmasıdır [11]. Bu çalışmadan sonra inşaat sektörü için sürdürülebilir malzeme seçimini çözmeye yönelik hibrit bir ÇKKV yaklaşımı da başarı ile tanıtılmıştır [12]. Bunlara ek olarak, sürdürülebilirliğin üç önemli bileşenine dayandırılan bir yeşil yapı malzemesini sıralamak için hibrit bir ÇKKV yöntemi önerilmiştir [13]. Ayrıca, DEMATEL, ANP, Gri İlişkisel Analizi (GİA) ve TOPSIS yöntemlerini bir araya getiren hibrit bir ÇKKV yaklaşımı en uygun yeşil malzemeyi seçmek için geliştirilmiştir [14].

Bu çalışmada, çok kriterli karar verme tekniklerinin kullanımı ile çevresel etki temelli termoplastik malzemelerin seçimi amaçlanmaktadır. Öncelikle altı farklı termoplastik malzeme alternatif olarak seçilmiştir: Akrilonitril bütadien stiren, polikarbonat, polimetametakrilit, polipropilen, polivinil klorür ve politetrafloroetilen. Bu alternatifler üç ana kriter ve dokuz alt kriter altında değerlendirilmektedir: Mekanik özellikler (uzama yüzdesi, eğilme modülü ve Young modülü), fiziksel özellikler (ısı iletkenliği, minimum sıcaklık ve maksimum sıcaklık) ve çevresel etki (yeşil) özellikleri (gömülü enerji, karbon ayak izi ve su ayak izi). Yeşil termoplastik malzemelerin belirlenebilmesi için karşılaştırmalı hibrit ÇKKV yaklaşımı kullanılmıştır. Bunun için, öncelikle kriter ağırlıkları AHP yöntemi ile belirlenmiştir. Daha sonra, CoCoSo, COPRAS ve WASPAS yöntemleri ile alternatifler sıralanmıştır. Hibrit yöntemlerin ürettikleri sonucun ne kadar birbirine yakın olduğunu tespit edebilmek için Spearman'ın sıralama korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir.

Makalenin geri kalan kısmı ise şu şekilde organize edilmiştir: Çalışmada kullanılan yöntemler ikinci bölümde anlatılmaktadır. Yeşil üretim için termoplastik malzeme seçim süreci, alternatifler, kriterler ve yöntemlerin uygulanması üçüncü bölümde açıklanmaktadır. Bulgular dördüncü bölümde tartışılmakta olup beşinci bölümde ise çalışma sonuçlandırılmaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) Yöntemi ile Kriter Ağırlıklandırma

AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci), öznel ağırlığı değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan bir karar verme yöntemidir [15]. 1970'lerde Thomas Saaty tarafından geliştirilmiştir ve o zamandan beri mühendislik ve sağlık hizmetleri gibi pek çok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [16]. AHP, karar vericilerin çeşitli kriterleri daha küçük bileşenlere ayırarak ve daha sonra bu bileşenleri ikili olarak karşılaştırarak göreceli önemlerini değerlendirmelerine olanak sağlar [17]. Yöntem, en üstte ana hedef ve alt seviyelerde kriterler ve alternatifler

olmak üzere karar probleminin hiyerarşik bir yapısının oluşturulmasını içerir [18]. AHP, karmaşık karar problemlerini ele alma yeteneği hem nitel hem de nicel verileri barındırma esnekliği ve kriterler arasındaki karşılıklı bağımlılıkları hesaba katma yeteneği dahil olmak üzere öznel ağırlığı değerlendirmek için çeşitli avantajlara sahiptir. AHP yöntemiyle kriter ağırlıklarının belirlenmesi, aşağıdaki gibi birkaç aşamadan oluşur [19]:

1. *Problemin tanımlanması ve hiyerarşinin oluşturulması*: AHP yönteminde ilk adım, karar problemini tanımlamak ve alternatifleri değerlendirmek için kullanılacak kriter ve alt kriter hiyerarşisini oluşturmaktır.

2. *İkili karşılaştırmalar*: Bir sonraki adım, göreceli önemlerini belirlemek için kriterlerin ve alt kriterlerin ikili karşılaştırmalarını yapmaktır. Bu, her bir kriter çifti arasındaki tercih veya önem derecesini belirtmek için Tablo 1'deki sayısal ölçek kullanılarak yapılır.

3. *Ağırlıkların hesaplanması*: Kriterlerin ve alt kriterlerin ağırlıkları, matematiksel formüller kullanılarak ikili karşılaştırmalara dayalı olarak hesaplanır.

Tablo 1. Kriter ağırlıklandırma da sayıların tanımı ve açıklamaları [20].

Sayı	Tanım	Açıklama
1	Eşit önem	İki kriter amaca eşit derecede katkıda bulunur
3	Orta derecede önem	Tecrübe ve muhakeme, bir kriteri diğerine göre biraz daha avantajlı hale getirir
5	Güçlü önem	Tecrübe ve muhakeme, bir kriteri diğerine göre güçlü bir şekilde tercih eder
7	Çok güçlü veya kanıtlanmış önem	Bir kriter diğerine göre çok güçlü bir şekilde tercih edilir; hakimiyeti pratikte kanıtlanmıştır
9	Son derece önemli	Bir kriteri diğerine tercih eden kanıtlar, mümkün olan en yüksek doğrulama mertebesine sahiptir
2, 4, 6, 8	Ara değerler	İki değer arasındaki önem derecesini bildirmektedir

4. *Karar matrisinin normalize edilmesi*: Karar matrisindeki değerler ilgili kriter değerlerinin toplamına bölünerek normalize edilir.

5. *Kriter ağırlıklarının belirlenmesi*: Normalize edilmiş karar matrisinde her bir alternatifin kriterler bazında puanlarının ortalaması alınarak kriter ağırlıkları belirlenmektedir.

6. *Tutarlılık kontrolü*: İkili karşılaştırmaların karar vericinin tercihleriyle tutarlı olduğundan emin olmak için bir tutarlılık kontrolü yapılır. Karşılaştırmalar tutarsızsa, revize edilmeleri gerekebilir. n kriter sayısı olmak üzere, tutarlılık indeksi (Consistency index - CI) Denklem (1)'e göre hesaplanmaktadır [21]. RI , literatürde kullanılan ve rassal tutarlılık indeksi anlamında olmak üzere, tutarlılık oranı (Consistency ratio - CR) Denklem (2)'de verilen eşitlik ile hesaplanmaktadır [21]. CR değerinin %10'un altında olması beklenmektedir. Eğer tutarlılık oranı bu değer üzerinde ise, karşılaştırma matrisi yeniden geliştirilmelidir [17].

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

2.2. Kombine Uzlaşma Çözümü (Combined Compromise Solution-CoCoSo) Yöntemi

Kombine Uzlaşma Çözümü (CoCoSo) yöntemi, alternatifleri birden fazla kritere göre değerlendirmek ve sıralamak için kullanılan çok kriterli karar verme (ÇKKV) tekniğidir [22]. İlk olarak 1998 yılında S.H. Zanakis, A. Solomon, N. Wishart ve S. Dublsh tarafından tanıtılmıştır. CoCoSo yöntemi iki aşamalı bir analiz içerir. İlk aşamada, karar verici kriterleri tanımlar ve bunlara göreceli önemlerine göre ağırlıklar atar. İkinci aşamada, alternatifler her bir kriterdeki performanslarına göre değerlendirilir ve sıralanır. CoCoSo yöntemi daha sonra kriterler arasındaki ödünleşmeleri dikkate alarak ve karar vericinin tercihlerini karşılayan bir dizi etkin alternatif üretmek için uzlaşma çözümü hesaplar [23, 24]. CoCoSo yöntemi, birbiriyle çelişen birden fazla kriter ve hedefin bulunduğu karmaşık karar verme durumlarıyla uğraşırken özellikle kullanışlıdır. CoCoSo yöntemi, kriterler arasındaki ödünleşimleri dikkate alan uzlaşmacı bir çözüm sunarak karar vericilerin bilinçli ve dengeli kararlar almasını sağlar [25]. Alternatifler ve ilgili kriterler belirlendikten sonra aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır [25]:

1. *Kriter değerlerinin normalleştirilmesi*: Uzlaşma normalleştirme denkleminde dayalı olarak gerçekleştirilir [26]. Denklem (3) fayda yönlü kriterlerin, Denklem (4) ise maliyet yönlü kriterlerin normalizasyonu için

kullanılmaktadır. x_{ij} , i . alternatifin j . kriter değeri ve r_{ij} , normalize edilmiş i . alternatifin j . kriter değeri olmak üzere,

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \text{ fayda kriteri için} \quad (3)$$

$$r_{ij} = \frac{\max_i x_{ij} - x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \text{ maliyet kriteri için} \quad (4)$$

2. Ağırlıklı karşılaştırılabilirlik dizisinin toplamı (S_i) ve her alternatif için karşılaştırılabilirlik dizilerinin güç ağırlığının tamamı (P_i) hesaplanır. S_i değeri gri ilişkisel üretim yaklaşımına dayalı olarak Denklem (5) ile P_i değeri de WASPAS çarpımsal tutumuna göre Denklem (6) ile elde edilmektedir. w_j, j . kriterin ağırlık değeri olmak üzere,

$$S_i = \sum_{j=1}^n (w_j r_{ij}) \quad (5)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n (r_{ij})^{w_j} \quad (6)$$

3. Aşağıdaki birleştirme stratejileri kullanılarak alternatiflerin göreceli ağırlıkları hesaplanır. Bu adımda, Denklem (7)-(9) ile üç farklı değerlendirme skoru stratejisi kullanılarak diğer seçeneklerin göreceli ağırlıkları oluşturulur. Denklem (7) ağırlıklı toplam yönteminin ve ağırlıklı çarpım yönteminin puanlarının toplamlarının aritmetik ortalamasını ifade etmektedir. Denklem (8), ağırlıklı toplam yönteminin ve ağırlıklı çarpım yönteminin en iyiye kıyasla göreceli puanlarının toplamıdır. Denklem (9), ağırlıklı toplam yönteminin ve ağırlıklı çarpım yönteminin model puanlarının dengeli bir şekilde uzlaşmasını ortaya koymaktadır. Denklem (9)'da λ (genellikle $\lambda = 0,5$) karar vericiler tarafından belirlenir. Ancak, esneklik ve istikrar açısından başka değerler de dikkate alınabilir.

$$k_{ia} = \frac{P_i + S_i}{\sum_{i=1}^m (P_i + S_i)} \quad (7)$$

$$k_{ib} = \frac{S_i}{\min_i S_i} + \frac{P_i}{\min_i P_i} \quad (8)$$

$$k_{ic} = \frac{\lambda(S_i) + (1 - \lambda)(P_i)}{(\lambda \max_i S_i + (1 - \lambda) \max_i P_i)} \quad (9)$$

4. Alternatiflerin nihai sıralaması Denklem (10) ile hesaplanan ki değerlerine göre belirlenir.

$$k_i = (k_{ia} k_{ib} k_{ic})^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{3} (k_{ia} + k_{ib} + k_{ic}) \quad (10)$$

2.3. Karmaşık Nisbi Değerlendirme (COMplex PROportional ASsessment-COPRAS) Yöntemi

Karmaşık Nisbi Değerlendirme (COPRAS) yöntemi, bir dizi kritere dayalı olarak alternatifleri değerlendirmek için kullanılan çok kriterli bir karar verme (ÇKKV) yaklaşımıdır [27]. 1980'lerin sonunda Profesör Roman Slowinski ve Polonya Bilimler Akademisi Bilgisayar Bilimleri Enstitüsü'ndeki meslektaşları tarafından geliştirilmiştir. COPRAS yöntemi, karar verme problemi birbirine bağlı ve farklı ölçüm birimlerine sahip birden fazla kriter içerdiğinde özellikle kullanışlıdır [28, 29]. Alinezhad & Khalili (2019) COPRAS yönteminin adımlarını aşağıdaki gibi açıklamaktadır [29]:

1. *Karar matrisinin oluşturulması:* Bu adım, alternatifleri değerlendirmek için kullanılacak kriterlerin belirlenmesini içerir. Bu kriterler ölçülebilir, karar problemiyle ilgili ve birbirinden bağımsız olmalıdır.

2. *Karar matrisinin normalize edilmesi:* Her kriter için veriler, genellikle 0 ile 1 arasında ortak bir ölçeğe göre normalleştirilir. Kriterler farklı ölçüm birimlerine sahip olabileceğinden bu adım gereklidir. r_{ij} , j . kriterin i . alternatif değeri olmak üzere, Denklem (11) ile karar matrisleri normalize edilir.

$$r_{ij}^* = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} \quad (11)$$

3. *Ağırlıklı normalize karar matrisinin elde edilmesi:* Bu adımda, karar verici her bir kriterin göreceli önemini dikkate alır. w_j , j . kriterin ağırlığı olmak üzere, Denklem (12) ile hesaplanır.

$$\hat{r}_{ij} = r_{ij}^* \cdot w_j \quad (12)$$

4. *Maksimum ve minimum indekslerin belirlenmesi:* g fayda yönlü kriter sayısını, $n-g$ ise maliyet yönlü kriter sayısını ve S_i ise i . alternatifin maksimum ve minimum indeksini göstermek üzere, Denklem (13) ve (14) ile hesaplanır.

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^g \hat{r}_{ij} \quad (13)$$

$$S_{-i} = \sum_{j=g+1}^n \hat{r}_{ij} \quad (14)$$

5. *Her bir alternatifin göreceli önem değerinin hesaplanması:* Q_i , her bir alternatifin görece önem değeri olmak üzere, Denklem (15) veya (16) ile hesaplanır.

$$Q_i = S_{+i} + \frac{\min S_{-i} \sum_{i=1}^m S_{-i}}{S_{-i} \sum_{i=1}^m \frac{\min S_{-i}}{S_{-i}}} \quad (15)$$

$$Q_i = S_{+i} + \frac{\sum_{i=1}^m S_{-i}}{S_{-i} \sum_{i=1}^m \frac{1}{S_{-i}}} \quad (16)$$

6. *Alternatiflerin sıralanması:* Elde edilen puanların büyükten küçüğe doğru sıralanması ile belirlenir.

COPRAS yöntemi, kararların iyi bilgilendirilmiş olmasını ve ilgili tüm faktörlerin kapsamlı bir analizine dayanmasını sağlamaya yardımcı olabilecek karar vermeye yönelik yapılandırılmış bir yaklaşım sağlar. Mühendislik, ekonomi ve yönetim dahil olmak üzere çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [30, 31].

2.4. Ağırlıklı Toplanmış Toplam Ürün Değerlendirmesi (Weighted Aggregated Sum Product Assessment-WASPAS) Yöntemi

Ağırlıklı Toplanmış Toplam Ürün Değerlendirme (WASPAS) yöntemi, bir dizi alternatifi birden fazla kritere göre değerlendirmek için kullanılan çok kriterli bir karar verme tekniğidir [32]. Yöntem 2011 yılında Tzeng ve Huang tarafından geliştirilmiştir ve Basit Toplamsal Ağırlıklandırma (SAW) yönteminin bir modifikasyonudur. WASPAS yönteminde her bir kritere, diğer kriterlere kıyasla göreceli önemini yansıtan bir ağırlık atanır. Ağırlıklar daha sonra her bir alternatif için her bir kriterde ağırlıklı bir puan hesaplamak için kullanılır [33]. Ağırlıklı puanlar daha sonra her bir alternatif için genel bir puan elde etmek üzere toplanır. En yüksek toplam puana sahip alternatif daha sonra en iyi alternatif olarak kabul edilir. WASPAS yönteminin avantajlarından biri hem nesnel hem de öznel kriterlerin dikkate alınmasına olanak sağlamasıdır. Ayrıca yöntem, kriterler için nominal, ordinal, aralık ve oran ölçekleri dahil olmak üzere farklı ölçek türlerinin kullanılmasına izin vermektedir [29, 34]. Alinezhad & Khalili [29], WASPAS yönteminin adımlarını aşağıdaki gibi açıklamıştır:

1. *Karar matrisinin oluşturulması:* Alternatiflerin ve kriterlerin sunulduğu başlangıç karar matrisi geliştirilmektedir.

2. *Karar matrisinin normalizasyonu:* Fayda yönlü kriterler Denklem (17) yardımıyla normalize edilirken Denklem (18) ise maliyet yönlü kriterleri normalize etmektedir. r_{ij} , j . kriterin i . alternatif değeri olmak üzere,

$$r_{ij}^* = \frac{r_{ij}}{\max_i r_{ij}} \quad (17)$$

$$r_{ij}^* = \frac{\min_i r_{ij}}{r_{ij}} \quad (18)$$

3. *Toplamsal göreceli önemin belirlenmesi*: Her bir kriterin ağırlık değeri ile normalize matris değerinin çarpılıp toplanmasıyla hesaplanmaktadır. Q_i^1 , toplamsal göreceli önemi ve w_j , j . kriterin ağırlığı olmak üzere, Denklem (19) toplamsal göreceli önemi hesaplamaktadır.

$$Q_i^1 = \sum_{j=1}^n r_{ij}^* \cdot w_j \quad (19)$$

4. *Çarpımsal göreceli önemin belirlenmesi*: Q_i^2 , çarpımsal göreceli önem olmak üzere, Denklem (20) ile hesaplanmaktadır.

$$Q_i^2 = \prod_{j=1}^n (r_{ij}^*)^{w_j} \quad (20)$$

5. *Ortak genelleştirilmiş kriterin belirlenmesi*: Toplamsal ve çarpımsal metotların entegrasyonu için Denklem (21) kullanılır.

$$Q_i = \frac{1}{2}(Q_i^1 + Q_i^2) \quad (21)$$

6. *Alternatiflerin sıralanması*: Elde edilen puanların büyükten küçüğe doğru sıralanması ile belirlenir.

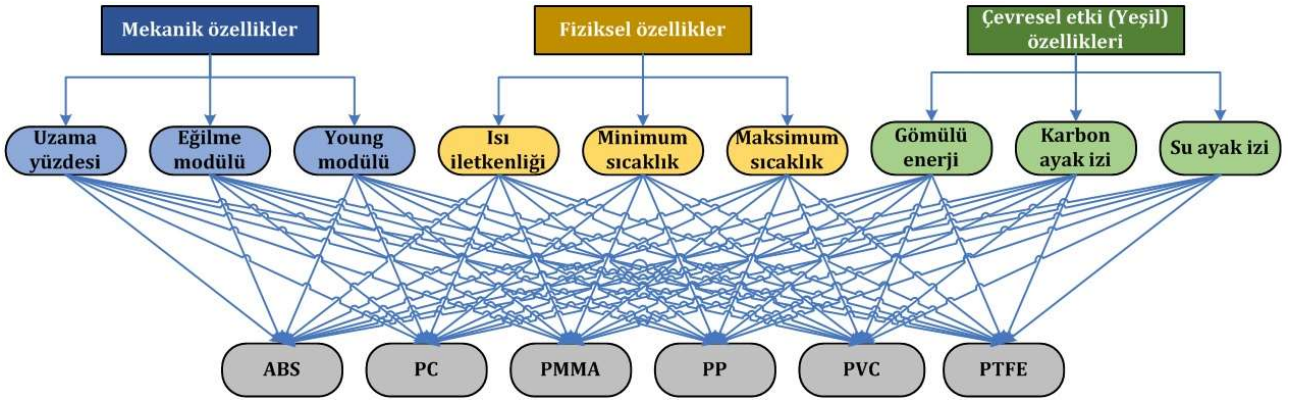
3. Yeşil Üretim için Termoplastik Malzeme Seçimi

Yeşil malzeme seçimi, farklı kriter türlerini (çevresel, fiziksel ve mekanik gibi) göz önünde bulundurarak en uygun termoplastik malzeme seçiminde en önemli çok kriterli karar verme (ÇKKV) problemlerinden biridir. Bu araştırmanın amacı, yeşil termoplastik malzeme seçimi yapılırken çevre sorunlarını çözümlen, mekanik ve fiziksel performansın önemini bilinmesini teşvik etmektir. Çalışmamızın kriterler hiyerarşisi ise Şekil 1'de gösterilmektedir.

3.1. Alternatifler

Yeşil termoplastik malzeme seçimi için uygun olabilecek altı farklı tipte termoplastik malzeme seçilmiştir. Bunlar; Akrilonitril bütadien stiren (ABS), Polikarbonat (PC), Polimetil metakrilat (PMMA), Polipropilen (PP), Polivinil klorür (PVC) ve Politetrafloroetilen (PTFE)'dir. Sektörlerde yaygın olarak kullanılan bu malzemelerin temel özelliklerinden aşağıda kısaca bahsedilmiştir.

Akrilonitril bütadien stiren (ABS), otomotiv parçaları, oyuncaklar ve ev aletleri de dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılan termoplastik bir polimerdir. Akrilonitril, bütadien ve stirenin polimerize edilmesiyle elde edilen bir kopolimerdir. ABS, yüksek darbe direnci, iyi ısı direnci ve mükemmel boyutsal kararlılığı ile bilinir. Ayrıca hafif ve işlenmesi kolay olduğundan enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon prosesleri için popüler bir seçimdir. ABS'nin benzersiz özelliklerinden biri, farklı özellikler elde etmek için katkı maddeleri ile kolayca modifiye edilebilmesidir. Örneğin, ABS UV ışığına karşı daha dayanıklı olacak veya alev geciktiriciliği geliştirilecek şekilde modifiye edilebilir. Genel olarak ABS, mekanik, termal ve işleme özellikleri arasında iyi bir denge sunan çok yönlü ve yaygın olarak kullanılan bir polimerdir [35].



Şekil 1. Kriterler hiyerarşisi

Polikarbonat (PC), olağanüstü tokluğu, darbe direnci ve şeffaflığı ile bilinen termoplastik bir polimerdir. Genellikle güvenlik gözlükleri, araba farları ve koruyucu kalkanlar gibi güvenlik ve dayanıklılığın kritik olduğu uygulamalarda kullanılır. Polikarbonat, bisfenol A ve fosgenin polimerizasyonu ile elde edilir. Elde edilen polimer, mükemmel mekanik özelliklerine katkıda bulunan yüksek bir moleküler ağırlığa ve doğrusal bir yapıya sahiptir. Polikarbonatın en önemli avantajlarından biri darbe direncidir. Neredeyse kırılmazdır ve çatlamadan veya kırılmadan önemli darbelerle dayanabilir, bu da onu güvenlik uygulamaları için mükemmel bir seçim haline getirmiştir. Buna ek olarak, polikarbonat iyi bir boyutsal kararlılığa sahiptir ve karmaşık şekillere kolayca kalıplanabilmektedir. Polikarbonat ayrıca yüksek şeffaflığı ile bilinir, bu da onu optik netliğin önemli olduğu uygulamalar için popüler bir seçim haline getirmiştir. UV ışığına karşı iyi bir dirence sahip olmasından ötürü dış mekân uygulamaları için çok uygundur. Genel olarak polikarbonat, çok çeşitli uygulamalar için uygun olmasını sağlayan benzersiz bir özellik kombinasyonuna sahip çok yönlü bir polimerdir [36, 37].

Polimetil metakrilat (PMMA), genellikle akrilik cam veya sadece akrilik olarak bilinen sentetik bir polimerdir. Genellikle cama kırılmaya karşı dayanıklı bir alternatif olarak kullanılan şeffaf ve sert bir termoplastik malzemedir. PMMA yüksek optik netliğe sahiptir ve aynı zamanda hafiftir, hava koşullarına dayanıklıdır ve çizilmeye karşı dirençlidir, bu da onu çok çeşitli uygulamalarda popüler bir malzeme haline getirir. PMMA, enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve döküm gibi teknikler kullanılarak levhalar, tüpler ve bloklar gibi çeşitli şekillerde kalıplanabilir. PMMA, inşaat, otomotiv, elektronik ve medikal dahil olmak üzere çeşitli sektörlerde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Genellikle tabelalar, aydınlatma armatürleri, pencereler, lensler ve akvaryumlar için kullanılır. PMMA ayrıca diş dolgularında, yapay kemik ve de kornea üretimlerinde de kullanılmaktadır. PMMA genellikle gıda ile temas eden uygulamalarda ve tıbbi cihazlarda kullanım için güvenli kabul edilir [38].

Polipropilen (PP), benzersiz özellikleri nedeniyle çok çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılan termoplastik bir polimerdir. Yüksek sıcaklıklara dayanabilen, kimyasallara ve yorulmaya karşı dirençli, esnek, hafif ve sağlam bir malzemedir. PP, propilen monomerinin polimerizasyonu ile üretilir. PP, mükemmel nem direnci ve bariyer özellikleri nedeniyle şişe, kapak ve film gibi ambalaj malzemelerinin üretiminde yaygın olarak kullanılır. Ayrıca otomotiv parçaları, oyuncaklar, tıbbi ekipman ve inşaat malzemeleri üretiminde de kullanılır. PP'nin en önemli avantajlarından biri geri dönüştürülebilir olmasıdır. Özelliklerini kaybetmeden birçok kez geri dönüştürülebilmesi, onu sürdürülebilir ambalaj çözümleri için popüler bir malzeme haline getirmektedir. Ayrıca, PP düşük yoğunluğa sahiptir. Bu özelliğinden ötürü diğer termoplastikler ile kıyaslandığında aynı hacmi üretmek için daha az malzeme gerektiği anlamına gelmektedir. Sonuç olarak daha düşük bir çevresel ayak izi ile sonuçlanmasına neden olur. Genel olarak PP, benzersiz özellikleri ve geri dönüştürülebilirliği nedeniyle çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılan çok yönlü ve uygun maliyetli bir malzemedir [39].

Polivinil klorür (PVC), vinil klorür monomerinden yapılan sentetik bir polimerdir. Dayanıklılığı, kimyasallara ve hava koşullarına karşı direnci ve düşük üretim maliyeti nedeniyle çok çeşitli ürünlerde yaygın olarak kullanılan çok yönlü bir plastiktir. PVC tipik olarak borular, pencere çerçeveleri ve vinil dış cephe kaplamaları gibi inşaat malzemelerinde kullanılır. Ayrıca elektrik kablolarında, tıbbi cihazlarda ve oyuncaklar ve şişirilebilir ürünler gibi çeşitli tüketici ürünlerinde de kullanılır. PVC, sert ve esnek PVC gibi farklı formlarda üretilebilir. Sert PVC inşaat uygulamalarında kullanılırken, esnek PVC tıbbi hortumlar ve şişirilebilir ürünler gibi esneklik gerektiren ürünlerde kullanılır [40].

