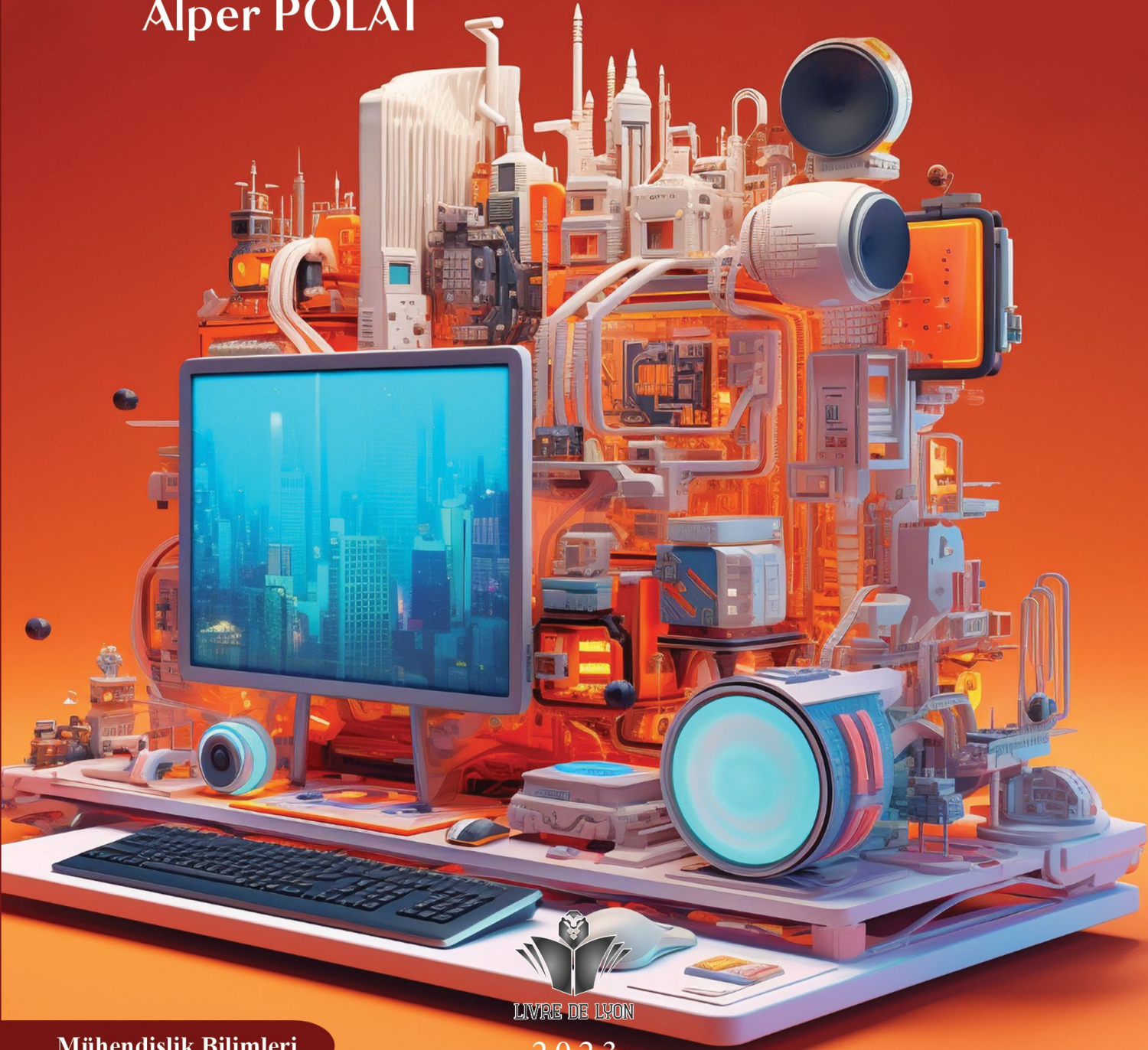


Mühendislik Bilimleri ve Teknolojileri Araştırmaları

Editörler

Yeliz AŞÇI

Alper POLAT



LIVRE DE LYON

2023

Mühendislik Bilimleri

Mühendislik Bilimleri ve Teknolojileri Araştırmaları

Editörler

Yeliz AŐCI & Alper POLAT



LIVRE DE LYON

Lyon 2023

Mühendislik Bilimleri ve Teknolojileri Araştırmaları

Editörler

Yeliz AŐCI & Alper POLAT



LIVRE DE LYON

Lyon 2023

Mühendislik Bilimleri ve Teknolojileri Araştırmaları

Editors • Prof. Dr. Yeliz AŐCI • Orcid:

• Doç. Dr. Alper POLAT • Orcid: 0000-0002-6368-5276

0000-0001-5618-058X

Cover Design • Motion Graphics

Book Layout • Motion Graphics

First Published • October 2023, Lyon

ISBN: 978-2-38236-625-7

copyright © 2023 by **Livre de Lyon**

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without prior written permission from the Publisher.

Publisher • Livre de Lyon

Address • 37 rue marietton, 69009, Lyon France

website • <http://www.livredelyon.com>

e-mail • livredelyon@gmail.com



LIVRE DE LYON

ÖNSÖZ

Değerli okuyucularımız;

Birbirinden kıymetli araştırmacılar tarafından hazırlanan ve 9 bölümden oluşan “Mühendislik Bilimleri ve Teknolojileri Araştırmalar” adlı eserimizi literatüre kazandırmış olmanın mutluluğunu ve onurunu sizlerle paylaşıyoruz. Genel mühendislik araştırmalarında son trendlerin ele alındığı bu eserde farklı mühendislik disiplinlerinden çeşitli araştırmalara ait verileri, analizleri ve bunlardan elde edilen sonuç-önerileri bulabilirsiniz.

Çalışmamızın mühendislik ve bilim dünyasına önemli katkılar sağlayacağına inancımız tam olmakla beraber, emeği geçen tüm araştırmacılara ve yayın ekibine teşekkürü borç biliriz.

Editör

Prof. Dr. Yeliz AŐCI

Doç. Dr. Alper POLAT

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	1
BÖLÜM I. METASEZGİZEL COOT-ANN YAPAY SİNİR AĞI MODELİ KULLANILARAK VİDEO SINIFLANDIRMA <i>İsmail İŞERİ & Ayşenur ÖZDEN</i>	1
BÖLÜM II. YAPAY ZEKA YÖNTEMLERİNİN AKCİĞER KANSERİ TANISINDAKİ PERFORMANS ANALİZİ <i>Sarp ÇOBAN & Gökhan KAYHAN</i>	27
BÖLÜM III. TEKSTİL ATIK SUYU RENK GİDERİMİNİN TAM FAKTÖRİYEL TASARIM İLE OPTİMİZASYONU <i>Ezgi AKTAR DEMİRTAS & YELİZ AŞÇI</i>	45
BÖLÜM IV. MİKROKİRLETİCİLERİN SESSİZ TEHLİKESİNE KARŞI: EN YENİ ARITMA STRATEJİLERİ <i>Onur SÖZÜDOĞRU</i>	61
BÖLÜM V. YAKIT PİLLERİ <i>Şevval TUNA & Nisa Nur ATAK & Battal DOĞAN & Zeynep ERDEM</i>	91
BÖLÜM VI. YAKIN ALAN (KAYNAK) YER HAREKETİ <i>Berrak FIRAT</i>	113
BÖLÜM VII. BUTRALİNİN CAMSI KARBON ELEKTROTLA DİFERANSİYEL PULS VOLTAMETRİSİ YÖNTEMİ KULLANILARAK ELEKTROKİMYASAL ANALİZİ <i>Berna KOÇAK & Hüseyin ÇELİKKAN</i>	125
BÖLÜM VIII. SİYAH BAYBURT TAŞININ BAZI MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ <i>Ömer CAN & Anıl AKSOY & Volkan KÜPÇÜ</i>	139
BÖLÜM IX. TEKNOLOJİK ÜRÜNLERİN ÜRETİM TAHMİN DEĞER İNCELEMESİ: ROBOTLAR, ROBOT KOL KULLANIMI (FABRİKA KULLANIMI), ENDÜSTRİYEL ROBOTLAR, İROBOT <i>Rabia KOCAER</i>	153

BÖLÜM I

METASEZGİSEL COOT-ANN YAPAY SİNİR AĞI MODELİ KULLANILARAK VIDEO SINIFLANDIRMA

Video Classification Using the Metaheuristic Coot-Ann Neural Network Model

İsmail İŞERİ¹ & Ayşenur ÖZDEN²

*¹(Dr. Öğr. Üyesi) Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye
E-mail: ismail.iseri@omu.edu.tr
ORCID: 0000-0002-0442-1406*

*²(Yüksek Lisans Öğrencisi) Ondokuz Mayıs Üniversitesi,
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü,
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Samsun, Türkiye
E-mail: aysenur.ozden@bil.omu.edu.tr
ORCID: 0000-0003-4728-105X*

1. Giriş

1943 yılında McCulloch ve Pitts tarafından ilk kez önerilen (McCulloch ve Pitts, 1943) Yapay Sinir Ağları (YSA), insan beyninin davranışlarından ilham alarak geliştirilmiş modellerdir. YSA, küçük birimler olarak adlandırılan yapay nöronlar kullanır, bu birimlere düğüm de denir. Her düğümün ağırlık değeri bulunur ve bilgi aktarımını beyindeki sinapsları taklit ederek gerçekleştirir. Çıktı bilgisi, girdi katmanını ile gizli katmanlar arasındaki

* Bu çalışma Dr.Öğr.Üyesi İsmail İŞERİ danışmanlığındaki “Coot Optimizasyon Algoritması Temelli Yapay Sinir Ağı Modeli” başlıklı yüksek lisans tez çalışması kapsamında üretilmiştir (Yüksek Lisans. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, Türkiye, 2023).

matematiksel hesaplamalar sonucunda elde edilir. YSA, uyarlanabilirlik, genelleme yeteneği ve öğrenme kabiliyeti ile uluslararası araştırma topluluğu tarafından büyük ilgi görmüştür. Günümüzde YSAlar, özellikle görüntü işleme, konuşma tanıma ve adaptif kontrol alanlarında başarıyla kullanılmaktadır.

Sinir ağı eğitiminde kullanılan öğrenme algoritmaları, YSA tarafından üretilen çıktı ile hedef çıktı arasındaki hatayı temel alan bir maliyet fonksiyonunu en aza indirerek düğümlerin ağırlıklarını ve bias değerlerini ayarlar veya değiştirir. YSA'nın daha doğru sonuçlar elde etmesi ve başarılı sınıflandırmalar yapabilmesi için bias değeri ve ağırlık değerlerinin en uygun şekilde güncellenmesi gerekmektedir.

Öğrenme algoritmaları temelde iki türe ayrılır: matematiksel/geleneksel ve stokastik. Matematiksel/geleneksel algoritmalar arasında Levenberg Marquardt, eşlenik gradyan ve geri yayılım algoritması gibi klasik yöntemler bulunurken, stokastik öğrenme algoritmaları grubuna sürü algoritmaları ve genetik algoritmalar gibi algoritmalar dahildir (Si vd., 2022). Genellikle YSAlar, gradyan inişi (GD) tekniklerine dayalı geri yayılım algoritmalarıyla eğitilir. Ancak GD teknikleri, gradyan bilgisini yinelemeli olarak hesapladığı için zaman alıcı olabilir ve yerel optimumlarda sıkışma riski taşır. Bu, YSA'ların etkinliğini ve doğruluğunu azaltabilir. Bu nedenle yerel optimumlardan kaçınmak için YSA'ların eğitiminde meta-sezgisel algoritmalar kullanılmıştır.

Metasezgisel algoritmalar, canlıların doğadaki davranışlarından esinlenerek geliştirilmiştir ve doğal optimizasyon algoritmaları olarak da bilinir. Zorlu optimizasyon problemleri, kısa süre içinde doğru bir şekilde çözilemeyen problemler olarak kabul edilir ve bu tür problemler, meta-sezgisel yöntemlerle optimize edilebilir.

Bu yöntemler, problemin doğasından bağımsızdır ve stokastik bir yaklaşım kullandıkları için türev bilgisine ihtiyaç duymazlar (Faramarzi vd., 2020). Hayvanların hareketlerini ya da avlanma sırasındaki davranışlarından ilham alınarak geliştirilmiş olan sürü temelli algoritmalar metasezgisel algoritmaların bir kategorisidir (Abualigah vd., 2021). Sürü temelli metasezgisel algoritmalar Gri Kurt Optimizasyonu (Gray Wolf Optimization) (Mirjalili vd., 2014), Ateşböceği Optimizasyon Algoritması (Firefly Optimization Algorithm) (Yang, 2010), Yapay Arı Kolonisi Algoritması (Artificial Bee Colony Algorithm) (Karaboğa vd., 2007), Yarasa Algoritması (Bat Algorithm) (Yang ve Hossein Gandomi, 2012) ve Yusufçuk Algoritması (Dragonfly Algorithm) (Mirjalili, 2016) gibi temelinde sürü davranışını modelleyen algoritmalarıdır.

Günümüzde internet kullanımının hızla artmasıyla birlikte, büyük miktarda verinin (ses, metin, görsel, video) dijital platformlarda üretilmesi ve paylaşılması

olağan bir durum haline gelmiştir (Brezeale ve Cook, 2008). Veri miktarının çoğalması, verilerin analiz edilmesini daha karmaşık hale getirmiş ve bu da bilgiye erişim ve içeriğin yönetilmesi konularında yeni zorluklar yaratmıştır. Özellikle, video verilerinin büyük boyutları ve karmaşıklığı nedeniyle, bu verilerin etkili bir şekilde düzenlenmesi, sınıflandırılması ve anlamlandırılması oldukça önemli bir konu haline gelmiştir. Video sınıflandırma, bu bağlamda, büyük veri setlerindeki videoları kategorilere veya belirli özelliklere göre sınıflandırmak için kullanılan bir analiz ve işleme yöntemidir. Bu sayede, kullanıcılar istedikleri video içeriğini daha hızlı bulabilirler ve büyük veriler üzerinde anlamlı bilgilere ulaşabilirler.

Bu çalışmada, Yapay Sinir Ağı (YSA) eğitiminde metasezgisel bir yöntem olan COOT Optimizasyon Algoritması (COOT) kullanılarak geliştirilen COOT-ANN modelinin video sınıflandırma üzerinde bir uygulaması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada COOT algoritması, yapay sinir ağı eğitiminde gradyan iniş algoritmasının yerine kullanılarak ağırlık ve bias değerlerinin optimum değerleri elde edilmiştir. Deneylerde geliştirilen COOT-ANN modeli ResNet50 CNN modeli ile elde edilen özellik vektörleri üzerinde sınıflandırıcı model olarak kullanılmış ve spor veri kümesi üzerindeki sınıflandırma başarımları test edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu bölümde çalışmada kullanılan YSA, YSA eğitiminde kullanılan optimizasyon algoritmaları, COOT optimizasyon algoritması, COOT-ANN modeli, video sınıflandırma ve performans değerlendirme ölçütleri hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir.

2.1. Veri Seti

Çalışmada kullanılan veri seti <https://github.com/jurjsorinliviu/Sports-Type-Classifier/tree/master/data> linki üzerinden GitHub'dan alınmıştır ve futbol, tenis ve ağırlık kaldırma spor dallarına ait görsellerden oluşmaktadır. Veri setinde futbol etiketli 799, tenis etiketli 718 ve ağırlık kaldırma etiketli 577 adet görsel mevcuttur ve görseller '.jpg' ve '.png' uzantılıdır.

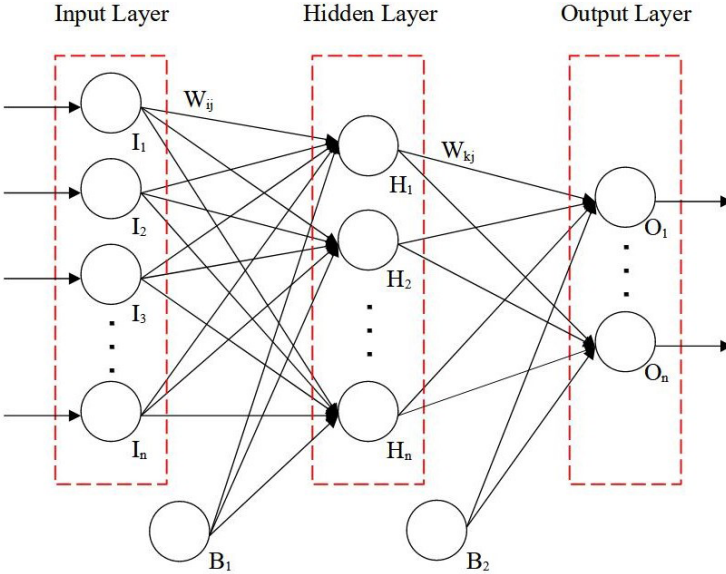
2.2. Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları (YSA'lar), biyolojik sistemlerden ilham alarak beyin hücrelerinin bilgi iletim sistemini modelleyen ve makine öğrenme alanında popüler bir algoritma grubunu oluşturan önemli bir yaklaşımdır (Adamowski ve Chan, 2011). YSA'lar, karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri yaklaşık olarak

hesaplamak için kullanılan, doğrusal olmayan optimizasyonu problemlerini modelleme yeteneğine sahiptir (Pineda ve Serpa, 2021). Bu nedenle sınıflandırma, desen tanıma, kümeleme gibi çeşitli makine öğrenme görevlerinde yaygın bir şekilde uygulanırlar. Bilim insanları tarafından YSA'ların performansını artırmak için hibrit sinir ağı modellerinin geliştirilmesi de aktif bir araştırma konusudur (Kayhan ve İşeri, 2023).

YSA'lar, birden çok işlem biriminden oluşan nöronlarla yapılandırılır. Girdi verileri, bağlantı ağırlıkları ile çarpıldıktan sonra birleştirme işlevi kullanılarak işlenir ve net çıktı üretilir. Bu çıktı değeri, genellikle hiperbolik tanjant, sigmoid, softmax ve ReLU gibi yaygın olarak kullanılan aktivasyon işlevleri tarafından işlenir (Irmak ve Gülcü, 2021). YSA'lar genellikle giriş, gizli ve çıkış katmanlarından oluşur, ve gizli katman bir veya daha fazla katmandan oluşabilir. Giriş verileri nöronların aktivasyon işlevi ile işlenerek istenen çıkış değeri oluşturulur. Nöronlar arasındaki bağlantılar, eğitim süreci sonucunda uygun ağırlıklarla ayarlanır (Sharma vd., 2022).

Bilgi, giriş katmanında işlenmez; bunun yerine alınan bilgi gizli katmanlara iletilir. Çıkış katmanında ise gizli katmandan gelen bilgi işlenir ve sonuç verisi üretilir. Üç katmanlı bir yapay sinir ağı yapısını gösteren bir örnek Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Üç Katmanlı YSA Modeli

2.2.1. Evrişimsel Sinir Ağları (CNN)

Evrişimsel sinir ağı (Convolutional Neural Network) modelleri, derin öğrenme yöntemlerinin yaygın olarak kullanılan özel bir mimarisidir. Özellikle son yıllarda yüz algılama, konuşma tanıma, el yazısı tanıma, davranış tanıma ve görüntü sınıflandırma alanında başarılı bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Evrişimsel sinir ağları görüntü ve video gibi iki boyutlu verilerden anlamlı bilgiler çıkarabildiği gibi tek boyutlu ve üç boyutlu veriler için de kullanılabilirler.

Temel olarak evrişimsel sinir ağı modeli girdi katmanı, gizli katman ve çıktı katmanından oluşmaktadır. Gizli katman ise konvolüsyonel katman (evrişim katmanı), havuzlama katmanı ve tam bağlantılı katman olarak adlandırılan üç katmandan oluşur. Evrişim katmanında giriş verisi filtrelenir ve özellik haritaları elde edilir. Giriş verisi görsel ya da ses gibi veriler olabilmektedir. Havuzlama katmanında ise evrişim katmanında elde edilen özellik haritaları örneklenir ve modelin kapsamlı ve hızlı öğrenmesi sağlanır. Tam bağlantılı katmandaki sinir hücreleri, önceki katmandan iletilen tüm giriş verilerine uygun olacak şekilde çıktı verileri üretir. Her katman, önceki katmanın çıktısına göre bir özellik oluşturur ve tüm katmanları bir araya getirerek eğitir, böylece özellik hiyerarşisi öğrenilir. Sonuç olarak, düşük seviye detaylardan yüksek seviye detaylara doğru etkili bir öğrenme hedeflenir (Acı ve Çırak, 2019). CNN ağı katmanlarının blok diyagramı Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. CNN Blok Diyagramı

2.2.1.1. ResNet-50

ResNet, “Residual Network” yani artık ağın kısaltmasıdır. 2015 yılında geliştirilen ResNet50 modeli, artık öğrenmeyi ilk kez kullanan bir Evrişimli Sinir Ağı (CNN) mimarisidir. ResNet50 modeli toplamda 50 katmandan oluşur ve milyonlarca görüntüyü içeren ImageNet veritabanında eğitilmiştir (Nedjai, 2020). Artık öğrenme, derin evrişimli sinir ağlarını eğitmek için kısayol bağlantılarını kullanarak girişi sadece bitişik katmana değil, aynı zamanda daha sonraki katmanlara doğrudan iletmeyi sağlar (He vd., 2016). Bu yaklaşım, birçok görüntü işleme uygulamasında omurga rolü oynamıştır.

ResNet-50, bilgisayar görüşü alanında başarılı bir şekilde doğruluk oranlarını artırmış ve 2015 yılında ImageNet Büyük Ölçekli Görsel Tanıma Yarışması (ILSVRC, 2015) ve Microsoft Ortak Nesnelerin Bağlamı (MS COCO, 2015) yarışmalarında birincilik kazanmıştır (He vd., 2016). Bu model, geleneksel CNN modellerinden farklı olarak ek bir kimlik eşleme yeteneği sunar. Bu kimlik eşlemeleri, ağın derin katmanlarında bilgi kaybını engellemek için eklenir. ResNet’teki kimlik eşlemeler, eğer gereksizse mevcut katmanın ağırlık katmanını atlamak için bir yol sağlar ve bu, eğitim verilerinde aşırı uyum sorununu önlemeye yardımcı olur (Theckedath ve Sedamkar, 2020).

ResNet50 mimarisi, toplamda 5 evrişim katmanı içerir ve ardından bir maksimum havuzlama katmanı gelir. Tam bağlantılı katmanda ise ortalama havuzlama kullanılır ve son olarak sınıflandırma işlemi için softmax fonksiyonu tercih edilir.

2.3. Öğrenme Algoritmaları

Yapay sinir ağlarının en dikkate değer özelliği öğrenme yetenekleridir. Yapay sinir ağları, istenilen çıktıyı elde etmek için sürekli olarak ağırlıklarını güncelleyerek öğrenme kabiliyetine sahiptirler. Öğrenme sürecinin gerçekleştirilmesi için öncelikle çeşitli öğrenme algoritmaları kullanılarak yapay sinir ağının eğitilmesi gereklidir. Literatürde, yapay sinir ağlarının eğitimi için birçok öğrenme algoritması bulunmaktadır. Gradient Descent, Scaled Conjugate Gradient ve Levenberg-Marquardt algoritmaları öğrenme algoritmalarına örnek verilebilir.