Politetrafloroetilen (PTFE), yapışmazlık özellikleri ve kimyasal direnci ile bilinen sentetik bir polimerdir. Yüksek sıcaklık direnci, düşük sürtünme katsayısı ve mükemmel elektriksel özellikleri nedeniyle çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. PTFE yaygın olarak Teflon ticari adıyla da bilinir. Genellikle pişirme kapları için bir kaplama olarak ve ayrıca contalar ve yataklar gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Termoplastik bir

polimerdir, yani eritilebilir ve birden çok kez yeniden kalıplanabilir. PTFE'nin benzersiz özelliklerinden biri, son derece düşük sürtünme katsayısıdır, bu da onu kayma veya sürtünme temasının gerekli olduğu uygulamalarda kullanım için ideal kılar. Ayrıca çoğu kimyasal maddeye ve çözücüye karşı dayanıklıdır, bu da onu zorlu ortamlarda kullanım için popüler bir seçim haline getirir. PTFE, inert olduğu ve diğer maddelerle reaksiyona girmediği için nispeten güvenli bir malzeme olarak kabul edilir [41].

3.2. Kriterler

Termoplastik malzeme seçiminin en büyük zorluklarından biri de malzeme özelliklerinin önem derecelerinin belirlenmesidir. Son kullanıcıların, termoplastik parçanın farklı kriter özelliklerini de taşıması istemektedir. Dolayısıyla, birçok uygulamada, malzemelerin farklı özelliklerinin istenen değerlerde bir araya getirilmesi ile en iyi deney kombinasyonunun oluşturulması amaçlanmaktadır.

Bununla birlikte, malzeme seçim problemlerinin çevresel kriterler dikkate alınarak ele alınması gerekmektedir. Sürdürülebilir malzeme seçimi olarak da adlandırılan yeşil malzeme seçimi, ürün performansını garanti etmeyi ve tüm yaşam döngüsünün çevreye ve insan sağlığına olan etkisini azaltmayı amaçlamaktadır. Bu çalışmada istenilen amaç, termoplastiklerin fiziksel ve mekanik özelliklerine yeşil malzeme kriterlerini de ekleyip gerekli malzeme seçimini güçleştirmektir.

Yapılan çalışmada malzeme seçimi için incelenmesi istenen kriterler 3 ana başlık altında toplanmıştır. Bunlar; fiziksel, mekanik ve çevresel etki (yeşil) özellikleridir. Fiziksel malzeme özellikleri altında ısı iletkenliği (thermal conductivity), minimum sıcaklık (minimum temperature) ve maksimum sıcaklık (maximum temperature) seçilmiştir. Mekanik özellik olarak Young modülü (Young's modulus), uzama yüzdesi (elongation) ve eğilme modülü (flexural modulus) dikkate alınmıştır. Son olarak ise yeşil özellikler için gömülü enerji (embodied energy), karbon ayak izi (carbon footprint) ve su ayak izi (water footprint) seçilmiştir.

Termal iletkenlik, bir malzemenin ısıyı ne kadar hızlı transfer edebileceğini tanımlayan bir özelliktir. Birim sıcaklık gradyanı başına, birim zamanda bir malzemenin birim alanı boyunca aktarılabilen ısı miktarı olarak tanımlanır. Başka bir deyişle, bir malzemenin ısıyı iletme kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Metalik malzemelerle karşılaştırıldığında, termoplastikler tipik olarak daha düşük ısı iletkenliğe sahiptir [42, 43]. Mümkün olduğunca yüksek ısı iletkenliğe sahip malzemenin seçimi, bu çalışmada istenilen bir özelliktir. Bu yüzden yapılan bu araştırmada yüksek termal iletkenlik talep edilen bir özellik olarak karşımıza çıkmaktadır. Diğer önemli özellik ise minimum ve maksimum sıcaklıktır. Malzemeler günlük kullanımlarında uzun süre yüksek sıcaklıklarda kullanıldığında maksimum sıcaklık büyük önem taşırken malzemenin kırılma hale gelmemesi için minimum sıcaklık hayati önem taşımaktadır. Bu yüzden seçilecek malzemenin en yüksek ve en düşük sıcaklık aralıklarında çalışabilmesi yapılacak seçim için önemli hale gelmektedir [44, 45].

Mekanik özellik olarak seçimi yapılacak olan yeşil termoplastik malzemenin esneklik özelliği de diğer önemli bir konudur. Elastisitenin yeterli olup olmadığını belirlemek için Young modülü ve eğilme modülü incelenmektedir. Yüksek miktarda elastik bir cihaz üretimi için seçilecek olan termoplastiğin Young modülü ve eğilme modülü olabildiğince düşük olmalıdır [46]. Malzemenin kırılma özelliğini değerlendirmek için kullanılan uzama yüzdesi, çok önemli bir malzeme seçim faktörüdür. Genel olarak, küçük uzamalara sahip polimerik malzemeler kırılma kabul edilir. Bu çalışma için seçilmesi düşünülen yeşil termoplastik malzemenin uzama yüzdesinin mümkün olduğu kadar büyük olması istenilmektedir.

Son olarak çalışmanın da amacını oluşturan yeşil özelliklerinden kısaca bahsetmek gerekmektedir. Gömülü enerji, herhangi bir mal veya hizmeti üretmek için gerekli olan tüm enerjinin toplamıdır ve bu enerjinin, ürünün kendisinde birleştirilmiş veya "gömülü" olduğu düşünülmektedir. Bu konsept, enerji üreten veya enerji tasarrufu sağlayan malzemelerin etkinliğinin belirlenmesinde faydalı olabilmektedir. Bu miktarı ölçmenin temel amaçlarından biri, söz konusu ürün tarafından üretilen veya tasarruf edilen enerji miktarını, onu üretirken tüketilen enerji miktarıyla karşılaştırmaktır [47]. Bu nedenlerden ötürü seçimi yapılması istenilen termoplastik malzemenin gömülü enerjisinin mümkün olduğunca minimum olması istenilmektedir. Karbon ayak izi, üretilen sera gazı miktarı açısından malzemenin üretimi esnasında çevreye salınan birim karbondioksit cinsinden zararın ölçüsüdür [48]. Gömülü enerjide olduğu gibi seçimi yapılacak olan termoplastiğin karbon ayak izinin minimum olması istenilmektedir. Son olarak bahsedilecek olan özellik ise su ayak izidir. Su ayak izi, bir termoplastik malzemenin üretimi aşamasında su kullanım kapsamını göstermektedir [49]. Önceki yeşil malzeme özellikleri gibi seçimi yapılması istenilen termoplastik malzemenin su ayak izinin mümkün olduğu kadar düşük olması talep edilmektedir.

Üretim için kullanılması düşünülen yeşil termoplastik malzemenin istenilen özelliklerinden kısaca bahsedilmiştir. Bunlara ek olarak seçilebilecek malzemedeki beklenen en önemli özellik kolay ulaşılabilir olmasıdır. Çok kriterli

seçim yöntemlerinde kullanılacak malzemelerin fiziksel, mekanik ve çevresel etki özelliklerin ortalama değerleri Tablo 2’de, seçim kriterleri, kısaltmaları ve kriter karakterleri Tablo 3’te gösterilmiştir. Tablo 3’te belirtilen kriterler detaylı ve sistematik bir literatür araştırması ile elde edilmiş olup bu alanda çalışan uzman bir grup ile yapılan toplantılar neticesinde belirlenmiştir.

Tablo 2. Her termoplastik için fiziksel, mekanik ve çevresel etki özelliklerin ortalama değerleri [50].

	ABS	PC	PMMA	PP	PVC	PTFE
Uzama yüzdesi (%)	50,75	100	2,5	120	1,6	300
Eğilme modülü (GPa)	2,5	2,3	2,9	1,5	3	0,6
Young modülü (GPa)	2	2,2	3	1,25	3,1	0,48
Isı iletkenliği (W/m/K)	0,27	0,21	0,17	0,14	0,22	0,25
Minimum sıcaklık (°C)	-20	-30	-70	-10	-20	-250
Maksimum sıcaklık (°C)	80	120	70	130	60	260
Gömülü enerji (MJ/kg)	95	105	115	80	58	115
Karbon ayak izi (kg/kg)	3,8	6,05	6,8	3,15	2,5	6
Su ayak izi (L/kg)	180	175	76	39	210	455

Tablo 3. Kriterler ve özellikleri

Kriter Ana Grubu	Alt Kriterler	Birimler	Kısaltmalar	Kriter Karakteri
Mekanik özellikler	Uzama yüzdesi	%	UY	Maksimizasyon
	Eğilme modülü	GPa	EM	Minimizasyon
	Young modülü	GPa	YM	Minimizasyon
Fiziksel özellikler	Isı iletkenliği	W/m/K	İİ	Maksimizasyon
	Minimum sıcaklık	°C	MİNS	Minimizasyon
	Maksimum sıcaklık	°C	MAKS	Maksimizasyon
Çevresel etki (yeşil) özellikleri	Gömülü enerji	MJ/kg	GE	Minimizasyon
	Karbon ayak izi	kg/kg	KAİ	Minimizasyon
	Su ayak izi	L/kg	SAİ	Minimizasyon

4. Bulgular ve Tartışma

4.1. Kriter Ağırlıkları

Bu çalışmada yeşil üretim için çevresel etki temelli termoplastik malzeme seçimine odaklanılmış ve çalışmanın hiyerarşik yapısı Şekil 1’de gösterilmiştir. Bu doğrultuda, 6 termoplastik malzeme (Akrilonitril bütadien stiren, polikarbonat, polimetametakrilit, polipropilen, polivinil klorür ve politetrafloroetilen), 3 ana ve 9 alt kriter altında değerlendirilmiştir. En uygun malzeme seçimi ise literatürde yaygın olarak kullanılan CoCoSo, COPRAS ve WASPAS yöntemlerinin uygulanması ile gerçekleştirilmiştir. İlk olarak AHP yöntemi ile kriter ağırlıkları belirlenmiştir. Bu kapsamda, ilgili alanda çalışan uzmanlarla yapılan toplantılar sonucunda kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi geliştirilmiş ve Tablo 4’te gösterilmiştir. Tablo 5’te ise normalize edilmiş karar matrisi ve kriter ağırlık değerleri verilmiştir. Ağırlık değerleri dikkate alındığında en önemli kriter karbon ayak izi olarak seçilmiştir. Daha sonra ise su ayak izi ve sonrasında gömülü enerji en önemli kriterler olarak belirlenmiştir.

Karbon ayak izi, yeşil üretim için seçilecek termoplastikler için en önemli kriter olarak kabul edilir, çünkü hammadde çıkarma, üretim, nakliye, kullanım ve bertaraf dahil olmak üzere ürünün tüm yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan sera gazı emisyonlarının miktarını ölçer. Termoplastikler ambalaj, otomotiv, inşaat ve elektronik gibi çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır ve karbon ayak izleri nedeniyle çevre üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, düşük karbon ayak izine sahip termoplastiklerin seçilmesi, bu endüstrilerin çevresel etkilerinin azaltılmasına yardımcı olabilmektedir. Daha düşük karbon ayak izine sahip malzemeler seçilerek iklim değişikliğine katkıda bulunan sera gazı emisyonları ciddi bir biçimde azaltılabilir. Ayrıca, karbon ayak izinin azaltılması bu alanda çalışan şirketlerin enerji tüketimlerini ve işletme maliyetlerini azaltmalarına yardımcı olarak üretim süreçlerini daha verimli ve sürdürülebilir hale getirecektir. Özetle, karbon ayak izi, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olduğu ve sürdürülebilir üretim uygulamalarını teşvik ettiği için yeşil üretim için termoplastik seçimindeki en önemli kriter olarak belirlenmiştir [51].

Su ayak izi, yeşil üretim için seçilecek termoplastikler için karbon ayak izinden sonraki en önemli kriterdir. Bunun en önemli nedeni ise suyun yaşam için gerekli olan değerli bir kaynak olmasından ileri gelmektedir. İklim değişikliği, nüfus artışı ve diğer faktörler nedeniyle birçok bölgede giderek daha az bulunur hale gelmiştir. Termoplastiklerin üretimi hem üretim sürecinin kendisi hem de üretimde kullanılan hammaddelerin çıkarılması için önemli miktarda su tüketimi gerektirmektedir. Buna ek olarak, plastik atıkların bertarafı, su kaynaklarının kirlenmesi ve de yeraltı su kaynaklarının tükenmesi gibi su kaynakları üzerinde de önemli etkilere neden olabilir. Bu nedenle, düşük su ayak izine sahip termoplastiklerin seçilmesi, su kaynakları üzerindeki baskının azaltılmasına

ve sürdürülebilir üretim uygulamalarının teşvik edilmesine çok büyük faydalar sağlayabilmektedir. Daha düşük su ayak izine sahip malzemeler seçilerek su kullanımı azaltılabilir ve bu değerli kaynağın verimli kullanımını teşvik edilebilir. Ayrıca, su ayak izinin azaltılması, daha az su tüketimi ve su arıtma ve bertarafıyla ilgili daha düşük maliyetler gibi kullanıcılar için ek ekonomik faydalar da sağlayabilmektedir. Özetlersek, su ayak izi, yeşil üretim için termoplastik seçiminde karbon ayak izinden sonraki en önemli kriterdir. Bunun en büyük nedeni su kullanımını azaltmaya yardımcı olmasıdır. Buna ek olarak sürdürülebilir üretim uygulamalarını teşvik eder ve kullanıcıları için ekonomik faydalar sağlar [52].

Karbon ve su ayak izinden sonraki en önemli seçim kriterimiz ise gömülü enerjidir. Gömülü enerji, yeşil üretim için termoplastik seçiminde dikkate alınması gereken diğer önemli bir faktördür. Çünkü malzemenin üretilmesi, taşınması, kullanılması ve bertaraf edilmesi için gereken enerji miktarını yansıtır. Termoplastiklerin üretimi, sera gazı emisyonlarına ve iklim değişikliğine katkıda bulunan önemli miktarda enerji içerir. Farklı termoplastiklerin gömülü enerjileri göz önünde bulundurularak, üreticiler üretmek için daha az enerji gerektiren malzemeleri seçebilir, bu da sera gazı emisyonlarını ve enerji tüketimini azaltabilmektedir. Bu, daha sürdürülebilir üretim uygulamalarına ve üretim sürecinin genel çevresel etkisinin azaltılmasına yönelik önemli bir adımdır. Enerji tüketimini ve sera gazı emisyonlarını azaltmanın yanı sıra, daha düşük gömülü enerjiye sahip termoplastiklerin seçilmesi de üreticiler için maliyet tasarrufu sağlayabilir. Üreticiler, malzemeyi üretmek için gereken enerji miktarını azaltarak enerji faturalarını düşürebilir ve potansiyel olarak nihai ürünün maliyetini azaltabilirler [53]. Genel olarak, gömülü enerjinin dikkate alınması, üreticilerin enerji tüketimini, sera gazı emisyonlarını ve maliyetleri azaltmasına yardımcı olurken aynı zamanda daha sürdürülebilir üretim uygulamalarına katkıda bulunabileceğinden, yeşil üretim için termoplastik malzeme seçiminin önemli bir yönüdür. Kriterlerin belirlenmesinde görüşlerine başvuru uzman grup ile yapılan beyin fırtınası neticesinde Tablo 4'te verilen ikili karşılaştırma matrisi geliştirilmiştir. Bu matriste her bir kriter diğer kriterler ile Tablo 1'de verilen ve AHP yönteminde kullanılan 1-9 skalası dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Örneğin, karbon ayak izi (KAİ) kriterinin su ayak izi (SAİ) kriterinden bir derece daha önemli olmasından dolayı KAİ'nin SAİ'ye olan üstünlüğü 2 puan ile değerlendirilmiştir. Aynı şekilde, önceki paragraflardaki açıklamalar dikkate alındığında KAİ'nin gömülü enerji (GE) kriterinden orta derecede önemli olduğu kararına varıldığından dolayı 3 puan ile puanlanmıştır.

Tablo 4. Kriterlerin ikili karşılaştırma matrisi.

	UY	EM	YM	İİ	MİNS	MAKS	GE	KAİ	SAİ
UY	1	2	1/5	1/2	1/3	1/4	1/6	1/8	1/7
EM	1/2	1	1/6	1/4	1/4	1/5	1/7	1/9	1/8
YM	5	6	1	3	4	2	1/2	1/4	1/3
İİ	2	4	1/3	1	2	1/2	1/4	1/6	1/5
MİNS	3	4	1/4	1/2	1	1/3	1/5	1/7	1/6
MAKS	4	5	1/2	2	3	1	1/3	1/5	1/4
GE	6	7	2	4	5	3	1	1/3	1/2
KAİ	8	9	4	6	7	5	3	1	2
SAİ	7	8	3	5	6	4	2	1/2	1

Çevresel etki özellikleri olan karbon ayak izi, su ayak izi ve de gömülü enerji kriterlerinden sonraki en önemli seçim kriteri Young modülü olmuştur. Düşük Young modülüne sahip termoplastikler daha esnektir ve ambalaj veya otomotiv endüstrileri gibi elastikiyet ve tekrarlanan bükülme veya deformasyona dayanma yeteneği gerektiren uygulamalar için çok daha uygundur. Bu çalışmada da seçilecek termoplastikten daha çevreci olmasının yanı sıra elastik cihaz üretimlerine de uygun olması beklendiğinden Young modülü çevresel etki kriterlerinden sonraki en önemli kriter haline gelmiştir.

Young modülünü takip eden kriter maksimum sıcaklıktır. Seçimi yapılacak olan termoplastik malzemenin mümkün olduğunca yüksek sıcaklıklara dayanımı istendiğinden maksimum sıcaklık kriterinin ağırlığı diğer kriterlerin ağırlıklarından fazla olmuştur. Bu iki kriteri takip eden kriter ısı iletkenliğidir. Yüksek ısı iletkenliğine sahip malzemeler, ısıyı düşük ısı iletkenliğine sahip malzemelere göre daha hızlı aktarabilir. Bu özellik, elektronik cihazlar veya ısının dağıtılması gereken üretim süreçleri gibi sıcaklık kontrolünün kritik olduğu uygulamalarda özellikle önemlidir. Bu çalışmada da seçimi yapılacak olan termoplastığın ısı iletkenliği mümkün olduğu kadar yüksek olması istendiğinden ısı iletkenliğinin kriter ağırlığı yüksek bir değer alınmıştır. Bu değerleri de sırayla; minimum sıcaklık, uzama yüzdesi ve de eğilme modülü takip etmektedir.

Tablo 5. Normalize karar matrisi ve kriter ağırlıkları (%).

	UY	EM	YM	İİ	MİNS	MAKS	GE	KAİ	SAİ	Ağırlıklar
UY	0,03	0,04	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,04	0,03	2,60
EM	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,03	1,85
YM	0,14	0,13	0,09	0,13	0,14	0,12	0,07	0,09	0,07	10,86
İİ	0,05	0,09	0,03	0,04	0,07	0,03	0,03	0,06	0,04	5,01
MİNS	0,08	0,09	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,05	0,04	4,23
MAKS	0,11	0,11	0,04	0,09	0,10	0,06	0,04	0,07	0,05	7,62
GE	0,16	0,15	0,17	0,18	0,17	0,18	0,13	0,12	0,11	15,40
KAİ	0,22	0,20	0,35	0,27	0,24	0,31	0,40	0,35	0,42	30,65
SAİ	0,19	0,17	0,26	0,22	0,21	0,25	0,26	0,18	0,21	21,78

Tablo 4'te gösterilen kriterlerin ikili karşılaştırma matrisinin tutarlık analizi yapılmış olup Tablo 6'da parametreler ve bunların değerleri gösterilmektedir. Sonuçlara göre tutarlık indeksi 0,0599 olarak hesaplanmıştır. Matrisin tutarlık oranı ise 0,04 olarak bulunmuş olup eşik değer olan 0,10'dan küçük olduğu tespit edilmiştir. Böylelikle AHP yönteminden elde edilen kriter ağırlık değerleri alternatif malzemelerinin sıralanmasında kullanılan ÇKKV yaklaşımlarında kullanılabilir.

Tablo 6. Tutarlılık oranı

Parametreler	Değerleri
Karşılaştırma sayısı	9
Ortalama tutarlılık (λ_{max})	9,48
Tutarlılık indeksi (CI)	0,0599
Rassal tutarlılık indeksi (RI)	1,45
Tutarlılık oranı (CR)	0,04

4.2. Alternatiflerin Sıralanması

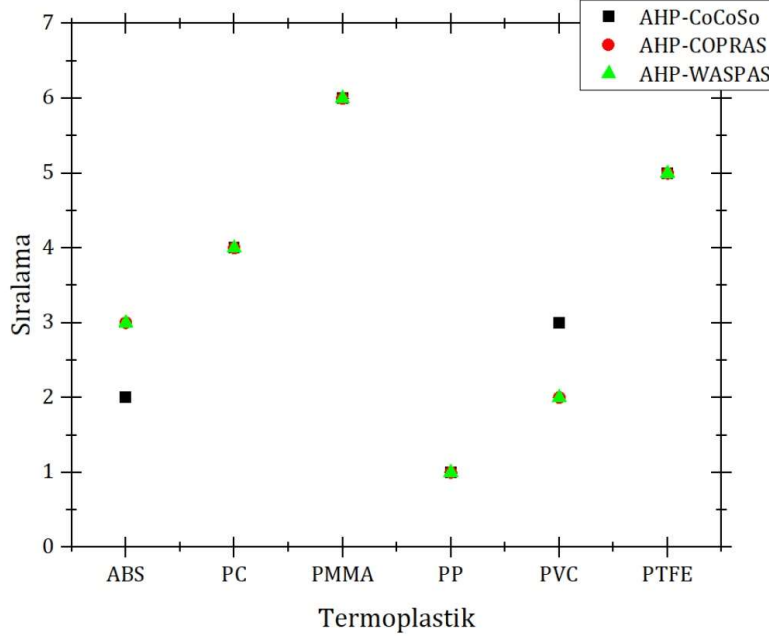
AHP-CoCoSo, AHP-COPRAS ve AHP-WASPAS dahil olmak üzere üç farklı hibrid ÇKKV yaklaşımı, alternatifleri önceliklendirmek için mevcut çalışmada başarı ile kullanılmıştır. AHP-CoCoSo, AHP-COPRAS ve AHP-WASPAS aracılığıyla elde edilen alternatiflerin sıralaması Tablo 7'de özetlenmiş ve sonuçlarda Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2 ve Tablo 7'den de görülebileceği gibi, malzeme alternatiflerinin sıralamasının temelinde tutarlı olduğu üç yöntem aracılığıyla özetlenebilmektedir. Sonuç olarak, önerilen yöntem alternatif malzeme seçeneklerinin performansını değerlendirmek ve yeşil üretim için en uygun termoplastik malzemeyi seçmek için makul ve etkili bir yoldur. Bu üç yöntemin sonuçlarına göre PP, yeşil üretim için seçilmesi planlanan en uygun termoplastik malzeme olmuştur. Üç yöntemde de (AHP-CoCoSo, AHP-COPRAS ve AHP-WASPAS), PP ilk sırayı almıştır. Bunun arkasındaki en önemli neden ise çevresel etki özelliklerinde diğer termoplastikler ile kıyaslandığında daha uygun sonuçlar vermesidir. Örneğin, su ayak izi kriterindeki en düşük değere sahip olması buna ek olarak gömülü enerji ile karbon ayak izinde ise en düşük değerlere sahip ikinci termoplastik olması en önemli nedenlerdir. Bunlara ek olarak; Young modülü, maksimum sıcaklık ve uzama yüzdesinde PTFE'den sonraki en başarılı ikinci termoplastik malzeme olması onu 3 farklı ÇKKV yaklaşımında neden birinci malzeme olduğunun en büyük ispatıdır.

Young modülü, maksimum sıcaklık ve de uzama yüzdesinde PP'den daha iyi değerler vermesine rağmen PTFE 3 farklı ÇKKV yaklaşımında da kendisine 5. Sırada yer bulmuştur. Bunun arkasındaki en önemli etken ise çevresel etki özelliklerinde göstermiş olduğu kötü performansdır. Su ayak izinde en yüksek değeri (455 L/kg) göstermekle birlikte, gömülü enerji (115 MJ/kg) ve de karbon ayak izinde (6 kg/kg) de çok yüksek değerler gösterdiği için 5. sırada yer almıştır.

Diğer bir dikkat çeken termoplastik ise PVC'dir. PVC, AHP-COPRAS ve de AHP-WASPAS yöntemlerinde 2. sırada yer alırken, AHP-CoCoSo yönteminde ise 3. sırada yer almıştır. Üst sıralarda yer almasındaki en önemli neden ise gömülü enerji (58 MJ/kg) ve de karbon ayak izindeki (2,5 kg/kg) en düşük değere sahip olmasıdır. Genel sıralamada PP'nin arkasında kalmasının nedeni ise mekanik ve fiziksel özelliklerde istenilenin uzağında olmasıdır. Örneğin, en yüksek Young modülüne sahip termoplastik PVC'dir. Buna ek olarak en düşük uzama yüzdesine ve en düşük maksimum sıcaklığa sahip malzeme olması da PP'nin gerisinde kalmasındaki en önemli nedenler arasında gösterilebilir. Son olarak diğer dikkat çeken bir özellik ise; PC'nin bütün yöntemlerde 4. sırada, PMMA'nın ise bütün yöntemlerde 6. sırada yer almasıdır.

Tablo 7. Hibrit ÇKKV yaklaşımlarıyla alternatif termoplastik malzemelerin sıralaması ve parametre değerleri.

Termoplastik	AHP-CoCoSo					AHP-COPRAS				AHP-WASPAS			
	k_a	k_b	k_c	k	Sıralama	S_{+i}	S_{-i}	Q_i	Sıralama	Q_i^1	Q_i^2	Q_i	Sıralama
ABS	0,203	4,021	0,981	2,663	2	0,022	0,125	0,645	3	0,981	0,473	0,727	3
PC	0,191	3,110	1,040	2,299	4	0,026	0,154	0,556	4	0,724	0,411	0,568	4
PMMA	0,148	2,298	1,028	1,863	6	0,014	0,158	0,500	6	0,527	0,376	0,451	6
PP	0,172	4,462	1,085	2,848	1	0,025	0,078	1,000	1	1,755	0,807	1,281	1
PVC	0,125	3,709	1,076	2,428	3	0,015	0,118	0,657	2	1,109	0,472	0,791	2
PTFE	0,162	3,008	1,045	2,203	5	0,051	0,215	0,525	5	0,542	0,402	0,472	5

**Şekil 2.** AHP-CoCoSo, AHP-COPRAS ve AHP-WASPAS yaklaşımlarından elde edilen sıralamaların karşılaştırması

Literatürde [54, 55], Spearman'ın sıralama korelasyon analizi ÇKKV yöntemlerinin birbiriyle ne kadar yakın sonuçlar ürettiğini tespit etmek için yapılmaktadır. Bu çalışmadaki AHP temelli üç farklı ÇKKV yaklaşımlarının ürettikleri sıralamaların yakınlıklarını analiz etmek için Spearman'ın sıralama korelasyon katsayıları hesaplanmış ve Tablo 8'de verilmiştir. Tüm yaklaşımların birbirleriyle olan korelasyon katsayıları 0,90 değerinden daha yüksek olarak bulunmuştur. Hatta, AHP temelli COPRAS ve WASPAS yöntemleri birbirlerinin benzeri sonuçlar üretmiştir.

Tablo 8. Spearman'ın sıralama korelasyon katsayı değerleri.

	AHP-CoCoSo	AHP-COPRAS	AHP-WASPAS
AHP-CoCoSo	1,0000	0,9430	0,9430
AHP-COPRAS		1,0000	1,0000
AHP-WASPAS			1,0000

5. Sonuç

Yeşil ya da bir diğer adı ile sürdürülebilir malzeme seçimi kavramı, çevre koruma bilincinin topluma entegre edilmesine bir yanıt olarak geliştirilmiştir. Bu nedenle, endüstri ve akademik dünya, çevre dostu yeşil termoplastik malzemelerin rekabetçi pazarını sürdürmek için elinden geleni yapmak zorundadır. Yeşil termoplastik malzeme seçimi kavramı birçok nedenden dolayı önemlidir. Bunların başında; çevresel etki, enerji tüketimi, sağlık, güvenlik ve kurumsal sosyal sorumluluk alanları başta gelmektedir.

Çok kriterli karar verme teknikleri kullanılarak, uygun yeşil termoplastik malzemelerin seçilmesi sorunu, mekanik, fiziksel ve de çevresel etki özelliklerine göre çözülmüştür. Bu amaç doğrultusunda altı termoplastik malzemeyi güvenilir bir şekilde seçmek için üç çok kriterli karar verme (ÇKKV) metodolojisi kullanılmıştır. Bunlar sırası ile AHP-CoCoSo, AHP-COPRAS ve AHP-WASPAS'dır. Elde edilen sonuçlar neticesinde, hibrit ÇKKV teknikleri ile sıralamalarda çok büyük benzerlikler olduğunu ortaya konmuştur. En ideal termoplastik 3 farklı yöntemde de PP olarak belirlenmiştir. Onu PVC ve de ABS takip etmektedir. Çalışmadaki en dikkat çeken sonuç AHP-CoCoSo, AHP-

COPRAS ve AHP-WASPAS yöntemlerinin neredeyse aynı sonucu vermeleridir. Sadece, ABS ve PVC için çok küçük bir farklılık söz konusu olmuştur. ABS, AHP-COPRAS ve AHP-WASPAS yöntemlerinde 3. sıradayken AHP-CoCoSo'da 2. olmuştur. PVC ise AHP-COPRAS ve AHP-WASPAS yöntemlerinde 2. Sıradayken AHP-CoCoSo'da 3. olmuştur.

Mevcut çalışmanın en bariz sınırı, belirli sayıda termoplastik malzemenin dikkate alınmış olmasıdır. Sadece piyasada en çok kullanılan 6 termoplastik malzeme seçilmiştir. Bu çalışmada kullanılan termoplastiklerin sayısının gelecek çalışmalar açısından artırılması düşünülebilir. Buna ek olarak, değerlendirme kriterleri ise 9 alt kriter ile sınırlandırılmıştır. Çalışmanın kapsamı, mevcut mekanik, fiziksel ve çevresel etki özellikleri gibi seçim parametrelerine ilave özellikler eklenerek daha da genişletilebilir. Ayrıca, mevcut çalışmada, ileride yapılacak araştırmaların kapsamı olarak düşünülebilecek olan malzeme seçimine karar vermede var olan belirsizlik hariç tutulmuştur.

Bu araştırma, yeşil üretim için uygun termoplastik malzeme seçimi probleminin üstesinden gelmek için entegre bir hibrit çok kriterli karar verme yaklaşımını tanıtmıştır. Malzeme seçim sırasını desteklemek için başvuru literatüre dayalı çalışmalar, bunların gerçek yeşil üretim süreçlerinde kullanılmasının pratik olacağını gösterebilmiştir. Önerilen stratejinin mantığı ve güvenilirliği mevcut yaklaşımla karşılaştırılarak gösterilmiştir. Yaklaşımın verimliliği ve basitliği, onu daha geniş bir malzeme seçimi yelpazesine uygulanabilir kılmaktadır. Yeşil imalat için malzeme ve de özellikle termoplastik malzeme seçmek isteyen yeni araştırmacılara fayda sağlayacaktır. Çalışma, yeşil üretim için malzeme seçim sürecinde yaşanan zaman ve iş gücü kayıplarını azaltarak imalat ve akademik sektörlerdeki temsilcilere çok önemli yararlar sağlayacaktır.

Kaynakça

- [1] Dornfeld, D. A. (Ed.). 2012. Green manufacturing: fundamentals and applications. Springer Science & Business Media.
- [2] Sezen, B., Cankaya, S. Y. 2013. Effects of green manufacturing and eco-innovation on sustainability performance. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 99, 154-163.
- [3] Rusinko, C. 2007. Green manufacturing: an evaluation of environmentally sustainable manufacturing practices and their impact on competitive outcomes. *IEEE transactions on engineering management*, 54(3), 445-454.
- [4] Emovon, I., Ogheniyerovwho, O. S. 2020. Application of MCDM Method in Material Selection for Optimal Design: A Review. *Results in Materials*, 7, 100115.
- [5] Biron, M. 2018. Thermoplastics and Thermoplastic Composites. 3rd edition. William Andrew, 1143s.
- [6] Larson, E. R. 2015. Introduction. ss 1-18. *Thermoplastic Material Selection*, Elsevier Science & Technology Books, USA, 364s.
- [7] Grigore, M. E. . 2017. Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers. *Recycling*, 2(4), 24.
- [8] Larson, E. R. 2015. Why Use Plastic?. ss 19-56. *Thermoplastic Material Selection*, Elsevier Science & Technology Books, USA, 364s.
- [9] Zhang, H., Peng, Y., Tian, G., Wang, D., Xie, P. 2017. Green Material Selection for Sustainability: A Hybrid MCDM Approach. *PLoS One*, 12(5), e0177578.
- [10] Remadi, F. D., Frikha, H. M. 2020. The Triangular Intuitionistic Fuzzy Extension of the CODAS Method for Solving Multi-Criteria Group Decision Making. 2020 International Multi-Conference on: Organization of Knowledge and Advanced Technologies, 6-8 February, Tunisia.
- [11] Akadiri, P. O., Olomolaiye, P. O., Chinyio, E. A. 2013. Multi-Criteria Evaluation Model for the Selection of Sustainable Materials for Building Projects. *Automation in Construction*, 30, 113-125.
- [12] Govindan, K., Madan Shankar, K., Kannan, D. 2016. Sustainable Material Selection for Construction Industry - A Hybrid Multi Criteria Decision Making Approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 1274-1288.
- [13] Khoshnava, S. M., Rostami, R., Valipour, A., Ismail, M., Rahmat, A. R. 2018. Rank of Green Building Material Criteria Based on the Three Pillars of Sustainability Using the Hybrid Multi Criteria Decision Making Method. *Journal of Cleaner Production*, 173, 82-99.

- [14] Ghorabae, M. K., Amiri, M., Zavadskas, E. K., Hooshmand, R., Antuchevičienė, J. 2017. Fuzzy Extension of the CODAS Method for Multi-Criteria Market Segment Evaluation. *Journal of Business Economics and Management*, 18(1), 1-19.
- [15] Mon, D. L., Cheng, C. H., Lin, J. C. 1994. Evaluating Weapon System Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process Based on Entropy Weight. *Fuzzy Sets and Systems*, 62(2), 127-134.
- [16] Höfer, T., Sunak, Y., Siddique, H., Madlener, R. 2016. Wind Farm Siting Using a Spatial Analytic Hierarchy Process Approach: A Case Study of the Städteregion Aachen. *Applied Energy*, 163, 222-243.
- [17] Yang, K., Zhu, N., Chang, C., Wang, D., Yang, S., Ma, S. 2018. A Methodological Concept for Phase Change Material Selection Based on Multi-Criteria Decision Making (MCDM): A Case Study. *Energy*, 165, 1085-1096.
- [18] Thokala, P., Devlin, N., Marsh, K., Baltussen, R., Boysen, M., Kalo, Z., Longrenn, T., Mussen, F. Peacock, S., PharmD, J. W., Ijzerman, M. 2016. Multiple Criteria Decision Analysis for Health Care Decision Making - An Introduction: Report 1 of the ISPOR MCDA Emerging Good Practices Task Force. *Value in Health*, 19(1), 1-13.
- [19] Xu, H., Romagnoli, A., Sze, J. Y., Py, X. 2017. Application of Material Assessment Methodology in Latent Heat Thermal Energy Storage for Waste Heat Recovery. *Applied Energy*, 187, 281-290.
- [20] Saaty, T. L. 2008. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*, 1, 83-98.
- [21] Sánchez-Lozano, J. M., García-Cascales, M. S., Lamata, M. T. 2016. GIS-Based Onshore Wind Farm Site Selection Using Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Methods. Evaluating the Case of Southeastern Spain. *Applied Energy*, 171, 86-102.
- [22] Riabacke, M., Danielson, M., Ekenberg, L. 2012. State-of-the-Art Prescriptive Criteria Weight Elicitation. *Advances in Decision Sciences*, 2012, 276584.
- [23] Ecer, F., Pamucar, D. 2020. Sustainable Supplier Selection: A Novel Integrated Fuzzy Best Worst Method (FBWM) and Fuzzy CoCoSo with Bonferroni (CoCoSo'B) Multi-Criteria Model. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121981.
- [24] Yazdani, M., Wen, Z., Liao, H., Banaitis, A., Turskis, Z. 2019. A Grey Combined Compromise Solution (CoCoSo-G) Method for Supplier Selection in Construction Management. *Journal of Civil Engineering and Management*, 25(8), 858-874.
- [25] Yazdani, M., Zarate, P., Kazimieras Zavadskas, E., Turskis, Z. 2019. A Combined Compromise Solution (CoCoSo) Method for Multi-Criteria Decision-Making Problems. *Management Decision*, 57(9), 2501-2519.
- [26] Zelany, M. 1974. A Concept of Compromise Solutions and the Method of the Displaced Ideal. *Computers & Operations Research*, 1(3-4), 479-496.
- [27] Xu, Z. 2012. Intuitionistic Fuzzy Multiattribute Decision Making: An Interactive Method. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 20(3), 514-525.
- [28] Asgharnia, A., Schwartz, H., Atia, M. 2023. Multi-Objective Fuzzy Q-Learning to Solve Continuous State-Action Problems. *Neurocomputing*, 516, 115-132.
- [29] Alinezhad, A., Khalili, J. 2019. New methods and applications in multiple attribute decision making (MADM). ss 87-98. Springer Nature, Switzerland, 233s.
- [30] Keshavarz Ghorabae, M., Amiri, M., Salehi Sadaghiani, J., Hassani Goodarzi, G. 2014. Multiple Criteria Group Decision-Making for Supplier Selection Based on COPRAS Method with Interval Type-2 Fuzzy Sets. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(5-8), 1115-1130.
- [31] Kazimieras Zavadskas, E., Kaklauskas, A., Peldschus, F., Turskis, Z. 2007. Multi-Attribute Assessment of Road Design Solutions by Using the Copras Method. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2(4), 195-203.
- [32] Chauvy, R., Lepore, R., Fortemps, P., De Weireld, G. 2020. Comparison of Multi-Criteria Decision-Analysis Methods for Selecting Carbon Dioxide Utilization Products. *Sustainable Production and Consumption*, 24, 194-210.
- [33] Keshavarz Ghorabae, M., Zavadskas, E. K., Amiri, M., Esmaili, A. 2016. Multi-Criteria Evaluation of Green Suppliers Using an Extended WASPAS Method with Interval Type-2 Fuzzy Sets. *Journal of Cleaner Production*, 137, 213-229.
- [34] Chakraborty, S., Zavadskas, E. K. 2014. Applications of WASPAS Method in Manufacturing Decision Making. *Informatica*, 25(1), 1-20.

- [35] Peterson, A. M. 2019. Review of Acrylonitrile Butadiene Styrene in Fused Filament Fabrication: A Plastics Engineering-Focused Perspective. *Additive Manufacturing*, 27, 363-371.
- [36] Larson, E. R. 2015. An Overview of Thermoplastic Materials. ss 97-143. *Thermoplastic Material Selection*. Elsevier Science & Technology Books, USA, 364s.
- [37] Ogończyk, D., Wgrzyn, J., Jankowski, P., Dąbrowski, B., Garstecki, P. 2010. Bonding of Microfluidic Devices Fabricated in Polycarbonate. *Lab on a Chip*, 10, 1324-1327.
- [38] Liga, A., Morton, J. A. S., Kersaudy-Kerhoas, M. 2016. Safe and Cost-Effective Rapid-Prototyping of Multilayer PMMA Microfluidic Devices. *Microfluidics and Nanofluidics*, 20(12), 164.
- [39] Der, O., Marengo, M., Bertola, V. 2019. Thermal Performance of Pulsating Heat Stripes Built with Plastic Materials. *Journal of Heat Transfer*, 141(9), 091808.
- [40] Hamedi, M. M., Ünal, B., Kerr, E., Glavan, A. C., Fernandez-Abedul, M. T., Whitesides, G. M. 2016. Coated and Uncoated Cellophane as Materials for Microplates and Open-Channel Microfluidics Devices. *Lab on a Chip*, 16, 3885-3897.
- [41] Rowe, D. J., Porch, A., Barrow, D. A., Allender, C. J. 2012. Microfluidic Device for Compositional Analysis of Solvent Systems at Microwave Frequencies. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 169, 213-221.
- [42] Tarannum F., Muthaiah, R., Annam, R. S., Gu, T., Garg, J. 2020. Effect of Alignment on Enhancement of Thermal Conductivity of Polyethylene-Graphene Nanocomposites and Comparison with Effective Medium Theory. *Nanomaterials*, 10(7), 1291.
- [43] Chae, H. G., Kumar, S. 2008. Making Strong Fibers. *Science*, 319(5865), 908-909.
- [44] Kalpakajian, S. 2001. Manufacturing Engineering and Technology. *Journal of Emerging Technologies in Engineering Research*, 3(2).
- [45] Rodrigues, R. O., Lima, R., Gomes, H. T., Silva, A. M. T. 2015. Polymer Microfluidic Devices: An Overview of Fabrication Methods. *U.Porto Journal of Engineering*, 1(1), 67-79.
- [46] Callister, W. D. 1991. *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 2nd edition, John Wiley & Sons, New York, 871s.
- [47] Gupta, D., Gaur, S. K. 2019. Carbon and Biofuel Footprinting of Global Production of Biofuels. Verma, D., Fortunati, E., Jain, S., Zhang, X, ed. 2019. *Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy: Construction, Biomedical, and Other Industrial Applications*, Woodhead Publishing, UK, 558s.
- [48] Plassmann, K., Edwards-Jones, G. 2010. Carbon Footprinting and Carbon Labelling of Food Products. ss 272-296. Sonesson, U., Berlin, J., Ziegler, F., ed. 2010. *Environmental Assessment and Management in the Food Industry*, Woodhead Publishing, UK, 432s.
- [49] Buonomano, A., Barone, G., Forzano, C. 2022. Advanced Energy Technologies, Methods, and Policies to Support the Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. *Energy Reports*, 8, 4844-4853.
- [50] Maine, E., Ashby, M. F. 1994. *Materials Selection in Mechanical Design*. ss 5230-5236. Jürgen Buschow, K. H., Flemings, M. C., Kramer, E. J., Veysi ere, P., Cahn, R. W., Ilschner, B., Mahajan, S., ed. 1994. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Pergamon.
- [51] Arora, N. K., Mishra, I. 2022. Progress of Sustainable Development Goal 7: Clean and Green Energy for All as the Biggest Challenge to Combat Climate Crisis. *Environmental Sustainability*, 5(4), 395-399.
- [52] Desole, M. P., Aversa, C., Barletta, M., Gisario, A., Vosooghnia, A. 2022. Life Cycle Assessment (LCA) of PET and PLA Bottles for the Packaging of Fresh Pasteurised Milk: The Role of the Manufacturing Process and the Disposal Scenario. *Packaging Technology and Science*, 35(2), 135-152.
- [53] Bontempi, E. 2017. A New Approach for Evaluating the Sustainability of Raw Materials Substitution Based on Embodied Energy and the CO₂ Footprint. *Journal of Cleaner Production*, 162, 162-169.
- [54] Grgen, S.,  akır, F. H., Sofuođlu, M. A., Orak, S., Kuşhan, M. C., Li, H. 2019. Multi-Criteria Decision-Making Analysis of Different Non-Traditional Machining Operations of Ti6Al4V. *Soft Computing*, 23, 5259-5272.
- [55] Kalita, K., Madhu, S., Ramachandran, M., Chakraborty, S., Ghadai, R. K. 2023. Experimental Investigation and Parametric Optimization of a Milling Process Using Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Analysis. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 17(1), 453-467.

Öndeki Aracın Akışına Maruz Kalan Otobüsün Üzerinde Oluşan Aerodinamik Etkinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Mustafa Özden*^{1,2}, Kemal Koca^{1,3}

¹ Rüzgâr Mühendisliği ve Aerodinamik Araştırma Grubu, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, 38039, Kayseri, Türkiye

² Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi, Erciyes Üniversitesi, 38039, Kayseri, Türkiye

³ Makine Mühendisliği Bölümü, Abdullah Gül Üniversitesi, 38080, Kayseri, Türkiye

(Alınış / Received: 22.12.2022, Kabul / Accepted: 01.03.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 02.05.2023)

Anahtar Kelimeler

Otobüs konvoyu,
Karşıdan esen rüzgâr,
Sollama,
HAD

Öz: Bu çalışmada, konvoy konumunda bulunan otobüslerin farklı hızlarda karşıdan esen rüzgâra maruz kaldıklarında aerodinamik özellikleri sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal girişim olarak ticari FloEFD yazılımının eğitim versiyonu kullanılmıştır. Sayısal simülasyon sonucunda hız, türbülanslı enerji dağılım konturları ve sürüklenme katsayısı (C_D) grafiği elde edilmiştir. Akış görselleştirmeleri olarak, hız ve türbülanslı enerji dağılım konturları, karşıdan gelen rüzgârın ilk otobüsün ön kısmında daha yüksek basınca sahip olmasına neden olduğunu açıkça gösterdi. Ayrıca birinci otobüsün kenarlarında akış ayrılmaları ve girdap yapıları gözlemlenmiştir. Otobüs hızı arttıkça bu akış yapılarının etkileri ve boyutları artmıştır. Bir süre sonra birinci otobüse ait akış ayrımına neden olan girdapların sollamaya çalışan ikinci otobüse çarptığı görülmüştür. Akabinde, C_D grafiği açıkça göstermiştir ki, birinci otobüsün girdaplar tarafından indüklenen akış ayrımı, ikinci otobüsün birinci otobüsü geçmeye çalışırken sürüklenme katsayısının yaklaşık %3 artmasına neden olmuştur.

Numerical Investigation of the Aerodynamic Effect on the Bus Exposed to the Flow of the Front Vehicle

Keywords

Bus convoy,
Headwind,
Overtaking,
CFD

Abstract:

In this study, the aerodynamic characteristics of buses which were convoy position were numerically investigated at different speeds when they were exposed to headwind. As the numerical attempt, the commercial FloEFD software with education version was utilized. Velocity, turbulent energy dissipation contours as well as drag coefficient (C_D) graph were provided as the result of numerical simulation. As the flow visualizations, velocity and turbulent energy dissipation contours clearly pointed out that headwind caused the front part of the first bus to have higher pressure. Additionally, flow separations and vortex structures were observed at the sides of the first bus. The effects and size of these flow structures increased when bus speed increased. After a while, it was observed that the vortices induced flow separation belonging to first bus hit the second bus which was trying to overtake. In what follows, C_D graph obviously indicated that the vortices induced flow separation of first bus caused the drag coefficient of the second bus to boost approximately 3% when it was trying to overtake the first bus.

*İlgili Yazar, email: mustafaozden@erciyes.edu.tr

1. Giriş

Son yıllarda, karayolu trafiği yıllar içinde sürekli olarak artmaktadır. Örneğin, Ülke içinde yolcu taşımacılığının %95,2'si karayoluyla yapılmaktadır. Bu oran ABD'de %89 AB ülkelerinde ise %79 oranlarında seyretmektedir. Yük taşımacılığı alanında karayolu kullanım oranı ülkemizde %76,1 civarındadır. Bu oran ABD'de %69,5, AB ülkelerinde ise yaklaşık %45'tir [1]. Kirletici emisyonların etkinin baskın olmaya başlaması nedeniyle artan trafik talebi ve buna bağlı olarak ortaya çıkan çevre sorunu ile başa çıkmak için taşıt grubu kavramı uzun zamandır potansiyel bir çözüm olarak önerilmiştir [2]. Bu çalışmada incelenen araç grubu kavramı ile ilgili olarak, birkaç aracın düzenli bir şekilde koordineli bir şekilde hareket ettiği, önde gelen bir araca sahip olduğu ve eylemi diğer araçların takip ettiği eylemdir. Bu yüzden, bazen konvoy halinde seyahat eden araçlar olarak adlandırılan araç grubu kavramına ilgi giderek arttı ve araç yakıt tüketimini azaltmak, ayrıca çevreci hareketlilik hareketlerini desteklemek için bir strateji haline geldi [3]. Bu durum da taşıt grubu aerodinamiği ile ilgili çalışmalarının artmasına sebep olmuştur [4-10]. Aerodinamik açıdan ifade etmek gerekirse bir araç üzerindeki sürüklenme kuvvetinin azalması, genel araç direncinde bir azalmaya yol açar. Böylece, motorun daha az güç gerektirmesi ve dolayısıyla daha az yakıt tüketimi nedeniyle bir aracın yakıt verimliliği iyileştirilir [11]. Bu durum ise çevre kirliliğinin azaltılmasını destekleyen çevresel faydaların oluşmasını sağlamaktadır. Bir taşıt grubundaki bir aracın azalan yakıt tüketiminin, öncelikle bir taşıt konvoyu konfigürasyonunun sürtünme azaltma faydalarından kaynaklandığı incelenmiştir. Bir takım araştırmacı araçlar arasındaki mesafeyi detaylı şekilde incelemiştir. Kaluva ve diğerleri [12] hesaplamalı akışkanlar dinamiğini (HAD) kullanarak araçlar arası mesafenin, konvoy boyutunun ve araç hızının bir konvoydaki araçların sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisini incelemiştir. Sayısal analizin sonuçları konvoydaki araç sayısına bağlı olarak 1 m'lik araçlar arası mesafede konvoyun ortalama sürüklenme katsayısında %24'e varan bir azalma olduğunu gösterdi. Arka kısmı kare şekline sahip araçların bir yol üzerinde konvoy oluşturmasını durumunu Bruneau ve diğerleri sayısal olarak incelenmiştir [13]. Onların sayısal sonuçları öndeki aracın gövdesi kalkan görevi gördüğünü ve bu nedenle sonraki aracın tamamen farklı akış koşullarıyla yüzleştiğini ortaya çıkarmıştır. Bazı araştırmacılar ise bir konvoyda seyahat eden bir aracın dış gövde şeklinin etkisini araştırmak için çalışmalar yapmışlardır [14-16]. Bir aracın dış gövdesinin şekli, havanın gövde kısmından nasıl aktığını da belirleyerek araç çevresinde farklı aerodinamik akış davranışı oluşturur. Araçların arka kısmı, Araç gövdesinin arkasındaki iz oluşumunda araçların arka kısmı daha fazla belirleyici olduğu için araçların arka kısmını incelemek önemli olabilir. Bu çalışmanın yapılmasının sebebi araçların yan rüzgarlar da dahil olmak üzere belirsiz çevre koşullarında seyahat ediyor olmasıdır. Maalesef, Bir araca uygulanan yanal hava akımı bileşeni yanal kuvveti artırır ve bu durum ise aracın dengesini ve güvenliğini önemli derecede etkilemektedir [17]. Bu etki, büyük bir araç için daha savunmasız hale gelir. Kamyon [18-20] ve tren [21, 22] gibi büyük kara taşıtlarında yan rüzgârın etkisini değerlendirmek için bazı çalışmalar yapılmıştır. Yan rüzgâra maruz kalan bir aracın aerodinamik davranışına ilişkin temel kavram, bazı araştırmacılar tarafından bir referans veya jenerik model kullanılarak da incelenmiştir [23-25]. Bunlar haricinde, trafik nedeniyle oluşan kirletici emisyonlarının aerodinamik etkiyle binalar etrafındaki hava hareketlerini de etkilediği çeşitli çalışmalarda araştırmacılar tarafından gösterilmiştir [26-29]. Demir [30] bu etkileri ise farklı türbülans modelleri kullanarak detaylı bir şekilde incelemiştir. Bu araştırmacıların genel sonuçlar, bir kara aracına uygulanan yan rüzgârın yanal rüzgâr bileşenini etkileyerek yan kuvvet katsayısının ve stabilitenin yükselmesine yol açtığını göstermiştir. Ortaya çıkan iz bölgesi, aracın gövde şeklinin bazı kısımlarında da artmıştır. Ayrıca, yan rüzgârın, seyahat eden karayolu araçlarının aerodinamik faydalarının dikkatini dağıtmada önemli bir rol oynadığını gösterdi.

Ancak, daha önce bahsedilen çalışmaların, konvoy konfigürasyonunda seyahat eden bir grup büyük araçta yan rüzgâr etkisinin önemini kapsamlı bir şekilde araştırmadığı görülmüştür. Bu çalışma, konvoy konfigürasyonunda olan iki büyük otobüsün birbirine olan aerodinamik tepkisini araştırmayı amaçlamaktadır. Bu çalışma özellikle konvoy konfigürasyonuna sahip iki büyük otobüsten arkada bulunan otobüsün öncedekini sollama esnasında yaratacağı aerodinamik olayları detaylı bir şekilde incelemiştir.