2.3.1. Gradyan İniş (Gradient Descent) Öğrenme Algoritması

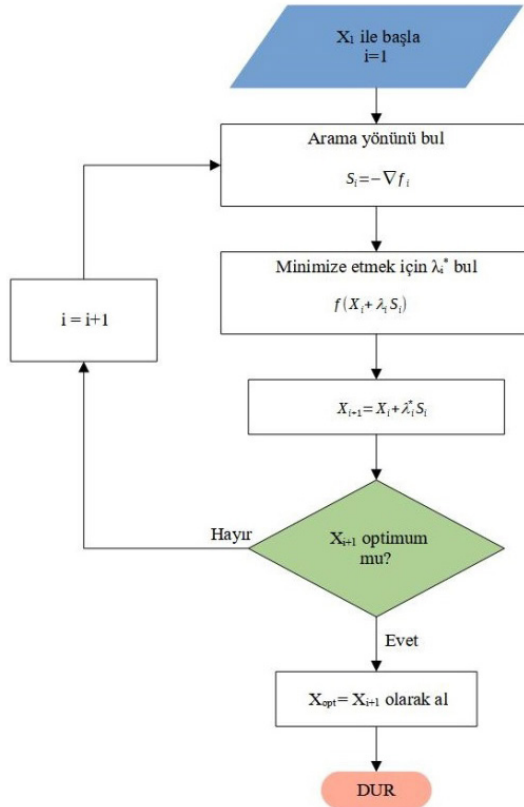
Gradyan iniş algoritması, makine öğrenme modellerini ve yapay sinir ağlarını eğitmek için en yaygın kullanılan optimizasyon algoritmalarından biridir.

Diğer algoritmalarla birlikte kullanılabilmesi, anlaşılabilir ve uygulanması kolay olması, Gradyan iniş algoritmasının popülerliğini artıran önemli faktörlerden biridir. Bu algoritmanın temel amacı, maliyet fonksiyonunu yinelemeli olarak en aza indirmektir.

İşlem, $w^{(0)}$ başlangıç noktasından başlar ve sonlandırma kriteri karşılanana kadar $w^{(i)}$ noktasından $w^{(i+1)}$ noktasına $d^{(i)} = -g^{(i)}$ yönünde adımlar atarak devam eder. Gradyan iniş yöntemi belirtilen formül ile tekrarlanır.

$$w^{(i)} = w^{(i)} - g^{(i)} \eta^{(i)}$$

Bu denklemde η , öğrenme oranını temsil eder ve optimuma ulaşmak için atılan adımların büyüklüğünü belirler. Öğrenme oranı sabit bir değer olarak ayarlanabilir veya eğitim yönü boyunca her adımda tek boyutlu optimizasyon kullanılarak belirlenebilir (Wilson ve Martinez, 2003). GD algoritmasının akış diyagramı Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. GD Algoritması Akış Diyagramı

2.3.2. Scaled Conjugate Gradient (SCG) Algoritması

SCG (Scaled Conjugate Gradient) algoritması, 1993 yılında Moller tarafından geliştirilmiş bir öğrenme algoritmasıdır (Møller, 1993). Bu algoritma, türevi alınabilen transfer fonksiyonlarına sahip olan ve ağırlıkları ve giriş değerlerini kullanan tüm yapay sinir ağlarının eğitimi için tercih edilen bir yöntemdir. SCG algoritmasının temel fikri, Levenberg-Marquardt (LM) gibi yaygın bir öğrenme algoritmasında kullanılan model-güven bölgesi yaklaşımını eşlenik gradyan yaklaşımı ile birleştirmektir. Bu yaklaşım, zaman alan satır aramasını ortadan kaldırır. Ağırlık ve bias değerleri, Conjugate Gradient algoritmasına göre güncellenir.

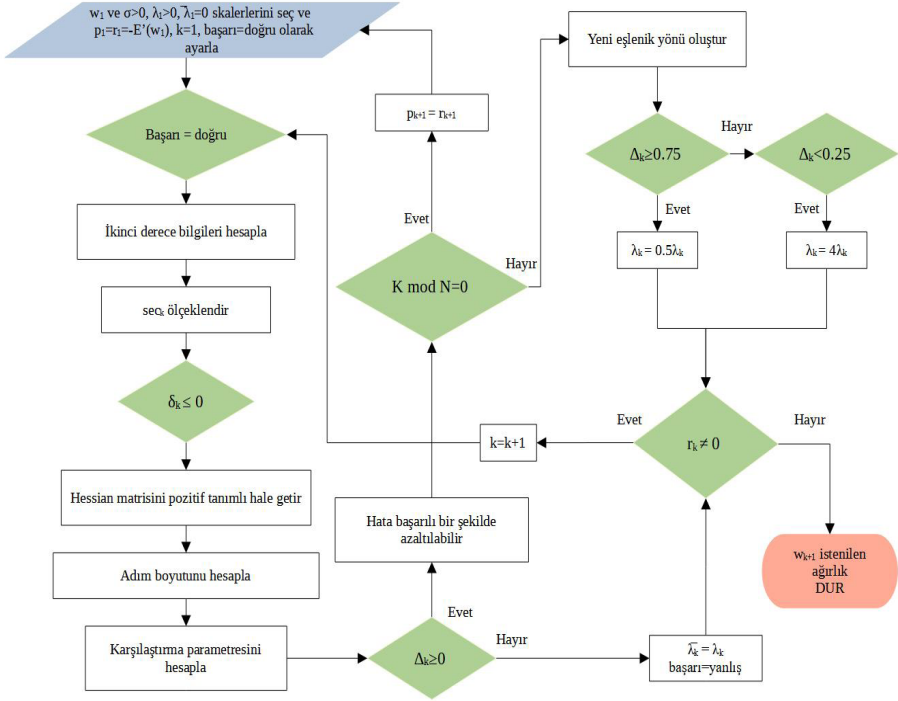
SCG algoritması, eğitim verilerinde ağ tepkilerini ve satır arama sürecini daha hızlı bir şekilde hesaplamak için kullanılır, bu da hesaplama açısından maliyetli olan eğitim girişlerinde büyük bir avantaj sağlar. Algoritma, ikinci dereceden yaklaşım bilgilerini kullanarak arama çizgisini ve adım boyutunu etkili bir şekilde seçer.

$$E(w + y) \approx E(w) + E'(w)^T + \frac{1}{2}y^T E''(w)y$$

SCG algoritması, her iterasyonda aşağıda belirtilen denklemi kullanarak mevcut arama yönünde hareket etmek için optimum mesafeyi hesaplar.

$$w_{k+1} = w_k + a_k \times p_k$$

Sonraki çağrı yönü, önceki çağrı çizgi yönlerine karşı konjugasyonu hesaplanır. Burada p_k , ikinci türevler matrisi ve Hessian matrisinin hata işlevine bağlı bir fonksiyondur. a_k , Hessian matrisinin belirsizliğini düzelten bir faktör olarak kullanılır (Othman ve Salih, 2021). SCG algoritmasının akış diyagramı Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. SCG Algoritması Akış Diyagramı

2.3.3. Levenberg–Marquardt (LM) Algoritması

Levenberg-Marquardt (LM) algoritması, doğrusal olmayan optimizasyon problemlerini çözmek için geliştirilmiş bir yinelemeli öğrenme algoritmasıdır. Bu algoritma, Gradyan inişi ve Newton-Gauss'un birleşimi olarak kabul edilir ve özellikle karesi alınmış hataların toplamını minimize etmek amacıyla kullanılır. Levenberg-Marquardt yöntemi, parametreler optimal değerlerine yakın olduğunda daha çok Gauss-Newton yöntemi gibi davranırken, parametreler optimal değerlerinden uzaksa daha çok Gradyan inişi gibi davranır (Shakibjoo vd., 2022).

$$f = \sum_{i=1}^m e_i^2$$

Karesi alınmış hataların toplamını içeren bir kayıp fonksiyonunu düşünelim, burada m eğitim örneklerinin sayısını ifade eder. Kayıp fonksiyonunun Jacobian

matrisini, parametrelerle ilgili hataların türevlerini içeren bir matris olarak tanımlayabiliriz,

$$J_{i,j} = \frac{\partial e_i}{\partial w_j}$$

Burada $i=1, \dots, m$ ve $j=1, \dots, n$. Burada m veri setindeki örnek sayısını, n ise sinir ağındaki parametre sayısını temsil eder. Jacobian matrisinin boyutu $m.n$ 'dir. Kayıp fonksiyonunun gradyan vektörünü aşağıdaki şekilde hesaplayabiliriz:

$$\nabla f = 2J^T \cdot e$$

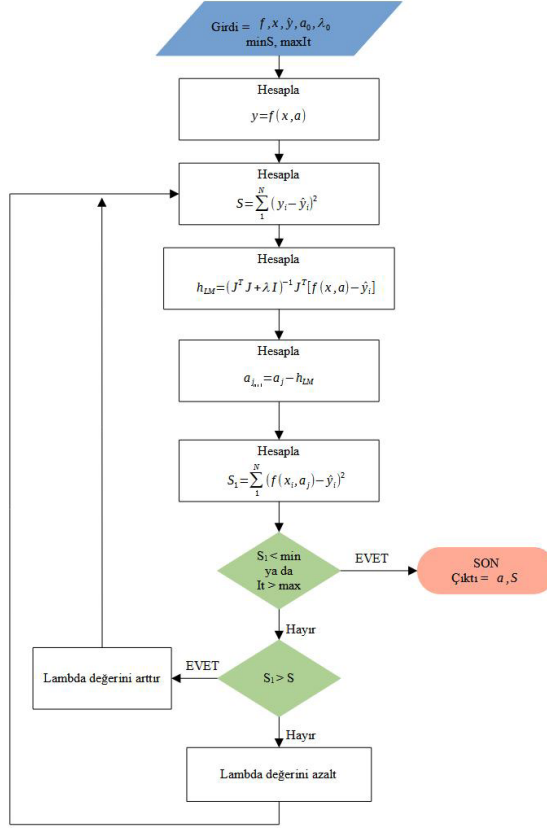
E değeri, tüm hata terimlerinin bir vektörüdür. Hessian matrisini yaklaşık olarak hesaplamak için aşağıdaki ifadeyi kullanabiliriz:

$$Hf \approx 2J^T \cdot J + \lambda I$$

Burada λ , Hessian'ın pozitif belirliliğini sağlayan bir sönümleme faktörüdür ve I birim matrisi temsil eder. Sonraki ifade, Levenberg-Marquardt algoritması ile parametrelerin güncellenme sürecini tanımlar:

$$w^{(i+1)} = w^{(i)} - (J^{(i)T} \cdot J^{(i)} + \lambda^{(i)} I)^{-1} \cdot (2J^{(i)T} \cdot e^{(i)}) \quad i = 0, 1, \dots$$

Sönümleme parametresi λ sıfır olduğunda, formül Newton'un yaklaşık Hessian matrisini kullanarak bir yöntem dönüşür. λ büyük olduğunda, bu küçük bir eğitim oranı ile Gradyan inişi anlamına gelir (Wilamowski ve Irwin, 2011). Başlangıçta λ parametresi büyük bir değerle başlatılır, böylece ilk güncellemeler Gradyan inişi yönünde küçük adımlar atar. Herhangi bir iterasyon başarısız olursa, λ bir faktörle artırılır. Aksi halde kayıp azaldıkça λ azalır, bu nedenle Levenberg-Marquardt algoritması Newton yöntemine yaklaşır. LM algoritmasının akış diyagramı Şekil 5'de sunulmuştur.



Şekil 5. LM Algoritması Akış Diyagramı

2.4. COOT Optimizasyon Algoritması

Naruei ve Keynia (2021) tarafından önerilen COOT optimizasyon algoritması, adını su tavuklarından (coot) esinlenerek almıştır. Cootlar, Rallidae adlı su tavuğu ailesinin üyeleri olan küçük su kuşlarıdır ve Türkçe’de “sakarmeke” olarak bilinirler. Bu kuşlar, alınlarındaki belirgin kalkanlar veya farklı süslemeler, kırmızıdan koyu kırmızıya gözleri ve renkli gagalarıyla tanınır. Bazı cootların kuyruğunun altında beyaz bir bölge bulunur.

COOT optimizasyon algoritması, cootların su üzerindeki hareketlerinden ilham olarak geliştirilmiştir. Algoritma, su yüzeyinde dört farklı coot hareketini modellemektedir:

Rastgele Hareket: Bu hareket, cootların arama uzayının farklı bölgelerini keşfetmesini sağlar. Eğer algoritma yerel optimuma sıkışırsa, rastgele hareket cootun bu durumdan kaçmasına yardımcı olur.

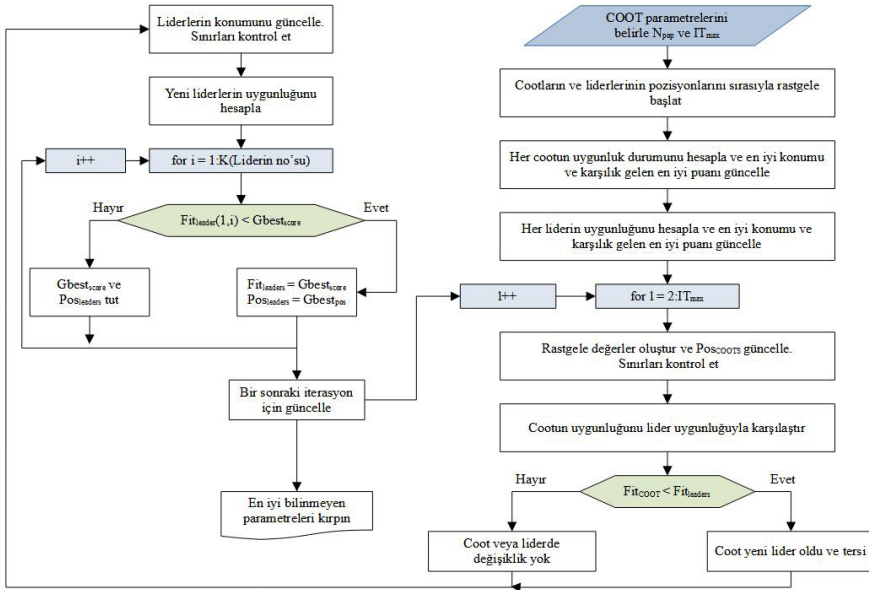
Zincir Hareketi: Zincir hareketi, iki coot arasındaki mesafe vektörünün hesaplanması ve bir cootun diğerine doğru yarı mesafede hareket etmesi ile gerçekleştirilir. Bu hareket, iki cootun ortalama konumu kullanılarak uygulanır.

Grup Liderlerine Göre Pozisyon Ayarlanması: Algoritma, cootların grup liderlerine göre konumlarını ayarlamalarını simüle eder. Bu, grup liderlerinin ortalama konumunu dikkate alarak yapılır.

Lider Hareketi: Grubun bir hedefe yönlendirilmesi amacıyla liderlerin konumlarını güncellemeleri gereklidir. Liderlerin konumları, mevcut en iyi konum etrafında daha iyi konumlar aramak için hesaplanır.

Algoritma, bir başlangıç popülasyonu $(\bar{x}) = \{ \bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n \}$ ile başlar ve her bir cootun konumu hesaplandıktan sonra amaç fonksiyonu $(\bar{O}) = \{ \bar{O}_1, \bar{O}_2, \dots, \bar{O}_n \}$ kullanılarak her çözümün uygunluğu değerlendirilir. Ardından liderler seçilir ve cootlar farklı hareketlerle yeni konumlarını güncellerler.

Bu hareketlerin rastgele doğada gerçekleştiği unutulmamalıdır. COOT optimizasyon algoritması, rastgele hareketlerin, zincir hareketlerinin, grup liderlerine göre pozisyon ayarlamalarının ve lider hareketlerinin bir araya geldiği bir yaklaşımı kullanarak optimizasyon problemlerini çözmeye çalışır. Bu sayede algoritma, global optimuma yakınsama olasılığını artırır. COOT algoritmasının akış diyagramı Şekil 6'da sunulmuştur.



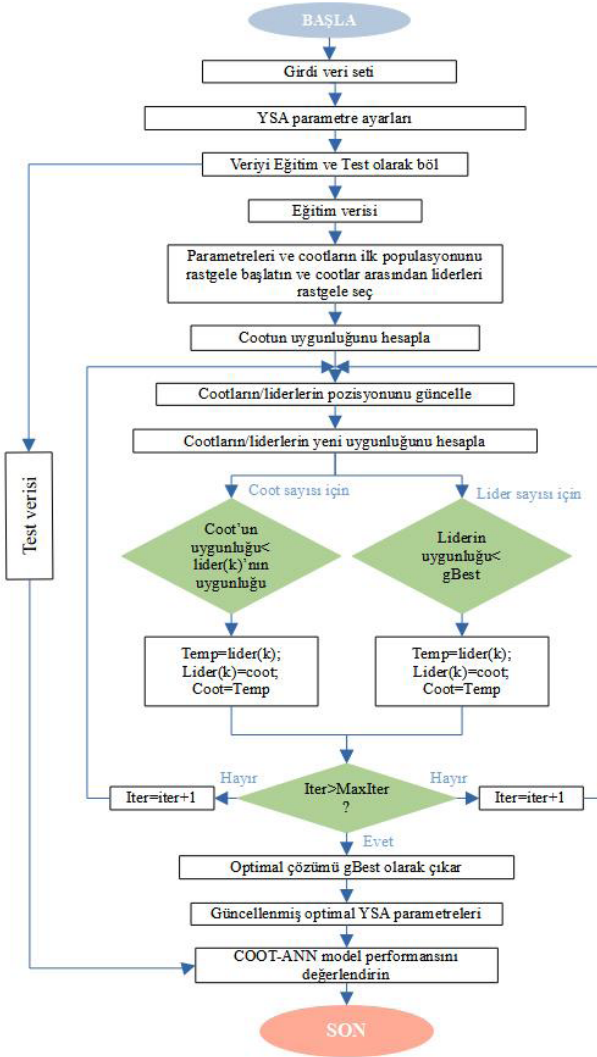
Şekil 6. COOT Algoritması Akış Diyagramı

2.5. COOT-ANN Modeli

Yapay Sinir Ağları'nın (YSA) doğru sonuçlar üretebilmesi ve sınıflandırmaları başarıyla gerçekleştirebilmesi için ağırlık ve bias değerlerinin en uygun şekilde güncellenmesi gerekmektedir. Bu güncelleme süreci için literatürde birçok algoritma önerilmiş olsa da, bu algoritmalar YSA'ların eğitimi için gerekli parametreleri optimize etme konusunda sık sık yetersiz kalmış ve sorunlar yaşanmıştır. Klasik teknikler, yüksek miktarda işlem süresi ve bellek gerektirirken, aynı zamanda yerel optimumlara takılarak kalitesiz çözümler üretebilirler. Bu sorunların üstesinden gelmek ve gerekli optimal parametreleri bulmak için metasezgisel algoritmalar, YSA'ların eğitiminde kullanılmıştır.

Bu çalışmada öncelikle geliştirilen hibrit COOT-ANN modeli için bir YSA oluşturulmuştur. Daha sonra model, video sınıflandırma için spor veri setine uygulanmıştır. Ardından, yapılandırmaların kalitesi, Cross-Entropy (CE) kullanılarak eğitim ve test verileri üzerinde bir uyum fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Sürecin devamında, COOT algoritmasının adımları uygulanmış ve parametreler güncellenmiştir. Öğrenme süreci sırasında elde edilen en iyi yapılandırmayla modelin performansı değerlendirilmiştir.

COOT-ANN modelinin akış diyagramı Şekil 7'de gösterilmiştir. Bu model, ağırlık ve bias değerlerinin optimize edilmesi için COOT algoritmasının metasezgisel gücünü kullanarak YSA eğitimini geliştirmeyi amaçlamaktadır (Özden ve İşeri, 2023).



Şekil 7. COOT-ANN Modeli Akış Diyagramı

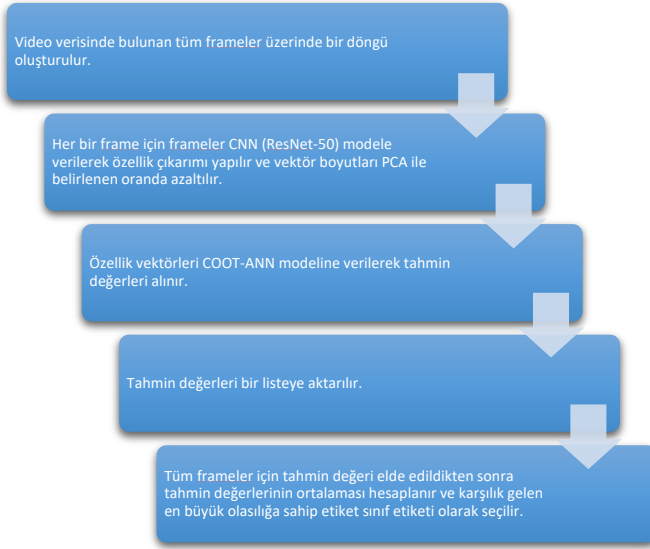
2.6. Video Sınıflandırma

Video sınıflandırma, büyük miktarda video içeriğini belirli kategorilere, sınıflara veya etiketlere atama sürecini ifade eder. Bu işlem, video içeriğinin anlamını anlamak ve benzer içerikleri gruplamak amacıyla kullanılır. Video sınıflandırma, genellikle görsel, metin veya ses özelliklerini kullanarak bir videoyu tanımlamayı ve sınıflandırmayı içerir. Bu, videoların etiketlenmesi, arama motorlarında indekslenmesi, içerik önerilerinin yapılması ve güvenlik

uygulamalarında anormalliklerin tespit edilmesi gibi birçok uygulama alanında kullanılır.

Video sınıflandırma için farklı yaklaşımlar mevcuttur: metin tabanlı yöntemler, ses tabanlı yöntemler ve video tabanlı yöntemler. Günümüzde ise ses ve görsel özelliklerin birleştirildiği kombinasyonel yöntemler de kullanılmaktadır. Birinci yöntem, giriş video dosyasının metin bilgisini kullanarak sınıflandırma yapar. İkinci yaklaşım, giriş video dosyasının ses kısmını kullanarak sınıflandırma yapar ve sistemi ses bilgilerine dayandırır. Üçüncü yöntem ise giriş video dosyasının görsel özelliklerini çıkararak hangi sınıfa ait olduğunu belirler (Rani vd., 2020).

Birçok video sınıflandırma modeli, veri setlerinde bulunan görsel özellikleri kullanarak eğitilir. Özellik çıkarımı aşamasında, derin öğrenme mimarileri gibi güçlü araçlar, video karelerini temsil eden yüksek boyutlu vektörler oluşturur. Bu vektörlerin boyutunu düşürmek ve verimlilik sağlamak için PCA gibi boyut azaltma teknikleri kullanılır. Sınıflandırma işlemi için geliştirilen model, öğrenilen özellikleri kullanarak videoları belirli kategorilere sınıflandırmak için tasarlanmıştır. Özellikle, bu çalışma, ResNet50 tabanlı bir özellik çıkarım ağını kullanarak ve ardından PCA ile boyut azaltma işlemi uygulayarak video içeriğini analiz etmek için geliştirilen COOT-ANN modeli ile video sınıflandırma alanına önemli bir katkı sunmaktadır.



Şekil 8. Video Sınıflandırma İşlemi

2.7. Performans Değerlendirme Ölçütleri

Bir sınıflandırma veya regresyon problemi için geliştirilen modellerin doğruluğunu değerlendirmek için çeşitli performans ölçütleri kullanılmaktadır. Makine öğrenimi ve istatistiksel sınıflandırma işlemlerinde, karmaşıklık matrisi olarak adlandırılan bir tablo kullanılarak performans metrikleri hesaplanır. Bu matris, gerçek değerleri satırlarda ve tahmin edilen değerleri sütunlarda temsil eder (Alan, 2020). İki sınıflı bir karmaşıklık matrisi ve alabileceği değerler Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. İki Sınıflı Karmaşıklık Matrisi

Tahmini Sınıf				
Gerçek Sınıf		Sınıf=Evet	Sınıf=Hayır	Toplam
	Sınıf=Evet	TP	FN	P
	Sınıf=Hayır	FP	TN	N
	Toplam	P_i	N_i	P+N

Birçok performans değerlendirme ölçütünde kullanılan temel terimler aşağıda açıklanmıştır:

Doğru Pozitif (TP): Sınıflandırma modelinin doğru bir şekilde etiketlediği pozitif veri sayısını ifade eder.