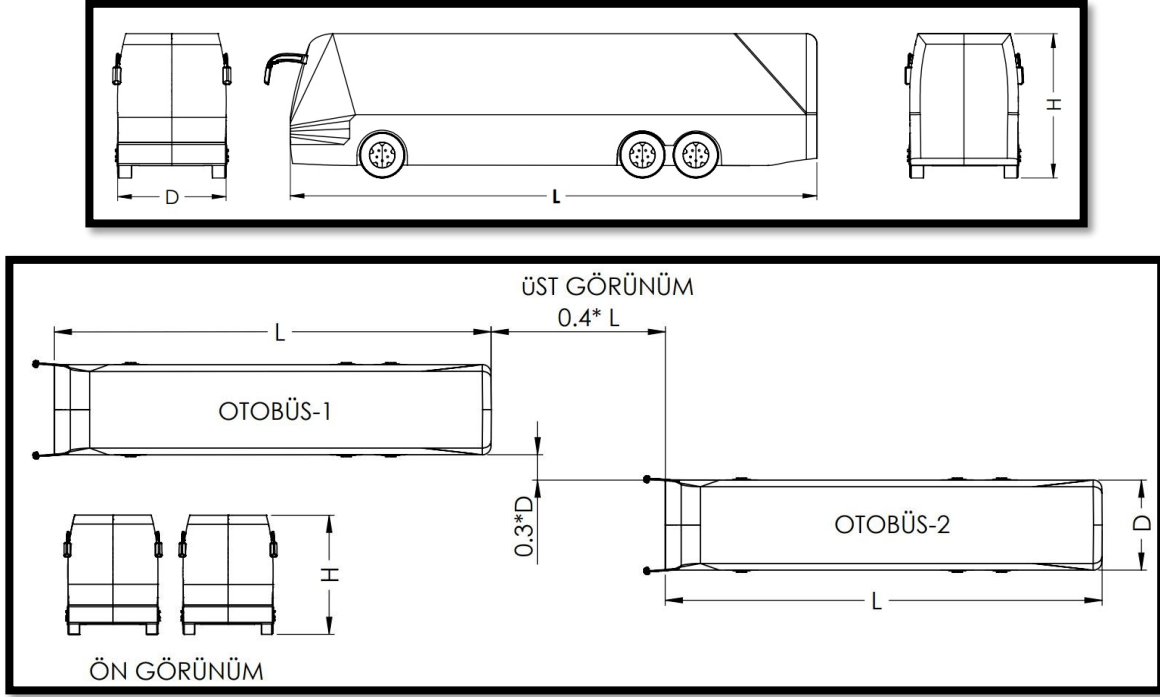
2. Materyal ve Metot

Çalışmanın bu kısmında konvoy halindeki iki büyük otobüsün birbirine olan aerodinamik tepkisini araştırmak için kullanılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ve model geometrileri detaylı olarak anlatılacaktır.

2.1. Sayısal model

Bu çalışmada simülasyon geometrilerinin ölçüleri Şekil 1'deki gibi gösterilmiştir. D ile gösterilen bir otobüs için iki teker arası mesafe, L ile belirtilen otobüsün boyu ve H ile gösterilen ise otobüsün yüksekliğini ifade etmektedir.

Bu uzunluklar gerçek bir otobüse ait uzunluklar olup sırasıyla $D= 2500$ mm, $L= 12500$ mm ve $H= 3400$ mm'dir. Bu uzunluklar haricinde iki otobüs arası yatay uzunluk $0.4*L$ ile gösterilirken dikey uzunluk ise $0.3*D$ ile ifade edilmiştir.



Şekil 1. Otobüslerin teknik resimleri ve ölçüleri

2.2. Sayısal yöntem

Sayısal yöntemlerde çözümün hassasiyetini belirleyen en önemli faktörlerden biri ağ yapısıdır. Ağ yapısı hassasiyeti çözümün doğruluğunda doğrudan rol oynamaktadır. Ansys, Cradle, Comsol gibi ticari yazılımlarda ağ yapısının oluşturulması kullanıcı tanımlamalarına özeldir. Yani kullanıcılar ne kadar tecrübeli ve bilgi sahibi ise o kadar iyi ağ yapısı oluşturmaktadırlar fakat HAD yazılımlarının ticari (sanayi uygulamaları) kullanımlarında firmalar bu bilgi ve tecrübeye sahip olmamaları nedeni ile problemler yaşamaktadırlar. Bu neden bir çok yazılım firmalarında mevcut fakat atıl durumda kullanılmayı beklemektedir. FloEFD yazılımında ise ağ yapısı kısmını program kendi içerisindeki algoritma ile düzenlemekte ve ağdan nerede ise bağımsız sonuçlar elde etmektedir. Ayrıca HAD yazılımı kullanıcılarının çözüm yapmadan önce geometriyi analiz için hazırlamaları gerekmektedir. Bu hazırlıklar bazı problemler için günler sürmektedir. FloEFD yazılımında ise geometri düzenlemeye gerek kalmaksızın analizler gerçekleştirilebilmektedir. Programın sonuçları literatürde diğer yazılımlar ve deneysel sonuçlar ile kıyaslanmakta ve kabul edilebilir sonuçlar elde edilmektedir. Türbülans modeli olarak $k-\epsilon$ seçilmiştir. Program içerisinde diğer HAD yazılımlarında da bulunan standart $k-\epsilon$ modeli üzerine, deneysel veriler ile düzenlemeler yapılması sonucunda programa özel ayrı bir model oluşturulmuştur. Sınır şartları olarak akış alanı; dış akış tanımlaması, araçların tekerlerinin temas yüzeyleri gerçek duvar olarak tanımlanmıştır. Hız vektörel olarak X yönünde her bir case için ayrı ayrı tanımlanmıştır. Şekil 2 de yazılımdan elde edilen ağ yapısı görseli sunulmuştur.



Şekil 2. Sayısal modellemedeki ağ yapısı görseli

2.3 Aerodinamik sürüklenme tanımlaması

Bu sayısal çalışmada yapılan akış analizlerinin haricinde tek ve arka arkaya olan çift otobüs etrafında meydana gelen akış olaylarının otobüsler üzerinde meydana getirdiği aerodinamik kuvvet de incelenmiştir. Bu bağlamda her iki konfigürasyona ait otobüslerin farklı hızlarına ait sürüklenme katsayısı (C_D) verileri aşağıdaki denklem yardımıyla bulunmuştur:

$$C_D = \frac{2 F_D}{\rho V^2 A} \quad (1)$$

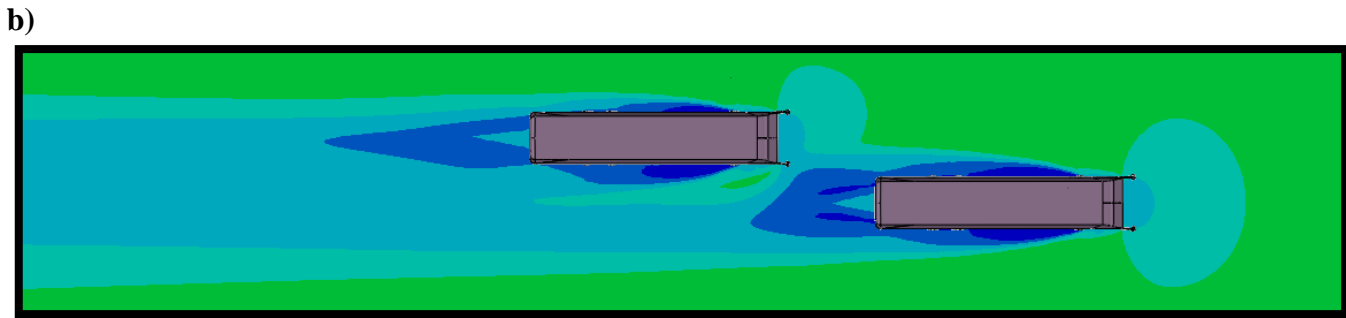
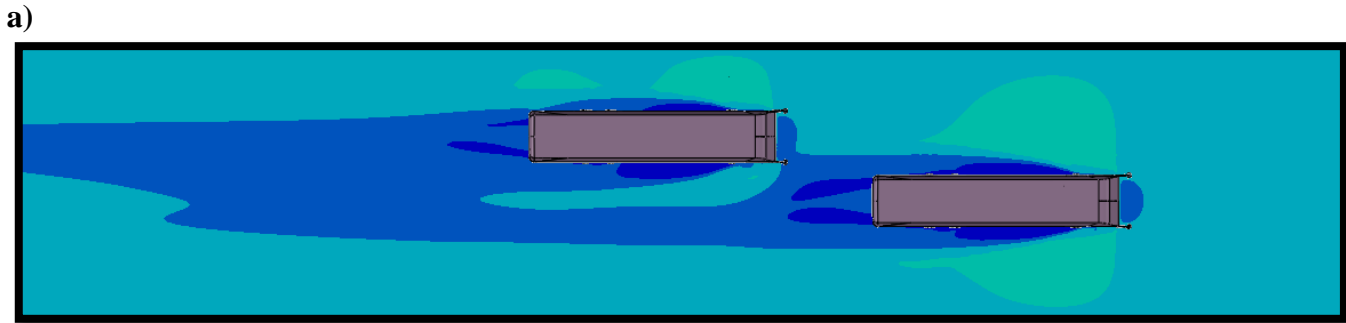
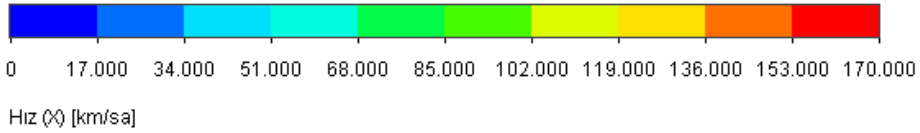
burada F_D farklı hızlardaki aerodinamik kuvveti gösterirken ρ hava yoğunluğunu, V otobüsün hızını ve A otobüsün ön taraftan bakıldığında iz düşüm alanını ifade etmektedir. Burada yoğunluk 1.25 m/s^2 ve alan ise 8.5 m^2 'dir. Analizler 5 farklı hız (50,70,100,120,150 km/s) değerinde gerçekleştirilmiştir.

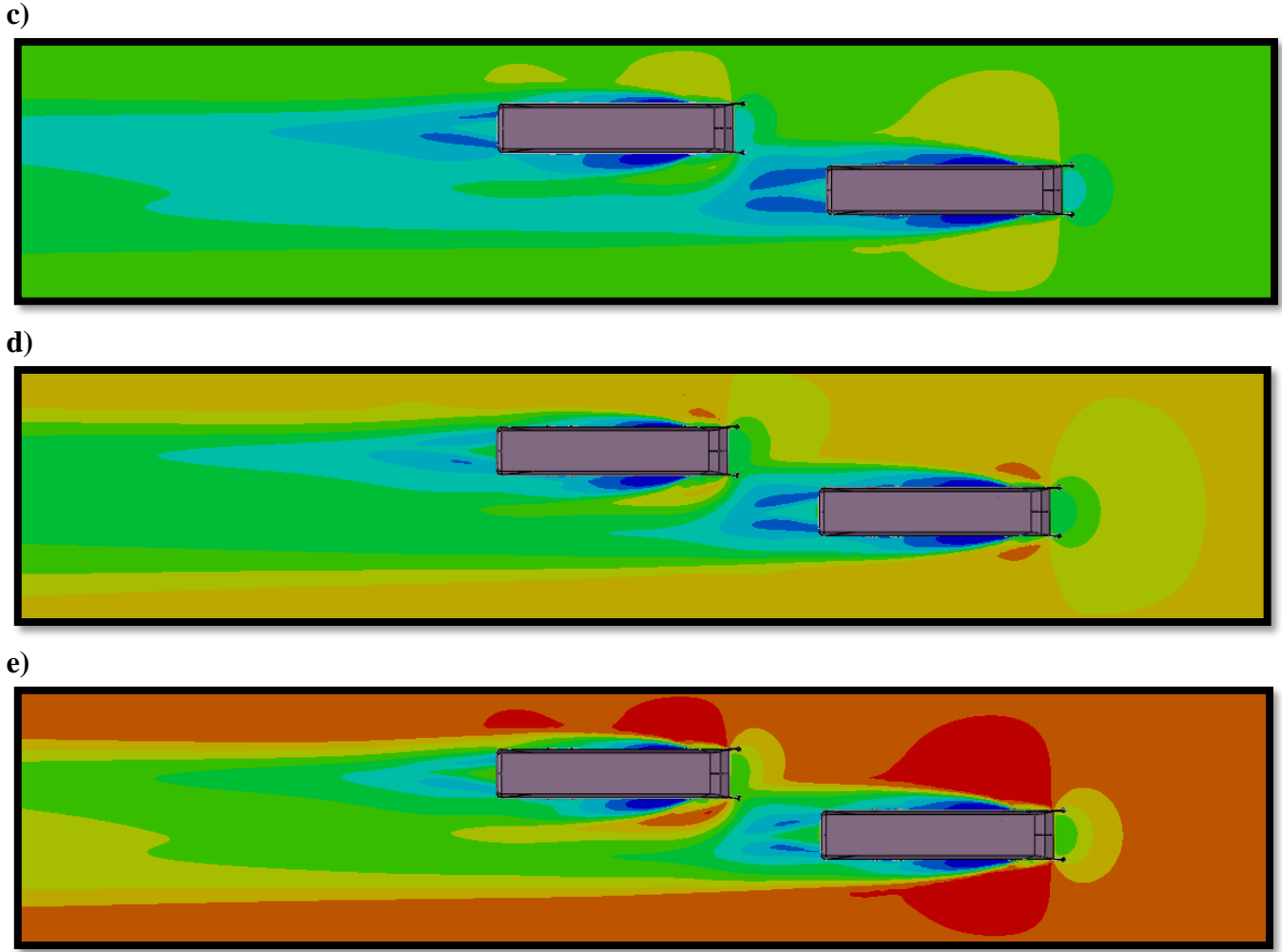
3. Bulgular

Çalışmanın bu bölümünde konvoy halindeki otobüslerin sayısal simülasyonundan elde edilen hız grafileri, türbülans dağılım kontörleri ve otobüslere ait sürüklenme katsayıları sonuçları tartışılacaktır. Ayrıca, otobüslere ait üç boyutlu kontör çizimleri oluşturularak otobüslerin ön ve arka kısmında meydana gelen akış yapılarını daha iyi anlamak için akım çizgileri incelenecektir.

3.1. Hız dağılımı kontörleri

Farklı hızlarda çift otobüs konfigürasyonuna ait hız kontörleri Şekil 3 'te gösterilmiştir. 50 km/s hızında her iki otobüsünün sağ-sol yanlarında ve otobüslerin arka kısmını ifade eden iz alanlarında düşük hız bölgeleri meydana gelmiştir. Hızın 50 km/s 'ten üç kat artarak 150 km/s 'e çıkmasıyla otobüslerin yan ve iz alanlarında meydana gelen düşük hız bölgeleri azalma eğilimine girmiştir. Burada, hızın artmasıyla inert kuvvetle viskoz kuvvetlere baskın çıkarak bu düşük hız bölgelerinin azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca, araçların ön kısımları incelendiğinde özellikle baştaki otobüsün düşük hızlarda aracın ön kısmında düşük kontörler belirlenirken hızın artmasıyla bu bölgede hız giderek artmıştır. Bu durumda akışkanlar mekaniğinin konularından olan Bernoulli prensibinden hızın arttığı bölgede basıncın düşük olduğunu göstermektedir.

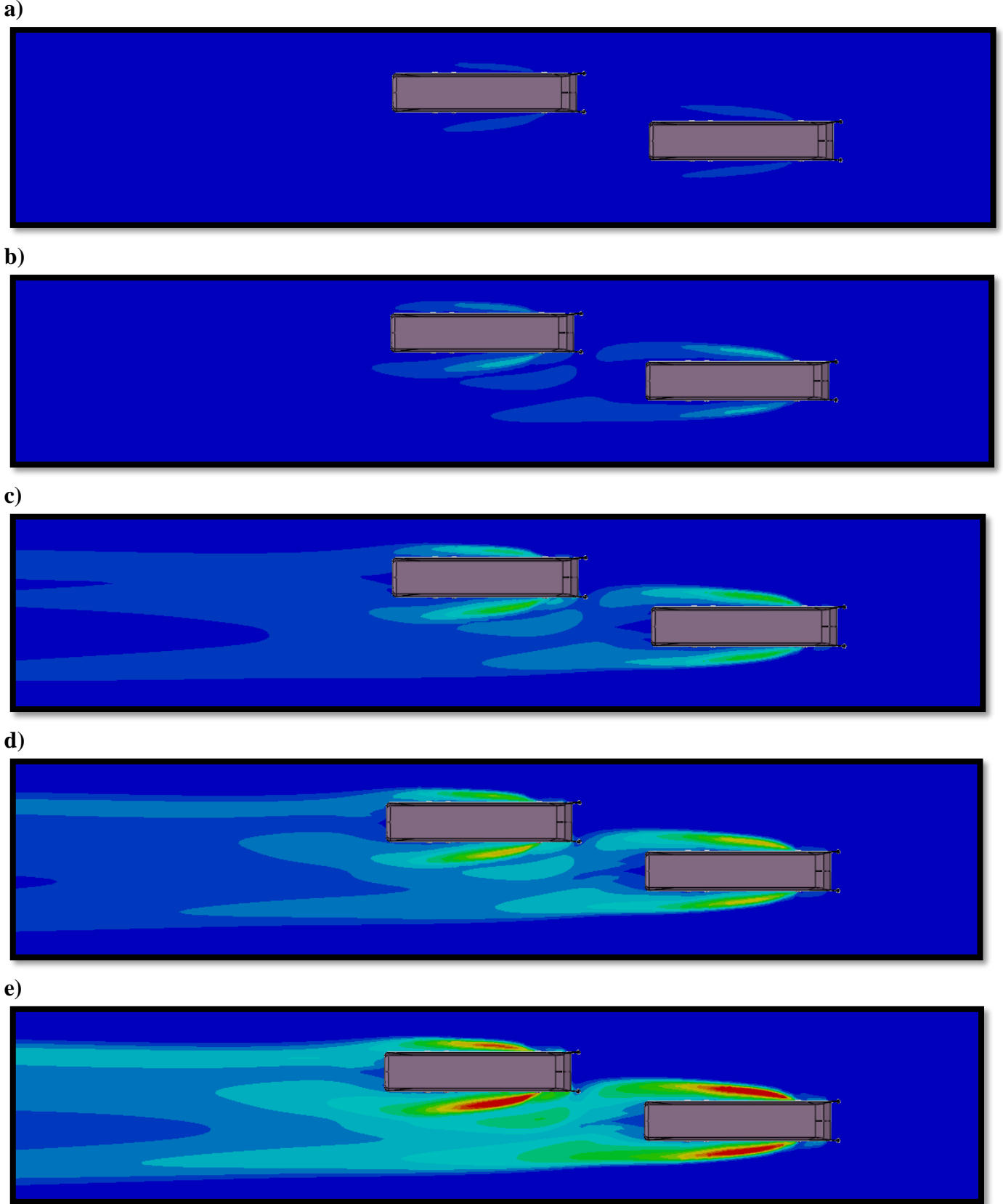
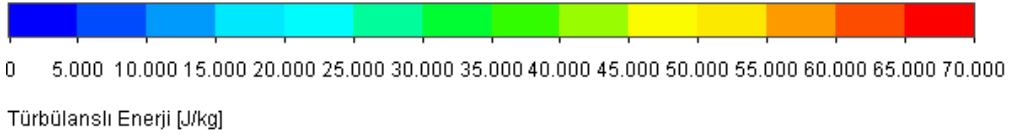




Şekil 3. Otobüslerin hız dağılım kontörleri, a) 50 km/s, b) 70 km/s, c) 100 km/s, d) 120 km/s, e) 150 km/s

3.2. Türbülans şiddeti kontörleri

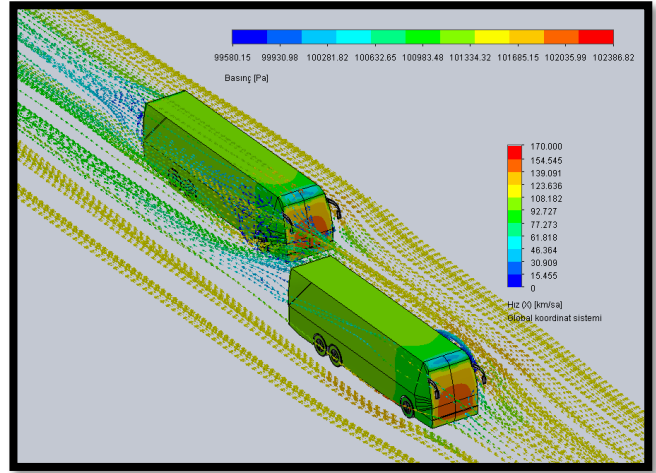
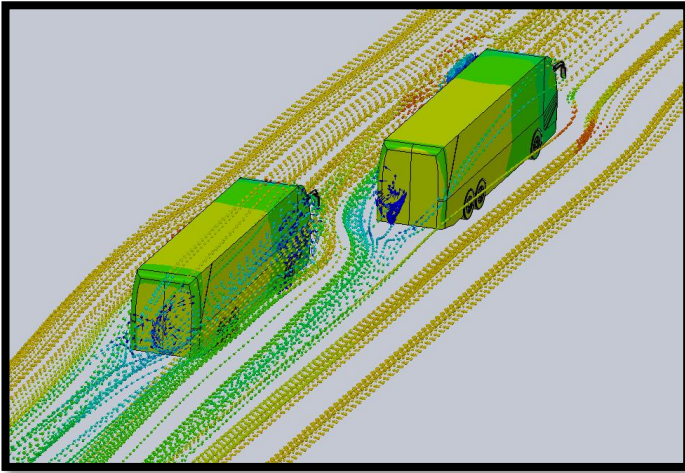
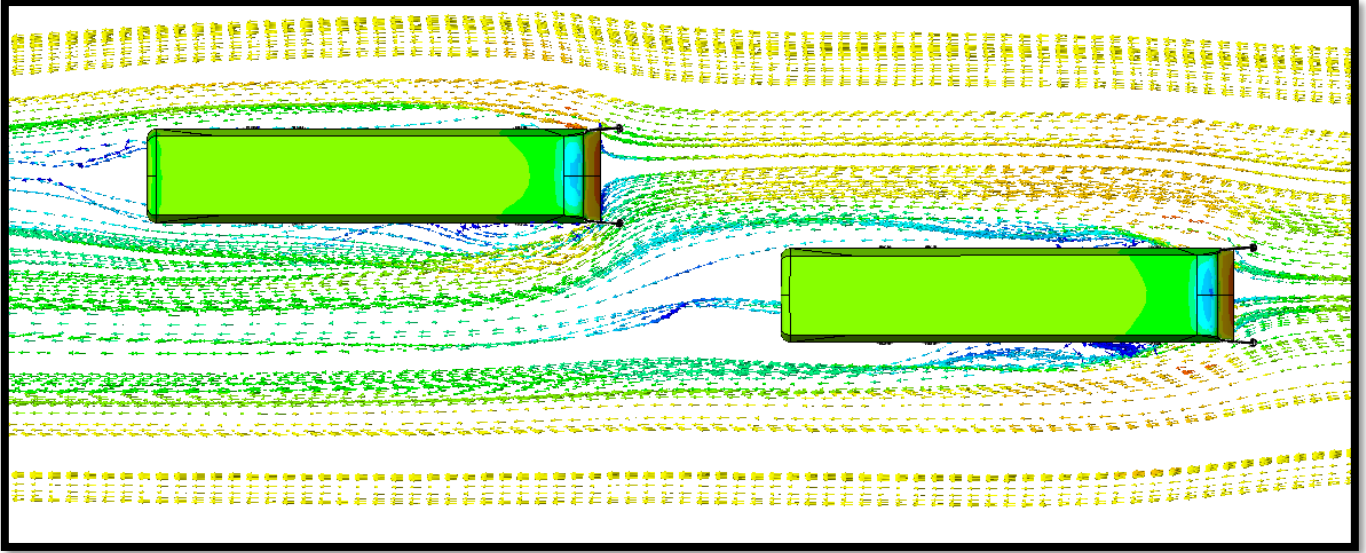
Yukarı kısımda hız kontörlerinin haricinde otobüslerin etrafında meydana gelen akış olaylarını daha iyi anlamak adına Şekil 4'te otobüslere ait türbülanslı enerji kontörleri gösterilmektedir. Bu kontörler her bir otobüsün etrafında meydana gelen akış olaylarını belirtmesinin yanında özellikle öndeki otobüsün arka taraftaki otobüs üzerine akış olarak nasıl bir etki yarattığını daha iyi açıklamaktadır. 50 km/s kontörü incelendiğinde nispeten düşük hız olduğu için otobüslerin etrafındaki açık mavi rengin daha az olduğu görülmektedir. Ancak, hızın artmasıyla bu açık mavi renkler bariz bir şekilde artış göstermiştir. Bu açık mavi renklerin oluşmasının sebebi otobüslerin etrafında meydana gelen akış ayrılması kaynaklı girdaplardır. Özellikle araç hızının 120 km/s ve 150 km/s olması durumlarında ön taraftaki otobüsün etrafında iz bölgesindeki kopan girdaplar arka taraftaki otobüsü açık bir şekilde etkilemektedir.



Şekil 4. Otobüslerin türbülans enerji dağılım kontörleri, a) 50 km/s, b) 70 km/s, c) 100 km/s, d) 120 km/s, e) 150 km/s

3.3. Basınç ve akım çizgileri kontörleri

Şekil 5 'te konvoy halindeki otobüslerin ön ve arka (iz) bölgelerinde meydana gelen akış olaylarını 3 boyutlu olarak görselini sunmaktadır. 3 boyutlu görselin haricinde şekillerde akışın nereden koştugu hangi bölgelerde girdaplar meydana geldiğini daha iyi anlamak içinse akım çizgileri de görsele eklenmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi ön taraftaki otobüsün akış ile karşılaştığı ilk kısmı olan ön kısmında basınç değeri en yüksek olarak hesaplanmıştır. Ön taraftaki otobüsün yan tarafında mavi ile gösterilen alan o bölge meydana gelen akış ayrılmalarını ve akış ayrılma kaynaklı girdapları göstermektedir. Bu girdapların bir kısmı öndeki otobüsün iz bölgesinde bir akış yapısı meydana getirirken diğer kısmı ise arka tarafta bulunan otobüsün ön tarafına çarpmaktadır. Arka tarafta bulunan otobüsün sağ tarafında ilave bir basınç düşüşü meydana gelmiştir.

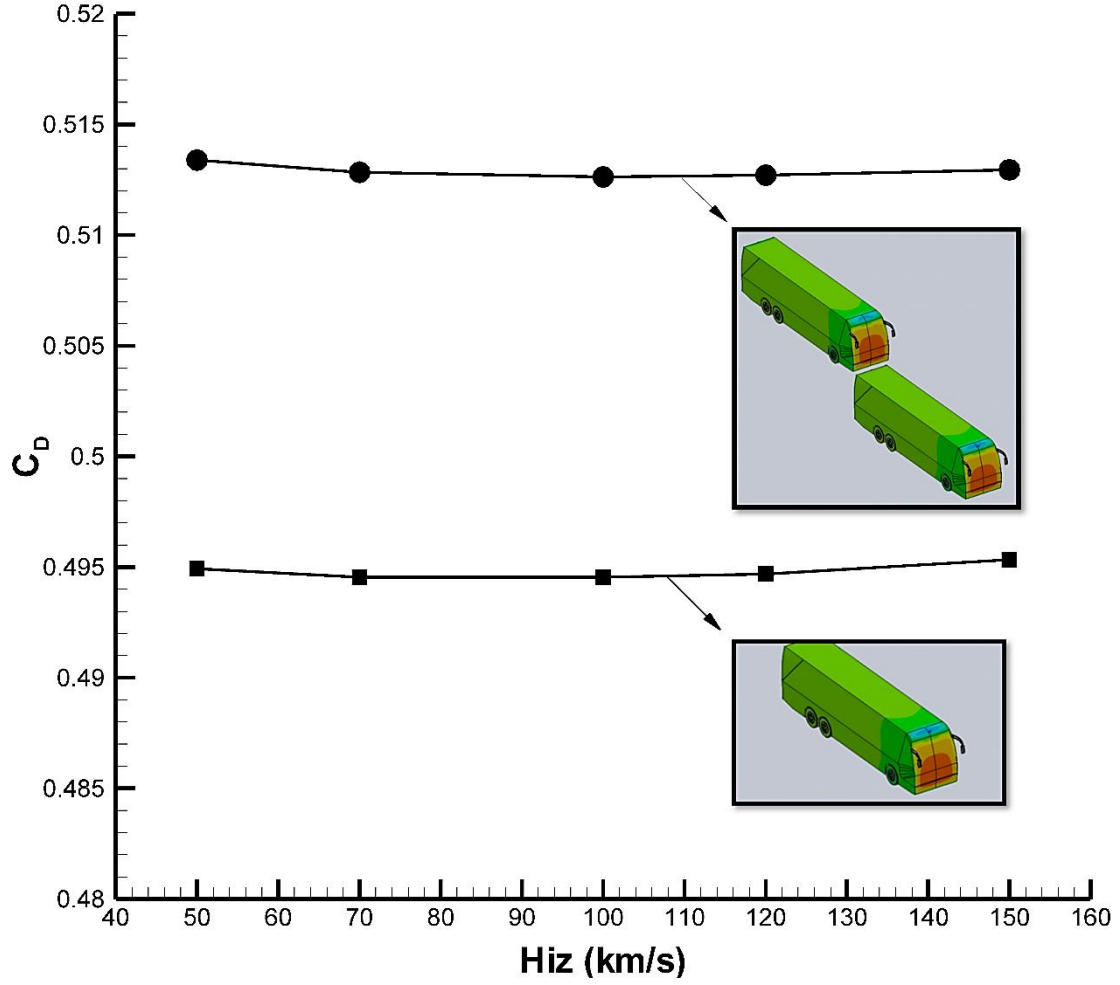


Şekil 5. Otobüslerin akım çizgileriyle 3 boyutlu gösterimi, $V = 120$ km/s

3.4. Sürüklenme katsayısı

Şekil 6'da tek bir otobüse ve konvoy halinde bulunan çift otobüslere ait hız-sürüklenme katsayısı grafiği gösterilmiştir. Şekilde gösterilen sürüklenme eğrileri çift otobüs konfigürasyonunda arka otobüse aittir. Tek otobüs durumunda, hız değerinin 50 km/s olduğu değerde C_D 0.495 çıkmıştır. Hızın artmasıyla beraber C_D değeri bir miktar azaldıktan sonra tekrar artış göstermiştir. Tek otobüs konfigürasyonunda oluşan sürüklenme durumu otobüsün ön tarafına gelen akış ve burada oluşan akış kaynaklı girdapların otobüs üzerindeki etkileridir. Çift otobüs konfigürasyonunda ise arka taraftaki otobüse üzerinden oluşan sürüklenme değerinin artışı açık bir şekilde görülmektedir. Buradaki sürüklenme değeri $\sim 3\%$ 'lük bir artış göstererek 0.515 değerlerine çıkmıştır. Arka otobüsteki sürüklenme katsayısının bu şekilde artmasının sebebi daha önceki türbülans enerji dağılımı ve hız

kontörlerinden de bahsedildiği üzere ön tarafta bulunan otobüsten kopan girdaplı akışların arka taraftaki otobüsün ekstra bir sürüklenme kuvvetine sahip olmasına neden olmuştur.



Şekil 6. Tek ve çift otobüse ait sürüklenme katsayısı grafiği

4. Tartışma ve sonuç

Bu çalışmada, konvoy halinde olup arka taraftaki otobüsün ön tarafta bulunan otobüsü sollama esnasında otobüsler üzerinde oluşan akış yapıları farklı hızlarda sayısal olarak incelenmiştir. İki otobüs için ayrı ayrı akış yapıları incelenmesinin yanında özellikle arkadaki otobüsün geçiş esnasında üzerinde meydana gelen sürüklenme kuvvetleri de detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Hız, türbülanslı enerji dağılım ve akım çizgilerini içeren kontörler baş tarafta bulunan otobüsün ön kısmına gelen akışın otobüsün ön bölgesinde basıncın artmasına sebebiyet verdiğini göstermiştir. Ayrıca, ön taraftaki otobüsün yan taraflarında düşük hız bölgeleri olduğu bu düşük hız bölgelerinde oluşan girdapların arka taraftaki otobüsü direkt etkilediği belirlenmiştir. Bu kopan girdapların arka taraftaki otobüsü nasıl etkilediğini daha iyi anlamak adına sürüklenme katsayısı grafiği farklı hızlarda oluşturulmuştur. Özellikle bu sürüklenme grafiği ön taraftan kopan girdapların sollama esnasında arka taraftaki otobüse çarparak ekstra bir sürüklenme kuvveti oluşturmuş ve sürüklenme kuvveti ~%3'lük bir artış göstermiştir. Bu çalışma özellikle otobüs gibi ağır tonajlı araçların aerodinamiksel olarak daha geliştirebilmesini ve bununla birlikte özellikle yakıt tasarrufu sağlayacağını göstermektedir.

Kaynakça

- [1] T.C Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, veri seti kitapçığı, 2021. <https://sgb.uab.gov.tr/uploads/pages/istatistikler/2021-01-veriseti.pdf>
- [2] Shladover, S. E., Desoer, C. A., Hedrick, J. K., Tomizuka, M., Walrand, J., Zhang, W. B., McKeown, N., 1991. Automated vehicle control developments in the PATH program. *IEEE Transactions on vehicular technology*, 40(1), 114-130.
- [3] Davila, A., Del Pozo, E., Aramburu, E., Freixas, A., 2013. Environmental benefits of vehicle platooning. In *Symposium on International Automotive Technology 2013* (No. 2013-26-0142).
- [4] Altinisik, A., Yemenici, O., Umur, H., 2015. Aerodynamic analysis of a passenger car at yaw angle and two-vehicle platoon. *Journal of Fluids Engineering*, 137(12).
- [5] Lammert, M. P., Duran, A., Diez, J., Burton, K., Nicholson, A., 2014. Effect of platooning on fuel consumption of class 8 vehicles over a range of speeds, following distances, and mass (Vol. 7, No. 2). *National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States)*.
- [6] McAuliffe, B. R., Ahmadi-Baloutaki, M., 2018. A wind-tunnel investigation of the influence of separation distance, lateral stagger, and trailer configuration on the drag-reduction potential of a two-truck platoon. *SAE Int. J. Commer. Veh.*, 11(2), 125-150.
- [7] Robertson, F. H., Bourriez, F., He, M., Soper, D., Baker, C., Hemida, H., Sterling, M., 2019. An experimental investigation of the aerodynamic flows created by lorries travelling in a long platoon. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 193, 103966.
- [8] Robertson, F. H., Soper, D., Baker, C., 2021. Unsteady aerodynamic forces on long lorry platoons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 209, 104481.
- [9] [Humphreys, H., Bevly, D., 2016. Computational fluid dynamic analysis of a generic 2 truck platoon (No. 2016-01-8008). *SAE Technical Paper*.
- [10] Liang, K. Y., Mårtensson, J., Johansson, K. H., 2015. Heavy-duty vehicle platoon formation for fuel efficiency. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(4), 1051-1061.
- [11] Davila, A., Nombela, M., 2012. Platooning-safe and eco-friendly mobility (No. 2012-01-0488). *SAE Technical Paper*.
- [12] Kaluva, S. T., Pathak, A., Ongel, A., 2020. Aerodynamic drag analysis of autonomous electric vehicle platoons. *Energies*, 13(15), 4028.
- [13] Bruneau, C. H., Khadra, K., Mortazavi, I., 2017. Flow analysis of square-back simplified vehicles in platoon. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 66, 43-59.
- [14] He, B., Wu, Y., Fu, L., 2008. Influence of vehicle shape on the aerodynamic characteristics of intelligent vehicle platoon. *Journal of Jilin University*, 38(1), 7-11.
- [15] Li, Q., Dai, W., Yang, Z., Jia, Q., 2020. Investigation on aerodynamic characteristics of tailing vehicle hood in a two-vehicle platoon. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(1), 283-299.
- [16] Le Good, G., Resnick, M., Boardman, P., Clough, B., 2021. An investigation of aerodynamic effects of body morphing for passenger cars in close-proximity. *Fluids*, 6(2), 64.
- [17] Sun, H., Karadimitriou, E., Li, X. M., Mathioulakis, D., 2019. Aerodynamic Interference between Two road vehicle models during overtaking. *Journal of Energy Engineering*, 145(2), 04019002.
- [18] [Chen, F., Peng, H., Ma, X., Liang, J., Pan, X., 2020. Model of driving behavior of truck driver under crosswind. *Journal of Tongji University*.
- [19] Hu, X. J., Qin, P., Liao, L., Guo, P., Wang, J. Y., Yang, B., 2014. Numerical simulation of the aerodynamic characteristics of heavy-duty trucks through viaduct in crosswind. *Journal of Hydrodynamics*, 26(3), 394-399.
- [20] Chen, F., Peng, H., Ma, X., Liang, J., Hao, W., Pan, X., 2019. Examining the safety of trucks under crosswind at bridge-tunnel section: A driving simulator study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 92, 103034.
- [21] Guo, Z., Liu, T., Yu, M., Chen, Z., Li, W., Huo, X., Liu, H., 2019. Numerical study for the aerodynamic performance of double unit train under crosswind. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 191, 203-214.
- [22] Niu, J., Zhou, D., Liang, X., 2018. Numerical investigation of the aerodynamic characteristics of high-speed trains of different lengths under crosswind with or without windbreaks. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 12(1), 195-215.

- [23] Zhu, H., Zhigang, Y., 2015. Fluid–structure interaction study of three-dimensional vehicle model under crosswind. *Advances in Mechanical Engineering*, 7(6), 1687814015591318.
- [24] Ishak, I. A., Mat Ali, M. S., Mohd Yakub, M. F., Shaikh Salim, S. A. Z. (2019). Effect of crosswinds on aerodynamic characteristics around a generic train model. *International Journal of Rail Transportation*, 7(1), 23-54.
- [25] Ishak, I. A., Ali, M. S. M., Sakri, F. M., Zulkifli, F. H., Darlis, N., Mahmudin, R., Khalid, A., 2019. Aerodynamic characteristics around a generic train moving on different embankments under the influence of crosswind. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 61(1), 106-128.
- [26] Gölbaşı, D., Buyruk, E., Karabulut, K. (2018). Experimental and numerical research of the flow features around the building pairs with different types. *Cumhuriyet Science Journal*, 39(4), 1089-1106.
- [27] Gölbaşı, D., Buyruk, E., Şahin, B., Karabulut, K. (2017). Değişik bina modelleri için akış alanlarının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi. *Tesisat Mühendisliği*, 6(162), 32-47.
- [28] Gölbaşı, D., Buyruk, E., Karabulut, K. (2021). Çatılı Bina Modellerinde Binalar Arası Mesafenin ve Bina Yüksekliğinin Akış Yapısı Üzerindeki Etkisinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 10(2), 101-111.
- [29] Gölbaşı, D., Buyruk, E., Karabulut, K. (2022). Experimental and Numerical Investigation of Flow Structures Around Different Binary Building Geometries. *Journal of Engineering Thermophysics*, 31(1), 173-186.
- [30] Demir, H. (2021). Numerical investigation of wind loads on building with various turbulence models. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 37(2), 356-366.

MOS Transistor Based Low Power and High Speed Fundamental Logic Gates

Recep Emir^{*1}, Sezai Alper Tekin²

^{*1} Nuh Naci Yazgan University, Electrical and Electronics Engineering, Kayseri, TURKEY
² Erciyes University, Industrial Design Engineering, Kayseri, TURKEY

(Alınış / Received: 18.11.2022, Kabul / Accepted: 13.04.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 02.05.2023)

Keywords

Low voltage,
Low power,
High speed,
Logic gate,
MOS

Abstract: In this paper, low voltage, low power, high speed and full swing, 1V MOS transistor based fundamental logic gates at 1GHz operation frequency are examined. The main purpose of this work is to comprehend basic ideas related to logic gate and circuit design research field and lay the foundation for novel design methods. The other purpose is to show that these full swing logic gates can be performed under low voltage and high speed conditions. Furthermore, MOS transistor based non-full swing logic gates and how to do them full swing are also examined. Waveforms and numerical results of examined structure's simulations show that MOS transistor based fundamental logic gates can be acquired at 1V supply voltage and 1GHz operation frequency levels. Theoretical results have been confirmed by HSPICE using 65nm CMOS process technology.

Düşük Güçlü ve Yüksek Hızlı MOS Transistörlü Temel Lojik Kapılar

Anahtar Kelimeler

Düşük gerilim,
Düşük güç,
Yüksek hız,
Lojik kapı,
MOS

Öz: Bu çalışmada, düşük gerilimli, düşük güçlü, yüksek hızlı ve tam salınımlı, 1GHz çalışma frekansında 1V MOS transistörlü temel lojik kapılar incelenmiştir. Bu çalışmanın temel amacı lojik kapı ve devre tasarımları araştırma alanı ile ilgili temel fikirleri edinmek ve yeni tasarım metotları için temel oluşturmaktır. Diğer bir amaç ise bu tam salınımlı lojik kapıların düşük gerilim ve yüksek hız şartlarında gerçekleştirilebildiğini göstermektir. Ek olarak, MOS transistörlü tam salınımlı olmayan lojik kapılar ve bunların nasıl tam salınımlı yapılabildiği incelenmiştir. İncelenen yapıların benzetim dalga şekilleri ve nümerik sonuçları, MOS transistörlü temel lojik kapıların 1V besleme gerilimi ve 1GHz çalışma frekansı seviyelerinde elde edilebildiğini göstermektedir. Teorik sonuçlar 65nm CMOS üretim teknolojisini kullanan HSPICE programında doğrulanmıştır.

*Corresponding Author, email: remir@nny.edu.tr

1. Introduction

In recent years, in view of big growth in portable electronic devices such as calculators, smart phones, tablets, laptops, the demand for using low voltage and low power, energy efficient and high speed circuits have largely been investigated in very-large-scale-integration (VLSI) systems. Arithmetic units are very important for most of digital designs and logic gates are fundamental building blocks of these kind of units. Accordingly, the fact that performance parameters of logic gates are improved provide more productive entire system working [1,2].

Designs with MOS transistors have significantly replaced designs with BJT transistors. Many papers have been published related to logic gates in the literature using MOS transistors [2-6] or advanced design methods. Some of them are DTMOS (Dynamic Threshold-voltage MOS) [7,8], FGMOS (Floating Gate MOS) [9,10] and CNTFET (Carbon Nano Tube FET) based digital design methods [11,12]. So, the fact that MOS transistor based fundamental logic gates are performed provide better understanding for novel and advanced designs.

The logic gates perform same functions regardless of design methods but their main performance parameters which are power dissipation, propagation delay and PDP (power-delay product) are different due to design methods. The most common approach for reducing power dissipation is power supply voltage scaling. However, there are two main parameters to consider important when reducing supply voltage. First, minimum values of transistor canal region parameters (W , width and L , length) values are should also be reduced [1]. Second, reduced supply voltage should be more than threshold voltage of transistor two or three times at least [13,14].

In this work, MOS transistor based fundamental logic gates are examined. Firstly, they are separated into two groups as full swing or non-full swing. While full swing ones generates strong (logic 0 or logic 1) values at the output, the other generates weak (logic near intermediate values). Some properties of these fundamental logic gates, which are transistor count, input-output relation and output defines, are examined. Secondly, full swing MOS transistor based fundamental logic gates are graphically and numerically simulated. Simulation results showed that these gates can be performed at low voltage and high speed operation frequency levels. The common approaches are utilized related to logic gate and circuit design research field and the foundation is laid for novel design methods. Consequently, this work introduces important and common fundamentals and provides a better and faster introduction to the field of digital design methods research.

2. Material and Method

2.1. MOS transistor based fundamental logic gates

Symbols of the eight fundamental logic gates are shown in Figure 1. These eight gates can be designed by using MOS transistors. These MOS transistor based logic gates can be separated into two groups considering that they are full swing or non-full swing. Firstly, NOT-NOR-NAND-XOR-XNOR are known as fundamental logic gates in the literature and provide full swing logic values at the output. At second, BUF-OR-AND are also fundamental but they are non-full swing. Circuit designs of these gates are displayed in Figure 2, Figure 3 and Figure 4, respectively.

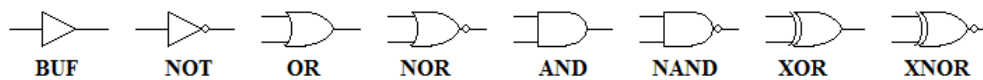


Figure 1. Symbols of the eight fundamental logic gates

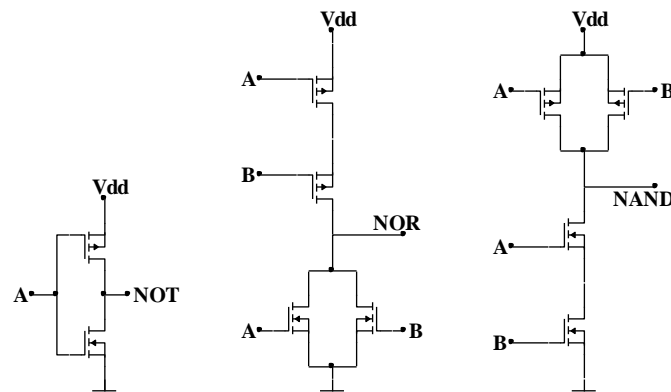


Figure 2. MOS transistor based full swing fundamental logic gates - NOT, NOR, NAND

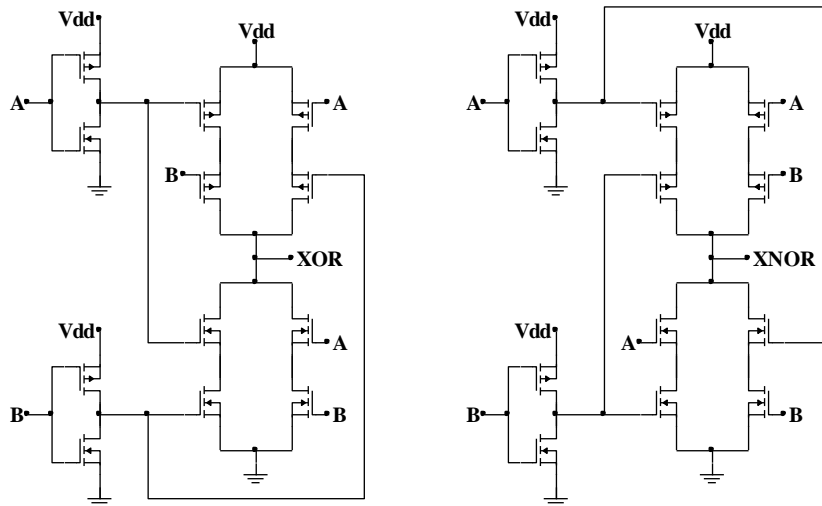


Figure 3. MOS transistor based full swing fundamental logic gates - XOR, XNOR

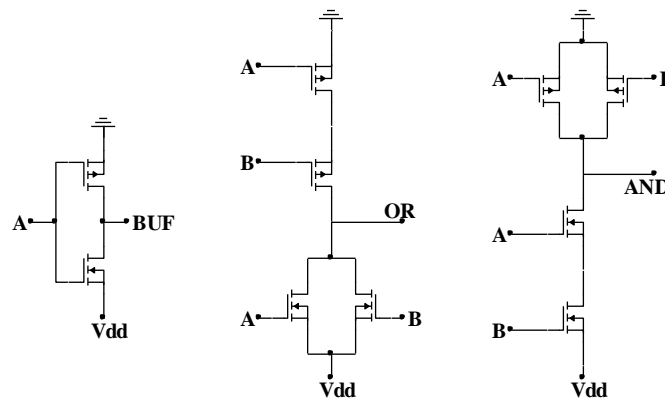


Figure 4. MOS transistor based non-full swing fundamental logic gates - BUF, OR, AND

Some properties of these MOS transistor based fundamental logic gates, which are transistor count, logic states and strong or weak logic values at the output, defines are given in Table 1 and Table 2. While full swing logic gates generates strong logic values at the output, non-full swing ones generates weak. V_{tp} and V_{tn} are the threshold voltages of p-MOS and n-MOS transistors, respectively.

Table 1. Some properties of MOS transistor based full swing fundamental logic gates

Gate	Transistor count	Inputs		Outputs	
		A	B	Result	Define
NOT	2	0/1	-	1/0	strong
NOR	4	0/0/1/1	0/1/0/1	1/0/0/0	strong
NAND	4			1/1/1/0	strong
XOR	12			0/1/1/0	strong
XNOR	12			1/0/0/1	strong

Table 2. Some properties of MOS transistor based non-full swing fundamental logic gates

Gate	Transistor count	Inputs		Outputs		
		A	B	Desired	Result	Define
BUF	2	0/1	-	0/1	$ V_{tp} /(V_{dd}-V_{tn})$	weak
OR	4	0/0/1/1	0/1/0/1	0/1/1/1	$ 2 \times V_{tp} /(V_{dd}-V_{tn})/(V_{dd}-V_{tn})/(V_{dd}-V_{tn}/2)$	weak
AND	4			0/0/0/1	$ V_{tp}/2 / V_{tp} / V_{tp} /(V_{dd}-2 \times V_{tn})$	weak

BUF-OR-AND logic gates can also be acquired as full swing through a NOT logic gate addition to the output of NOT-NOR-NAND. However, this idea causes to use two more MOS transistors.

3. Results

3.1. Simulation setups

Simulation setups are summarized in Table 3. V_{dd} = positive input voltage is 1V and V_{gnd} = negative input voltage is 0V. Operation frequency is 1GHz. 1V supply voltage is appropriated for 65nm CMOS process technology [1]. According to 65nm, $L_p = L_n$ value is 65nm. p-ratio (W_p/L_p) and n-ratio (W_n/L_n) values of p-MOS and n-MOS transistors are determined as 2 and 1, respectively. The reason of p-ratio > n-ratio is that the transconductance of p-MOS transistor is lower than that of n-MOS transistor.

Table 3. Simulation setups

Parameter	Unit	Value
$V_{dd} = V_{i^+}$	V	1
$V_{gnd} = V_{i^-}$	V	0
Input waveform	-	Square
Input frequency	GHz	1
R (load)	M Ω	1000
W_p / W_n	nm	130 / 65
$L_p = L_n$	nm	65
p / n	-	2 / 1

3.2. Simulation results

Input-output signals of NOT and NOR-NAND-XOR-XNOR logic gates are indicated in Figure 5 and Figure 6, respectively. As shown in figures, these full swing logic gates generates strong logic values at the output voltage levels. Moreover, power dissipation, propagation delay and PDP values are summarized in Table 4. The graphical and numerical simulations are obtained by using HSPICE.

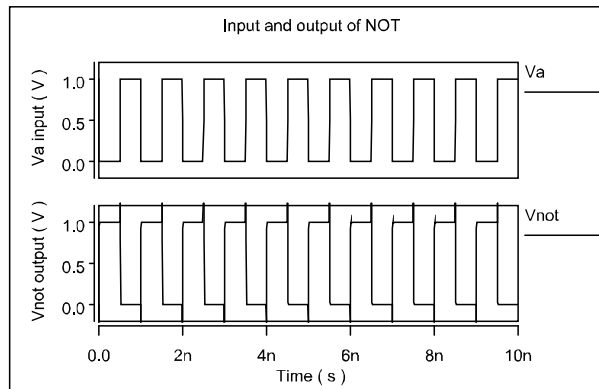


Figure 5. Input-output signals of NOT logic gate

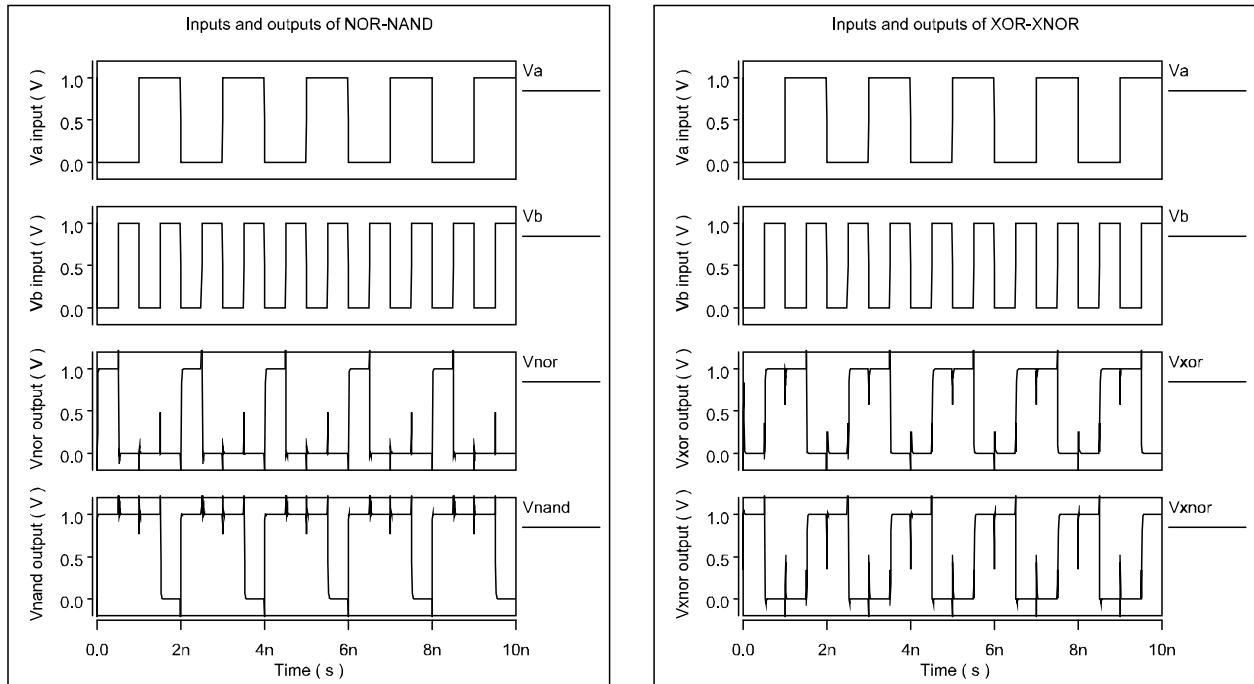


Figure 6. Input-output signals of NOR-NAND-XOR-XNOR logic gates

Table 4. Simulation results

Gate	Power (nW)	Delay (ps)	PDP (10^{-21} J)
NOT	0.859	6.840	5.876
NOR	0.367	11.352	4.166
NAND	1.719	9.524	16.372
XOR	3.435	15.582	53.524
XNOR	3.849	15.982	61.515

4. Discussion and Conclusion

The basic aspect of MOS transistor based fundamental logic gates are examined in this work to achieve better understanding of fundamentals for logic gate and circuit design research field and lay the foundation for novel design methods. Firstly, they are separated into two groups by evaluating whether full swing or not and the basic properties are introduced. And then, simulations are performed for full swing ones as graphically and numerically. Some of important simulation parameters are 1V supply voltage and 1GHz operation frequency levels. At these levels, it is shown that MOS transistor based fundamental logic gates can be achieved.