Doğru Negatif (TN): Sınıflandırma modelinin doğru bir şekilde etiketlediği negatif veri sayısını ifade eder.

Yanlış Pozitif (FP): Gerçekte negatif olarak etiketlenmiş olan, ancak sınıflandırma modeli tarafından pozitif olarak tahmin edilen verileri ifade eder.

Yanlış Negatif (FN): Gerçekte pozitif olarak etiketlenmiş olan, ancak sınıflandırma modeli tarafından negatif olarak tahmin edilen verileri ifade eder.

Çeşitli performans değerlendirme metrikleri, sınıflandırma veya regresyon problemlerinde modelin başarısını ölçmek ve değerlendirmek için kullanılır. Bu metrikler arasında doğruluk oranı, ortalama mutlak hata (MAE), F1 skoru, ROC-AUC eğrisi ve Cohen's Kappa metriği gibi önemli ölçütler bulunur.

2.7.1. Doğruluk Oranı

Doğruluk, bir modelin test verilerini doğru bir şekilde sınıflandırma oranını gösterir. Doğru tahmin edilerek sınıflandırılan veri sayısının toplam veri sayısına bölünmesi ile hesaplanır.

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN}$$

2.7.2. Ortalama Mutlak Hata (MAE)

Bir tahmin modelinin veya regresyon modelinin performansını değerlendirmek için kullanılan istatistiksel bir metriktir. MAE, gerçek değerler ile model tarafından yapılan tahminler arasındaki farkların mutlak değerlerinin ortalamasını ifade eder. Yani her tahminin hata değeri mutlak alınır, sonra bu hata değerlerinin ortalaması hesaplanır.

$$\text{MAE} = \frac{\sum |\text{Gerçek Değer} - \text{Tahmin}|}{N}$$

2.7.3. Çapraz Entropi

Çapraz entropi, iki durum arasındaki olayların düzensizlik temelinde değerlendirilmesini sağlar (Japkowicz ve Shah, 2011).

$$H(p, q) = - \sum_i p(x_i) \log(q(x_i))$$

Formülde belirtilen p değeri hedef dağılımı, r değeri ise tahmini dağılımı ifade etmektedir. Çapraz entropi formülü ile bu iki dağılımdaki her olayın olasılık değerlerinin birbirine yakınlık derecesi belirlenmiş olur. Çapraz entropi simetrik bir metrik olmadığı için $H(p, q)$ ve $H(q, p)$ değerleri aynı olmayabilir.

2.7.4. F1 Skoru

F1 skoru, kesinlik ve anma değerlerinin harmonik ortalaması alınarak hesaplanır.

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP+FP}$$

$$\text{Anma} = \frac{TP}{TP+FN}$$

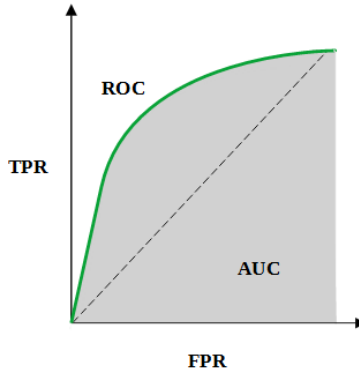
Kesinlik ve anma ölçütleri model performans değerlendirmesi sırasında anlamlı bir karşılaştırma yapabilmemiz için yeterli değildir. Bu nedenle iki ölçüt

kullanılarak elde edilen F1 ölçütü daha anlamlı değerlendirme yapabilmemizi sağlar.

$$F1\text{skoru} = 2 \frac{\text{Kesinlik} * \text{Anma}}{\text{Kesinlik} + \text{Anma}}$$

2.7.5. ROC-AUC Eğrisi

ROC eğrisi, bir sınıflandırma modelinin performansını görselleştirmek için kullanılır ve AUC (Eğrinin Altındaki Alan) ROC eğrisinin altındaki alanı temsil eder. Yüksek AUC değeri, modelin sınıfları ne kadar iyi ayırt edebildiğini gösterir.



Şekil 9. ROC Eğrisi ve AUC

False Positive Rate (FPR) ile belirtilen değer sınıflandırma sonucunda modelin pozitif sınıfta etiketlediği fakat gerçekte negatif sınıfa ait FP adet verinin tüm negatif sınıfa bölümüdür.

$$FPR = \frac{FP}{TN + FP}$$

Ayrıca FPR değeri özgüllük değerinin 1'e tümleyenidir. Özgüllük değeri ise sınıflandırma modelinin negatif sınıf etiketlerini tahmin etmedeki etkililiğidir.

$$FPR = 1 - \text{Özgüllük}$$

$$\text{Özgüllük} = \frac{TN}{TN + FP}$$

2.7.6. Cohen's Kappa Metriği

Cohen's Kappa istatistiği Amerikalı psikolog ve istatistikçi Jacob Cohen tarafından 1960 yılında psikoloji alanında iki puanlayıcı arasındaki güvenilirliğin ölçüsü olarak geliştirilmiş (Cohen, 1960), daha sonra ise literatürde sınıflandırma problemlerinde performans ölçütü olarak kullanılmaya başlanmıştır. Cohen's Kappa iki puanlayıcı arasındaki uyuşmanın bir ölçüsüdür ve sınıflandırma problemlerinde performans ölçütü olarak kullanılır. Cohen's Kappa metriği, gözlenen ve beklenen uyumluluk oranlarını kullanarak hesaplanır ve aşağıdaki denklemlerle ifade edilir:

Tablo 2. İki Puanlayıcının K-Kategori Ölçeğindeki Değerlendirmelerinin Ortak Olasılıkları

Tahminci A	Tahminci B				Toplam
	1	2	...	k	
1	p_{11}	p_{12}	...	p_{1k}	$p_{1.}$
2	p_{21}	p_{22}	...	p_{2k}	$p_{2.}$
.
.
k	p_{k1}	p_{k2}	...	p_{kk}	$p_{k.}$
Toplam	$p_{.1}$	$p_{.2}$...	$p_{.k}$	1

Doğruluk ve CE değerleri sınıflandırıcı performansının değerlendirilmesinde yeterli olmayabilir. Bu nedenle Cohen's Kappa ölçütü performans karşılaştırmasında daha doğru veriler elde etmemize yardımcı olur.

$$K = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e}$$

$$M = TP + FN + FP + TN$$

$$p_o = \frac{TP + TN}{M}$$

$$d = \frac{(TN + FP)}{M} \times \frac{(TN + FN)}{M}$$

$$y = \frac{(FN + TP)}{M} \times \frac{(FP + TP)}{M}$$

$$p_e = d + y$$

Denklemden P_0 değeri gözlenen uyumluluk oranı ve P_e rastgele beklenen uyumluluk oranıdır.

3. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışmada COOT-ANN modelinin video sınıflandırmadaki başarımı geleneksel yapay sinir ağı modelleriyle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. İyi bilinen optimizasyon algoritmalarını kullanan Levenberg-Marquardt-YSA (LM-ANN), ölçeklenmiş eşlenik gradyan-YSA (SCG-ANN) ve gradyan inişi-YSA (GD-ANN) algoritmalarıyla COOT-ANN performansı spor videolarının sınıflandırılmasında kullanılarak karşılaştırmalı olarak test edilmiştir.

Çalışmada deneyler Anaconda Navigator platformunda Spyder tümleşik geliştirme ortamı (IDE) ile Python 3.8.13 kullanılarak geliştirilmiştir. Yazılımda scikit learn, tensorflow, keras, opencv kütüphaneleri kullanılmıştır.

Veri setinde bulunan görsellerin ResNet-50 CNN modeli ile özellik çıkarımları yapılarak Principal Component Analysis(PCA) ile özellik vektörü boyutları belirlenen sayı değeri oranında indirgenmiştir. PCA veri madenciliği, veri analizi ve boyutsal azaltma gibi veri işleme ve analiz alanlarında kullanılan bir istatistiksel ve matematiksel bir yöntemdir. Çok boyutlu verilerin içerdikleri bilgiyi sıkıştırarak daha az boyuta indirgeyerek verilerin anlaşılmasına ve yorumlanmasına yardımcı olur.

COOT-ANN modelinin geliştirilmesi için 10 nöronlu tek gizli katman yapısını kullanarak bir Yapay Sinir Ağı (YSA) modeli oluşturulmuş ve giriş ile çıkış katmanları veri setine uygun şekilde ayarlanmıştır. Modelin eğitimi için tercih edilen maliyet fonksiyonu, sınıflandırma problemleri için yaygın olarak kullanılan çapraz entropi (CE) fonksiyonudur. Bu fonksiyonun tercih edilmesinin nedeni, konveks bir yapısı olması ve kolayca optimize edilebilir olmasıdır.

Görsellerden elde edilen özellik vektörleri %75 eğitim ve %25 test olacak şekilde ayrılmış ve geliştirilen COOT-ANN modeline eğitim verileri verilerek model eğitilmiştir. Test sürecinde, modelin performansını daha ayrıntılı bir şekilde değerlendirmek için doğruluk ve MAE ile birlikte F1-skor ve Cohen's Kappa gibi metrikler de kullanılmıştır. Bu metrikler, modelin sınıflandırma performansını daha fazla açıklığa kavuşturur ve modelin gerçek dünya verilerine ne kadar iyi uyduğunu belirlemeye yardımcı olur. Ayrıca, model performansını görselleştirmek ve karşılaştırmak için karmaşıklık matrisleri ve ROC-AUC eğrileri gibi grafiksel araçlar da kullanılmıştır. Model denemelerinde farklı vektör boyutu, popülasyon sayısı, alt sınır ve üst sınır değerleri ile çalışılmış,

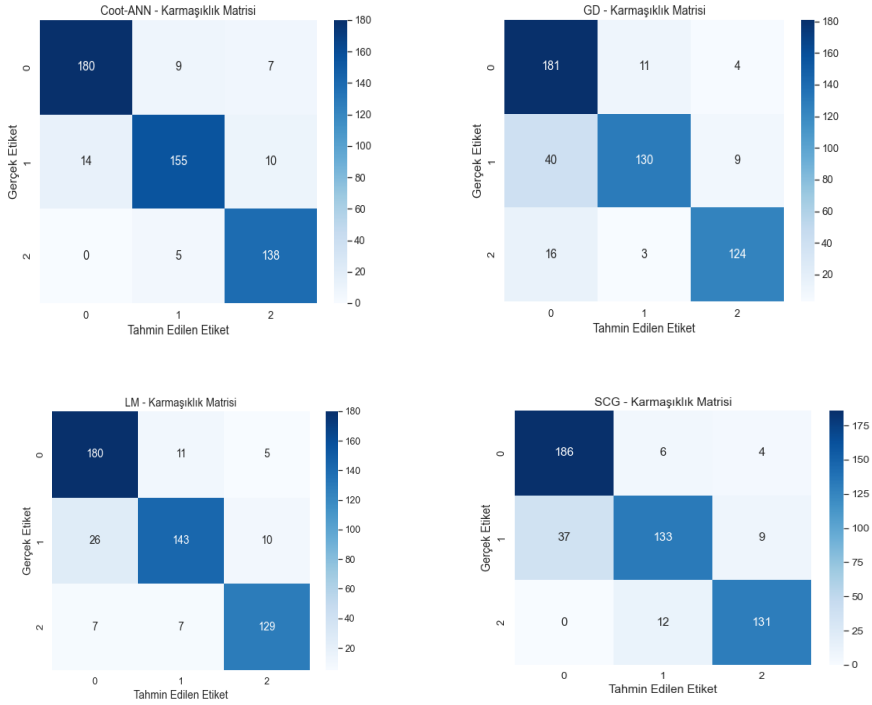
elde edilen en yüksek doğruluk değerine ulaşılan ağırlık ve bias değerleri ile model kayıt edilmiştir.

Tablo 3'te COOT-ANN, SCG-ANN, GD-ANN ve LM-ANN modellerinin 3 sınıflı spor video sınıflandırmada test verileri üzerindeki başarımların değerleri verilmiştir.

Tablo.3 Test Verileri Üzerinde Elde Edilen Model Başarımları

Model	Doğruluk	MAE	CK	F1
COOT-ANN	0.9247	0.0868	0.8863	0.9207
SCG-ANN	0.8687	0.1003	0.8009	0.8664
LM-ANN	0.8725	0.1110	0.8070	0.8718
GD-ANN	0.8397	0.0959	0.7564	0.8390

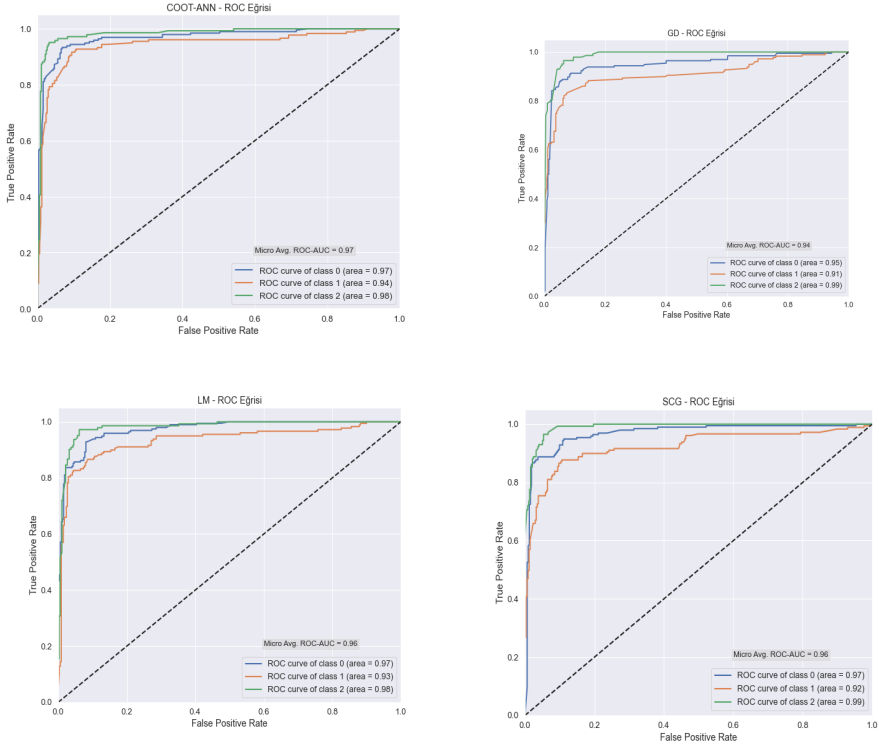
Tablo 3'te elde edilen performans değerlendirme metrikleri incelendiğinde en yüksek doğruluk, CK ve F1 skorunun COOT-ANN modelinde elde edildiği görülmektedir. Ayrıca MAE değerlerinde de COOT-ANN modelinin diğer geleneksel yöntemlere göre daha düşük bir orana sahip olduğu belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda en düşük doğruluk CK ve F1 değerinin ise GD-ANN modeli ile elde edildiği görülmektedir. Performans metriklerinin başarımlarını doğrulayabilmek amacıyla Şekil 10'da modellere ait karmaşıklık matrisleri verilmiştir.



Şekil 10. Test Verilerinde Elde Edilen Model Bazlı Karmaşıklık Matrisi

3 sınıflı bir veri seti olan spor veri seti üzerinde COOT-ANN modeli için elde edilen doğruluk değeri karmaşıklık matrisi ile doğrulanmaktadır. Ayrıca, karmaşıklık matrisleri diğer modellerin sınıflandırma hatalarını da ortaya koymaktadır.

Şekil 11’de, spor veri setine uygulanan yöntemlerin ROC eğrileri ve AUC değerleri sunulmaktadır. Bu eğriler, en yüksek performansın COOT-ANN yöntemi tarafından elde edildiğini, en düşük performansın ise GD-ANN modeli tarafından sergilendiğini göstermektedir.



Şekil 11. Test Verisi İçin Model Bazlı ROC Eğrisi Ve AUC Değeri

4. Sonuç

Literatürde, yerel minimumlara takılma sorununun, gradyan iniş algoritmalarının yerine metasezgisel algoritmaların kullanılmasıyla aşıldığı ve bu metasezgisel algoritmaların yüksek performans sergilediği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, en yeni metasezgisel algoritmalarından biri olan COOT algoritması, yapay sinir ağlarının eğitiminde kullanılarak etkili bir hibrit metasezgisel optimizasyon tabanlı COOT-ANN modeli geliştirilmiş ve video sınıflandırma problemine uygulanmıştır. COOT optimizasyon algoritmasına ait parametreler ve Yapay Sinir Ağı (YSA) parametrelerinin değişiminin veri setleri üzerindeki etkileri deneysel çalışmalarla gözlemlenmiş ve en iyi parametre ayarları belirlenerek sınıflandırma başarıları elde edilmiştir.

COOT-ANN modeli, giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı olmak üzere 3 katmandan oluşmakta ve ikili veya çoklu sınıflandırma veri setlerine adapte olabilmeye yeteneği göstermektedir. Modelin performansı video

sınıflandırma için, doğruluk, F1-skoru ve Cohen's kappa (CK) metrikleri açısından değerlendirildiğinde, COOT-ANN modelinin performansının LM-ANN, SCG-ANN ve GD-ANN modellerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. COOT-ANN modeli ile spor videoları sınıflandırmasında %92,47, GD-ANN modeli ile %83,97, LM-ANN modeli ile %87,25 ve SCG-ANN modeli ile %86,87 doğruluk elde edilmiştir. F1-skoru ve CK değerlerine göre COOT-ANN modelinin performansı diğer test veri setlerinde daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca SCG-ANN ve LM-ANN modellerinin birbirlerine yakın performans gösterdiği, GD-ANN modelinin ise en kötü performansı gösterdiği belirlenmiştir.

Karşılaştırmalı deney sonuçları incelendiğinde, önerilen yöntemin video sınıflandırma çalışmalarında diğer gradyan inişe dayalı algoritmalarından daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Sinir ağı parametrelerinin optimizasyonunda COOT algoritmasının kullanılmasının video sınıflandırma sürecinde doğruluğu arttırdığı görülmüştür.

Kaynakça

Abualigah, L., Diabat, A., Mirjalili, S., Abd Elaziz, M., and Gandomi, A. H. (2021). The arithmetic optimization algorithm. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 376, 113609.

Acı, Ç. and Çırak, A. (2019). Türkçe Haber Metinlerinin Konvolüsyonel Sinir Ağları ve Word2Vec Kullanılarak Sınıflandırılması. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 12(3), 219-228. DOI: 10.17671/gazibtd.457917

Adamowski, J., and Chan, H. F. (2011). A wavelet neural network conjunction model for groundwater level forecasting. *Journal of Hydrology*, 407(1-4), 28-40.

Alan, A. (2020). *Makine öğrenmesi sınıflandırma yöntemlerinde performans metrikleri ile test tekniklerinin farklı veri setleri üzerinde değerlendirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Brezeale, D., & Cook, D. J. (2008). Fellow, IEEE, Automatic Video Classification: A Survey of the Literature. *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Applications and Reviews*, 38(3).

Cohen J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educ Psychol Measur* 20(1):37-46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>

Cricri, F., Roininen, M. J., Leppänen, J., Mate, S., Curcio, I. D., Uhlmann, S., & Gabbouj, M. (2014). Sport type classification of mobile videos. *IEEE Transactions on Multimedia*, 16(4), 917-932.

Gülcü, Ş. (2020). Training of the artificial neural networks using states of matter search algorithm. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 8(3), 131-136.

He, K., Zhang, X., Ren, S., and Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 770-778).

Japkowicz, N., and Shah, M. (2011). *Evaluating learning algorithms: a classification perspective*. Cambridge University Press.

Karaboğa, D., Akay, B., and Oztürk, C. (2007). Artificial bee colony (ABC) optimization algorithm for training feed-forward neural networks. In *Modeling Decisions for Artificial Intelligence: 4th International Conference, MDAI 2007, Kitakyushu, Japan, August 16-18, 2007*. Proceedings 4 (pp. 318-329). Springer Berlin Heidelberg.

Kayhan, G., and İşeri, İ. (2023). Counter propagation network based extreme learning machine. *Neural Processing Letters*, 55(1), 857-872.

McCulloch, W. S., and Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, 5, 115-133.

Mirjalili, S. (2016). Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems. *Neural computing and applications*, 27, 1053-1073.

Mirjalili, S. M. S. M., Mirjalili, S. M., and Lewis, A. (2014). Grey Wolf Optimizer *Adv Eng Softw* 69: 46–61.

Naruei, I., and Keynia, F. (2021). A new optimization method based on COOT bird natural life model. *Expert Systems with Applications*, 183, 115352.

Nedjai, A. (2020). *Training and optimizing deep artificial neural networks using dragonfly algorithm for medical prediction*. (Yüksek lisans tezi)

Othman, K. M. Z., and Salih, A. M. (2021). Scaled conjugate gradient ANN for industrial sensors calibration. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 10(2), 680-688.

Özden, A., and İşeri, İ. (2023). COOT optimization algorithm on training artificial neural networks. *Knowledge and Information Systems*, 1-31.

Pineda, L. R., and Serpa, A. L. (2021). Determination of confidence bounds and artificial neural networks in non-linear optimization problems. *Neurocomputing*, 463, 495-504.

Rani, P., Kaur, J., & Kaswan, S. (2020). Automatic video classification: a review. *EAI Endorsed Transactions on Creative Technologies*, 7(24).

Shakibjoo, A. D., Moradzadeh, M., Moussavi, S. Z., Mohammadzadeh, A., and Vandeveld, L. (2022). Load frequency control for multi-area power systems: A new type-2 fuzzy approach based on Levenberg–Marquardt algorithm. *ISA transactions*, 121, 40-52.

Sharma, V., Chouhan, A. P. S., and Bisen, D. (2022). Prediction of activation energy of biomass wastes by using multilayer perceptron neural network with Weka. *Materials Today: Proceedings*, 57, 1944-1949.

Si, T., Bagchi, J., and Miranda, P. B. (2022). Artificial neural network training using metaheuristics for medical data classification: an experimental study. *Expert Systems with Applications*, 193, 116423.

Theckedath, D., and Sedamkar, R. R. (2020). Detecting affect states using VGG16, ResNet50 and SE-ResNet50 networks. *SN Computer Science*, 1, 1-7.

Wang, J., Xu, C., & Chng, E. (2006, August). Automatic sports video genre classification using pseudo-2d-hmm. In *18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06)* (Vol. 4, pp. 778-781). IEEE.

Watcharapinchai, N., Aramvith, S., Siddhichai, S., & Marukatat, S. (2007, October). A discriminant approach to sports video classification. In *2007 International Symposium on Communications and Information Technologies* (pp. 557-561). IEEE.

Wilamowski BM and Irwin JD (2011). The industrial electronics handbook. In: Bogdan MW, Irwin JD (eds) Control and mechatronics. CRC Press, Boca Rton.

Wilson, D. R., and Martinez, T. R. (2003). The general inefficiency of batch training for gradient descent learning. *Neural networks*, 16(10), 1429-1451.

Yang, X. S. (2010). Nature-inspired metaheuristic algorithms. Luniver press.

Yang, X. S., and Hossein Gandomi, A. (2012). Bat algorithm: a novel approach for global engineering optimization. *Engineering computations*, 29(5), 464-483.