References

- [1] Sedra A. S., Smith K. C., Carusone T. C., Gaudet V. 2020. Microelectronic Circuits. 8th Edition, New York Oxford, Oxford University Press.
- [2] Sharma V. K. 2020. Design and Simulation of Reliable Low Power CMOS Logic Gates. IETE Journal of Research, 69(2020), 1022-1032.
- [3] Nishad A. K., Chandel R. 2011. Analysis of Low Power High Performance XOR Gate Using GDI Technique. International Conference on Computational Intelligence and Communication Systems, 7-9 October, Gwalior, India, 187-191.
- [4] Amini-Valashani M., Ayat M., Mirzakuchaki S. 2018. Design and Analysis of a Novel Low Power and Energy-Efficient 18T Hybrid Full Adder. Microelectronics Journal, 74(2018), 49-59.

- [5] Naseri H., Timarchi S. 2018. Low-Power and Fast Full Adder by Exploring New XOR and XNOR Gates. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 26(2018), 1481-1493.
- [6] Mirmotahari O., Berg Y. 2014. Ultra Low-Voltage Static Precharge NAND/NOR Gates. *IEEE International Nanoelectronics Conference (INEC)*, 28-31 July, Sapporo, Japan.
- [7] Kim K., Kim S. 2015. Design of Schmitt Trigger Logic Gates Using DTMOS for Enhanced Electromagnetic Immunity of Subthreshold Circuits. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2015(57), 963-972.
- [8] Kadu A., Kalbande M. 2016. Design of Low Power Schmitt Trigger Logic Gates Using Vtcmos. *Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)*, 19 November, Coimbatore, India.
- [9] Gupta R., Gupta R., Sharma S. 2017. Design of high speed and low power 4-bit comparator using FGMOS. *International Journal of Electronics and Communications (AEU)*, 2017(76), 125-131.
- [10] Gupta R., Gupta R., Sharma S. 2019. A High-Speed, Low-Power, and Area-Efficient FGMOS-Based Full Adder. *IETE Journal of Research*, 2019(68), 2305-2311.
- [11] Banerjee P., Abraham J. A. 1984. Characterization and Testing of Physical Failures in MOS Logic Circuits. *IEEE Design & Test of Computers*. 1984(1), 76-86
- [12] Aggarwal A., Sharma S. 2021. An Overview of DPL, MVL, Ternary Logic and CNTFET Technology for Contribution of Efficient Circuits. *International Conference on Simulation, Automation & Smart Manufacturing (SASM)*, 20-21 August, Mathura, India.
- [13] Assaderaghi F., Parke S., Sinitsky D., Bokor J., Ko P., Hu C. 1994. A Dynamic Threshold Voltage MOSFET (DTMOS) for Very Low Voltage Operation. *IEEE Electron Device Letters*, 1994(15), Vol. 510-512.
- [14] Assaderaghi F., Sinitsky D., Parke S., Bokor J., Ko P., Hu C. 1997. Dynamic Threshold-Voltage MOSFET (DTMOS) for Ultra-Low Voltage VLSI. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1997(44), 414-422.

Evaluation of Phosphate Recovery from Treated Municipal Wastewater by Forward Osmosis

Mehmet Dağhan Erden¹, Ozlem Ozcan², Nuray Ateş³, Niğmet Uzal^{4*}

¹Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, KAYSERİ

²Abdullah Gul University, Graduate School of Engineering and Science, Department of Materials Science and Mechanical Engineering, KAYSERİ

³Erciyes University, Engineering Faculty, Department of Environmental Engineering, KAYSERİ

^{4*}Abdullah Gul University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, KAYSERİ

(Alınış / Received: 19.01.2023, Kabul / Accepted: 29.03.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 02.05.2023)

Keywords

Forward Osmosis,
Nutrient Recovery,
Membrane Filtration,
Municipal Wastewater

Abstract: As the global population continues to grow rapidly, fertilizers are becoming increasingly crucial for ensuring the security of food supply. Because phosphate is the key component in fertilizers, there is an increasing demand for alternative phosphate (PO_4^{3-}) sources. The forward osmosis (FO) process has gained more attention recently as a promising, low-cost and low-fouling membrane process for nutrient concentration and recovery. In this study, the efficiency of the FO process was evaluated in recovering PO_4^{3-} from pre-treated municipal wastewater. The effectiveness of the FO process was investigated using two different draw solutions ($MgCl_2$ and $NaOAc$) at two different concentrations (1 and 2 M) and two different recovery rates (60% and 80%). The highest PO_4^{3-} concentration of 23.20 mg/L was obtained in FO experiments at 60% recovery rate and with the concentration of the 2 M $MgCl_2$ draw solution.

İleri Ozmoz ile Arıtılmış Evsel Atıksudan Fosfat Geri Kazanımının Değerlendirilmesi

Anahtar Kelimeler

İleri Ozmoz,
Nütrient Geri Kazanımı,
Membran Filtrasyon,
Evsel Atıksu

Öz: Küresel nüfus hızla artmaya devam ederken, gıda arzının güvenliğini sağlamak için gübre giderek daha önemli hale gelmektedir. Fosfat (PO_4^{3-}), gübrelerdeki ana bileşen olduğundan, alternatif PO_4^{3-} kaynaklarına yönelik arz artmaktadır. İleri ozmoz (FO) prosesi, nütrient konsantrasyonu ve geri kazanımı için umut verici, düşük maliyetli ve düşük tıkanmaya neden olan bir membran prosesi olarak son zamanlarda daha fazla dikkat çekmektedir. Bu çalışmada, ön arıtımı yapılmış evsel atıksulardan PO_4^{3-} geri kazanımında FO prosesinin etkinliği değerlendirilmiştir. FO prosesinin etkinliği, iki farklı konsantrasyonda (1 ve 2 M) iki farklı çekme çözeltisi ($MgCl_2$ ve $NaOAc$) ve iki farklı geri kazanım oranı (%60 ve %80) kullanılarak araştırılmıştır. FO deneylerinde en yüksek PO_4^{3-} konsantrasyonu, 23,20 mg/L ile %60 geri kazanım oranında ve 2 M $MgCl_2$ çekme çözeltisi konsantrasyonu ile elde edilmiştir.

*Corresponding Author, email: ozlem.ozcan@agu.edu.tr

1. Introduction

In recent years, the sustainability of natural resources has gained a new perspective with the recovery of organic, energy and nutrients in the wastewater, beyond the principle of removal. To remove nitrogen and phosphorus from wastewater, a lot of energy and chemicals are needed [1, 2]. There is a significant opportunity for water, energy, and nutrient recovery from municipal wastewater as part of the circular economy. It was predicted that one cubic meter of municipal wastewater could provide enough supply of water for 5 to 10 people per day, enough energy to power a light bulb for an average household, and enough nutrients for at least one m^2 of agricultural area annually [3]. Meanwhile, phosphorus for agricultural use can only be obtained by the mining of phosphate

rock [4-6]. Predictions suggest that it could be depleted by the end of the 21st century [7], which would pose a significant danger to global food security, underscoring the importance of developing strategies to manage and ultimately overcome this potential challenge [8].

Membrane filtration has been utilized in municipal wastewater treatment to produce recovered water suitable for a number of reuse purposes. These processes are both space- and resource-efficient [9]. As a result, not only is the water recovered but also pre-concentrated phosphate in the treated wastewater is obtained, which can enhance the precipitation kinetics crucial for phosphorus mineral recovery [5, 10-12]. Pressure-driven membrane processes such as reverse osmosis and nanofiltration are used for resource recovery with high rejections after secondary treatment processes [13]. However, energy consumption and fouling are the main drawbacks of pressure-driven membrane processes [14].

Effective treatment methods for the concentration of nutrients in wastewater are needed, one alternative of that is the FO process, which is an emerging treatment process [15]. FO process has recently been used as a promising alternative for recovery due to its benefits including recovering nutrients and organic matter via natural osmotic pressure [16]. Furthermore, compared to the RO process, the fouling of the FO membrane by both organic materials and inorganic precipitates is much lower [17, 18]. However, to date, most of the studies on the FO process for concentrating treated municipal wastewater have mainly focused on the FO process's operating duration rather than the water or phosphate recovery rate achieved [19, 20].

The conception of wastewater pre-concentration has not yet been investigated to its full potential, but it presents significant potential for resource recovery processes when research on it is performed for the selection determination of draw solution type and the effectiveness of the process [21]. Therefore, this study aims to investigate the performance of the FO process in terms of the recovery of phosphate from pre-treated municipal wastewater. The effect of draw solution type, concentration, and process recovery rate on the phosphate recovery potential were evaluated.

2. Materials and Method

2.1. Materials

In FO experiments, the performances of two different draw solutions, sodium acetate (NaOAc) and magnesium chloride ($MgCl_2$), were evaluated in terms of phosphate recovery at concentrations of 1 M and 2 M. The municipal wastewater taken from Kayseri Municipality Wastewater Treatment Plant and has been used in the FO tests after treating with a hybrid process that consist of direct ceramic microfiltration and anaerobic fluidized bed membrane bioreactor. Table 1 shows the feed sample characterization.

Table 1. Characterization of the feed sample used in FO tests

pH	7.9±0.15
Conductivity (mS/cm)	1.50±0.1
COD (mg/L)	69±5
PO_4^{3-} (mg/L)	11.2±1.5
Cl^- (mg/L)	168±51

The commercial flat-sheet membrane (FTS H2O, Sterlitech, USA) was used in FO tests. Table 2 shows the specifications of FO membrane used for phosphate recovery.

Table 2. Specifications of FO membrane

Membrane material	Cellulose Triacetate (CTA)
pH range	3-7
Max. operating Temperature	50 °C
Maximum Chlorine	2 ppm
Minimum transmembrane pressure	5 psi
Max. inlet pressure	75 psi

2.2. Experimental

FO tests were performed at three stages: i) evaluation of the draw solution type using MgCl_2 and NaOAc at 2M concentration, ii) evaluation of recovery rate for 2M MgCl_2 at 60% and 80 recovery rates, iii) evaluation of draw solution concentration for 1 M and 2 M of MgCl_2 . FO system was operated at a rate of approximately 1L/min flow using the peristaltic pump for draw and feed side. The membrane module has an active membrane area of 60 cm^2 . During the tests, the changes in weight were monitored in order to calculate the flux. Temperature was kept constant ($25 \pm 3^\circ\text{C}$) during the tests.

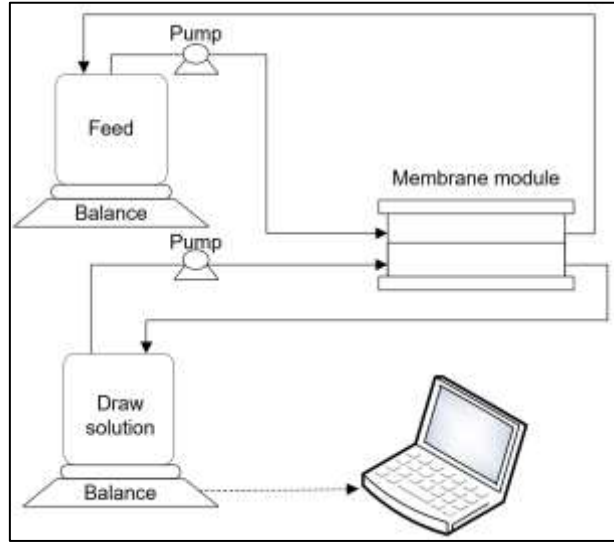


Figure 1. The schematic representation of the experimental setup

The flux values were calculated based on equation 1

$$J = \Delta V / (S \times \Delta t) \quad (1)$$

where, J is the flux, ΔV is the volumetric change, S is the effective membrane area, and Δt is the operating time. The reverse salt flux (RSF, $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) was calculated according to Equation 2.

$$RSF = V_f / (C_f \times C_i) / S \times t \quad (2)$$

Here, C_f is the initial feed solution ion concentration, V_f is the initial feed solution volume, C_i is the feed solution ion concentration at the end of the experiment, S is the effective membrane area, and t is the operating time.

3. Results

In this study, the performance of the FO process was tested for the recovery of phosphate from pre-treated municipal wastewater. The FO experiments were conducted using two different draw solutions (MgCl_2 and NaOAc) at two different concentrations (1 and 2M) and for two different recovery rates (60 and 80%).

Table 3 shows the characteristics of the concentrated feed samples of the FO experiments for two different MgCl_2 and NaOAc draw solutions. It is seen that the increase in MgCl_2 concentration from 1 M to 2 M not significantly affected the PO_4^{3-} concentration efficiency at the 60% recovery rate. However, the PO_4^{3-} concentration of concentrated feed reached 23.2 ± 0.1 mg/L at 60% recovery rate for 2M MgCl_2 and 14.3 ± 7.4 mg/L for 2M NaOAc draw solution. The PO_4^{3-} concentration capacity was decreased from 23.2 mg/L to 12.4 mg/L by the increase in recovery rates from 60 to 80% for the same 2 M MgCl_2 draw solution concentration.

Table 3. Characterization of concentrated feed samples of the FO experiments for two different draw solutions (MgCl₂ and NaOAc) at two different concentrations (1 and 2 M) and for two different recovery rates (60 and 80%).

Parameters	2 M NaOAc (60%)	2 M MgCl ₂ (60%)	2 M MgCl ₂ (80%)	1 M MgCl ₂ (60%)
pH	8.1±0.1	8.2±0.2	8.4±0.3	7.9±0.0
Conductivity (mS/cm)	3.6±0.4	3.3±0.4	6.9±0.3	3.6±0.1
COD (mg/L)	180±34	198±71	340±48	259±28
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	14.3±7.4	23.2±0.1	12.4±3.8	23.0±0.0
Cl ⁻ (mg/L)	487±51	527±42	593±136	659±43

Figure 2 illustrates the pure water, feed and RSF fluxes in FO experiments. Feed fluxes were 7.5±0.2 and 9.0±1.2 LMH at 60% and 80% recovery rate of 2M MgCl₂ draw solution, respectively. However, when the recovery rate was raised from 60% to 80%, RSF increased from 12.2±4.2 to 30.2±5.3 g/m².h for MgCl₂ draw solution. When the concentration of the draw solution was decreased from 2 M to 1 M MgCl₂, the flux was reduced from 7.5±0.2 LMH to 6.6±1.3 LMH. Considering the effect of draw solution type (MgCl₂ and NaOAc) at 60% recovery rate and 2 M concentration, higher RSF and lower feed flux are attained.

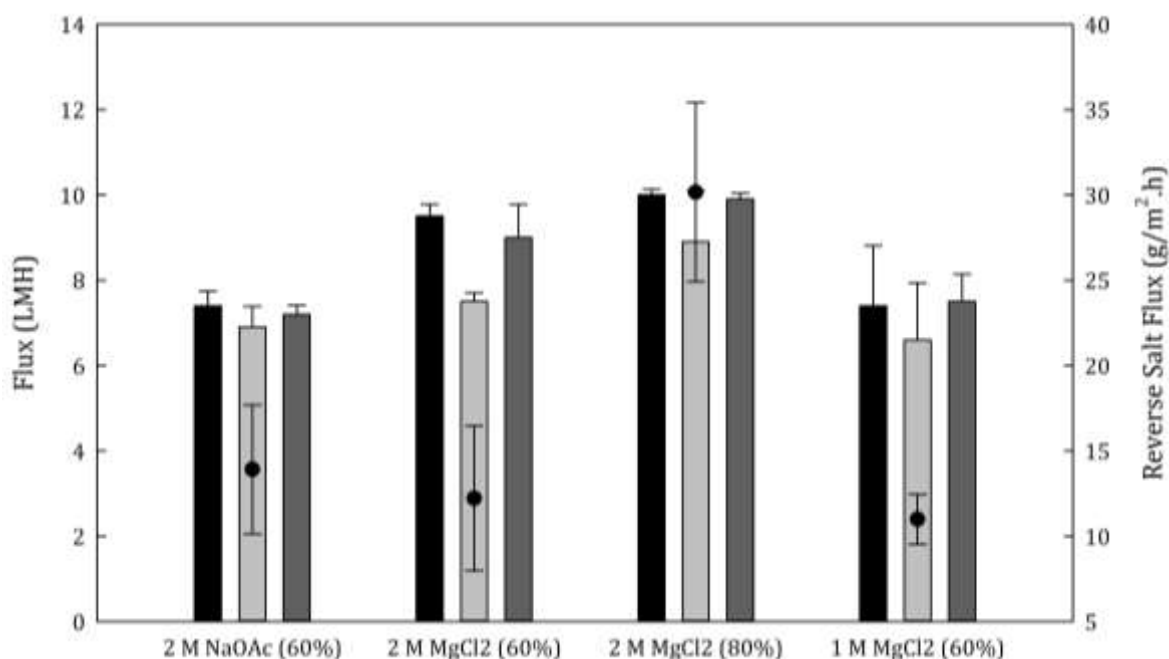


Figure 2. The pure water, feed and RSF flux values for FO experiments

4. Discussion and Conclusion

In this study, pre-treated municipal wastewater was concentrated using CTA membranes. The FO membrane rejects PO₄³⁻, thus ensuring a stable and reliable removal [12]. Thus, the PO₄³⁻ concentration increased as the draw solution concentration was increased. The highest PO₄³⁻ concentration of 23.20 mg/L was obtained in FO experiments at 60% recovery rate and with the concentration of the 2 M MgCl₂ draw solution. In the literature, RSF values were found to range from 0.2 to 7.72 g/m².h in FO studies were performed with MgCl₂ draw solution for nutrient recovery [9, 22, 23]. In this study, the FO tests performed with 60% recovery and at the concentration of the 2 M MgCl₂ draw solution where the greatest PO₄³⁻ concentration was obtained, the RSF value was 12.2±4.2 g/m².h However, RSF can be useful for nutrient recovery, even if typically viewed as a challenge in the FO process. Using the reverse magnesium flux mechanism, Xie et al. (2014) intentionally used MgCl₂ as a draw solution to

increase magnesium concentration in the feed solution [5]. Furthermore, the requirement of Ca^{2+} and/or Mg^{2+} addition for providing the struvite precipitation is eliminated due to the enrichment of these ions by the FO membrane [24, 25]. In addition, the feed solution pH can rise on its own thanks to the bidirectional diffusion of solutes that occurs during the FO tests. According to the research conducted by Xie et al. (2014) and Ansari et al. (2016), it was revealed that the precipitation of struvite and calcium phosphate both benefited directly from the bidirectional transfer of $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ and proton (H^+) [5, 26]. Therefore, not only is an increase in the rate of phosphate recovery attained, but also an improvement in the efficiency of further struvite precipitation methods in highly concentrated wastewater when using 2 M MgCl_2 instead of NaOAc as a draw solution.

Acknowledgment

The authors gratefully acknowledge the Scientific and Technological Research Council of Turkey for the financial support (Project No: 119Y134) Scientific Research Foundation of Erciyes University (Project No: FYL-2022-11861).

References

- [1] Zeeman, G., et al. Anaerobic treatment as a core technology for energy, nutrients and water recovery from source-separated domestic waste(water). 2008. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*. 578 1207-1212.
- [2] Sun, D., et al. Energy-neutral sustainable nutrient recovery incorporated with the wastewater purification process in an enlarged microbial nutrient recovery cell. 2018. *Journal of Power Sources*. 384 160-164.
- [3] Lee, Y., et al. Towards Energy Self-Sufficient Water Reclamation Plants. 2013. *PUB Technology Review*, London.
- [4] Elser, J. and Bennett, E. A broken biogeochemical cycle. 2011. *Nature*. 4787367 29-31.
- [5] Xie, M., Nghiem, L. D., Price, W. E., and Elimelech, M. 2014. Toward resource recovery from wastewater: extraction of phosphorus from digested sludge using a hybrid forward osmosis–membrane distillation process. *Environmental Science & Technology Letters*. 12 191-195.
- [6] Jørgensen, M. K., Sørensen, J. H., Quist-Jensen, C. A., and Christensen, M. L. 2018. Wastewater treatment and concentration of phosphorus with the hybrid osmotic microfiltration bioreactor. *Journal of Membrane Science*. 559 107-116.
- [7] Reijnders, L. 2014. Phosphorus resources, their depletion and conservation, a review. *Resources, conservation and recycling*. 93 32-49.
- [8] Vardanyan, A., Kafa, N., Konstantinidis, V., Shin, S. G., and Vyrides, I. 2018. Phosphorus dissolution from dewatered anaerobic sludge: Effect of pHs, microorganisms, and sequential extraction. *Bioresource technology*. 249 464-472.
- [9] Singh, N., et al. 2019. Dewatering of sewage for nutrients and water recovery by Forward Osmosis (FO) using divalent draw solution. *Journal of Water Process Engineering*. 31 100853.
- [10] Ali, A., Quist-Jensen, C. A., Macedonio, F., and Drioli, E. 2015. Application of membrane crystallization for minerals' recovery from produced water. *Membranes*. 54 772-792.
- [11] Quist-Jensen, C. A., Macedonio, F., and Drioli, E. 2016. Membrane crystallization for salts recovery from brine—an experimental and theoretical analysis. *Desalination and Water Treatment*. 5716 7593-7603.
- [12] Qiu, G., Law, Y.-M., Das, S., and Ting, Y.-P. 2015. Direct and complete phosphorus recovery from municipal wastewater using a hybrid microfiltration-forward osmosis membrane bioreactor process with seawater brine as draw solution. *Environmental science & technology*. 4910 6156-6163.
- [13] Arola, K., Van der Bruggen, B., Mänttari, M., and Kallioinen, M. 2019. Treatment options for nanofiltration and reverse osmosis concentrates from municipal wastewater treatment: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 4922 2049-2116.
- [14] Díez, B. and Rosal, R. A 2020. critical review of membrane modification techniques for fouling and biofouling control in pressure-driven membrane processes. *Nanotechnology for Environmental Engineering*. 52 1-21.
- [15] Jafarinejad, S. 2021. Forward osmosis membrane technology for nutrient removal/recovery from wastewater: Recent advances, proposed designs, and future directions. *Chemosphere*. 263 128116.

- [16] Shaffer, D. L., Werber, J. R., Jaramillo, H., Lin, S., and Elimelech, M. Forward osmosis: Where are we now? 2015. *Desalination*. 356 271-284.
- [17] Rastogi, N. K. 2020. Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments. *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes*. 3-35.
- [18] Chiao, Y.-H., et al. 2022. Comparison of Fouling Behavior in Cellulose Triacetate Membranes Applied in Forward and Reverse Osmosis *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 6141 15345-15354.
- [19] Yadav, S., et al. 2020. Organic fouling in forward osmosis: a comprehensive review. *Water*. 125 1505.
- [20] Almoalimi, K. and Liu, Y.-Q. 2022. Fouling and cleaning of thin film composite forward osmosis membrane treating municipal wastewater for resource recovery. *Chemosphere*. 288 132507.
- [21] Ansari, A. J., Hai, F. I., Price, W. E., Drewes, J. E., and Nghiem, L. D. 2017. Forward osmosis as a platform for resource recovery from municipal wastewater - A critical assessment of the literature. *Journal of Membrane Science*. 529 195-206.
- [22] Pramanik, B. K., Hai, F. I., Ansari, A. J., and Roddick, F. A. 2019. Mining phosphorus from anaerobically treated dairy manure by forward osmosis membrane. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 78 425-432.
- [23] Singh, N., Petrinic, I., Hélix-Nielsen, C., Basu, S., and Balakrishnan, M. 2019. Influence of Forward Osmosis (FO) membrane properties on dewatering of molasses distillery wastewater. *Journal of Water Process Engineering*. 32 100921.
- [24] Carlsson, H., Aspegren, H., Lee, N., and Hilmer, A. 1997. Calcium phosphate precipitation in biological phosphorus removal systems. *Water Research*. 315 1047-1055.
- [25] Song, Y., Hahn, H. H., and Hoffmann, E. 2002. Effects of solution conditions on the precipitation of phosphate for recovery: A thermodynamic evaluation. *Chemosphere*. 4810 1029-1034.
- [26] Ansari, A. J., Hai, F. I., Price, W. E., and Nghiem, L. D. 2016. Phosphorus recovery from digested sludge centrate using seawater-driven forward osmosis. *Separation and Purification Technology*. 163 1-7.