BÖLÜM II

YAPAY ZEKA YÖNTEMLERİNİN AKCİĞER KANSERİ TANISINDAKİ PERFORMANS ANALİZİ

Performance Analysis of Artificial Intelligence Methods in the Diagnosis of Lung Cancer

Sarp ÇOBAN¹ & Gökhan KAYHAN²

¹(Arş. Gör.) Samsun Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Yazılım Mühendisliği Bölümü
E-mail: sarp.coban@samsun.edu.tr,
ORCID: 0000-0002-1078-3227

²(Doç. Dr.) Ondokuz Mayıs Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
E-mail: gokhan@bil.omu.edu.tr,
ORCID: 0000-0003-3391-0097

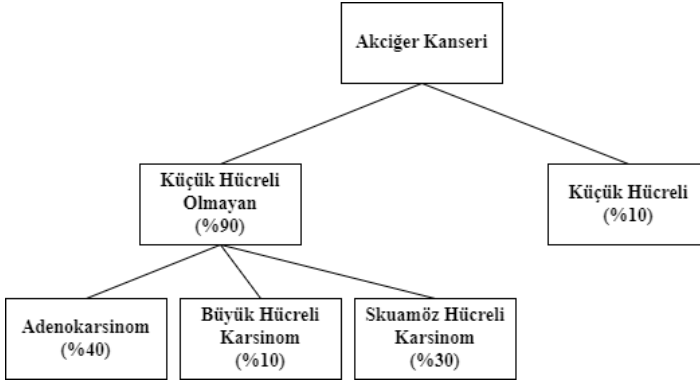
1. Giriş

Günümüzde birçok hastalığın tanısında, laboratuvarlar ve görüntüleme uygulamaları kullanılmaktadır. Bu yöntemler çok zaman tüketmektedir ve çok maliyetlidir. Hem zamandan kazanmak hem de maliyeti düşürebilmek adına hızlı ve doğru sonuç üreten bilgisayar destekli cihazlar gerekmektedir. Bu cihazlar, yapay zekâ yardımıyla tanı koymaktadır. Dünya

* Bu çalışma Doç. Dr. Gökhan Kayhan danışmanlığında tamamladığımız “Akciğer Kanseri Tanısında Yapay Zeka Yöntemlerinin Karşılaştırılması” başlıklı yüksek lisans esas alınarak hazırlanmıştır (Yüksek Lisans. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, Türkiye, 2023).

genelinde bu tür cihazlar artmaktadır ve bu yönde çalışmalar yapılmaktadır (Temurtaş vd, 2019).

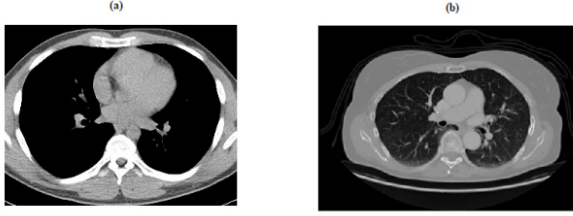
Akciğer kanseri, akciğer dokularında bulunan hücrelerin kontrolsüz bir şekilde çoğalması sonucu meydana gelen hastalıktır. Dünya genelinde en sık rastlanan ve en ölümcül kanser türüdür. 2020 yılında yaklaşık olarak 2,2 milyon yeni akciğer kanseri vakası görülmüştür ve 1,8 milyon kişi akciğer kanseri nedeniyle hayatını kaybetmiştir. Geç evrede tespit edilebildiğinden dolayı ölüm oranı yüksektir. Bundan dolayı yaşama oranı yaklaşık %15'tir. Uzun süre boyunca gelişmektedir ve bundan dolayı çeşitli tümörler oluşmaktadır. Süreklilik durumunda metabolizmada ve genomda değişiklikler meydana gelmektedir. (Thong et al, 2023; Temurtaş vd, 2019; Schmidt et al, 2023; Vas and Dessai, 2017). Akciğer kanserinin yüzdelik dağılımı Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1: Akciğer Kanserinin Yüzdelik Dağılımı (Çoban, 2023)

Şekil 1'de görüldüğü üzere, akciğer kanseri hücreleri, küçük hücreli ve küçük hücreli olmayanlar olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Küçük hücreli olmayanlar ise adenokarsinom, büyük hücreli karsinom ve skuamöz hücreli karsinom olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Akciğer kanseri olan hastaların yaklaşık %90'ı küçük hücreli olmayan, yaklaşık %10'u ise küçük hücreli akciğer kanserine yakalanmışlardır. Küçük hücreli olmayan akciğer kanserine yakalanan kişilerin yaklaşık %40'ı adenokarsinom, yaklaşık %10'u büyük hücreli karsinom, yaklaşık %30'u skuamöz hücreli karsinoma yakalanmışlardır. Geriye kalan %10'luk kısmın tanısı konulamamaktadır. Akciğer kanseri 4 evreden meydana gelmektedir. Birinci evrede kanser hücresi sadece akciğerde bulunmaktadır. İkinci ve üçüncü evrede kanser hücreleri göğüste, dördüncü

evrede ise vücudun diğer kısımlarında görülmektedir. X-ray, tomografi, manyetik rezonans görüntüleme ve balgam sitolojisi yöntemleriyle akciğer kanseri tanısı konulabilir. Ana tedavi yaklaşımı kemoterapidir ancak kanser hücreleri, ilaç inaktivasyonu, DNA onarımı, ilaç hedefi değişikliği ve hücre ölümü inhibisyonu gibi mekanizmalarla kemoterapiye karşı dirençli hale gelebilirler. (Vas and Dessai, 2017; Wu et al, 2022). Şekil 2’de normal akciğerin ve kanserli akciğerin tomografi görüntüsü görülmektedir.



Şekil 2: (a) Sağlıklı Akciğer Tomografisi
(b) Kanserli Akciğer Tomografisi (Çoban, 2023)

2. Literatür Araştırması

Toğaçar ve arkadaşları, CT görüntüleri üzerinde hazır LeNet, AlexNet ve VGG-16 CNN modellerine, lineer regresyon (LR), lineer ayırık analiz (LDA), karar ağaçları (DT), SVM, kNN ve softmax sınıflandırıcılarını ekleyerek akciğer kanseri tespiti üzerinde çalışma yapmışlardır. En iyi doğruluk oranı AlexNet’e kNN eklenerek 0.9874 olarak elde edilmiştir. Minimum fazlalık maksimum alaka(mRMR) metodu uygulanınca başarı oranı 0.9951’e çıkmıştır (Toğaçar et al, 2019). Jawarkar ve arkadaşları, CT görüntüleri üzerinde CNN yöntemini uygulayarak hem akciğer kanserini hem de derecesini 0.9688 doğruluk oranı tespit etmişlerdir (Jawarkar et al, 2021). Subramanian ve arkadaşları, AlexNet modeline; SVM, derin kNN ve softmax algoritmalarını uygulayarak CT görüntüleri üzerinde akciğer kanseri tahmini üzerinde çalışmalar yapmışlardır. En iyi doğruluk oranı AlexNet modelinin softmax ile olan birleşiminden 0.9952 olarak elde edilmiştir (Subramanian et al, 2020). Asuntha ve Srinivasan, CT görüntüleri üzerinde akciğer kanseri tümörü tespiti için çalışma yapmışlardır. Bulanık parçacık sürüsü optimizasyonu algoritmasını kullanarak, özellik seçiminde en iyi özelliği seçmişlerdir. En iyi doğruluk oranı 0.9931 değerinde olup bulanık parçacık sürüsü optimizasyonu konvolüsyonel sinir ağı ile elde edilmiştir (Asuntha and Srinivasan, 2020). Saleh ve arkadaşları, CT görüntüleri üzerinde akciğer kanseri tanısı koyma üzerine çalışma yapmışlardır. Ayrıca

akciğer kanserinin türünü de tespit etmişlerdir. Chest CT Scan Images veri setini kullanmışlardır. CNN-SVM algoritmasını kullanmışlardır. 0.9791 doğruluk oranı, 0.9790 hassaslık, 0.9932 özgüllük ve 0.9796 hassaslık değeri elde edilmiştir (Saleh et al, 2021). Abdullah ve arkadaşları, CT görüntüleri üzerinde akciğer kanseri tahmini ve sınıflandırması üzerine çalışma yapmışlardır. UCI veri setini kullanmışlardır. CNN, SVM ve kNN algoritmaları arasında karşılaştırma yapılmıştır. En yüksek doğruluk oranı SVM ile 0.9556 olarak ikinci en yüksek doğruluk oranı CNN ile 0.9211 olarak elde edilmiştir (Abdullah et al, 2021).

3. Yöntem

3.1. Dalgacık Dönüşümü

Dalgacık dönüşümü, işaretin zaman-frekans analizinde kullanılan algoritmadır. Ses ve görüntü gibi birçok farklı sinyal tipine uygulanabilmektedir. Sinyallerde gürültü temizleme amacıyla kullanılmaktadır. İki boyutlu görüntülerde, satır ve sütunlar bir boyutlu sinyal olarak kullanılır. Dalgacık dönüşümü ayrılabilir olduğundan, geçişler satırlarda ve sütunlarda ayrı ayrı yapılır. (Öner vd, 2017; Zhang, 2019).

Birinci seviye ayrıştırma öncelikle, görüntü ölçeklenir yani görüntünün ağırlıklı ortalaması alınır ve dalgacık dönüşümü yapılır yani görüntünün ağırlıklı farkı alınır. Bu işleme dikey dönüştürme denir. İlk adımın çıktısı olarak, biri ölçeklenme katsayısına, diğeri dalgacık katsayısına sahip iki adet yarım görüntü oluşmaktadır. İki görüntü de orijinal görüntünün satırının yarısı genişliğindedir. İkinci adımda ölçekleme ve dalgacık dönüşümü, elde edilen iki yarım görüntünün sütunlarına uygulanır. Sonucunda görüntünün yaklaşımı, yatay detayları, dikey detayları ve çapraz detayları olmak üzere dört adet görüntü oluşmaktadır. İkinci ve daha büyük seviyeler elde edilen görüntünün yaklaşımına uygulanır. Görüntü ölçeklenemeyecek hale gelene kadar bu işlem devam eder (Zhang, 2019).

3.2. Naive Bayes

Naive Bayes(NB) algoritması Bayes kuralına dayanmaktadır. Y kararı için özniteliklerin (X_1, \dots, X_n) koşullu olarak birbirinden bağımsız olduğu kabul edilir. Bu durumun sonucunda $P(X|Y)$ 'in gösterimi basitleştirilir ve eğitim verilerinden tahmin etme sorunu çözülür (Kumar and Rath, 2016).

Naive Bayes, basit ve güçlü bir algoritmadır. Model, eğitim verilerinden hesaplama yaparken iki farklı yöntem kullanır. Her sınıfın olasılığı ve her x değeri için verilen sınıfların koşullu olasılığı hesaplanır. Hesaplama işleminden sonra modelde, Bayes teoremi kullanılarak yeni veriler için tahminler yapılır.

Veriler gerçek değerli olduğunda, olasılıkların tahmini için yaygın olarak Gauss dağılımı kullanılır. Naive Bayes, girdi değişkenlerini bağımsız olduğunu varsaymaktadır.

3.3. K-En Yakın Komşu Algoritması

K-en yakın komşu (kEYK) algoritması, sınıflandırma amacıyla kullanılan parametrik olmayan algoritmadır. Amacı, verilerin özellikleri tarafından tanımlanan alanda düzenlenmesidir. Algoritmaya yeni veri girişi yapıldığında, yeni verinin sınıfının belirlenmesi için en yakın k adet verinin sınıfları karşılaştırılır. Karşılaştırma sonrasında yeni veri, k adet veri içinden en çok hangi sınıfın verilerine yakınsa o sınıfa ait olur.

K en yakın komşu algoritması, metin sınıflandırma, zaman serisi veri madenciliği, DNA ve RNA dizilerini tanıma, hastalık tanısı, toplantı tahminleri, internet bilgi filtresi ve görüntü anlama gibi gerçek dünya problemlerinde kullanılmaktadır (Chaudhry et al, 2007).

K-en yakın komşu algoritması “bellek tabanlı öğrenici” olarak da bilinmektedir. Algoritma, gözlemlediği verilerin konumunu hatırlar ve yeni veriler için tahminlerde bulunur. Bu yöntemin pratikte uygulanabilmesi için bazı ek önemli hususları bulunmaktadır. Tahmini yapılan veriler arasındaki mesafenin hesaplanma tekniğine, tahmin yapılırken kaç tane komşunun dikkate alındığına ve birden fazla en yakın komşu göz önüne alındığında son tahminin nasıl yapılacağına dikkat edilmelidir (Winters-Miner et al, 2015).

K-en yakın komşu sınıflandırmasının avantajı sade bir yapıda olmasıdır. Kullanıcı, komşu sayısını ve kullanılacak uzaklık ölçüsünü belirler. Uzaklık ölçüm yöntemleri arasında yaygın olarak Öklid mesafesi kullanılır (Neath and Johnson, 2010).

3.4. Destek Vektör Makinesi

Destek vektör makinesi (DVM), özellikleri birbirinden ayırır. Aynı özellikler bir düzlemde, başka özellikler başka bir düzlemde bir araya gelir. Destek vektör makinesi, özellikleri birbirinden ayırmak için düzlem, çizgiler ve hiper düzlemleri kullanır. Bir boyutlu verilerin sınıflandırılması için çizgi, iki boyutlu verilerin sınıflandırılması için düzlem ve üç boyutlu verilerin sınıflandırılması için hiper düzlemler kullanılır. İnsan daha yüksek boyutları algılayamaz, ancak bilgisayarlar bu konuda yardımcı olabilir (Bhargava et al, 2020). Destek Vektör Makineleri ve Kernel yöntemleri, doğal ve etkili bir şekilde birlikte çalışmaktadırlar. Destek vektör makineleri, yüksek boyutlu

özellik uzaylarında tahmin edicileri öğrenmek için kernel kullanır (Zoppis et al, 2019).

Destek vektör makinelerinde çok sınıflı problemlerin çözümünde bire karşı bir ve bire karşı hepsi olarak iki çözüm bulunmaktadır. Bire karşı bir destek vektör makinesi yaklaşımının amacı, $(m^2-m)/2$ adet destek vektör makinesinin eğitimini sağlamaktır, burada m sınıf sayısıdır. Destek vektör makineleri, etiketlenmemiş örneklerin iki sınıftan birine ait olup olmadığını tespit etmek için çalışır. Asıl çıktının belirlenmesi için ikili sınıflandırmalardan gelen sonuçlar birleştirilir. Bire karşı hepsi yaklaşımında, destek vektör makineleri etiketlenmemiş örneklerin herhangi bir sınıfa ait olup olmadığını tespit etmek için m adet destek vektör makinesi içerir. Sınıfa özgü destek vektör makinesi, örneğin sınıfını belirleyen pozitif sonuç döndürür. Birden çok sınıfa özgü destek vektör makinesi olumlu sonuç verirse, bire karşı bir yaklaşımı eşitlik bozma amacıyla kullanılır. Çok sınıflı destek vektör makinesi yaklaşımları, çeşitli problemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Kumar et al, 2020).

3.5. Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları, örüntü tanımayı gerçekleştirme amacıyla harici verileri almak için bir giriş katmanı, problemin çözümünü üreten bir çıkış katmanı ve diğer katmanları birbirinden ayıran gizli katmandan oluşur. Giriş katmanından çıkış katmanına doğru birbirine bitişik nöronlar, dögüsel olmayan yaylarla bağlanır. Yapay sinir ağları, hedef çıktı ile gerçek çıktı arasındaki hata oranına bağlı olarak nöron ağırlıklarını değiştiren eğitim algoritmasından yararlanır. Yapay sinir ağları, veri setini öğrenebilmek için eğitim algoritması olarak geri yayılım algoritmasını kullanır (Sairamya et al, 2019).

Literatürde farklı yapay sinir ağları tipleri bulunmaktadır. Bunlar nöronların birbirine bağlanma şekillerine ve eğitim türlerine göre sınıflandırılır. En sık kullanılan yapay sinir ağı modeli, çok katmanlı algılayıcıdır (MLP) (Bakr and Negm, 2012).

Çok katmanlı algılayıcı, ileri beslemeli sinir ağı modelidir. Üç katmandan meydana gelir; giriş katmanı, çıkış katmanı ve gizli katman. Giriş katmanı, işleme yapılması için giriş sinyali alır. Tahmin ve sınıflandırma işlemleri çıktı katmanında gerçekleştirilir. Giriş ve çıkış katmanı arasında bulunan gizli katman, çok katmanlı algılayıcının hesaplama işlemlerini yaptığı yerdir. İleri beslemeli ağda olduğu gibi çok katmanlı algılayıcılarda, veriler giriş katmanından çıkış katmanına doğru ilerler. Çok katmanlı algılayıcıda nöronlar, geri yayılım öğrenme algoritması ile eğitilir. Çok katmanlı algılayıcılar, sürekli

fonksiyonların değerlerine yaklaşmak için tasarlanmıştır ve doğrusal olarak ayrılmayan sorunların çözümünde kullanılırlar. Çok katmanlı algılayıcıların başlıca kullanım durumları, örüntü sınıflandırması, tanıma ve tahmindir (Abirami and Chitra, 2020).

3.5.1. Momentumlu Dereceli Azalma

Momentumlu dereceli azalma(MDA) algoritması, bir fonksiyonun minimumunun bulunması için kullanılan bir optimizasyon yöntemidir. Geri yayılım esnasında, hatanın en aza indirgenmesi için ağırlıklar ve eşik değerleri yinelemeli olarak güncellenir. Momentumlu dereceli azalma optimizasyonunda, ağırlıkların güncellemesi için tüm eğitim örnekleri kullanılır. Aktivasyon fonksiyonu türevlenebildiği sürece, momentumlu dereceli azalma algoritması, sinir ağlarına uygulanabilir. (Andrearczyk and Whelan, 2017; MacLennan, 2001).

Momentumlu dereceli azalma algoritması, yapay sinir ağlarına uygulandığında geri yayılım işlemi gerçekleşir. Geri yayılım yöntemi adını işlemlerinden almıştır. Nöronların ağırlıkları ve eşik değerleri önce çıktı katmanında, sonra gizli katmanlarda düzeltilir. Yapay sinir ağlarının yaptığı hata sadece çıktı katmanında anlaşılır.

3.5.2. Levenberg-Marquardt

Levenberg-Marquardt(LM) algoritması, özellik çıkarımı için kullanılan algoritmadır. Optimum sonuca ulaşabilmek için Gauss-Newton ve en dik iniş algoritmalarının birinden faydalanmaktadır. Bu güncelleme tekniği duruma göre değişmektedir. Levenberg-Marquardt tekniği yapılan çalışmalara göre dereceli azalma yönteminden önemli derecede yüksek sonuçlar vermektedir. Levenberg-Marquardt algoritmasının dezavantajları, yüksek derecede bellek ve zaman tüketimi ve uygulanmasının biyolojik olarak mümkün olmayışıdır (Kumaraswamy, 2021; Wilson and Mantooh, 2013).

3.5.3. Ölçeklendirilmiş Eşlenik Gradyan

Ölçeklendirilmiş eşlenik gradyan(ÖEG), ikinci dereceden gradyan danışmanlı öğrenme yöntemidir. Ölçekli eşlenik gradyan algoritmasında, diğer eşlenik gradyan algoritmalarının aksine, her iterasyonda satır arama yöntemi uygulanmamaktadır. Bunun yerine güven bölgesi adımını kullanmaktadır. Bu durum modelin maliyetini azaltmaktadır. Güven adımı yönteminde, model fonksiyonunun güvenli olacağı mesafe her adımda güncellenmektedir. Model

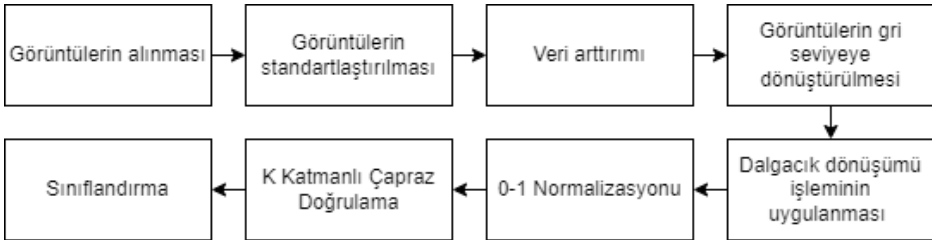
adımı mesafe içindeyse kullanılır, aksi durumda sınırdaki model fonksiyonu için yaklaşık minimum değer kullanılır. (Babani et al., 2016; Cetişli and Barkana, 2009).

Ölçeklendirilmiş eşlenik gradyan algoritmasının her iterasyonunda ikinci dereceden bilgilerin belirlenebilmesi amacıyla iki parametrenin birinci dereceden gradyanı hesaplanır. Bundan dolayı, en dik iniş yönteminden iki kat daha hızlıdır (Cetişli and Barkana, 2009).

4. Bulgular

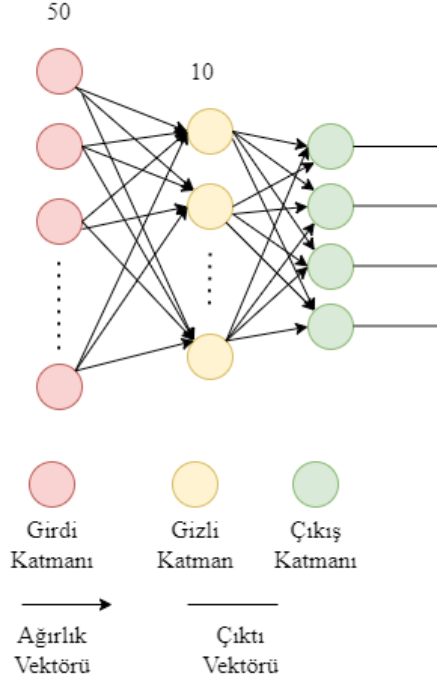
4.1. Verilerin Hazırlanması

Veri seti bilgisayarlı tomografi görüntülerinden oluşmaktadır. Veriler Kaggle Chest CT-Scan veri setinden elde edilmiştir. Görüntülerin boyutu standart olmadığından görüntüler 80×40 boyutuna indirgenerek verinin boyutu standartlaştırılmıştır ayrıca modellerin daha hızlı çalışması da amaçlanmıştır. Daha iyi sonuçlar elde edilebilmesi amacıyla görüntülere veri arttırımı işlemi uygulanmıştır. Bu amaçla görüntüler 15 derece sağa ve sola döndürülmüştür ayrıca görüntülerin parlaklığı artırılıp azaltılmıştır. Görüntülerin dalgacık dönüşümünden geçebilmesi için görüntüler gri seviyesine dönüştürülmüştür. Gri seviyesine dönüştürülen görüntüler Daubechies-1 dalgacık dönüşümünden geçirilerek özellik çıkarımı işlemi uygulanmıştır. Özellik çıkarımı işleminden sonra verilere 0-1 normalizasyonu uygulanmıştır. Her bir görüntüden elde edilen özellik görüntü matrisleri tek boyuta indirgenmiştir. Bu işlemin sonucunda veri boyutu 50 olan özellikler elde edilmiştir. Elde edilen verilere $k=5$ seçilerek k -katmanlı çapraz doğrulama işlemi uygulanmıştır. Bütün verilerin test verisi olarak kullanılabilmesi amacıyla bu yaklaşım kullanılmıştır. Tek boyuta indirgenen veriler makine öğrenimi modellerine ve yapay sinir ağına verilmiştir. Kullanılan yapının öbek çizgisi Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3: Veri Hazırlama Yapısının Öbek Çizgisi (Çoban, 2023)

Kullanılan yapay sinir ağı modeli Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4: Kullanılan Yapay Sinir Ağı Modeli (Çoban, 2023)

Yapay sinir ağı modelinde, girdi katmanının boyutu 50 olup gizli katmanda 10, çıkış katmanında ise 4 adet nöron bulunmaktadır. Ağın eğitiminde Momentumlu dereceli azalma, Levenberg-Marquardt ve ölçeklendirilmiş eşlenik gradyan algoritmaları, hata metriği olarak da çapraz entropi seçilmiştir. Ağlar maksimum epok sayısı 100, hata oranı minimum 10^{-3} belirlenmiştir.

4.2. Eğitim Verilerinde Elde Edilen Bulgular

Eğitim verilerinden elde edilen başarı oranları Tablo 1’de görülmektedir. Modellerin başarı oranı incelendiğinde en kötü başarı oranına sahip modelin Naive Bayes olduğu görülmektedir. Kappa puanı incelendiğinde 0,342 olduğu görülmektedir. K en yakın komşu ve destek vektör makinesi modelleri incelendiğinde bütün metriklerin %90’ın üzerinde olduğu görülmektedir. Momentumlu dereceli azalma optimizasyon algoritmasıyla eğitilmiş yapay sinir ağında başarı oranları kappa hariç %70’in üzerindedir. Akciğer kanseri tanısında bu başarı oranları oldukça düşüktür. Levenberg-Marquardt optimizasyon algoritması ve Ölçeklendirilmiş eşlenik gradyan optimizasyon algoritmasıyla

eğitilmiş yapay sinir ağı modellerinde başarı oranları %95'in üzerinde olduğu görülmüştür. Bu iki model arasında ise Levenberg-Marquardt algoritmasını kullanan modelin daha yüksek başarıma sahip olduğu belirlenmiştir.

Tablo 1: Eğitim Verilerinden Elde Edilen Başarı Oranları

Algoritma	Doğruluk Oranı	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Puanı	Kappa
NB	%50,74	%51,09	%52,45	%51,76	0,342
kEYK	%93,81	%94,26	%94,15	%94,20	0,918
DVM	%93,83	%94,04	%94,46	%94,24	0,917
MDA	%74,86	%75,47	%75,91	%75,68	0,659
LM	%97,52	%97,37	%97,56	%97,45	0,966
ÖEG	%96,66	%96,89	%96,87	%96,88	0,955

Modellerin eğitim başarımları Çapraz Entropi(ÇE), Ortalama Karesel Hata(OKH), Karekök Ortalama Karesel Hata(KOKH) ve Ortalama Mutlak Hata(OMH) hata metrikleri kullanılarak belirlenmiş ve Tablo 2’de verilmiştir. Modellerin hata metrikleri incelendiğinde en yüksek hata oranına sahip modelin momentumlu dereceli azalma optimizasyon algoritmasıyla eğitilen yapay sinir ağı olduğu görülmektedir En düşük hata oranına sahip modelin Levenberg-Marquardt optimizasyon algoritmasıyla eğitilen yapay sinir ağı olduğu görülmektedir.

Tablo 2: Modellerin Eğitim Başarımları

Algoritma	ÇE	OKH	KOKH	OMH
MDA	0,1633	0,0894	0,2990	0,1988
LM	0,0253	0,0108	0,1039	0,0153
ÖEG	0,0280	0,0137	0,1166	0,0310

4.3. Test Verilerinde Elde Edilen Bulgular

Test verilerinden elde edilen başarı oranlarının ortalaması Tablo 3’te görülmektedir. Modellerin başarı oranı incelendiğinde en kötü başarı oranına sahip modelin Naive Bayes olduğu görülmektedir. K en yakın komşu ve destek vektör makinesi modelleri incelendiğinde kappa puanı hariç bütün metriklerin %90’ın üzerinde olduğu görülmektedir. Momentumlu dereceli azalma

optimizasyon algoritmasıyla eğitilmiş yapay sinir ağında başarı oranları kapa hariç %70'in üzerindedir. Levenberg-Marquardt optimizasyon algoritmasıyla eğitilmiş yapay sinir ağı modelinde başarı oranları kapa puanı hariç %95'in üzerindedir. Ölçeklendirilmiş eşlenik gradyan optimizasyon algoritmasıyla eğitilmiş yapay sinir ağı modelinde başarı oranları %90'ın üzerindedir. Bu açıdan sonuçlar incelendiğinde Levenberg-Marquardt algoritmasının başarı oranının diğer algoritmalara göre daha iyi olduğu görülmüştür.

Tablo 3: Test Verilerinden Elde Edilen Başarı Oranlarının Ortalaması

Algoritma	Doğruluk Oranı	Kesinlik	Duyarlılık	F1 Puanı	Kappa
NB	%50,24	%50,69	%51,89	%51,28	0,335
kEYK	%91,20	%91,40	%91,30	%91,34	0,879
DVM	%92,42	%92,73	%93,14	%92,93	0,898
MDA	%73,44	%74,31	%74,15	%74,22	0,646
LM	%95,54	%95,46	%95,56	%95,51	0,939
ÖEŞ	%93,32	%94,29	%94,26	%94,27	0,918

Modellerin test başarımları Tablo 4'te verilmiştir. Modellerin hata metrikleri incelendiğinde en yüksek hata oranına sahip modelin momentumlu dereceli azalma optimizasyon algoritmasıyla eğitilen yapay sinir ağı olduğu görülmektedir. En düşük hata oranına sahip modelin Levenberg-Marquardt optimizasyon algoritmasıyla eğitilen yapay sinir ağı olduğu görülmektedir.

Tablo 4: Modellerin Test Başarımları

Algoritma	ÇE	OKH	KOKH	OMH
MDA	0,1686	0,0933	0,3050	0,2024
LM	0,0534	0,0206	0,1433	0,0260
ÖEG	0,0603	0,0248	0,1571	0,0446

Şekil 5'teki karmaşıklık matrisleri incelendiğinde sınıflandırmada en büyük hatayı skuamöz hücreli karsinom sınıfında ve büyük hücreli karsinom sınıfında yaptığı görülmektedir. Yapılan yanlış sınıflandırmaların toplamı, doğru sınıflandırmadan fazladır. En iyi sınıflandırma işleme normal sınıfında gerçekleşmiştir ancak bu sınıfta da yanlış sınıflandırma miktarı oldukça büyüktür.

Tahmin					G e r ç e k
normal	adenokarsinom	büyük hücreli karsinom	skuamöz hücreli karsinom		
normal	224	74	39	46	G e r ç e k
adenokarsinom	42	216	74	103	
büyük hücreli karsinom	64	154	180	68	
skuamöz hücreli karsinom	57	164	44	251	

Tahmin					G e r ç e k
normal	adenokarsinom	büyük hücreli karsinom	skuamöz hücreli karsinom		
normal	255	68	35	53	G e r ç e k
adenokarsinom	29	238	77	78	
büyük hücreli karsinom	53	138	172	93	
skuamöz hücreli karsinom	50	164	53	244	

Tahmin					G e r ç e k
normal	adenokarsinom	büyük hücreli karsinom	skuamöz hücreli karsinom		
normal	257	78	37	52	G e r ç e k
adenokarsinom	38	234	81	80	
büyük hücreli karsinom	55	142	166	76	
skuamöz hücreli karsinom	37	154	53	260	

Tahmin					G e r ç e k
normal	adenokarsinom	büyük hücreli karsinom	skuamöz hücreli karsinom		
normal	265	59	32	37	G e r ç e k
adenokarsinom	27	245	77	118	
büyük hücreli karsinom	39	125	181	75	
skuamöz hücreli karsinom	56	180	46	238	

Tahmin					G e r ç e k
normal	adenokarsinom	büyük hücreli karsinom	skuamöz hücreli karsinom		
normal	248	69	48	54	G e r ç e k
adenokarsinom	41	224	70	108	
büyük hücreli karsinom	43	137	175	57	
skuamöz hücreli karsinom	55	179	43	249	

Şekil 5: Naive Bayes Modelinin Test Verileri Üzerindeki Karmaşıklık Matrisleri

Şekil 6'daki karmaşıklık matrisleri incelendiğinde sınıflandırmada en büyük hatayı skuamöz hücreli karsinom sınıfında ve büyük hücreli karsinom sınıfında yaptığı görülmektedir. Parça 4'te diğer parçalara göre kanserli sınıfları normal sınıf olarak tahmini daha fazladır.

Tahmin					G e r ç e k
normal	adenokarsinom	büyük hücreli karsinom	skuamöz hücreli karsinom		
normal	383	12	0	3	G e r ç e k
adenokarsinom	4	546	28	43	
büyük hücreli karsinom	0	14	295	5	
skuamöz hücreli karsinom	0	36	14	417	

Tahmin					G e r ç e k
normal	adenokarsinom	büyük hücreli karsinom	skuamöz hücreli karsinom		
normal	382	8	0	3	G e r ç e k
adenokarsinom	5	548	38	38	
büyük hücreli karsinom	0	18	295	7	
skuamöz hücreli karsinom	0	34	4	420	

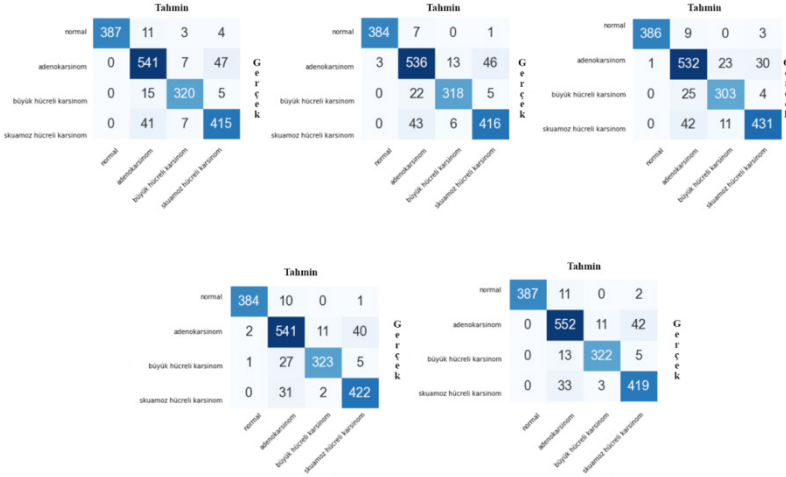
Tahmin					G e r ç e k
normal	adenokarsinom	büyük hücreli karsinom	skuamöz hücreli karsinom		
normal	380	10	0	5	G e r ç e k
adenokarsinom	3	530	33	26	
büyük hücreli karsinom	0	24	281	6	
skuamöz hücreli karsinom	4	44	23	431	

Tahmin					G e r ç e k
normal	adenokarsinom	büyük hücreli karsinom	skuamöz hücreli karsinom		
normal	372	8	0	3	G e r ç e k
adenokarsinom	10	540	27	19	
büyük hücreli karsinom	1	25	297	10	
skuamöz hücreli karsinom	4	36	12	436	

Tahmin					G e r ç e k
normal	adenokarsinom	büyük hücreli karsinom	skuamöz hücreli karsinom		
normal	385	9	0	4	G e r ç e k
adenokarsinom	0	551	39	21	
büyük hücreli karsinom	0	10	282	5	
skuamöz hücreli karsinom	2	39	15	438	

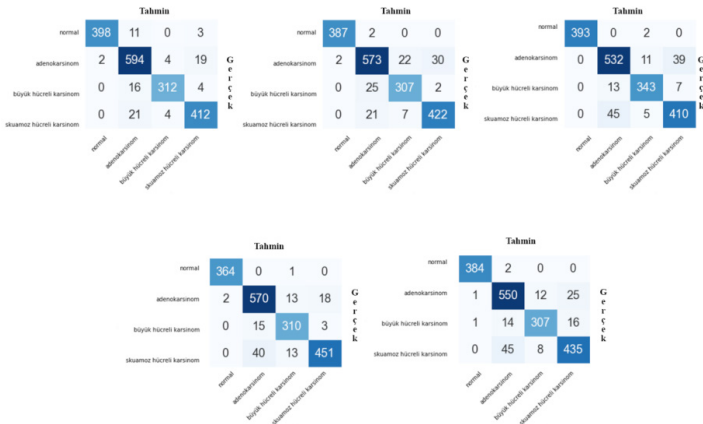
Şekil 6: K En Yakın Komşu Modelinin Test Verileri Üzerindeki Karmaşıklık Matrisleri

Şekil 7’deki karmaşıklık matrisleri incelendiğinde sınıflandırmada en büyük hatayı adenokarsinom sınıfında yaptığı görülmektedir. Bütün parçalar incelendiğinde parça 1 ve parça 5 hariç kanserli akciğer ile sağlıklı akciğer tanısında yanlış sınıflandırma yaptığı durumlara rastlanmıştır.



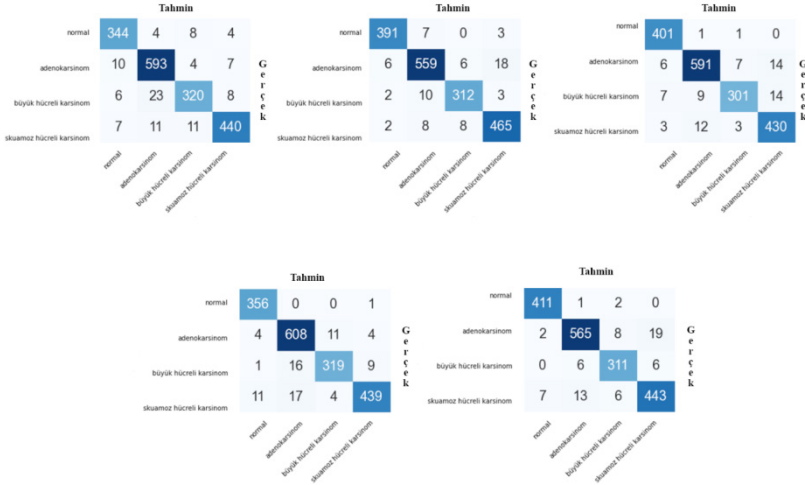
Şekil 7: Destek Vektör Makinesi Modelinin Test Verileri Üzerindeki Karmaşıklık Matrisleri

Şekil 8’deki karmaşıklık matrisleri incelendiğinde sınıflandırmada en büyük hatayı skuamöz hücreli karsinom sınıfında yaptığı görülmektedir. Bütün parçalara incelendiğinde parça 3 hariç kanserli akciğer ile sağlıklı akciğer tanısında yanlış sınıflandırma yaptığı durumlara rastlanmıştır.



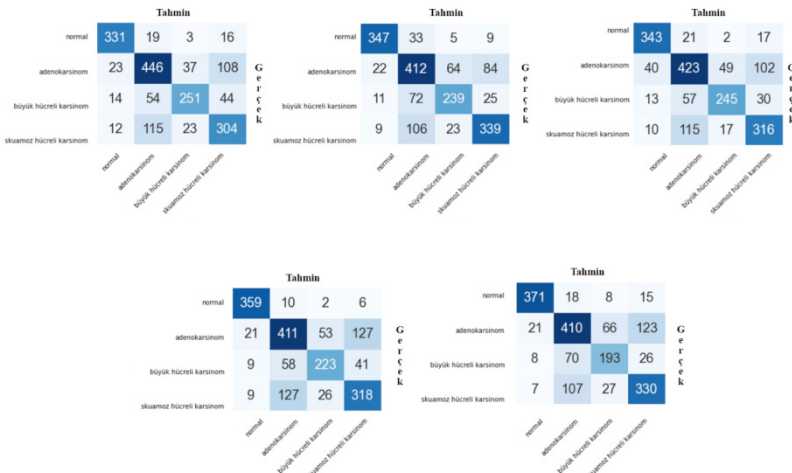
Şekil 8: Ölçeklendirilmiş Eşlenik Gradyan Modelinin Test Verileri Üzerindeki Karmaşıklık Matrisleri

Şekil 9'daki karmaşıklık matrisleri incelendiğinde sınıflandırmada en büyük hatayı büyük hücreli karsinom sınıfında yaptığı görülmektedir. Bütün parçalar incelendiğinde kanserli akciğer ile sağlıklı akciğer tanısında yanlış sınıflandırma yaptığı durumlara rastlanmıştır.



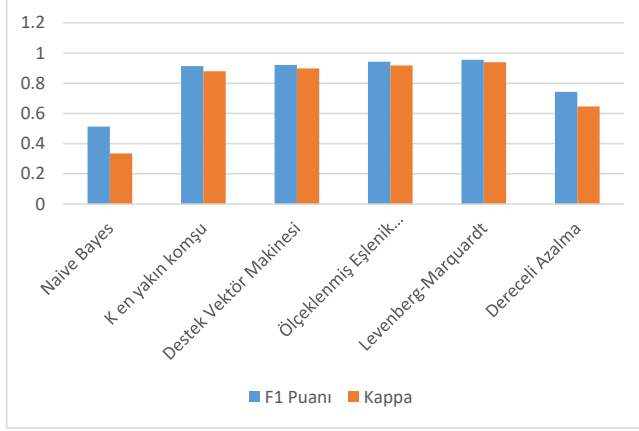
Şekil 9: Levenberg-Marquardt Modelinin Test Verileri Üzerindeki Karmaşıklık Matrisleri

Şekil 10'daki karmaşıklık matrisleri incelendiğinde sınıflandırmada en büyük hatayı adenokarsinom sınıfında yaptığı görülmektedir. Bütün parçalar incelendiğinde kanserli akciğer ile sağlıklı akciğer tanısında yanlış sınıflandırma yaptığı durumlara rastlanmıştır.



Şekil 10: Momentumlu Dereceli Azalma Modelinin Test Verileri Üzerindeki Karmaşıklık Matrisleri

Şekil 11’de kullanılan sınıflandırıcılar, F1 puanı ve kappa puanına ortalamaları alınarak karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda akciğer kanseri sınıflandırmada en başarısız algoritmanın Naive Bayes, en başarılı algoritmanın ise Levenberg-Marquardt algoritması olduğu görülmektedir.



Şekil 11: Yapay Zeka Algoritmalarının Karşılaştırılması

5. Sonuç

Akciğer kanseri ölüm riski en yüksek kanser türlerinden biridir. Akciğer kanserindeki tümörler tek tip olmayıp küçük hücreli ve küçük hücreli olmayan olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Küçük hücreli olmayan ise adenokarsinom, büyük hücreli karsinom ve skuamöz hücreli karsinom olmak üzere üç alt gruba ayrılmaktadır. Günümüzde akciğer kanserine laboratuvar yöntemleriyle tanı konabilmektedir ancak bu yöntemler hem zaman açısından hem de maddi açıdan maliyetlidir. Bundan dolayı bilgisayar destekli tanı sistemleri önem kazanmaktadır. Bilgisayar destekli tanı sistemlerinde yapay zekanın rolü büyüktür. Bundan dolayı bu işi yapabilecek en iyi yapay zekâ yönteminin tespit edilmesi önemlidir.

Bu çalışmada Kaggle Chest CT-Scan veri seti kullanılmıştır. Bu veri setindeki görüntüler standart bir boyutta değildir. Bundan dolayı görüntüler 80×40 boyutuna indirgenmiştir. İndirgenen görüntüler gri seviyesine dönüştürülmüştür. Dönüştürülen görüntülere 3. seviye dalgacık dönüşümü uygulanmıştır ve 0-1 normalizasyonu uygulanmıştır. Ön işlemden geçmiş veri kümesi Naive Bayes, k en yakın komşu, destek vektör makinesi ve yapay sinir ağları modellerine uygulanmıştır. Bu modeller F1 puanı ve kappa puanına göre değerlendirilmiştir ve aralarında karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına

göre en iyi sonuçları veren model, 0,9551 F1 puanı ve 0,939 kappa puanıyla Levenberg-Marquardt algoritması ile eğitilen yapay sinir ağı modelidir.

Bu çalışmanın ileri safhasında yeni veri seti oluşturulabilir, küçük hücreli tümörler de dahil edilebilir. Derin öğrenme metotları ve hibrit metotlar da karşılaştırmaya dahil edilebilir.

Kaynakça

Abdullah, D. M., Abdulazeez, A. M., and Sallow, A. B. (2021). Lung cancer prediction and classification based on correlation selection method using machine learning techniques. *Qubahan Academic Journal*, 1(2), 141-149.

Abirami, S., and Chitra, P. (2020). “Energy-efficient edge based real-time healthcare support system.” In *Advances in computers* (Vol. 117, No. 1, pp. 339-368). Elsevier.

Andrearczyk, V., and Whelan, P. F. (2017). Deep learning in texture analysis and its application to tissue image classification. In *Biomedical texture analysis* (pp. 95-129). Academic Press.

Asuntha, A., and Srinivasan, A. (2020). Deep learning for lung Cancer detection and classification. *Multimedia Tools and Applications*, 79(11-12), 7731–7762.

Babani, L., Jadhav, S., and Chaudhari, B. (2016). “Scaled conjugate gradient based adaptive ANN control for SVM-DTC induction motor drive.” In *IFIP International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations* (pp. 384-395). Springer, Cham.

Bakr, M. H., and Negm, M. H. (2012). Modeling and design of high-frequency structures using artificial neural networks and space mapping. In *Advances in Imaging and Electron Physics* (Vol. 174, pp. 223-260). Elsevier.

Bhargava, D., Vyas, S., and Bansal, A. (2020). Comparative analysis of classification techniques for brain magnetic resonance imaging images. In *Advances in Computational Techniques for Biomedical Image Analysis* (pp. 133-144). Academic Press.

Cetişli, B., and Barkana, A. (2009). Speeding up the scaled conjugate gradient algorithm and its application in neuro-fuzzy classifier training. *Soft Computing*, 14(4), 365–378.

Chaudhry, Q., Chrétien, J., Craciun, M., Guo, G., Lemke, F., Müller, J.-A., Neagu, D., Piclin, N., Pintore, M., and Trundle, P. (2007). Algorithms for (Q) SAR model building. *Quantitative Structure-Activity Relationships (QSAR) for Pesticide Regulatory Purposes*, 111–147.

Çoban, S. (2023). Akciğer kanseri tanısında yapay zeka yöntemlerinin karşılaştırılması. Ondokuz Mayıs Üniversitesi. Samsun.

Jawarkar, J., Solanki, N., Vaishnav, M., Vichare, H., and Degadwala, S. (2021). Multistage lung cancer detection and prediction using deep learning. *Int J Sci Res Sci Eng Technol*, 54-60.

Kumar, A., Bi, L., Kim, J., and Feng, D. D. (2020). “Machine learning in medical imaging.” In *Biomedical Information Technology* (pp. 167-196). Academic Press.

Kumar, M., and Rath, S. (2016). Feature selection and classification of microarray data using machine learning techniques. In *Emerging Trends in Applications and Infrastructures for Computational Biology, Bioinformatics, and Systems Biology* (pp. 213-242). Elsevier.

Kumaraswamy, B. (2021). Neural networks for data classification. In *Artificial Intelligence in Data Mining* (pp. 109-131). Academic Press.

MacLennan, B. J. (2001). Connectionist approaches. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, 2568–2573.

Neath, R. C., and Johnson, M. S. (2010). Discrimination and classification. *International Encyclopedia of Education*, 135–141.

Öner, İ. V. , Yeşilyurt, M. K. ve Yılmaz, E. Ç. (2017). Wavelet Analiz Tekniği ve Uygulama Alanları. *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7 (1) , 42-56.

Sairamya, N. J., Susmitha, L., George, S. T., and Subathra, M. S. P. (2019). Hybrid approach for classification of electroencephalographic signals using time–frequency images with wavelets and texture features. In *Intelligent Data Analysis for Biomedical Applications* (pp. 253-273). Academic Press.

Saleh, A. Y., Chin, C. K., Penshie, V., and Al-Absi, H. R. H. (2021). Lung cancer medical images classification using hybrid CNN-SVM. *International Journal of Advances in Intelligent Informatics*, 7(2), 151-162.

Schmidt, F., Kohlbrenner, D., Malesevic, S., Huang, A., Klein, S. D., Puhan, M. A., and Kohler, M. (2023). Mapping the landscape of Lung Cancer Breath Analysis: A scoping review (ELCABA). *Lung Cancer*, 175, 131–140.

Subramanian, R. Raja, Mourya, Ravella, Prudhvi, V, Reddy, Teja, Reddy, B and Amara, Srikar. (2020). Lung Cancer Prediction Using Deep Learning Framework. *International Journal of Control and Automation*. 13(3). 154-160.