Üç boyutlu (3B) Polipropilen Halı Yapıların Aşınma ve Sürtünme Özellikleri

Gülhan Erdoğan Güler^{*1}, Sinem Yücel²

^{*1} Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Talas/KAYSERİ
² Uniteks Tekstil, Atatürk Organize Sanayi Bölgesi, 10039 sokak, No. 26, 35620 Çiğli/İZMİR

(Alınış / Received: 28.03.2023, Kabul / Accepted: 10.04.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 02.05.2023)

Anahtar Kelimeler

3 boyutlu halı yapısı,
Polipropilen lif,
Aşınma (Martindale),
Sürtünme (Token test)

Öz: Bu makalede, çeşitli hav yüksekliğindeki (6 mm, 9 mm ve 12 mm) ve yönsel yoğunluktaki polipropilen halıların aşınma (Martindale) ve sürtünme dayanım (token) özellikleri incelenmiştir. Polipropilen halılar, Van De Wiele halı tezgahında üç kancalı Wilton yüz yüze halı dokuma ile imal edilmiştir. Halı tasarımları 2/2 V dokuma (atkı, çözgü, dolgu çözgü ve hav ipliklerinin kesişmeleriyle) ve 1+2/3 V dokuma (atkı, dolgu atkı, çözgü, dolgu çözgü ve hav ipliklerinin kesişmeleriyle) ile gerçekleştirilmiştir.

Hav yoğunluğu ve yüksekliği testlerde kullanılan tüm halıların aşınma yükü altındaki halı kütle kayıplarını (% , mg) etkilediği tespit edilmiştir. Sürtünmede ise tamamen bozulan hav ipliklerinden elde edilen sürtme devir sayılarının, her bir hav yoğunluğu için hav yükseklikleri 6 mm'den 12 mm'ye değişim gösterdiğinde arttığı gözlenmiştir. Bu çalışma ile elde edilen sonuçların, halı tasarımcıları ve özellikle karmaşık şekilli forumlama imalatında üç boyutlu önşekil tasarımcıları için yol gösterici olacağı öngörülmüştür.

Abrasion and Rubbing Properties of Three-Dimensional (3D) Polypropylene Carpet Structures

Keywords

3 dimension carpet
structure,
Polypropylene carpet,
Abrasion (Martindale),
Rubbing (Token test)

Abstract: In this article, abrasion (Martindale) and rubbing (token) properties of polypropylene carpets of various pile heights (6 mm, 9 mm and 12 mm) and directional densities are investigated. Polypropylene carpets are produced with Wilton face-to-face carpet weaving with three hooks on the Van De Wiele carpet loom. Carpet designs are fulfilled with 2/2 V weaving with the interlacement of weft, warp, stuffer warp and pile yarns, and 1+2/3 V weaving with the interlacement of weft, stuffer weft, warp, stuffer warp and pile yarns.

It was found that pile density and pile height affected the carpet mass losses (% , mg) of all carpets used in the tests under abrasion load. In friction, it was observed that the number of rubbing cycles (stroke numbers) obtained from completely fractured pile yarns were increased when the pile heights changed from 6 mm to 12 mm for each pile density. It is predicted that the results obtained from this study will be a guide for carpet designers and especially for three-dimensional preform designers in the production of complex shaped foruming.

*İlgili Yazar, email: gulhanerdoganguler@gmail.com

1. Giriş

Halı, çözgü, dolgu ve hav ipliği (z-iplik) olmak üzere üç iplik setinin kullanılması sonucunda üç boyutlu (3D) bir yapı olarak kabul edilebilir ve konfor, ısı, ses yalıtımı ve estetik özelliklerinden dolayı hem ev hem de iş yerlerinde en yaygın kullanılan döşemelik yapılardan biridir. Bir başka tanımlamada ise halıların zemin yapısının atkı ve çözgü (dolgu-zincir) ipliklerinden, kullanım yüzeyinin ise hav ipliğinden oluştuğu üç boyutlu bir yapıdır [1]. Havlı iplikler, pamuk, yün, sentetik esaslı akrilik, naylon, polyester ve polipropilen lifler veya bunların karışımları gibi

çeşitli doğal liflerden yapılabilir [2]. Zemin kumaşında bulunan çözgü ve atkı iplikleri pamuk, jüt veya karışım liflerden üretilirler [3]. Örneğin, gerek atkı gerekse dolgu atkısı ipliğinde sert ve dolgun yapısı nedeniyle jüt ipliği kullanılmaktadır. Makine halılarında temel kumaşı sağlamlaştırmak ve halının formlanma direnci açısından jüt dışında, keten ve pamuk gibi dolgu iplikleri de kullanılabilir [4].

Halı üzerine yapılan araştırmalar genellikle halıların son kullanım alanlarına yönelik olarak yapılmış tasarımlar ve halılara ait yapısal özellikler ve üretim parametrelerinin doğru bir şekilde seçilmesi ile ilgili olduğu tespit edilmiştir [5-8]. Öte yandan halının karakterizasyonu, kullanım ömrü boyunca fiziksel, mekanik-termal, akustik özellikleri, görünüm kalıcılığı ve dayanıklılığının belirlenmesi açısından kritik öneme sahiptir [3, 9-16]. Örneğin, ayakta durma ve yürüme sırasındaki halı konforu, karmaşık biyomekanik ve psikofiziksel açıdan incelenmiştir. Bu, özellikle evlerde nihai ürün olarak kullanımları için daha uygun halılar tasarlamaya yardımcı olabilmektedir [17-20]. Ayrıca polipropilen yüz yüze halıların ısı iletkenlik ve ses yalıtım özelliklerine hav uzunluğu ve yoğunluğunun etkili olduğu, daha kısa havlı ve ilmek sıklığı yüksek halılar da ses yalıtımı özelliklerinde iyileşme olduğu görülmüştür [21, 22].

Aşınma, insanların halı üzerinde oluşturdukları yaya trafiği sırasında halı yüzeyini bozan karmaşık yüklerden birisidir ve oluşan bu yük sonucunda iç ve dış ortamlarda lifler arası sürtünme, lif kayması ve hav ipliklerindeki lif kopmaları nedeniyle halı yüzeyinin görünümü etkilenir [23, 24]. Aşınma ile ilgili kritik parametreler lifin malzemesi ve inceliği; iplik kat sayısı ve büküm dahil olmak üzere hav ipliği özellikleri; dokuma tasarımı, hav ipliği ile zemin iplikleri arasındaki etkileşimler, düzlem dışı hav ipliği uzunluğu ve hav ipliği yoğunluğu gibi halının yapısal özellikleri olarak ele alınabilir [25, 26]. Halıların aşınma davranışı lif, iplik ve halı konstrüksiyon parametrelerinin hepsinden birden etkilenmektedir [3].

Önder ve Berkalp, yüz yüze halının aşınma direncinin; zemin (çözgü, atkı ve dolgu), hav yüksekliği ve hav yoğunluğu gibi hav ipliği ve halı yapısal parametreleri ile ilişkili olduğunu bulmuşlardır [27]. Bilisik ve Yolacan tarafından floklu kumaşların aşınma direnci üzerine başka bir çalışma yapılmıştır. Flok lif yoğunluğunun ve lif uzunluğunun, yoğun ve kısa flok lifinin geniş lif yüzey alanı ve eğilme rijitliği nedeniyle daha iyi aşınma direnci gösterdiği lamine flok kumaşın aşınma özelliklerini etkilediği elde edilmiştir [28]. Ayrıca lif çapının artmasıyla birlikte aşınma kaybının da arttığı sonucuna ulaşılmıştır [29, 30]. Floklu kumaş üzerinde yapılan token sürtme testi, pamuk lifi ve akrilik yapıştırıcının kayganlaştırıcı etkisi nedeniyle ıslak durumdaki çözgü ve atkı yırtılma mukavemetlerinin kuru duruma göre biraz daha yüksek olduğunu göstermiştir [31].

Öte yandan, sürtme devir sayısı arttığında, çözgü ve atkı yönlü çekme mukavemeti ve floklu bir kumaşın uzaması genellikle azalır. Ayrıca floklu bir kumaşın yıkama öncesi ve sonrasındaki sürtme sayısı ıslak halde kuru haline göre düşüktür. Bunun temel nedeni, akrilik yapıştırıcının zayıf ıslaklık özelliklerine sahip olmasıdır [32]. Doğal kaynaklarla boyanmış halılarda pamuk hav ipliklerinin sürtünme haslıklarının iyi ile mükemmel arasında olduğu ortaya çıkmıştır [33]. Ayrıca, düşük konsantrasyonlu baskı mürekkebi ile poliamid (nylon) havlı halı inkjet baskısı, iyi sürtünme haslığına ve renk verimine sahiptir [34].

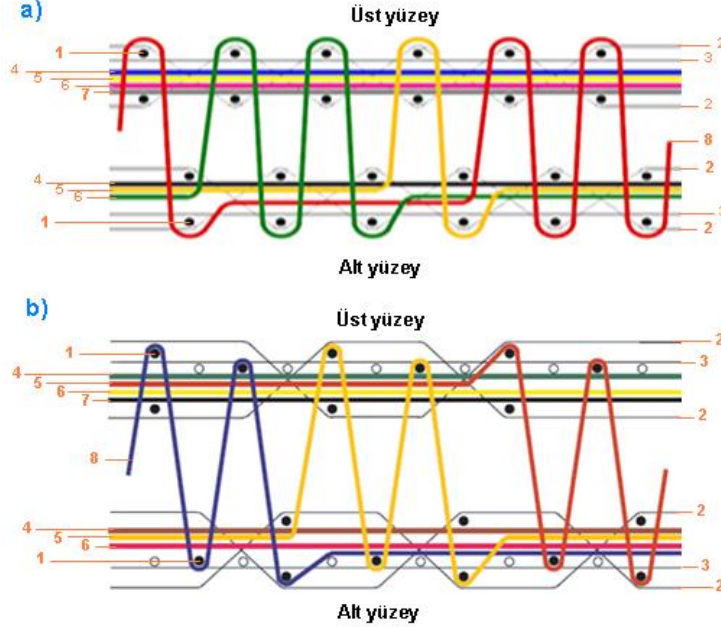
Literatürden görüleceği üzere, makine halılarının kullanım performansına etki eden birçok parametre özellikle dinamik ve statik yük altında hav çökmesi ve katlanma gibi çalışmalar olmasına karşın aşınma ve sürtünme davranışları ile ilgili yapılan araştırmaların sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Dolayısı ile bu çalışmada farklı özelliklerdeki polipropilen halı yapıların aşınma ve sürtünme davranışları incelenerek halıların performans özellikleri tanımlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Halı Yapısı

Çalışmada kullanılan halı örnekleri farklı atkı sıklıklarında ve hav yüksekliklerinde Gümüşsuyu Halı Ltd. Şti. A.Ş. tarafından temin edilmiştir. Çözgü ipliği olarak polyester-pamuk karışımı iplik, atkı ipliği olarak %100 jüt ve hav ipliği olarak ta %100 polipropilen kullanılmıştır. Tablo 1'de çalışmada kullanılmış olan halı numunelerine ait atkı, çözgü ve hav iplikleri ile ilgili karakteristik özellikler verilmiştir. Tablo 2' de ise polipropilen havlı halı numunelerin yapısal parametreleri sunulmuştur. Tablo 2'den görüleceği üzere hav yüksekliği ve halı ağırlığı, üzerinde deneysel çalışma yapılacak örneklerin üretildiği halı biriminden elde edilen değerlerle, bunların laboratuvarında ölçülen değerleri (parantez içinde) kıyaslamalı olarak bir arada verilmiştir. Polipropilen havlı halılar 3 farklı hav yüksekliği ve 3 farklı atkı sıklığında üretilmiştir. Polipropilen halılar, Van De Wiele halı tezgahında üç kancalı wilton yüz yüze halı dokuma prensibi ile üretilmiştir. Tezgâh ile uyumlu Weaving ve Booria programları kullanılarak tasarlanmıştır. Halı örnekleri 2/2V ve 1+2/3V dokuma konstrüksiyonlarında üretilmiştir. Bu yapılar Şekil 1 (a-b)'de gösterilmektedir. Her iki dokuma halı yapısında da kesişmesiz dolgu ve kesişmeli çözgü (%80/20 polyester/pamuk karışımı iplik), atkı (%100 jüt) ve renkli hav iplikleri (%100 polipropilen) bulunmaktadır.

48 çözgü x 48 atkı (gevşek), 48 çözgü x 55 atkı (sıkı) ve 48 çözgü x 70 atkı (çok sıkı) uç/10 cm olmak üzere üç farklı sıklıkta halı örneği kullanılmıştır. Halı örnekler 5.55-5.88 mm (kısa), 6.58-7.75 mm (orta) ve 8.93-10.67 mm (uzun) olmak üzere üç farklı hav yüksekliğindedir. Ayrıca gevşek ve orta sıklıkta dokuma halı yapısı 2/2V dokuma deseni ile, sık dokuma halı ise 1+2/3V dokuma deseni ile yapılmıştır. Halıdaki hav ipliği polipropilen liftir ve ipliğin lineer yoğunluğu 180 tex'dir. Aynı zamanda sürekli filamentlerden oluşur ve bükümsüzdür. Hav ağırlığı ve halı ağırlığı sırasıyla 1006-2116 g/m² ve 1850-3011 g/m² arasında değişmektedir. Ölçülen hav yüksekliği ve halı kalınlığı sırasıyla 5.55-10.67 mm ve 8.7-14.3 mm arasında değişmektedir. Tablo 1, hav ipliği ve polipropilen halı yapılarının özelliklerini göstermektedir. Halı numuneleri üzerinde oluşturulan tüm veriler ortalama değerlerdir.



Şekil 1. Halı yapılarının şematik görünüşleri. (a) 2/2 V dokuma tasarımı; (1) atkı, (2) çözgü (geçmeli veya zincir), (3) çözgü (dolgu), (4-8) hav iplikleri [35], (b) 1+2/3 V dokuma tasarımı (1) atkı, (2) çözgü (geçmeli veya zincir), (3) çözgü (dolgu), (4-8) hav iplikleri [35].

Tablo 1. Polipropilen halı numunelere ait atkı, çözgü ve hav iplikleri ile ilgili karakteristik özellikler.

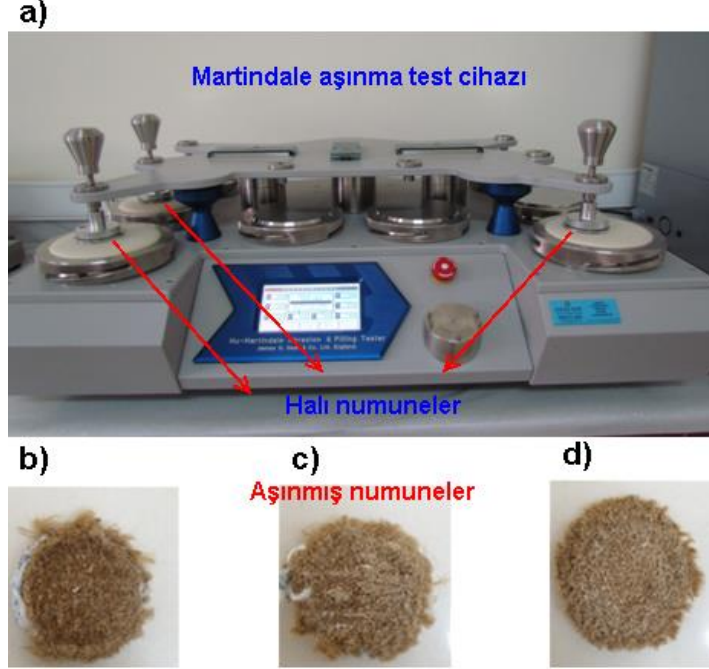
İplik türü		Materyal	İplik lineer yoğunluğu (tex)
Çözgü ipliği	Dolgu ipliği	%80 Polyester/ %20 Pamuk	211
	Zincir ipliği	%80 Polyester/ %20 Pamuk	118
Atkı ipliği		Jüt	556
Hav ipliği		Polipropilen	180

Tablo 2. Polipropilen halı örneklerin yapısal parametreleri.

Numune kodu	Çözgü sıklığı (uç/10 cm)	Atkı sıklığı (uç/10 cm)	Dokuma konstrüksiyonu	Hav uzunluğu (mm)	Hav sıklığı (düğüm/m ²)	Hav ağırlığı (g/m ²)	Halı kalınlığı (mm)	Halı ağırlığı (g/m ²)
1PP6	48	48	2/2 V	6 (5.88)	230400	1006	8.7	1850 (1936)
1PP 9	48	48	2/2 V	9 (6.58)	230400	1297	9.7	2140 (2067)
1PP12	48	48	2/2 V	12 (8.93)	230400	1546	12.2	2389 (2494)
2PP6	48	55	2/2 V	6 (5.85)	264000	1109	8.8	2034 (2114)
2PP 9	48	55	2/2 V	9 (7.39)	264000	1442	10.3	2367 (2077)
2PP12	48	55	2/2 V	12 (10.06)	264000	1727	13.0	2652 (2702)
3PP6	48	70	1+2/3 V	6 (5.55)	336000	1330	9.0	2225 (2141)
3PP 9	48	70	1+2/3 V	9 (7.75)	336000	1753	11.3	2649 (2668)
3PP12	48	70	1+2/3 V	12 (10.67)	336000	2116	14.3	3011 (2979)

2.2. Aşınma dayanımı (Martindale) testi

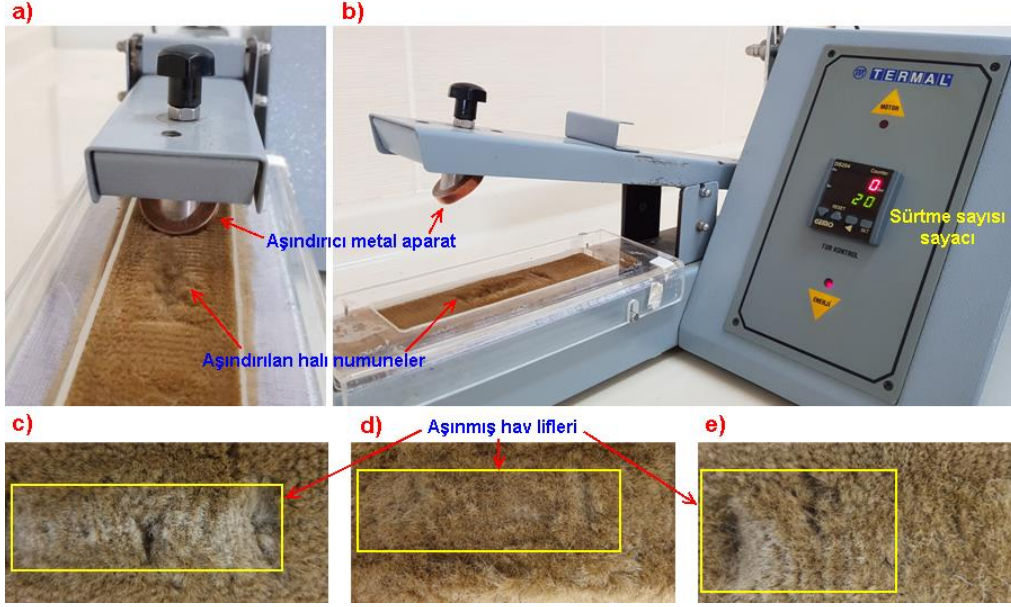
Polipropilen halı yapılarının aşınma özellikleri Martindale aşınma testi yöntemi (ISO 12947-3, 1998) [36] kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 2 (a-d)'de gösterildiği gibi, standarda uygun olarak halının aşınma sonrası kütle kaybını değerlendirmek için Nu-Martindale Aşınma Test cihazı (James H Heal, UK) kullanılmıştır. Kütle kaybı değerleri her 5000, 10000, 20000, 30000, 40000 ve 50000 aşınma devri sonunda kaydedilmiştir. Aşındırma için standart yün kumaş kullanılmış ve halı örneklerinin havlı yüzeyleri basınç (12 KPa) altında aşındırılmıştır. Halı örnekler aşınma devirlerinden sonra kalınlık kaybı eğilimi gösterdiği için kalınlık ölçümleri de kalınlık ölçer (Elastocon EV 07, İsveç) kullanılarak yapılmıştır [28].



Şekil 2. (a) Halı numunelerin Martindale cihazı ile aşınma testi esnasında alınmış görüntüleri (b) Kısa havlı ve çok sıkı halı numunenin aşınma sonrası görüntüsü (3PP6), (c) Orta havlı ve çok sıkı halı numunenin aşınma sonrası görüntüsü (3PP9) ve (d) Uzun havlı ve çok sıkı halı numunenin aşınma sonrası görüntüsü (3PP12) (dijital fotoğraflar).

2.3. Para sürtme (Token) testi

BS 2543 test standartlarına [37] (BS 2543, 2004 [37]; TS 3374 (ISO 1765), 1991 [38]) uygun olarak halı örneklerin sürtünme davranışını değerlendirmek için metal sürtücü Crockmeter (Termal, Türkiye) kullanılmıştır. Kuru halının lineer sürtünmeye karşı direnci, halı hav yüzeyi ile 45° açı yapan metal sürtücü ile incelenmiş ve halı havının deforme olan bölgeleri dijital kamera görüntüleri kullanılarak görsel olarak değerlendirilerek tanımlanmıştır. Geliştirilen metal sürtücü aparatın çapı yaklaşık 29 mm, kalınlığı 6 mm ve bakırdır [28]. Halı el temizliği simüle edildiği için para sürtme testi kullanılmıştır. Para sürtme test yöntemi, Şekil 3'de gösterildiği gibi düşük basınç (9 N) altında, halı hav yüzeyi ile 45° açı yapacak şekilde metal bir sürtücü ile uygulanmıştır. Token sürtme testine tüm numunelerin deformasyonları görsel olarak birbirine benzer olana kadar devam edilmiş ve test sonuçları sürtme devir sayısı ile ifade edilmiştir. Bir sürtme devri (adım), metal sürtücünün halı hav yüzeyinde doğrusal olarak bir gidiş-dönüş hareketi olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3. Halı numunesi üzerinde sürtünme testi sırasında metal sürtücü crockmeter. (a) önden görünüş, (b) cihazın tam görünüşü, (c) gevşek ve uzun havlı halının görüntüsü (IPP12), (d) sıkı ve uzun havlı halının görüntüsü (2PP12), (e) çok sıkı ve uzun havlı halının görüntüsü (3PP12) (dijital fotoğraflar).

Polipropilen halı örnekleri ve hav kütlesi ağırlık kaybı ölçümleri, Ohaus Adventurer™ Pro AV812 (Ohaus Corp., ABD) dijital terazisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ağırlık ölçümündeki hata payı $\pm 0,1$ mg' dir. Halı hav kalınlığı ve Martindale testleri sonrası halı kalınlığı, sırasıyla Elastocon EV07 dijital cihazı kullanılarak TS 7125 (ISO 1766) [39] ve TS 3374 (ISO 1765) [38] esas alınarak ölçülmüştür. Tüm mekanik testler, $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklığa ve 50 ± 10 bağıl neme sahip standart laboratuvar atmosferinde gerçekleştirilmiştir (ISO 139, 2005) [40]. Aşınma dayanımı ve para sürtme testlerinden sonra halı numunelerinin bozulan yüzeyini görüntülemek için yüksek çözünürlüklü dijital kamera (CANON PowerShot SX30 IS, JP) kullanılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Aşınma dayanımı

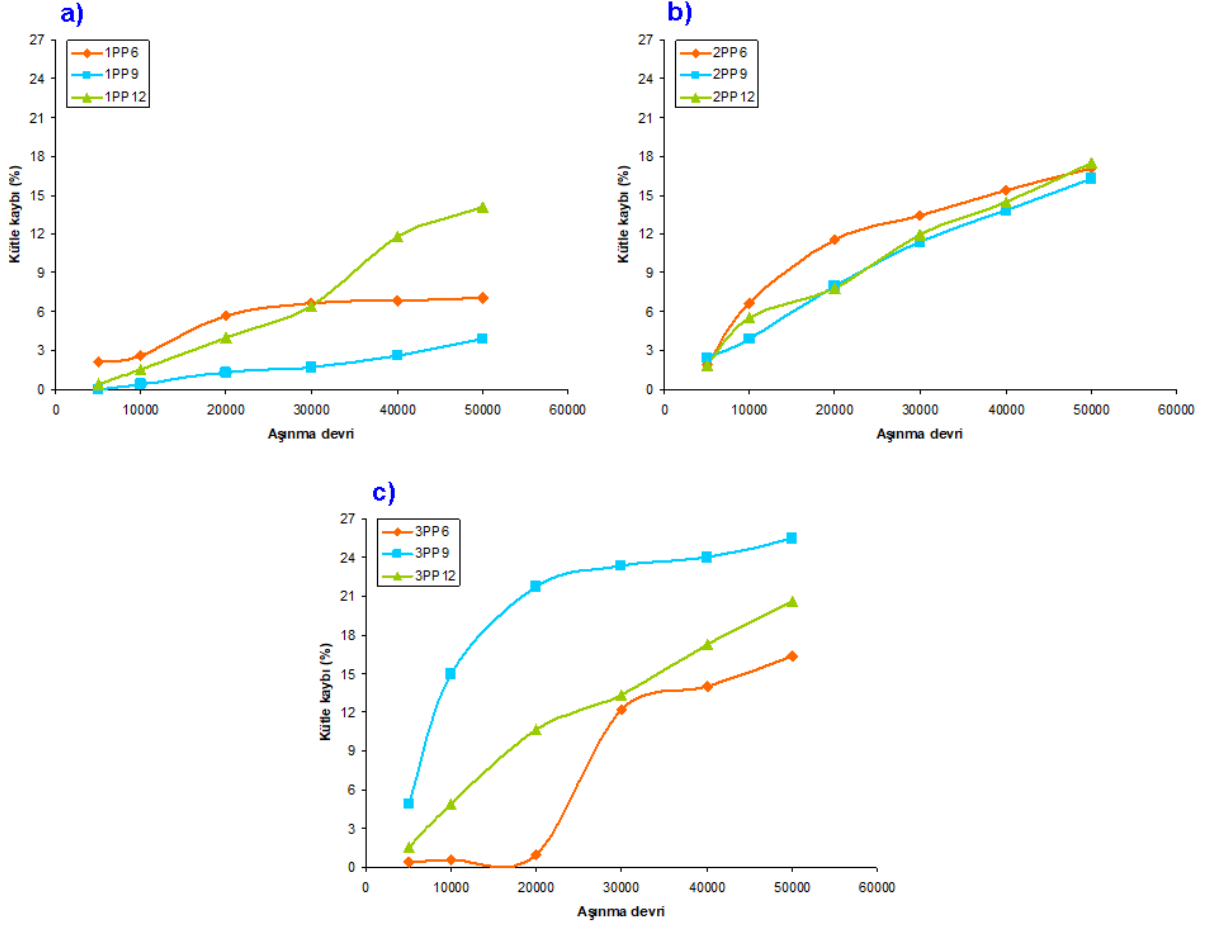
Farklı aşınma devirlerinde halı hav kütle kaybı, kalınlık kaybı ve halı yapısı ile ilişkili olarak Martindale aşınma dayanımı test sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Ayrıca, Şekil 4 (a-c) ve 5(a-c)'de halı numunelerin Martindale aşınma testinden sonra çeşitli aşınma devirlerinde hav kütle kaybı yüzde (%) ve miligram (mg) olarak sırası ile gösterilmiştir.

Tablo 3 ve Şekil 4(a-c)'de görüldüğü üzere, hav yoğunluğu arttığında, tüm halı örneklerinin halı kütle kayıpları (%) artmıştır. Örneğin 1PP9, 2PP9 ve 3PP9 halı örneklerinin ortalama halı kütle kayıplarının (%) sırasıyla %3.88, %16.23 ve %25.44 arttığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni, halının birim alanındaki düğüm sayısıdır. Aynı hav yoğunluğunda (düğüm/m²), hav yüksekliği arttıkça tüm halı örneklerindeki halı kütle kayıpları (%) orantılı olarak artmıştır. Örneğin, 1PP6, 2PP9 ve 3PP12 halı örneklerinin ortalama halı kütle kayıpları (%) sırasıyla %7.11, %16,23 ve %20.60 arttığı tespit edilmiştir. Öte yandan, aşınma devirleri 5000 den 50000 'e artırıldığında, ortalama halı kütle kayıpları (%) %0.38'den %25.44'e yükselmiştir. Bu sonuçlardan aşınma devri arttıkça halıların polipropilen hav kütle kayıplarının da (% , mg) arttığı görülmüştür. Ayrıca, hav yoğunluğu ve hav yüksekliğinin halı tasarımında kritik parametreler olduğu sonucuna varılmıştır. Hav sıklığı ve hav yüksekliği arttığında aşınma esaslı yüklemeler altında kütle kaybında da artışlar olduğu anlaşılmıştır. Hav sıklığı ve yüksekliği arttıkça birim alan başına düşen hav ipliği miktarı (düğüm/m²) dolayısı ile hav yüksekliğinin de artması ile birlikte birim alan başına düşen lif yoğunluğu artmaktadır. Bu sebeple lif yoğunluğu daha fazla olan halı örneklerde aşınma sonucunda daha fazla lif kaybı ve kütle kaybı olduğu görülmüştür. Ayrıca numunelerin zemin mimarisinin (iplik setlerinin birbirleri ile yapmış olduğu kesişmeler) halı aşınma özellikleri üzerindeki etkisinin kayda değer bir öneme sahip olmadığı bu çalışma ile tespit edilmiştir.

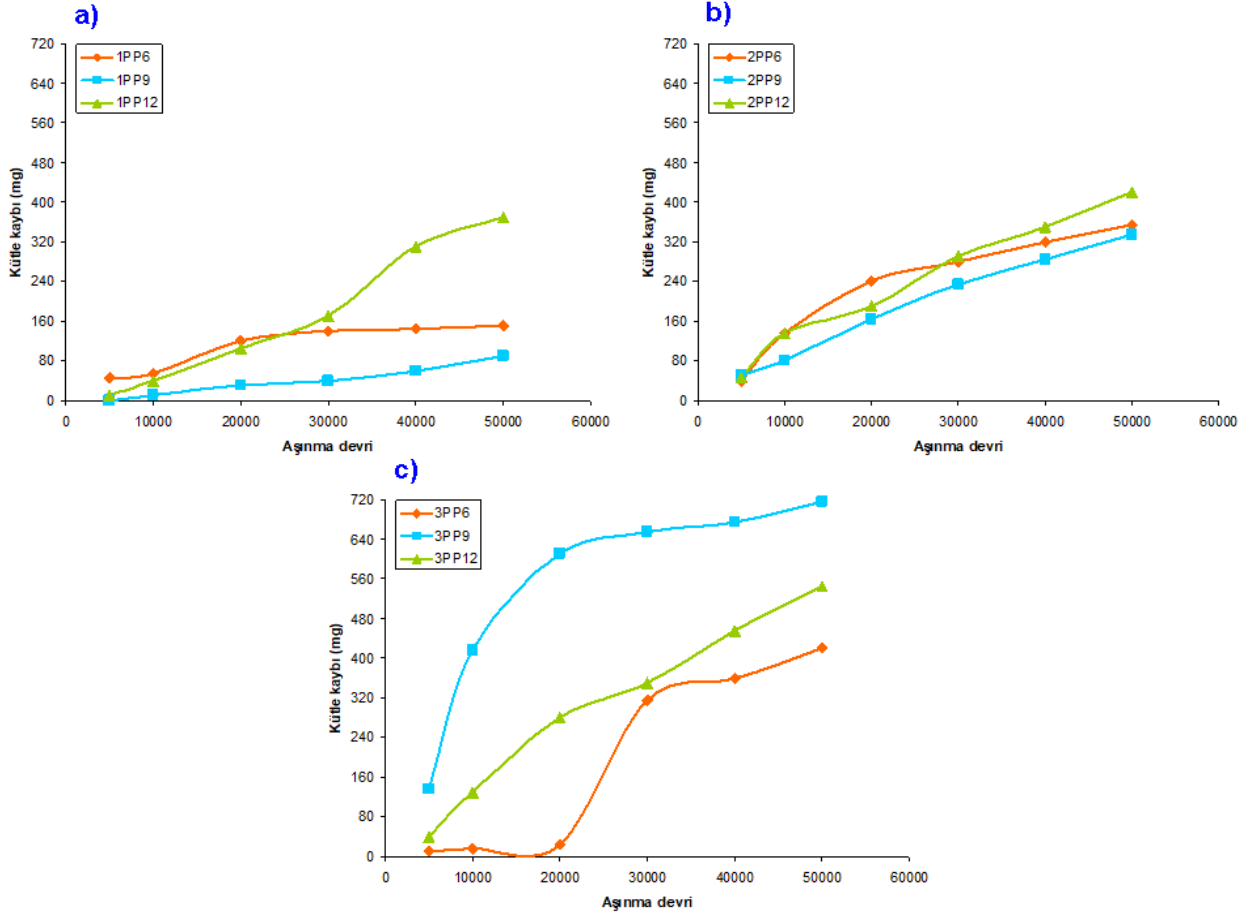
Tablo 3. Çeşitli halı örnekleri üzerinde yapılan Martindale aşınma testi sonrası aşınma devri, hav kütle kaybı ve halı kalınlık kaybı ilişkileri.

Örnek kodu	Aşınma devri (devir/dk)	Halı kütlesi (mg)	Halı kütle kaybı (mg)	Halı kütle kaybı (%)	Halı kalınlığı (mm)	Halı kalınlık kaybı (mm)	Halı kalınlık kaybı (%)
1PP6	0	2105	0±0	0.00±0.00	8.7		
	5000	2060	45±21.21	2.14±1.03	-		
	10000	2050	55±21.21	2.62±1.03	-		
	20000	1985	120±70.71	5.68±3.30	-	1.92±0.13	22.07±1.46
	30000	1965	140±84.85	6.63±3.96	-		
	40000	1960	145±77.78	6.87±3.63	-		
	50000	1955	150±70.71	7.11±3.29	6.78±0.13		
1PP9	0	2320	0±0	0.00±0.00	9.7		
	5000	2320	0±0	0.00±0.00	-		
	10000	2310	10±0	0.43±0.00	-		
	20000	2290	30±14.14	1.29±0.61	-	1.5±0.14	18.56±1.46
	30000	2280	40±0.00	1.72±0.00	-		
	40000	2260	60±0.00	2.59±0.00	-		
	50000	2230	90±42.43	3.88±1.83	7.9±0.14		
1PP12	0	2630	0±0	0.00±0.00	12.2		
	5000	2620	10±0	0.38±0.00	-		
	10000	2590	40±14.14	1.52±0.52	-		
	20000	2525	105±21.21	4.00±0.85	-	4.25±0.81	34.84±6.61
	30000	2460	170±56.57	6.45±2.08	-		
	40000	2320	310±42.43	11.78±1.49	-		
	50000	2260	370±56.57	14.06±2.00	7.95±0.81		
2PP6	0	2085	0±0	0.00±0.00	8.8		
	5000	2045	40±28.28	1.96±1.47	-		
	10000	1950	135±106.07	6.63±5.47	-		
	20000	1845	240±14.14	11.55±1.34	-	3.64±1.00	41.36±11.41
	30000	1805	280±0.00	13.45±0.78	-		
	40000	1765	320±28.28	15.33±0.47	-		
	50000	1730	355±7.07	17.06±1.32	5.16±1.00		
2PP9	0	2065	0±0	0.00±0.00	10.3		
	5000	2015	50±14.14	2.40±0.51	-		
	10000	1985	80±0.00	3.88±0.28	-		
	20000	1900	165±7.07	8.00±0.23	-	5±0.28	48.54±2.75
	30000	1830	235±7.07	11.42±1.16	-		
	40000	1780	285±21.21	13.80±0.03	-		
	50000	1730	335±21.21	16.23±0.14	5.30±0.28		
2PP12	0	2400	0±0	0.00±0.00	13		
	5000	2355	45±21.21	1.85±0.77	-		
	10000	2265	135±63.64	5.56±2.32	-		
	20000	2210	190±84.85	7.83±3.07	-	6.75±0.35	51.92±2.72
	30000	2110	290±113.14	11.97±4.01	-		
	40000	2050	350±84.85	14.50±2.68	-		
	50000	1980	420±42.43	17.48±0.74	6.25±0.35		
3PP6	0	2575	0±0	0.00±0.00	9		
	5000	2565	10±0.00	0.39±0.01	-		
	10000	2560	15±7.07	0.59±0.29	-		
	20000	2550	25±7.07	0.97±0.30	-	2.09±0.68	23.22±7.54
	30000	2260	315±91.92	12.19±3.27	-		
	40000	2215	360±42.43	13.96±1.30	-		
	50000	2155	420±0.00	16.32±0.40	6.91±0.68		
3PP9	0	2820	0±0	0.00±0.00	11.3		
	5000	2685	135±35.36	4.84±1.59	-		
	10000	2405	415±190.92	14.99±7.82	-		
	20000	2210	610±28.28	21.72±2.53	-	5.02±0.45	44.38±3.94
	30000	2165	655±35.36	23.33±2.89	-		
	40000	2145	675±21.21	24.02±2.44	-		
	50000	2105	715±21.21	25.44±2.54	6.29±0.45		

	0	2635	0±0	0.00±0.00	14.3		
	5000	2595	40±14.14	1.51±0.45	-		
	10000	2505	130±56.57	4.88±1.87	-		
3PP12	20000	2355	280±14.14	10.63±0.06	-	8.52±0.25	59.58±1.78
	30000	2285	350±0.00	13.30±0.75	-		
	40000	2180	455±49.50	17.24±0.91	-		
	50000	2090	545±106.07	20.60±2.86	5.78±0.25		

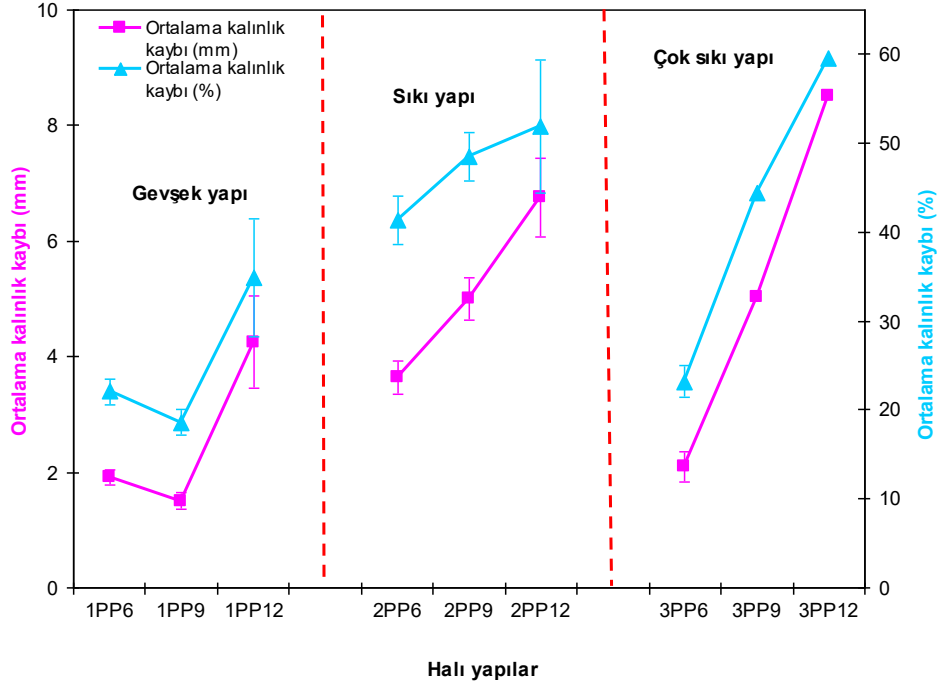


Şekil 4. Halı numunelerinde martindale aşınma testinden sonra çeşitli aşınma devirleri ve hav kütle kaybı (%) ilişkisi. (a) Gevşek halılarda (çeşitli hav yüksekliklerinde) kütle kaybı (%), (b) sıkı halılarda (çeşitli hav yüksekliklerinde) kütle kaybı (%) ve (c) çok sıkı halılarda (çeşitli hav yüksekliklerinde) kütle kaybı (%).



Şekil 5. Halı numunelerinde martindale aşınma testinden sonra çeşitli aşınma devirleri ve hav kütle kaybı (mg) ilişkileri. (a) Gevşek halılarda (çeşitli hav yüksekliklerinde) kütle kaybı (mg), (b) sıkı halılarda (çeşitli hav yüksekliklerinde) kütle kaybı (mg) ve (c) çok sıkı halılarda (çeşitli hav yüksekliklerinde) kütle kaybı (mg).

Tablo 3 ve Şekil 6'de gösterildiği üzere, hav yoğunluğu arttığında, tüm halı numunelerinin halı kalınlık kayıpları (%) 50000 aşındırma devrinden sonra aşındırılan alanda daha fazla düzlem dışı elyafın temas etmesinden dolayı artmıştır. Örneğin 1PP12, 2PP12 ve 3PP12 halı örneklerinin ortalama halı kalınlık kayıpları (%) başlangıç halı kalınlık değerlerine göre sırasıyla %34.84, %51.92 ve %59.58 arttığı tespit edilmiştir. Aynı hav yoğunluğunda, hav yüksekliği arttıkça tüm halı örneklerinin halı kalınlık kayıplarının (%) bariz bir şekilde arttığı anlaşılmıştır. 1PP6, 1PP9 ve 1PP12 halı örneklerinin ortalama halı kalınlık kayıpları (%) sırasıyla %22.07, %18.56 ve %34.84 elde edilmiştir.



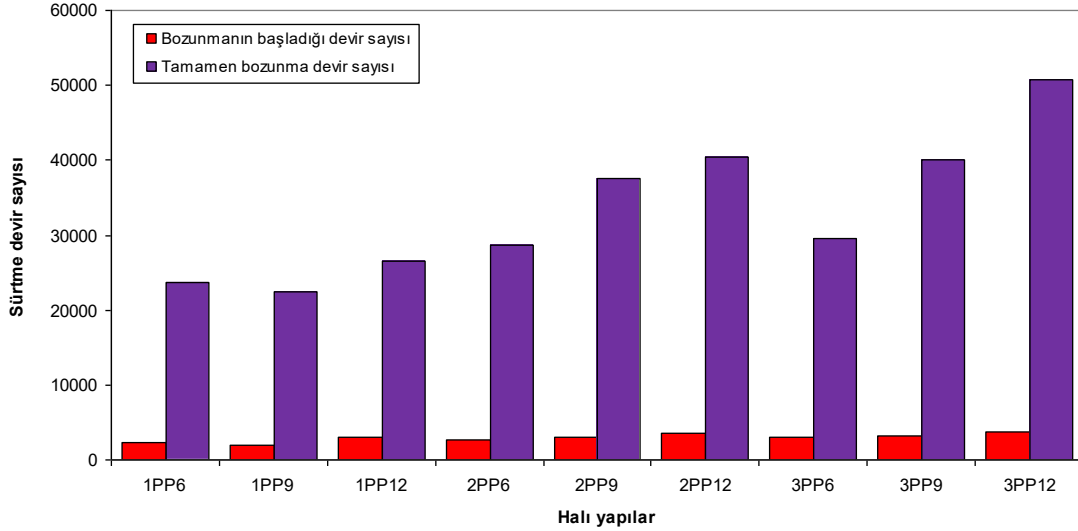
Şekil 6. Halı örneklerde martindale aşınma dayanımı testi sonrası (50000 aşınma devrinde) halı kalınlık kaybı (mm, %) ilişkisi.

3.2. Sürtünme dayanımı

Halı örneklerine uygulanan metal sürtme testi (Token) sonuçları Tablo 4'da verilmiştir. Şekil 7'de ise çeşitli halı örnekleri için para sürtme testi sonuçları görülmektedir. Tablo 4 ve Şekil 7'den görüleceği üzere, her bir hav yoğunluğu için hav yükseklikleri arttığında, tamamen kopmuş hav ipliklerinden sonraki sürtme devir sayısı artmıştır. Çok sıkı halı yapıları dışında gevşek ve sıkı halılarda da benzer ilişkiler tespit edilmiştir. Ayrıca, tamamen kopmuş hav ipliklerinden sonraki sürtme devir sayısı ile kopmuş hav ipliklerinin başlangıcındaki sürtme devir sayısının hemen hemen tüm halı yapıları için birbirleri ile orantılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 4. Çeşitli halı örneklerinde sürtme testinden sonra sürtme devir sayısı ve bozulan hav ipliği ilişkisi.

Örnek kodları	Bozunmanın başladığı devir sayısı	Tamamen bozunma devir sayısı
1PP6	2250	23750
1PP9	2000	22500
1PP12	3000	26500
2PP6	2750	28750
2PP9	3000	37500
2PP12	3500	40500
3PP6	3000	29500
3PP9	3250	40000
3PP12	3750	50750



Şekil 7. Çeşitli halı örnekleri için para sürtme testi sonuçları.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı hav yüksekliği ve yoğunluğundaki halılarda aşınma ve sürtünme özellikleri incelenmiştir. Genel olarak, hav yoğunluğu arttığında, aşınma yükü altındaki tüm halı numunelerinin halı kütle kayıpları (%) artmıştır. Aynı hav yoğunluğunda, hav yüksekliği arttıkça tüm halı örneklerinin halı kütle kayıplarının (%) bariz bir şekilde arttığı veriler üzerinden gözlenmiştir. Bununla birlikte, birim alan başına düşen hav yoğunluğu ve hav yüksekliklerinin artması ile aşınma testleri sonucunda halı örneklerde kalınlık kaybı meydana geldiği tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuçların literatür ile de uyumlu olduğu anlaşılmıştır [27]. Hav yoğunluklarında ki farklılık halıların zemin yapısında atkı sıklıklarının farklı olmasından ve daha sıkı yapılarda daha yoğun hav miktarı olması ile açıklanmıştır [28]. Ayrıca, numunelerin zemin mimarisinin halı aşınma özellikleri üzerindeki etkisinin önemsiz olduğu tespit edilmiştir. Her bir hav yoğunluğu için hav yüksekliği arttığında, sürtme devir sayısının da arttığı anlaşılmıştır. Çok sıkı halı yapıları dışında gevşek ve sıkı halı yapılarında da benzer ilişkiler tespit edilmiştir. Daha yüksek sürtme devirlerinde bozunmaların gerçekleşmesi, birim alan başına düşen hav miktarının daha fazla olması sebebi ile açıklanmıştır. Elde edilen bu sonuçların literatürde yapılmış olan çalışmalarla da uyumlu olduğu görülmüştür [28, 32].

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan halı numunelerin üretimlerinde sağlamış oldukları değerli katkılarından dolayı Gümüşsuyu Halı A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] Sarıoğlu, E., Babaarslan, O., Or, S. Z. 2019. Lif Karışım Oranı ve Toz Alma İşleminin Wilton Tipi Yüz-Yüze Halıların Tozuma Derecesine Etkileri. *Tekstil ve Mühendis*, 26(115), 309-317.
- [2] Chaudhuri, S. K. 2017. *Advances in Carpet Manufacture: Structure & properties of carpet fibres & yarns*. Woodhead Publishing.
- [3] Gupta, S.K., Goswami, K.K., Majumdar, A. 2015. Durability of Handmade Wool Carpets: A Review. *Journal of Natural Fibers*, 12(5), 399-418.
- [4] Bayramoğlu, E. 2018. Gaziantep ili makine halısı üretimi. Gazi Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü, Tekstil Tasarımı Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 164s, Ankara.
- [5] Presley, A. B. 1997. Evaluation of Carpet Appearance Loss: Structural Factors. *Textile Research Journal*, 67(3), 174-180.
- [6] Wang, J., Wood, E. J. 1994. A New Method for Measuring Carpet Texture Change. *Textile Research Journal*, 64(4), 215-224.

- [7] Wilding, M. A., Lomas, B., Woodhouse, A. K. 1990. Changes Due to Wear in Tufted Pile Carpets. *Textile Research Journal*, 60(11), 627-640.
- [8] Xu, B. 1997. Quantifying Surface Roughness of Carpets By Fractal Dimension. *Clothing and Textile Research Journal*, 15(3), 155-161.
- [9] Postle, R., Carnaby, G. A., de-Jong S. 1988. *The mechanics of wool structures*. John Wiley, New York.
- [10] Beil, N. B., Roberts, W. W. 2002. Modeling and Computer Simulation of the Compressional Behavior of Fiber Assemblies: Part I: Comparison to Van Wyk's Theory. *Textile Research Journal*, 72(4), 341-351.
- [11] Vangheluwe, L., Kiekens, P. 1997. Resilience Properties of Polypropylene Carpets. *Textile Research Journal*, 67(9), 671-676.
- [12] Dayiary, M., Najar, S. S., Shamsi, M. 2010. An Experimental Verification of Cutpile Carpet Compression Behavior. *The Journal of the Textile Institute*, 101(6), 488-494.
- [13] Laughlin, K. C., Cusick, G. E. 1968. Carpet Performance Evaluation, Part II: Stress-Strain Behavior. *Textile Research Journal*, 38(1), 72-80.
- [14] Wood, E. J. 1993. Description and Measurement of Carpet Appearance. *Textile Research Journal*, 63(10), 580-594.
- [15] Savilla, B. P. 1999. *Physical testing of textiles*. The Textile Institute, Woodhead Publishing.
- [16] Goswami, K. K. 2018. *Advances in carpet manufacture*, Elsevier Ltd, Cambridge, MA, USA.
- [17] Wu, J., Pan, N. Williams, K. R. 2007. Mechanical, Biomechanical and Psychophysical Study of Carpet Performance. *Textile Research Journal*, 77(3), 172-178.
- [18] McNeil, S. J., Tapp, L. S. 2016. The Design and İntial Evaluation of Visual Cues in Carpets to Assist Walking. *The Journal of The Textile Institute*, 107(3), 376-385.
- [19] Polat, E. 2013. Türkiye’de halı sektörünün ithalat ihracat dengesi. Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, İşletme Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 95s, Gaziantep.
- [20] Erdoğan, Ü. H. 2001. Ege bölgesinde üretilen makine halıları ve kullanılan liflerin başlıca özellikleri üzerine bir araştırma. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 123s. İzmir.
- [21] Kucuk, M., Korkmaz, Y. 2017. Sound Absorption Properties of Acrylic Carpets. *The Journal of The Textile Institute*, 108(8), 1398-1405.
- [22] Kucuk, M., Korkmaz, Y. 2019. Acoustic and Thermal Properties of Polypropylene Carpets: Effect of Pile Length and Loop Density. *Fibers and Polymers*, 20(7), 1519-1525.
- [23] Mehta, P.V. 1992. *An Introduction to quality control for the apparel industry*, ASQC Quality Press.
- [24] Collier, B. J., Epps, H. H., 1999. *Textile testing and analysis*, Prentice Hall.
- [25] Manich, A.M., Castellar, M. D. D., Sauri, R. M., Miguel, R. A., Barella, A. 2001. Abrasion Kinetics of Wool and Blended Fabric. *Textile Research Journal*, 71, 469-474.
- [26] Ozdil, N., Kayseri, G. O., Menguc, G. S. 2012. Analysis of abrasion characteristics in textiles, In: *Abrasion resistance of materials*, (Marcin Adamiak, Ed.) IntechOpen.
- [27] Onder, E., Berkalp, O. B. 2001. Effects of Different Structural Parameters on Carpet Physical Properties. *Textile Research Journal*, 71(6), 549-555.
- [28] Bilisik, K., Yolacan, G. 2009. Abrasion Properties of Upholstery Flocked Fabrics. *Textile Research Journal*, 79 (17), 1625-1632.
- [29] Gupta, N. P., Shakyawar, D. B., Sinha, R. D. 1998. Influence of Fibre Diameter and Medullation on Woollen Spun Yarns and Their Products. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 23, 32-37.
- [30] Shakyawar, D. B., Gupta, N. P., Patni, P. C., Arora, R. K. 2008. Computer-Aided Statistical Module for Hand-Knotted Carpets. *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 33(4), 405-410.
- [31] Bilisik, K., Turhan, Y., Demiryurek, O. 2011. Tearing Properties of Upholstery Flocked Fabrics. *Textile Research Journal*, 81(3), 290-300.
- [32] Bilisik, K., Turhan, Y., Demiryurek, O. 2011. Analysis and Tensile Characterization of Flocked Fabric After Rubbing. *Journal of the Textile Institute*, 102(9), 808-822.

- [33] Bhavani, K., Devi, S. 2012. Comparative Study of Colour Fastness Properties of Naturally Dyed Carpet Yarns Cellulosic in Composition. Asian Journal of Home Science, 7(2), 587-591.
- [34] Zhou, C. E., Zhang, Q., Kan, C. W. 2017. Some Properties of a Thickener for Preparing Inkjet Printing Ink for Nylon Carpet. Coloration Technology, 133, 116-121.
- [35] VANDEWIELE NV. Carpet weaving: Face-to-face carpet weaving. <http://www.vandewiele.be/carpetlooms.htm>, 2022.
- [36] ISO 12947-3. 1998. Determination of the abrasion resistance of fabrics by the Martindale method Part 3: Determination of mass loss.
- [37] BS 2543. 2004. Upholstery fabrics for end use applications.
- [38] TS 3374 (ISO 1765). 1991. Machine made textile floor coverings- determination of thickness. International Organization for Standardization.
- [39] TS 7125 (ISO 1766). 2003. Textile floor coverings-Determination of thickness of pile above the substrate. International Organization for Standardization.
- [40] ISO 139. 2005. Textiles-Standard atmospheres for conditioning and testing. International Organization for Standardization.