Temurtaş, F. , Öztekin, M. , Yazdani, M. , Yörük, Y. E. , Aydemir, F. , Yonar, D. , Taşaltın, C. , Gürol, İ. , Ebeoğlu, M. A. , Salih, B. , Köksal, D. ve Emri,

K. A. S. (2019). AKCİĞER KANSERİ TANISI İÇİN YENİ BİR YÖNTEM . *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 1 (1) , 35-48 .

THONG, L. T., CHOU, H. S., CHEW, H. S., and LAU, Y. (2023). Diagnostic test accuracy of artificial intelligence-based imaging for lung cancer screening: A systematic review and meta-analysis. *Lung Cancer*, 176, 4–13.

Toğaçar, M., Ergen, B., and Cömert, Z. (2020). Detection of lung cancer on chest CT images using minimum redundancy maximum relevance feature selection method with convolutional neural networks. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 40(1), 23–39.

Vas, M., and Dessai, A. (2017). “Lung cancer detection system using lung CT image processing.” In 2017 International Conference on Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA) (pp. 1-5). IEEE.

Wilson, P., & Mantooth, H. A. (2013). Model-based optimization techniques. *Model-based engineering for complex electronic systems*, 2013, 347-367.

Winters-Miner, L. A., Bolding, P., Hill, T., Nisbet, B., Goldstein, M., Hilbe, J. M., Walton, N., Miner, G., Rastunkov, V., and Stout, D. (2015). Prediction in medicine – the data mining algorithms of Predictive Analytics. *Practical Predictive Analytics and Decisioning Systems for Medicine*, 239–259.

Zhang, D. (2019). Wavelet Transform. *Lecture Notes in Physics*, 35–44.

Zoppis, I., Mauri, G., and Dondi, R. (2019). Kernel methods: Support Vector Machines. *Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology*, 503–510.

BÖLÜM III

TEKSTİL ATIK SUYU RENK GİDERİMİNİN TAM FAKTÖRİYEL TASARIM İLE OPTİMİZASYONU

Optimization of Textile Wastewater Decolorization by Full Factorial Design

Ezgi AKTAR DEMİRTAS¹ & YELİZ AŞCI²

¹(Prof. Dr.) *Eskisehir Osmangazi Üniversitesi,*

E-mail: eaktar@ogu.edu.tr

ORCID: 0000-0002-3762-6256

²(Prof. Dr.) *Eskisehir Osmangazi Üniversitesi,*

E-mail: yelizbal@ogu.edu.tr

ORCID: 0000-0001-5618-058X

1. Giriş

Tekstil üretimi, genellikle boyar maddelerin eşlik ettiği ve üretilen atıksuyun özelliklerini belirleyen birçok kimyasal madde kullanımıyla önemli su tüketimini içerir (Kalaycı ve Çağlarer, 2021). Tekstil atık suları, hem çevre hem de insan sağlığı için zararlı olan, oldukça kirletici maddeler içerebilir. Bu kirleticiler arasında yüksek oranda katı madde, önemli miktarda organik ve inorganik kirleticiler, kimyasallar, boyar maddeler, ağır metaller, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ), asitlik, azot ve diğer çözünen maddeler bulunur. Tekstil atık sularındaki kirlilik genellikle boyama işlemlerine atfedilir. Tekstil, kozmetik ve deri gibi endüstriler yaklaşık 100.000 ticari boya ve boyar madde kullanmakta ve bunların yaklaşık %10-15'i doğrudan suya deşarj edilmektedir. Renk giderimi, tekstil, gıda, kağıt üretimi ve diğer sektörlerde karşılaşılan önemli sorunlardan biridir (Keerthi ve Vani, 2022). Bu bağlamda, özellikle yüksek miktarda boya içeren tekstil endüstrilerinden gelen atıksulardan renk gideriminin, ekolojik olarak kritik olduğu söylenebilir.

Kimyasal yöntemleri kullanarak renk giderimi yapan birçok çalışma bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında adsorpsiyon, koagülasyon, ozonlama, Fenton prosesi, foto-Fenton prosesi, UV/NaOCl, elektrokimyasal bozunma, ultrasonik ışınlama, UV/H₂O₂ vb. prosesler sayılabilir (Özdemir et al., 2011).

Bu yöntemlerin verimliliği, işlemlerde kullanılan faktörler ve parametreler kadar bu faktörler arasındaki etkileşimlere de bağlıdır. Bu nedenle, renk giderimi işlemini optimize etmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

Son yıllarda, deney tasarımı (DT) ve yanıt yüzey metodu (YYM), atıksulardan renk giderimi için yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Bu teknikler özellikle süreç verimini artırmak için çok kullanışlı olabilir. Temel fikir, tüm önemli parametreleri tasarlanmış deneyler dizisi boyunca aynı anda değiştirmek ve ardından sonuçları matematiksel bir model aracılığıyla birleştirmektir. Daha sonra bu model, optimizasyon, tahmin veya yorumlama için kademeli olarak kullanılabilir, böylece süreç performansı iyileştirilebilir. Bu yöntemi kullanarak renk giderimi verimini artırabilirken kimyasal tüketimi, işletme maliyetlerini ve çevresel etkileri azaltabilirsiniz. Ayrıca, elde edilen sonuçlar genellikle geleneksel yöntemlere göre daha hassas ve tekrarlanabilir (Saha ve Chowdhury, 2021). Tam faktöriyel tasarım (TFT), ana faktör etkilerinin veya etkileşimlerin değerlendirilmesine olanak sağlayan basit ve sistematik bir tasarımıdır. Faktör veya seviye sayısı arttıkça, bu tasarım için gereken deneme sayısı katlanarak artar. Klasik bir tasarımdan başlayarak daha ileri seviyelere ilerlemek yaygın bir uygulamadır. 2^k faktöriyel tasarım, her faktörün yalnızca iki olası değere sahip olduğu TFT' nin bir alt kümesidir. Bu yöntem, araştırmacının kategorik ve sürekli bileşenler için bağımlı değişken üzerindeki bağımsız faktörlerin etkilerini (ana etkiler) ve bağımsız değişkenler arasındaki etkileşimlerin (bağımlı değişken üzerindeki bağımsız değişkenler arasındaki etkiler) incelemesine izin verir (Maaze ve Shrivastava, 2023).

Seçilen parametrelerin en iyi değerlerini belirleyebilmek bir dizi deney yapılmasını gerektirir. Deneme sayısının artması zaman kaybına, malzeme israfına ve artan maliyetlere neden olur. Bu durumda, DT, ANOVA ve regresyon modelleri gibi istatistiksel analiz yöntemleri önemli bir rol oynar (Myers ve diğerleri, 2016).

Bu yayında, sono-katalitik fenton yöntemiyle bir tekstil firmasının atık suyundan renk giderimi için en iyi çalışma koşullarının TFT ile optimizasyonuna odaklanılmaktadır. İleri oksidasyon yöntemlerinden biri olan fenton prosesi Fe⁺² ile H₂O₂'in birleşmesi sonucunda boya moleküllerini parçalayan OH⁻ radikali oluşması esasına dayanır. Bu çalışmada kullanıldığımız yöntem sono-katalitik

fenton; fenton ve ultrases proseslerinin birleşimidir. Burada fenton prosesine ilave olarak ultrasesin de etkisiyle daha çok OH⁻ radikali oluşur ve daha yüksek verim elde edilir. Fenton ve ultrases yönteminin ayrıntılı açıklaması için bkz. Özdemir et al. (2011).

TFT, faktör seviyelerinin tüm kombinasyonları için yanıt değişkenini (renk giderimi) inceleme olanağı sağlar. pH, kil miktarı, tepkime süresi ve H₂O₂ konsantrasyonu gibi faktörlere ilişkin en iyi çalışma koşulları Varyans Analizi (ANOVA) ile belirlenmiş ve giderim verimi regresyon modelleri kullanılarak tahmin edilmiştir. İlgili faktörlerin en iyi düzeyleri ile yapılan doğrulama deneyleri, giderim veriminin en iyi değere (94%) ulaştığını ve bu değer %95 güven seviyesinde hesaplanan tahmin aralıkları içerisinde kaldığını göstermiştir. Bahsedilen dört faktör için iki seviyeli (düşük/yüksek) tam faktöriyel tasarım kullanılmıştır. Toplamda 16 deney rastgele sırada yapılmış olup, deneylerin tasarımı ve analizi Design-Expert 11 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar varyans analizine tabi tutularak renk giderim veriminde etkili faktör ve etkileşimleri belirlenmiş, etkili faktörler için en iyi parametre seviyeleri tespit edilmiştir. Daha sonraki aşamada regresyon modeli oluşturularak uygun parametre seviyelerine karşı gelen renk giderim verimi tahmin edilmiştir. Aynı koşullar altında gerçekleştirilen doğrulama deneyleri de giderim veriminin en iyi değere ulaştığını fiziksel ortamda geçerli kılmıştır. Doğrulama sonuçları %95 anlam düzeyinde regresyon modelinden elde edilen tahmini renk giderim yüzdesi ile gerçek giderim veriminin uyumlu olduğunu göstermiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde su arıtımı ve renk gideriminde YYM, Taguchi, Tam/Kesirli ve Faktöriyel Tasarım gibi deney stratejilerini kullanan çalışmalara değinilmiştir. Üçüncü bölümde deney tasarımı hakkında temel bilgiler verilerek istatistiksel analizler detaylı olarak ele alınmıştır. Son bölümde çıkarımlardan ve gelecekte yapılabilecek çalışmalardan söz edilmiştir.

2. Literatür Taraması

Literatürde, su arıtımı ve renk giderimi ana başlığı altında DT, YYM ve Taguchi ile renk giderim verimini optimize eden pek çok çalışma bulunmaktadır. Konu hakkındaki literatür taraması için Lee et al. (2022) ve Saha and Chowdhury (2021)'nin yayınları incelenebilir.

Altayb et al. (2021), Yargıç (2020), Kaya et al. (2019), Asci et al (2017) renk gideriminde DT ve TFT stratejisini kullanırken, Demirtas and Akay (2015), Sharma et al. (2017), Altın and Dogruel (2018), Chowdhury and Siddik

(2020), Raza et al. (2021), Altayb et al. (2021), Selçuk et al. (2023) YYM'daki deney stratejilerini (Box-Benkhen ya da Central Composite Design-CCD) kullanmıştır.

Son 10 yıl içinde yayınlanan çalışmalardan bazıları ise izleyen paragraflarda daha detaylı olarak tartışılmıştır.

Bidu et al. (2023) tekstil atıksularının yardımcı substrat olarak evsel atıksu ile arıtımını incelemiştir. Farklı karışım oranlarındaki (100:0, 80:20, 60:40) kombine tekstil ve evsel atıksular anaerobik reaktör altında arıtılmıştır. Başlangıç pH'ını, karışımdaki tekstil atıksu fraksiyonunu ve kalma süresini içeren operasyonel parametrelerin renk ve KOİ üzerindeki etkisini YYM ile incelemiştir. Box-Behnken deney stratejisi ile elde edilen ikinci dereceden regresyon modellerine ilişkin R^2 ve düzeltilmiş R^2 değerleri KOİ giderimi için sırasıyla %91.87 ve %89.75'dur. Öte yandan, renk giderme için bu değerler %96.38 ve %95.00'tir. Tekstil atık suyunun 0.65-0.8 aralığı, yüksek oranda renk giderimini desteklerken, artan tekstil atık suyuyla KOİ giderimi azalmaktadır. KOİ ve rengin aynı anda en yüksek giderimi, 8.6 başlangıç pH'ında, 9 günlük kalış süresinde karşılırken, tekstil ve evsel atık su oranı 77.23 olmuştur. Gerçekleştirilen en yüksek giderim verimlilikleri, renk ve KOİ için sırasıyla %70 ve %72 idi. Genel olarak, daha uzun kalış süresi ve daha yüksek başlangıç pH'ı, KOİ ve rengin aynı anda daha yüksek giderimini desteklemiştir. Tekstil ve evsel atıksuların belirli oranlarda birlikte sindirilmesi yeni bir bulgu olarak ifade edilmiştir.

Yaprak ve Vergili (2023), nanofiltrasyon (NF) yöntemi ile biyolojik olarak arıtılmış tekstil atık suyunun yeniden kullanımı için en iyi işletme koşullarını ve önemli faktörleri belirlemek için L9 (3^4) dizisi ile Taguchi deneysel tasarım yöntemini kullanmıştır. Sinyal-gürültü oranları, NF membran türü, transmembran basınç, hacim azaltma faktörü ve çapraz akış hızı faktörleri için sırasıyla Desal 5DL, 16 bar, 1.5 ve 2 L/dak en iyi koşulların geçerli olduğu gösterilmiştir. Bu koşullar altında boyama işlemi, finiş işlemi ve üretim süreçlerinde genel kullanım için suyun istenilen kalite düzeyini karşıladığı görülmüştür.

Keerthi and Vani (2022) doğal pıhtılaştırıcılarla pıhtılaşmanın etkinliğini araştırmak için ticari olarak kullanılan boyanın tekstil atık suyundan uzaklaştırılmasına ilişkin bir çalışma yapmıştır. Doğal pıhtılaştırıcılar, düşükten yükseğe kadar bulanık suyu arıtılabilir ve çeşitli amaçlar için kullanılabilen olağanüstü renk giderme verimliliğine sahiptir. Dört tür doğal pıhtılaştırıcı, yani mısır, yeşil fasulye, nirmal tohumları (*Strychnos potatorum*)

ve moringa tohumları incelenmiştir. Ayrıca, pıhtılaştırıcı konsantrasyonu, pH ve tekstil atık suyunun rengini gidermek için karıştırma süresi gibi proses parametreleri, YYM kullanılarak optimize edilmiştir. En iyi koşullar, pıhtılaştırıcı konsantrasyonu için 55 mg/l, pH için 2.96, karıştırma süresi için 62.5 dk olarak belirlenmiştir. Optimize edilmiş koşullarda maksimum renk giderimi %98.9 olarak tahminlenmiştir. Toplam çözünmüş katı miktarı için 312 ppm ve bulanıklık için 4.8 NTU verim değerleri elde edilmiştir. 0.987 R² değerine sahip ikinci dereceden bir polinom denklem ile moringanın tekstil boyası atıksularını arıtmak için etkili bir pıhtılaştırıcı olduğu sonucuna varılmaktadır.

Yadav et al. (2021), YYM ve Box-Behnken tasarımı ile *Arthrographis kalrae* türevi lakkaz ile Remazol Brilliant Blue R boya biyodegradasyonunu optimize etmiştir. İşlenmemiş numunelerle karşılaştırıldığında, lakkaz ile muamele edilmiş boya numunesi, *Allium cepa* L üzerinde nispeten daha az fito-ve sito-toksik etki göstermiştir. Bu çalışmanın sonuçları, mevcut lakkazın tekstil atıksu arıtımında kullanılabileceğini göstermektedir.

Ashwini Prabhakar et al. (2020), tekstil atık sularından renk gideriminin yanı sıra atık suda bulunan toplam çözünür maddenin azaltılmasına yönelik olarak oldukça etkili olduğu düşünülen *Aloe vera* biyoflokülant'ın etkisini incelemişlerdir. Optimizasyon için 3 seviye-3 değişken kullanan Box-Behnken tasarım stratejisi önerilmiştir. Optimize edilmiş koşullar altında atık suyun renk gideriminde $62,50 \pm 0,1$ 'den $82,01 \pm 0,8$ 'e önemli bir artış gözlemlendi. Biyoflokülant dozu (60 mg/L), pH (5.0) ve temas süresi (180 dakika). Renk giderme verimi için 0.99 R² değerine sahip kuadratik bir regresyon modeli ile elde edilen tahmin sonuçları, *Aloe vera* müsilajının umut verici bir biyoflokülant olarak hizmet edebileceğini göstermiştir.

Tones et al. (2020), fiziksel renk parametresinin niteliksel ve niceliksel olarak belirlenmesi için spektral ters evrişim ve Gauss uyumunu kullanarak, fotovoltajik elektrokoagülasyon (Electrocoagulation - EC) tekniği ile ikili bir azo boya karışımındaki renk giderimini araştırmıştır. Başlangıçta, EC reaktörünü beslemek için geleneksel bir enerji kaynağı kullanılmış ve deneysel tasarım, Rotasyonel Merkezi Bileşik Tasarıma (RMBT) göre yapılmıştır. Gauss uyumu ile ilişkili spektral ters evrişim yöntemi, numune matrisinin bileşiminin tanımlanmasına yardımcı olmuştur. İlk adımda, ANOVA, RMBT ve üç boyutlu yüzey tepki grafikleri aracılığıyla, optimize edilmiş çalışma koşulları belirlenmiştir. Scarlet Red (SR) ve Turquoise Blue (TB) boya için sırasıyla 16.6 ve 15.7 dakikalık bir reaksiyon süresi ile EC reaktörünün güç kaynağı olarak

fotovoltaik modül kullanılarak, TB boyası için maksimum $97 \pm 0,43$ ve SR için $98 \pm 0,81$ 'lik maksimum giderim elde edilmiştir. Sonuçlar, fotovoltaik modül beslemeli EC teknolojisinin tekstil boya için atık suların arıtılması için umut verici bir alternatif olarak uygulanabilirliğini göstermektedir. Sonuçların güvenilirliği ve kesinliği için Gauss uyumu ile ilişkili spektral ters evrişim yönteminin kullanımı da teşvik edilmiştir.

Bessegato et al. (2019) bu çalışmayla merkez noktasında üç tekrarlı gerçekleştirilen TFT ile bor katkılı TiO_2 nanotüp dizi elektrotları ile Photoelectrocatalytic (PEC) oksidasyon parametrelerini optimize etmiştir. YYM ile elde edilen sonuçlar, elektrot yüzeyinde AR151 boyasının elektrosorpsiyonu ile ilişkili olduğu için pH'ın en etkili parametre olduğunu göstermiştir. Diğer iki faktörün, yani anoda uygulanan potansiyel ve kullanılan karşıt elektrot malzemesinin de pH'a kıyasla çok daha az etkiye sahip olmalarına rağmen, PEC işleminde etkili olduğu raporlanmıştır. Araştırılan faktörler (değişkenler) arasında anlamlı bir etkileşim gözlenmemiştir. Ek olarak, bor katkılı TiO_2 nanotüp elektrot kullanımı, PEC işleme tekniği altında katkısız TiO_2 NT elektrot kullanımına kıyasla AR151'in mineralizasyonunda ve renk gideriminde yaklaşık 1.5 kat iyileşme sağlamıştır. Dolayısıyla, bu çalışmanın bulgularına dayanarak, deneysel tasarımın, photoelectrocatalytic oksidasyon koşullarını optimize etmek için yararlı bir araç olduğu sonucuna varılabilir.

Hassanzadeh et al. (2017), yünlü tekstil endüstrilerinde, bulanıklık (>40 NTU) ve KOİ (>1500 mg/L) değerleri çok yüksek olduğu için genellikle yüksek düzeyde kimyasal arıtma kullanıldığı; ancak, bu düzeyin, yüksek konsantrasyonlu çamur gibi başka bir sorun yarattığı tespit edilmiştir. KOİ 'yi maksimum 200 mg/L'ye ve bulanıklığı 25 NTU'ya düşürmek için kimyasal ön arıtma (pıhtılaştırıcı olarak FeSO_4 , 400–800 mg/L, pH 6–10,) deneyleri planlanmıştır. Gerçek bir yünlü tekstil atığının arıtılması için kimyasal destekli NF işlemi (çalışma koşulları: 4–8 bar, KOİ 50–200 mg/L ve pH 6-10) ve ticari bir spiral sargılı poliamid nano filtre (Thin Film Composite - TFC) kullanılmıştır. YYM ile yapılan optimizasyon sonrasında, ön arıtma işlemi için en iyi koşulların pH için 8, FeSO_4 için 600mg/L olduğunu göstermiştir. NF prosesi için pH ve basıncı artırarak bulanıklığın azaldığı ve KOİ giderim veriminin %98'e kadar yükseldiği görülmüştür. Bununla birlikte, renk konsantrasyonlarının arttırılmasıyla KOİ giderim verimliliği yaklaşık %90 civarında seyretmiştir. En iyi koşullarda ve kimyasal ön arıtmadan sonra NF prosesinin, tekstil atıksu akımlarının geri dönüşümünde kirleticilerin (örn. renk ve mineraller) uzaklaştırılması için büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir.

Secula et al. (2013), GAC üzerinde adsorpsiyon ile geliştirilmiş EC prosesi kullanarak boya çözeltilerinden renk giderme performansını optimize etmeye çalışmıştır. Bu çalışmada, belirli bir boya çözeltisi için iki seviyeli kesirli faktöriyel tasarım kullanılarak matematiksel bir model geliştirilmiştir. Mevcut yoğunluk, zaman ve ilk boya konsantrasyonu faktörlerinin, renk giderme verimliliği ve birim enerji talebi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bir EC reaktörüne bir GAC dozunun eklenmesi, kirletici gideriminin artmasına yol açar. Ayrıca belirli deneysel koşullar altında, özellikle artırılmış atık su elektroforetik taşımayı destekleyen uygun iletkenliğe sahip olduğunda, renk giderme verimliliği tepkisini olumlu yönde etkilemektedir.

3. Deneysel Tasarım ve Optimizasyon

DT, bilinen girdi değişkenlerine sahip sistemlerin performansını hızla optimize etmek için kullanılan istatistiksel bir tekniktir. Sistemin performansını (veya çıktısını) etkilediği düşünülen tüm faktörleri içeren bir tarama planı (screening design) ile başlar. Girdi değişkenlerinin veya test faktörlerinin sayısı fazla olduğunda, birincil amaç bu sayıyı yönetilebilir birkaç adede indirmektir. Bunu genellikle sistemin performansını optimize etmek amacıyla tasarlanmış başka bir deney veya test planı takip eder. Temel amaç, bazı süreçleri, faktörler adı verilen girdi veya test değişkenleri ve yanıtlar adı verilen ölçülmüş çıktı değişkenleri ile değerlendirme ihtiyacıdır. Ayrıca DT, bir çalışmadan elde edilen bilgi miktarını en üst düzeye çıkarırken toplanacak veri miktarını en aza indirmek için etkili bir araçtır (Uy and Telford, 2009).

TFT, en az iki veya daha fazla parametre ve bu parametrelere ait en az iki veya daha fazla seviyenin bulunduğu deneylerde tüm faktörlerin olası etkilerini belirlemeye yardımcı olur. Ancak, faktör sayısı arttıkça, deney sayısı da artar, bu nedenle bu tasarım türü pahalı ve zaman alıcı olabilir. Kesirli Faktöriyel Tasarım ise TFT'nin alt kümelerini kullanan bir tasarım türüdür. Maliyetten ve zamandan tasarruf sağlamak için deney sayısının orantılı olarak azaltılmasıyla elde edilir (Myers et al., 2016). DT çalışmalarının analizinde ANOVA'nın yanısıra Multiple Linear/Nonlinear Regression models kullanılır. Amaç açıklayıcı (bağımsız) değişkenler ile yanıt (bağımlı) değişkenler arasındaki doğrusal/doğrusal olmayan (polynomial) ilişkiyi modellemektir.

Çalışmada izlenen adımlar alt bölümlerde detaylı olarak tartışılmıştır.

3.1. Deney Planının Oluşturulması

Deney tasarımında kullanılacak olan faktörler ve düzeylerin belirlenmesi için ön denemeler gerçekleştirilmiştir. Ön denemeler sonrasında renk gideriminde etkili olabilecek faktörlerin pH (A), kil miktarı (Clay-B, gr), tepkime süresi (Time-C, dk.) ve H₂O₂ konsantrasyonu (D, ppm) 2 düzeyli 4 faktör (2⁴) olmak üzere toplam 16 deneyden oluşan tam faktöriyel deney planı oluşturulmuştur. Tablo 1’de deneylerde kullanılan faktör ve düzeyleri listelenmiştir.

Tablo 1: Deney tasarımında kullanılan faktörler ve düzeyleri

Factor	Name	Low Level	High Level
A	pH	2	6
B	Clay	2	6
C	Time	30	120
D	H ₂ O ₂	35	200

Rassal sırada yapılan toplam 16 deney için renk giderim sonuçları elde edilerek analize tabi tutulmuştur. Analiz sonuçları izleyen bölümde tartışılmıştır.

3.2. ANOVA ve Regresyon Modeli

Deneyler gerçekleştirildikten sonra renk giderimi yanıt değişkeni için ANOVA yapılmış ve regresyon modelleri oluşturulmuştur. Modele dâhil edilecek değişkenlerin belirlenmesinde backward elimination yöntemi kullanılmıştır. Analiz sonuçları Tablo 2’de paylaşılmıştır.

Analiz sonuçları incelendiğinde modelin anlamlı olduğu görülmektedir ($p\text{-value} < 0.05$) Sonuçlar faktörler bazında değerlendirildiğinde ise A ve C ana faktörleri ile BC ve BD ikili etkileşim etkilerinin, ABC ve ACD üçlü etkileşim etkilerinin kritik öneme sahip olduğu ($p\text{-value} < 0.05$) görülmüştür. AB etkileşimi için p değeri 0.5’e yakın olduğundan (0.06) olduğundan ve ABC üçlü etkileşim etkisi kritik olduğundan AB ikili etkileşim etkisinin modelde kalmasına karar verilmiştir. Tablo 2’de sözü edilen faktör ve etkileşim terimleri ile oluşturulan regresyon modelindeki R² değerleri Tablo 3’deki gibidir. R² değerinin 0.92 ve düzeltilmiş R² değerinin 0.85 civarında olduğu görülmektedir. Bu değerler modelin renk giderimindeki değişkenliği açıklama yüzdesinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.

Tablo 2: Renk giderimi için ANOVA sonuçları

	Sum of		Mean	F	p-value	
Source	Squares	df	Square	Value	Prob > F	
Model	1018.90	7	145.56	12.91	0.0009	significant
A-pH	78.01	1	78.01	6.92	0.0301	
C-Time	71.28	1	71.28	6.32	0.0361	
AB	53.47	1	53.47	4.74	0.0610	
BC	171.15	1	171.15	15.19	0.0046	
BD	191.75	1	191.75	17.01	0.0033	
ABC	298.17	1	298.17	26.45	0.0009	
ACD	155.06	1	155.06	13.76	0.0060	
Residual	90.17	8	11.27			
Cor Total	1109.07	15				

Tablo 3: Regresyon modeli için R² değerleri

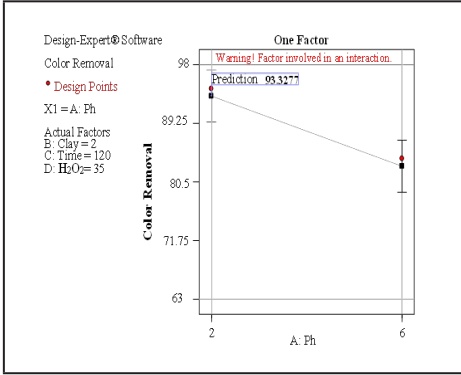
Std. Dev.	3.36	R-Squared	0.919
Mean	79.24	Adj R-Squared	0.848
C.V. %	4.24	Pred R-Squared	0.675
PRESS	360.67	Adeq Precision	11.087

Renk giderim verimi (%) için elde edilen çok değişkenli regresyon modeli Eq.1'de verilmiştir:

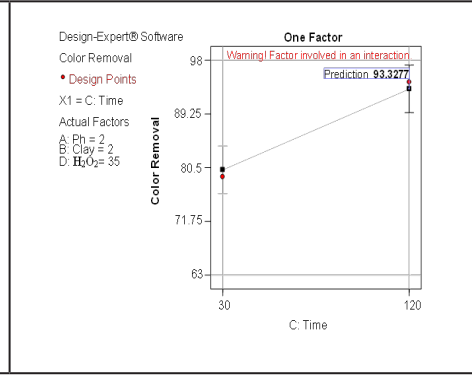
$$\text{Color Removal (\%)} = 79.24 - 2.21A + 2.11C + 1.83AB - 3BC + 3.46BD + 4.32ABC - 3.11ACD \quad \text{Eq.1}$$

A ana faktör etkisi ile BC ve ACD etkileşim etkileri renk giderimine negatif yönde etki ederken diğerleri pozitif yönde etki göstermektedir. Ana faktörlerin ve etkileşimlerin renk giderim yanıt değişkenine etkisini net olarak görebilmek

için ana faktör etkileri ve ikili-üçlü etkileşim grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 1 a-b, Şekil 2 a-c).



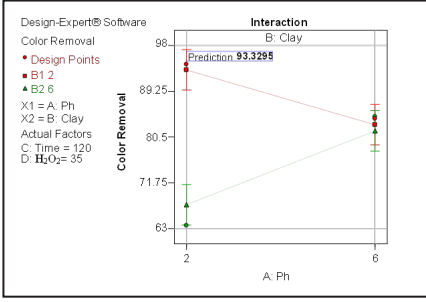
Şekil 1 a. pH için ana etkiler grafiği



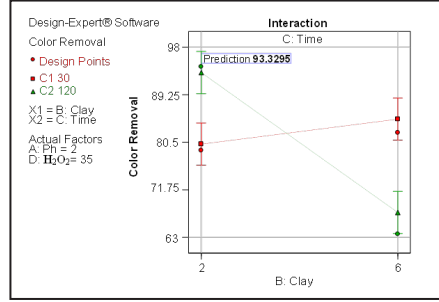
Şekil 1 b. Süre için ana etkiler grafiği

Şekil 1 a incelendiğinde kil miktarı ve H_2O_2 için düşük, süre için yüksek düzeyler seçildiğinde (B=2 gr. C=120 dk. D=35 ppm), en yüksek renk giderim değerine pH'nın düşük düzeyinde (A=2) ulaşılmaktadır. İlgili düzeylerde renk giderim yüzdesi için tahmin değeri yaklaşık 93.328 olarak gerçekleşmektedir. Şekil 1 b'de görüldüğü üzere süre 30 dakikadan 120 dakikaya çıkarıldığında renk gideriminin arttığı görülmektedir. Diğer faktörler en düşük düzeyde iken süre 120 dakikaya çıkarıldığında en büyük renk giderim verimi elde edilmiştir.

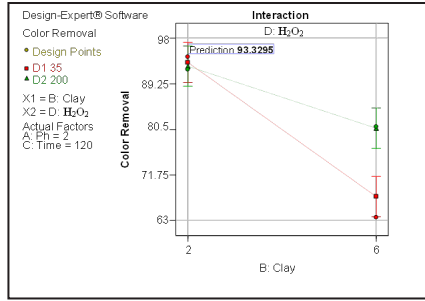
Şekil 2 a-c'de ise ikili etkileşim grafikleri yer almaktadır. Şekil 2 a incelendiğinde A ve B faktörlerinin belli bir noktada kesiştiği görülmektedir. Bu durum A ve B faktörlerinin bir etkileşim içinde olduğunu gösterir. A ve B düşük düzeyde iken (A=2 ve B=2 gr.) renk giderim verimi en büyük değere ulaşmaktadır. Şekil 2 b'ye göre en yüksek renk giderim verimine B düşük düzeyde ve C yüksek düzeyde iken erişilmektedir. Benzer şekilde Şekil 2 c'ye göre en yüksek renk giderim verimine B ve D düşük düzeylerde iken erişilmektedir.



Şekil 2 a. Interaction Effect plot for AB



Şekil 2 b. Interaction Effect plot for BC



Şekil 2 c. Interaction Effect plot for BD

3.3. Optimizasyon ve Doğrulama

Çekicilik fonksiyonları yardımıyla yerel en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar arasından Çekicilik değeri 1'e en yakın olan çözüm benimsenmiştir. Çekicilik değeri 0.965 olan bu çözüm için tahmini renk giderim verimi %93.33 olarak hesaplanmıştır (Tablo 4). A=2, B=2 gr. C=120 dk. D=35 ppm seviyesinde iken elde edilen bu çözüm için %95 güven seviyesindeki tahmin aralıkları incelendiğinde giderim değeri için alt sınırın 83.84 ve üst sınırın 102.81 olarak hesaplandığı görülmektedir (Tablo 4). Fiziksel koşullarda yapılacak doğrulama deneylerinde elde edilen giderim verimi ilgili tahmin aralığına düşerse sonuçların tutarlı olduğu yorumu yapılabilir.

	Prediction	SE Mean	95% CI low	95% CI high	SE Pred	95% PI low	95% PI high
Renk Giderim Yüzdesi	93.33	2.37	87.85	98.80	4.11	83.84	102.81

Tablo 4. % 95 güven seviyesindeki tahmin aralıkları

İlgili faktörler önerilen seviyelerde tutulduğunda yapılan doğrulama deneyi ile elde edilen giderim yüzdesinin yaklaşık 94 civarında olduğu gözlenmiştir. Sonuçların tutarlı olduğunu söylemek mümkündür.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada bir tekstil firmasına ait atık suyun renk giderim verimi DT ile eniyilenmiştir. TFT deney stratejisi ile en yüksek giderim verimini veren parametre değerleri belirlenmiş ve tahmin edilen verim değerleri için % 95 güven seviyesinde tahmin aralıkları hesaplanmıştır. DT ve seçilen deney stratejisinin etkili bir şekilde uygulanması için deneylere başlamadan önce süreç verimi üzerinde etkili olduğu düşünülen faktör ve düzeylerinin dikkatli ve doğru seçilmesi önemlidir. Renk giderim veriminde etkili faktörlerden pH, kil miktarı, tepkime süresi ve H₂O₂ konsantrasyonunun sırasıyla 2, 2 gr., 120 dk. ve 35 ppm düzeylerinde tutulduğunda verim değerinin % 94'e ulaştığı gözlenmiştir. Bu değer %95 güven seviyesinde hesaplanan alt-üst tahmin aralığı içerisinde yer almaktadır.

Literatürde henüz yer almayan farklı arıtma yöntemleri, farklı faktörler ve boyar maddeler ile çalışan araştırmacılar için DT ve YYM teknikleri ile optimizasyon ileri çalışma konularından biridir. Ayrıca renk giderim verimi dışında birden fazla yanıtı eş zamanlı olarak optimize edebilmek için çok amaçlı optimizasyon teknikleri ve çekicilik fonksiyonlarını kullanmak mümkündür. Diğer taraftan Yapay Sinir Ağları (YSA) ve makine öğrenmesi gibi yöntemler girdiler ile çıktılar (faktör ve yanıtlar) arasındaki neden-sonuç korelasyonlarını belirleyebilir. YSA aynı zamanda çok yanıtli problemlerin çözümü için de YYM gibi tekniklerle hibritlenebilen alternatif bir yöntemdir (Khan et al., 2023). Ancak YSA kullanımında sonuçların doğruluğu açısından daha fazla deneye ihtiyaç duyulabilir. Zaman ve maliyet yönlü kısıtlamaların olmadığı ve yeterince deneyin varlığı durumunda YSA ve makine öğrenmesi de çeşitli DT ve YYM araçları ile hibritlenerek kullanılabilir.

Kaynakça

Akay, U. Demirtas, E.A. (2015). Degradation of burazol blue ED by heterogeneous fenton process: simultaneous optimization by central composite design. *Desalination and Water Treatment*, 56:12, 3346-3356.

Altayb, H. N. Kouidhi, B. Baothman, O. A. Abdulhakim, J. A. Ayed, L. Hager, M. Chaieb, K. (2021). Mathematical modeling and optimization by the application of full factorial design and response surface methodology approach

for decolourization of dyes by a newly isolated *Photobacterium ganghwense*. *Journal of Water Process Engineering*, 44, 102429.

Altin, O. Dogruel, S. (2018). Removal Of Reactive Black 5 From Aqueous Solution Using Electrocoagulation: Optimization By Response Surface Methodology. *Journal of Water Process Engineering*, 24, 184-191.

Asci, Y. Ayas, N. Demirtas, E. A. (2017). The use of full factorial design for modeling the effects of process parameters on decolorization of Reactive Yellow 15 by using Fe/ZrO. *Desalination and Water Treatment*, 69, 328-334.

Ashwini Prabhakar, S. Ojha, N. Das, N. (2020). Application Of Aloe Vera Mucilage As Bioflocculant For The Treatment Of Textile Wastewater: Process Optimization. *Water Science and Technology*, 82 (11), 2446-2459.

Bessegato, G. G. De Almeida, L. C. Ferreira, S. L. Zanoni, M. V. B. (2019). Experimental Design As A Tool For Parameter Optimization Of Photoelectrocatalytic Degradation Of A Textile Dye. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7 (4), 103264.

Bidu, J. M. Njau, K. N. Rwiza, M. Van der Bruggen, B. (2023). Textile Wastewater Treatment In Anaerobic Reactor: Influence Of Domestic Wastewater As Co-Substrate in Color and KO₂ Removal. *South African Journal of Chemical Engineering*, 43, 112-121.

Chowdhury, M. N. Siddique, R. (2020). Optimization Of Decolorization Of Textile Wastewater By Coagulation Process Using Response Surface Methodology (RSM). *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101541.

Hassanzadeh, E. Farhadian, M. Razmjou, A. Askari, N. (2017). An Efficient Wastewater Treatment Approach For A Real Woolen Textile Industry Using A Chemical Assisted NF Membrane Process. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 8, 92-96.

Kalaycı, E. Çağlarer, E. (2021). Tekstilde Boyama Atık Suyundan Isı Geri Kazanımı: Gerçek İşletme Örneği (in Turkish). *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(2), 609.

Kaya, Y. Uzun, İ. Şahinkaya, S. Çetinkaya, B. (2019). Optimization Of Color Removal From Textile Wastewater By Full Factorial Method. *Journal of Cleaner Production*, 220, 805-812.

Khan, M. Z. Yousuf, R. I. Shoaib, M. H. Ahmed, F. R. Saleem, M. T. Siddiqui, F. Rizvi, S. A. (2023). A Hybrid Framework Of Artificial Intelligence-Based Neural Network Model (ANN) and Central Composite Design (CCD) In Quality By Design Formulation Development Of Orodispersible Moxifloxacin Tablets: Physicochemical Evaluation, Compaction Analysis, and Its In-Silico

PBPK Modeling. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 82, 104323.

Lee, B. Mahtab, M. Neo, T. Farooqi, I. Hurşid, A. (2022). "A Comprehensive Review Of Design Of Experiment (DOE) For Water And Wastewater Treatment Application - Key Concepts, Methodology And Contextualized Application. *Journal of Water Process Engineering*, 47, 102673.

Myers, R. H. Montgomery, D. C. Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. John Wiley & Sons, USA.

Raza, W. Abbas, N. Niazi, M. B. K. Mahmood, T. Bukhari, S. A. H. Mahmood, Q. (2021). Optimization of Textile Wastewater Color Removal by Response Surface Methodology. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101404.

Maaze, M. R. Shrivastava, S. (2023). Design Development Of Sustainable Brick-Waste Geopolymer Brick Using Full Factorial Design Methodology. *Construction and Building Materials*, 370, 130655.

Saha, S. Chowdhury, S. (2021). A Critical Review Of Response Surface Methodology in Wastewater Treatment Research. *Chemosphere*, 263, 128252.

Secula, M. S. Cretescu, I. Cagnon, B. Manea, L. R. Stan, C. S. Breaban, I. G. (2013). Fractional Factorial Design Study On The Performance Of GAC-Enhanced Electrocoagulation Process Involved in Color Removal From Dye Solutions. *Materials*, 6(7), 2723-2746.

Selçuk, S. F. Köker, B. Sarioğlu Cebeci, M. (2023). Tio₂-Zro₂ Katalizörüyle Boya Gideriminde Fotokatalitik Arıtım Parametrelerinin Yüzey Yanıt Yöntemiyle Optimizasyonu (in Turkish). *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29, 7, in press,

Sharma, S. Kapoor, S. Christian, R.A. (2017). Effect of Fenton Process on Treatment of Simulated Textile Wastewater: Optimization Using Response Surface Methodology. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14, 1665–1678.

Keerthi, D.S. Vani, M. (2022). Optimization Studies On Decolorization Of Textile Wastewater Using Natural Coagulants. *Materials Today: Proceedings*, 57, 1546-1552.

Özdemir, C., Öden, M. K., Şahinkaya, S., & Kalipçi, E. (2011). Color removal from synthetic textile wastewater by sono-fenton process. *Clean–Soil, Air, Water*, 39(1), 60-67.

Tones, A. R. M. Eyng, E. Zeferino, C. L. Ferreira, S. D. O. Alves, A. A. D. A. Fagundes-Klen, M. R. Sehn, E. (2020). Spectral Deconvolution Associated To The Gaussian Fit As A Tool For The Optimization Of Photovoltaic Electrocoagulation Applied In The Treatment Of Textile Dyes. *Science of the Total Environment*, 713, 136301.

Uy, M. Telford, J. K. (2009). Optimization By Design Of Experiment Techniques. IEEE Aerospace conference, Big Sky, MT, USA, 2009, pp. 1-10.

Yadav, A. Yadav, P. Kumar Singh, A. Kumar, V. Chintaman Sonawane, V. Naresh Bharagava, R. Raj, A. (2021). Decolourisation Of Textile Dye By Laccase: Process Evaluation And Assessment Of Its Degradation Bioproducts. *Bioresource Technology*, 340, 125591.

Yaprak, R. E. Vergili, I. (2023). Taguchi Experimental Design Method for the Reuse of Wastewater in Textile Processes. *Chemical Engineering & Technology*, in press.

Yargıç, A. Ş. (2020). Kavak Ağacı Kabuğu Esaslı Sorbentlerin 2⁵ Tam Faktöriyel Deney Tasarımı Kullanılarak Boyarmadde Gideriminde Değerlendirilmesi ve % Giderim Etkinliğinin İstatistiksel Analizi. *Politeknik Dergisi*, 23 (4) , 941-954.

BÖLÜM IV

MİKROKİRLETİCİLERİN SESSİZ TEHLİKESİNE KARŞI: EN YENİ ARITMA STRATEJİLERİ

Against the Silent Threat of Micropollutants: State-of-the-Art Treatment Strategies

Onur SÖZÜDOĞRU¹

¹ (Dr.Öğr.Üyesi), Atatürk Üniversitesi, Uygulamalı Bilimler Fakültesi,
Acil Yardım ve Afet Yönetimi Bölümü
E-posta: onur.sozudogru@atauni.edu.tr
ORCID: 0000-0001-7885-2930

1. Giriş

Son yıllarda, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip kirleticilerin çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkisi giderek artan bir endişe kaynağı haline gelmiştir. Bu kirleticiler arasında mikrokirleticiler (MK), kalıcılıkları, biyoakümülatif yapıları ve ekosistemler üzerindeki potansiyel olumsuz etkileri nedeniyle önemli bir sorun olarak ortaya çıkmıştır. MK'ler endüstriyel faaliyetler, tarımsal uygulamalar ve kentsel yüzey akışı dahil olmak üzere çeşitli alanlardan kaynaklanan çok farklı kimyasal bileşikler kapsar. Yeni ortaya çıkan kirleticiler veya eser organik bileşikler olarak da bilinen MK'ler, suda, toprakta, çökeltilerde ve hatta canlı organizmalarda tipik olarak litre başına nanogram ila mikrogram (ng/L-g/L) aralığında çok düşük konsantrasyonlarda bulunan kimyasal maddeleri ifade eder Bunları özellikle endişe verici kılan şey, doğal sistemlerde bozunmaya karşı dirençli olmaları ve zaman içinde birikmelerine yol açmalarıdır. Bu bileşikler, farmasötikler (örn., antibiyotikler ve antidepresanlar) ve kişisel bakım ürünleri (örn., kokular, güneş koruyucu maddeler ve antiseptikler), pestisitler, alev geciktiriciler, doğal ve steroid hormonlar, endüstriyel kimyasallar ve bunların metabolitleri gibi çeşitli

madde sınıflarını kapsamaktadır (Ozelcaglayan and Parker 2023; Rios-Miguel et al. 2023). Çevrede kalıcı olmalarını, geleneksel su arıtma süreçlerine direnç göstermelerini ve uzun menzilli taşıma kabiliyetleri sergilemelerini sağlayan farklı fizikokimyasal özelliklere sahiptirler (Götz et al. 2010; Ratola et al. 2012).

MK'lerin ekosistemlerdeki varlığı suda yaşayan organizmalar, yaban hayatı ve insanlar için potansiyel riskler doğurmaktadır. Düşük konsantrasyonlarda bile, üreme sorunları, endokrin sistemin bozulması, fiziksel deformasyonlar, hem kısa hem de uzun vadeli toksisite, balık türlerinde cinsiyet değişimi, bazı organizmalarda doğumsal anormallikler ve mikrobiyal popülasyonlarda antibiyotik direncinin gelişmesi dahil olmak üzere çok çeşitli zararlı etkilerle sıklıkla ilişkilendirilmiştir (Adewuyi 2020; Li et al. 2023; Richardson et al. 2007). Ayrıca, giderek artan araştırmalar MK'lere uzun süreli maruz kalma ile antibiyotik direnci gelişimi ve insan sağlığı üzerindeki diğer zararlı etkiler arasında olası bir bağlantı olduğunu göstermektedir (Xue et al. 2021). MK'ler sorununu ele almak için kaynak belirleme, izleme, risk değerlendirmesi ve etkili azaltma tekniklerini içeren kapsamlı bir yaklaşıma ihtiyaç vardır. Araştırmacılar ve çevre ajansları, sonuçlarını daha iyi anlamak ve etkili yönetim planları oluşturmak için bu kimyasalların çeşitli çevresel ortamlardaki akıbetini, geçişini ve davranışını araştırmaktadır. Bu kritik çevre sorununun ele alınması, MK'leri benzeri görülmemiş bir hassasiyet ve duyarlılıkla tespit edebilen, tanımlayabilen ve miktarını belirleyebilen gelişmiş analitik tekniklerin araştırılmasına ve geliştirilmesine yol açmıştır. Daha kapsamlı ve verimli izleme stratejilerine yönelik talebe yanıt olarak, MK'lere yönelik analitik tekniklerdeki teknolojik gelişmeler alanında önemli adımlar atılmıştır. Kütle spektrometrisi ile birleştirilmiş geleneksel gaz ve sıvı kromatografisinden, yüksek çözünürlüklü kütle spektrometrisi ve biyosensörlerin devrim niteliğindeki uygulamalarına kadar, analitik araçların kütüphaneleri, daha yüksek doğruluk ve verimlilik çağını kucaklamak için önemli ölçüde genişlemiştir (Chormey et al. 2018). Bu MK'lerin analiz edilmesi ve izlenmesi, etkilerinin anlaşılması ve uygun giderme stratejilerinin uygulanması için çok önemlidir. Klasik atıksu arıtma süreçleri genellikle bu kalıcı kirleticileri etkili bir şekilde gidermekte zorlanmakta, bu da bu çevresel sorunu daha fazla giderim verimliliğinde ve hassasiyetle ele alabilecek en son teknolojilere ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır. MK'lerin artan tehdidine karşılık olarak araştırmacılar ve bilim insanları, bu kirleticilerin başarılı bir şekilde giderilmesi ve bozunması için etkili yaklaşımlar sunan yenilikçi arıtma yöntemlerini önemle takip etmektedir. İleri oksidasyon prosesleri, biyofiltrasyon sistemleri, aktif karbon adsorpsiyonu ve membran bazlı

ayırma teknikleri gibi yenilikçi su arıtma süreçleri, bu bileşikleri atıksulardan etkili bir şekilde uzaklaştırmak için araştırılmaktadır (Khan et al. 2023; Nure and Nkambule 2023a; Souza et al. 2021).

Sonuç olarak, MK'ler kalıcılıkları, biyolojik birikim potansiyelleri ve ekosistemler üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle önemli bir çevre ve sağlık sorununu oluşturmaktadır. Bilim insanları, politika yapımcılar ve genel olarak toplum, bunların belirlenmesi, izlenmesi ve azaltılması için sürdürülebilir stratejiler geliştirmek üzere işbirliği içinde çalışmalıdır. MK'lerin yarattığı zorlukları anlayarak ve ele alarak, gelecek nesiller için daha temiz ve daha sağlıklı bir çevre için çaba gösterebiliriz.

2. Mikroirletici Kaynakları

MK'ler hem doğal hem de antropojenik olmak üzere çeşitli kaynaklardan gelebilir. İnsan faaliyetleri bu bileşiklerin çevreye yayılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Aşağıda MK'lerin bazı temel kaynakları yer almaktadır:

2.1 Endüstriyel Deşarjlar

Endüstriyel süreçler çok çeşitli kimyasalların, çözücülerin ve maddelerin kullanımını içerir. İmalat, işleme ve üretim sırasında bu maddeler atıksu deşarjları, atmosferik emisyonlar ve uygunsuz atık yönetimi yoluyla çevreye salınabilir. Bunlar arasında farmasötikler, kişisel bakım ürünleri, pestisitler ve üretim süreçlerinde kullanılan kimyasallar sayılabilir. Bu endüstriyel kimyasalların çoğu, çevrede kalıcı olma ve birikme potansiyeline sahip MK'lerdir. Zamanla, MK'ler çevrede birikerek suda yaşayan organizmalarda biyobirikime ve besin zincirinde potansiyel biyomagnifikasyona yol açabilir (Cunha et al. 2018; Mille et al. 2020). Bu durum sucul ekosistemler ve içlerindeki flora ve fauna için doğrudan bir tehdit oluşturmaktadır. Kirletilmiş su kaynakları içme suyu temini ve tarımsal sulama için kullanıldığından, bu kirleticiler insan besin zincirine girerek çok düşük konsantrasyonlarda maruziyetle bile endokrin bozulması, kanserojenlik ve nörotoksisite dahil olmak üzere çeşitli sağlık sorunlarıyla ilişkilendirilmiştir (Faria et al. 2020).

2.2 Tarımsal Uygulamalar

Yıllar içinde tarımsal uygulamalarda önemli gelişmeler yaşanmış, bu da mahsul veriminin artmasına ve milyonlarca insanın geçim kaynaklarının iyileşmesine neden olmuştur. Ancak, tarımsal faaliyetlerin bu şekilde yoğunlaşması çevre için istenmeyen sonuçlara da yol açmıştır. Bu sonuçlardan

biri, tarımsal uygulamalardan kaynaklanan önemli bir çevresel sorun olarak giderek daha fazla kabul gören MK'lerin ortaya çıkmasıdır. MK'ler; pestisitler, herbisitler, veteriner ilaçları, gübreler ve diğer zirai kimyasallar da dahil olmak üzere, modern tarım uygulamalarında verimliliği artırmak, mahsulleri ve çiftlik hayvanlarını zararlılardan ve hastalıklardan korumak için yaygın olarak kullanılan çok çeşitli kimyasal bileşikler (Goessens et al. 2022; Unuofin 2020). Bu kimyasallar haşereleri ve yabancı otları kontrol etmek için tahıllara uygulanır, ancak toprağa ve su kaynaklarına sızarak kirlenmeye yol açabilirler. Böcek ilaçları, mantar ilaçları ve herbisitler gibi pestisitler çevrede kalıcı olabilir ve su ekosistemleri, vahşi yaşam ve hatta insan sağlığı için risk oluşturabilir. Tarımsal gübreler, özellikle azot ve fosfor içerenler MK'lerin varlığına katkıda bulunabilir. Gübreler tarlalara uygulandığında, yağmur ile fazla besin maddeleri yüzey akışıyla taşınabilir veya yeraltı sularına sızabilir. Bu besinler plankton ve alg varlığının aşırı çoğalmasıyla ötrofikasyona neden olurlar. Ötrofikasyon çözünmüş oksijenin tükenmesine neden olmakla birlikte bitkiler ve diğer su canlıları öldüğünde su kütlelerindeki ölü bölgelerde alg toksinleri ve diğer MK'lerin ayrışma süreci sırasında ortaya çıkmasına neden olur (Vassalle et al. 2020). Hayvancılıkta oluşan büyük miktarlarda hayvan gübresi; hormonlar, antibiyotikler ve patojenler de dahil olmak üzere çok farklı yapıda ve miktarda MK'leri içerir. Gübre yanlış yönetildiğinde veya toprağa uygulandığında, bu maddeler çevreye karışabilir. Gübre uygulanan tarlalardan akan sular bu kirleticileri yakındaki su kaynaklarına taşıyarak yüzey suyu ve yeraltı su kaynaklarını kirletebilir (Ofrydopoulou et al. 2022).

2.3 Evsel Atıksular

Yerleşim alanlarından ve ticari kuruluşlardan kaynaklanan evsel atıksu, MK'ler de dahil olmak üzere karmaşık bir kirletici karışımı oluşturur. Günlük yaşamda, haneler ve işletmeler ilaçlardan kişisel bakım ürünlerine, temizlik maddelerinden çok değişik kimyasallara kadar çok çeşitli ürünleri kullanmaktadır ve bunların tümü evsel atıksuyun bileşimine katkıda bulunmaktadır. Temizlik ürünleri, kişisel bakım ürünleri, kozmetikler, boyalar ve diğer ev kimyasalları; kanalizasyona dökülebilen veya uygun olmayan bir şekilde bertaraf edilebilen çeşitli tehlikeli MK'leri içerebilir. Bu maddeler atıksu arıtma sistemlerine girebilir ve daha sonra çevreye veya doğrudan su kütlelerine deşarj edilebilir. Evsel atıksuların nehirlere, göllere ve okyanuslara boşaltılması, doğal ekosistemlere MK'leri sokar ve sonuçları şehir merkezlerinin yakın çevresinin çok ötesine uzanır. Balıklar ve omurgasızlar gibi suda yaşayan organizmalar bu

kirleticileri zaman vücutlarında biriktirebilir ve potansiyel olarak üremelerine, büyümeleri ve hayatta kalmaları üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Dahası, bu ekosistemlerin ekolojik dengesi bozulabilir, tüm besin zincirlerini etkileyebilir ve genel biyoçeşitliliği azaltabilir. Ekolojik etkilere ek olarak, evsel atıksu kaynaklı MK'ler insan sağlığı için potansiyel bir risk oluşturmaktadır. Arıtılmamış veya yetersiz arıtılmış atıksu içme suyu kaynaklarını kirlettiğinden, bireyler farkında olmadan eser miktarda zararlı maddeleri bünyelerine alabilir (Mathew and Saravanakumar 2022; Nure and Nkambule 2023b).

2.4 Düzenli Depolama Alanları ve Atık Bertarafı

Modern atık yönetim sistemlerinin temel bileşenleri olan düzenli depolama alanları ve atık bertaraf sahaları, istemeden de olsa çevreye MK'leri salmaktadır. İlaçlar, kişisel bakım ürünleri, pestisitler, alev geciktiriciler, ağır metaller ve bir dizi başka tehlikeli bileşiği içeren MK'ler düşük konsantrasyonlarda kalıcıdır ve önemli çevresel ve sağlık riskleri oluşturur. Katı atıklar düzenli depolama sahalarında depolandığında, doğal ayrışma süreçleri çeşitli MK'leri toprağa ve yeraltı sularına bırakır. Atığın içinden süzülen yağmur suyu bu zararlı bileşikler sızdırarak zehirli bir sızıntı suyu oluşturabilir ve bu sızıntı suyu yakındaki su kaynaklarına karışabilir veya akiferleri kirletebilir. Buna ek olarak, atıkların yakma tesislerinde tam olarak yanmaması, MK yüklü kül oluşturabilir ve bu da yeterli şekilde yönetilmediği takdirde daha fazla çevresel kirlenme riski oluşturur. Düzenli depolama sahası sızıntı suyu ve kül akışı, MK'lerin su ekosistemlerine yayılması için önemli yolları temsil etmektedir. Bu kirleticiler su kütlelerine karıştıktan sonra sedimanlarda birikebilir ve suda yaşayan organizmalarda biyolojik olarak birikerek yaygın ekolojik bozulmalara neden olabilir. Ayrıca, insanların bu maddelere dolaylı olarak maruz kalması, kirlenmiş balık ve su kaynaklarının tüketilmesi yoluyla gerçekleşir ve potansiyel sağlık etkileri konusunda endişeleri artırır (Kumar et al. 2023; Rahman, Sultan, and Alam 2023). Yenilikçi atık yönetimi uygulamaları, gelişmiş sızıntı suyu arıtma teknolojileri ve daha sıkı düzenlemeler, düzenli depolama sahalarından ve atık bertarafından kaynaklanan MK'lerin çevresel etkilerini en aza indirmek ve böylece daha temiz ve daha sürdürülebilir bir gelecek sağlamak için çok önemlidir.

3. Arıtmayı Etkileyen Fizikokimyasal Özellikler

MK'lerin fizikokimyasal özellikleri, bunların arıtılmasında ve çeşitli çevresel ortamlardan uzaklaştırılmasında çok önemli bir rol oynar. MK'lerin

arıtımını önemli ölçüde etkileyebilecek bazı temel fizikokimyasal özellikler aşağıda verilmiştir:

3.1 Moleküler Boyut ve Ağırlık

MK'nin boyutu ve ağırlığı, atıksu arıtma proseslerinde giderim verimlilikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Daha büyük MK'ler, artan çökeltme oranları nedeniyle sedimantasyon ve filtrasyon (membran ayırma) gibi fiziksel işlemlerle daha kolay giderilir (Zielińska et al. 2016). Buna karşılık, daha küçük MK'ler, daha büyük yüzey alanı/hacim oranları nedeniyle adsorpsiyon süreçleri yoluyla daha yüksek giderim verimliliği sergiler ve bu da onları katı yüzeylere adsorpsiyona daha uygun hale getirir (Loganathan et al. 2022). Aksine, MK'lerin ağırlığı arıtma sırasındaki akıbetlerini etkiler; daha ağır MK'lerin çökeltme işlemleri sırasında çökeltme olasılığı daha yüksektir ve bu da daha iyi giderimle sonuçlanır (Fernández-Márquez et al. 2022). Biyolojik sistemlerde moleküler ağırlık ve biyolojik bozunabilirlik arasında kesin bir ilişki olduğu söylenemez. Daha yüksek moleküler ağırlığa sahip bileşikler, bakterilerin belirli bir hedef bölgeyi parçalaması ve seçici olarak bozunmayı başlatması için daha fazla fırsat sunan daha fazla dala sahip olabilir (Tadkaew et al. 2011). Özetle, MK'lerin boyutu ve ağırlığı, giderim verimliliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Yine de çeşitli arıtma süreçleri ve çevresel koşullar da MK gideriminin genel etkinliğini etkilemektedir.

3.2 Hidrofobiklik

MK'lerin hidrofobikliği, çeşitli su arıtma prosesleri sırasında giderim verimliliklerini önemli ölçüde etkileyebilir. Hidrofobikliği belirleyen katsayıya oktanol-su bölme (K_{ow}) katsayısıdır. Bir bileşiğin oktanoldeki konsantrasyonunun denge durumundaki sudaki konsantrasyonuna oranını temsil eder. Daha yüksek bir K_{ow} değeri daha yüksek hidrofobikliği gösterir, yani MK'ler aktif karbon, partiküller, askıda katı maddeler veya organik madde gibi polar olmayan ortamlar için daha güçlü bir afiniteye sahiptir ve sulu fazda kalmak yerine yüzeylere adsorbe olma veya emilme eğilimindedir. Su arıtma proseslerinde, hidrofobik MK'ler hidrofobikliklere kıyasla daha düşük giderim verimliliği sergileyebilir. Bunun nedeni, koagülasyon-flokülasyon, kum filtrasyonu ve sedimantasyon gibi geleneksel su arıtma yöntemlerinin polar ve yüklü partiküllerin giderilmesinde daha etkili olmasıdır (Borrull et al. 2021). Hidrofobik MK'ler partiküller üzerine adsorbe olabilir veya su fazında kalabilir, bu da geleneksel yöntemlerle giderimlerini zorlaştırır. Aktif karbon adsorpsiyonu, membran filtrasyonu ve

ileri oksidasyon prosesleri gibi ileri arıtma prosesleri hidrofobik MK'lerin giderilmesinde daha etkilidir. MK'ler için kabul edilen hidrofobiklik aralığı (K_{ow} değerleri) ile ilgili olarak, belirli bileşiklere ve bunların çevresel akıbetine bağlı olarak değişebilir. Bununla birlikte, genel olarak, $K_{ow}=1.0-4.0$ arasında olan MK'ler orta derecede hidrofobik olarak kabul edilirken, $K_{ow}>4.0$ büyük olanlar yüksek derecede hidrofobik olarak kabul edilir. $K_{ow}<1.0$ olan bileşikler hidrofilik olarak kabul edilir ve su fazında kalmaları ve geleneksel giderim süreçlerine duyarlı olmaları daha olasıdır (Luo 2014; Nam et al. 2014).

3.3 Çözünürlük

MK'lerin sudaki çözünürlüğü, arıtma süreçleri sırasında dağılımlarını ve davranışlarını etkiler. Suya afinitesi olan hidrofilik MK'ler, çevresel matrislerden uzaklaştırılmalarını da etkileyebilir. Hidrofilik MK'ler, hidrojen bağları oluşturma ve polar çözücü ile etkileşime girme yetenekleri nedeniyle suda yüksek çözünürlüğe sahiptir. Bu yüksek çözünürlük, suda dağılımlarına ve çözümlerine yol açarak belirli arıtma işlemleriyle giderilmelerini daha zor hale getirebilir. Bir kirletici yüksek oranda çözünürse, etkili bir giderim elde etmek için gelişmiş oksidasyon veya membran biyoreaktörler gibi özel teknikler gerektirebilir (Cook et al. 2016; Jung et al. 2015; Surana et al. 2022). Hidrofilik MK'ler, hidrofobik olanlara kıyasla membran filtrasyon sistemlerinden daha kolay geçme eğilimindedir. Sudaki çözünürlükleri, membran gözeneklerinden kolayca geçmelerini sağlayarak tutma ve giderme verimliliğinin azalmasına neden olur. Bu nedenle, membran prosesleri hidrofilik MK'lerin giderilmesinde daha az etkili olabilir ve ek arıtma adımları veya filtrasyon sisteminde modifikasyonlar gerektirebilir (Comerton et al. 2007; Ojajuni, Saroj, and Cavalli 2015).

3.4 Uçuculuk

MK'lerin uçuculuk derecesi Henry Kanunu sabiti (k_H) kullanılarak değerlendirilebilir; burada $10^{-2}-10^{-3}$ mol/(m³.Pa) aralığındaki bir k_H değeri uçuculaşma için yüksek bir eğilimi gösterir. Başka bir deyişle, yüksek k_H değerlerine sahip MK'lerin sıvı fazdan gaz fazına buharlaşma olasılığı daha yüksektir, bu da yüksek uçuculuklarını ve atmosfere kaçma potansiyellerini gösterir (Lim et al. 2020). Çok uçucu MK'ler, klasik arıtma yöntemleri sırasında su fazından havaya kaçma eğilimindedir ve bu da önemli kayıplara ve azaltılmış giderme verimliliğine neden olur. Uçucu olmayan kirleticiler için etkili olan koagülasyon, sedimentasyon ve kum filtrasyonu gibi prosesler, suda

kalmadıkları veya yakalanmadan önce buharlaşmadıkları için uçucu bileşikleri yeterince gideremeyebilir. Bunu gidermek için aktif karbon adsorpsiyonu, membran filtrasyonu ve ileri oksidasyon süreçleri gibi ileri arıtma teknikleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler, uçucu MK'leri yakalamak veya bozmak için özel olarak tasarlanmıştır ve su kaynaklarından etkin bir şekilde uzaklaştırılmalarını sağlar (Besha et al. 2017; Bui et al. 2016). MK'lerin uçuculuğu, bu bileşikler su arıtma süreçleri sırasında atmosfere salınabileceğinden, potansiyel hava kirliliği ile ilgili endişeleri de beraberinde getirmekte ve çevre dostu ve etkili arıtma stratejilerine ihtiyaç vardır.

3.5 Kimyasal Kararlılık

MK'lerin kimyasal kararlılığı, çeşitli çevresel koşullar altında kimyasal reaksiyonlara veya dönüşümlere maruz kalmaya karşı doğal dirençlerini ifade eder. Atıksu ve çevresel kirlenme bağlamında, bu küçük kirleticilerin zaman içinde moleküler yapılarını ve özelliklerini koruma kabiliyetleriyle ilgilidir. Kimyasal stabilite, arıtma proseslerinin verimliliği ve etkinliği üzerindeki derin etkisi nedeniyle MK'lerin atıksudan uzaklaştırılmasında çok önemli bir husustur. Yüksek kimyasal kararlılık sergileyen MK'ler genellikle klasik arıtma yöntemleriyle parçalanmaya karşı daha dirençlidir, bu da potansiyel olarak eksik giderime ve kalıcı kirliliğe yol açar (Imparato et al. 2022; Rodríguez-Chueca et al. 2018). Öte yandan, daha az kararlı olan MK'leri uzaklaştırmaya daha elverişli veya daha az zararlı hale getiren kimyasal dönüşümler geçirme olasılığı daha yüksektir. Kimyasal kararlılık seviyesi uygun arıtma yöntemlerinin seçimine rehberlik eder. Örneğin, oldukça kararlı MK'ler, tatmin edici bir giderim elde etmek için aktif karbon adsorpsiyonu, gelişmiş oksidasyon süreçleri (AOP'ler) veya membran filtrasyonu gibi gelişmiş arıtma yöntemleri gerektirebilir. Buna karşılık, daha az kararlı MK'ler biyolojik arıtma veya çökeltme gibi daha basit süreçlerle etkili bir şekilde giderilebilir. Kimyasal stabilite aynı zamanda arıtma sırasında MK'lerin kimyasal reaksiyonlarından kaynaklanan değişmiş bileşikler olan dönüşüm ürünlerinin potansiyel oluşumunu da etkiler. Bu dönüşüm ürünleri, orijinal MK'lere kıyasla farklı özelliklere ve davranışlara sahip olabilir ve giderim, toksisite ve çevresel kalıcılık açısından ek zorluklar getirebilir (Neamtu et al. 2014). Kirleticileri parçalamaktan sorumlu mikroorganizmalar kararlı bileşikleri metabolize etmekte zorlanabilir, bu da biyolojik bozunma oranlarının düşmesine yol açarak biyolojik arıtma süreçlerinin verimliliğini etkileyebilir (Rodríguez-Chueca et al. 2018). Esasen, MK'lerin kimyasal kararlılığının anlaşılması, etkili giderim stratejilerinin uyarlanması, dönüşüm

ürünlerinin oluşumunun tahmin edilmesi ve bu kalıcı kirleticilerin çevresel etkilerinin azaltılması için esastır.

3.6 Kimyasal Yapı ve Fonksiyonel Gruplar

MK'lerde bulunan kimyasal yapı ve fonksiyonel gruplar, arıtma süreçlerindeki giderim verimlilikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bir MK molekülü içindeki atomların düzeni ve doğası, arıtma mekanizmaları ile etkileşimlerini belirler. Hidroksil veya karboksil grupları gibi polar fonksiyonel gruplara sahip MK'ler, hidrojen bağı nedeniyle suda daha fazla çözünürlük sergileme eğilimindedir ve bu da çöktürme veya filtreleme gibi işlemlerle giderilmelerini potansiyel olarak etkiler (Gul, Khaligh, and Julkapli 2021). Aromatik yapılar ve konjuge sistemler, MK'leri biyolojik bozunmaya karşı daha dirençli hale getirebilir ve etkili bir giderim sağlamak için AOP'ler gibi gelişmiş arıtma yöntemleri gerektirir (Ma et al. 2023). Ayrıca, iyon değiştirici reçineler gibi belirli arıtma ortamları için güçlü afinitelere sahip fonksiyonel gruplar, adsorpsiyon süreçleri yoluyla bunların giderilmesini kolaylaştırabilir. Dahası, fonksiyonel grupların varlığı arıtma sırasında dönüşüm ürünlerinin oluşumunu etkileyerek genel giderim senaryosunu değiştirebilir. Bu nedenle, MK'lerin kimyasal yapısını ve fonksiyonel gruplarını anlamak, optimum giderim verimliliği elde etmek için benzersiz özelliklerinden yararlanan özel arıtma stratejileri tasarlamak için çok önemlidir.

3.7 pH

Bir sistemin pH'si, çeşitli atıksu arıtma proseslerinde MK'lerin giderim verimliliğini derinden etkiler. pH, MK'lerin iyonlaşma durumunu doğrudan etkiler ve bu da çözünürlüklerini, yüklerini ve arıtma mekanizmalarıyla etkileşimlerini etkiler. Birçok MK, farklı pH seviyelerinde iyonize olabilen fonksiyonel gruplar içerir. Düşük pH değerlerinde, bu bileşikler daha fazla protonlanmış ve daha az iyonize olmuş olabilir, bu da potansiyel olarak aktif karbon gibi yüzeylere daha fazla adsorpsiyona veya çözünmeyen bileşikler olarak çökmeye yol açabilir. Tersine, daha yüksek pH değerlerinde, fonksiyonel grupların iyonizasyonu daha negatif yüklü türlerle sonuçlanabilir, bu da membran bazlı ayırma işlemlerinde davranışlarını etkileyebilir veya biyolojik işlemlerde bozunmaya karşı duyarlılıklarını etkileyebilir. Ayrıca pH, belirli kimyasalların türleşmesini ve reaktivitesini değiştirerek arıtma sırasında dönüşüm ürünlerinin oluşumunu etkileyebilir. Bu nedenle, sistemin pH'si MK'lerin giderim verimliliklerinin belirlenmesinde çok önemli bir rol oynar ve etkili arıtma stratejileri tasarlanırken

dikkate alınması gereken kritik bir parametre haline gelir. Bu fizikokimyasal özelliklerin anlaşılması, aktif karbon adsorpsiyonu, ileri oksidasyon, membran filtrasyonu ve biyolojik arıtma gibi süreçler de dahil olmak üzere MK'ler için uygun arıtma stratejilerinin tasarlanması için çok önemlidir. Mühendisler ve bilim insanları bu özellikleri göz önünde bulundurarak, MK'leri çeşitli çevresel matrislerden etkili bir şekilde uzaklaştırmak için arıtma teknolojilerini seçebilir ve optimize edebilirler (Khan et al. 2023; Mahouachi et al. 2020; Roman et al. 2020).

4. MK Giderim Yöntemleri

4.1 Klasik Atıksu Arıtma Yöntemleri

Atıksu arıtma tesislerinde yaygın olarak kullanılan bir biyolojik arıtma prosesi olan geleneksel aktif çamur sistemleri, bazı MK'lerin giderilmesine katkıda bulunma potansiyeline sahiptir. Öncelikle organik kirleticileri ve besin maddelerini (azot ve fosfor) gidermek üzere tasarlanmış olsa da aktif çamur sistemleri MK'ler için de bir dereceye kadar giderim sergileyebilir (Khan et al. 2020; Ranjit, Jhansi, and Reddy 2021). Aktif çamur sistemlerinde MK'lerin giderimi, arıtma süreci içerisinde çeşitli mekanizmalar ve süreçler aracılığıyla gerçekleşebilir. Aktif çamur sisteminde bulunan bakteri, mantar ve protozoa gibi organizmalar, MK'ler de dahil olmak üzere organik bileşiklerin parçalanması ve dönüştürülmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu mikroorganizmalar MK'leri bir karbon ve enerji kaynağı olarak kullanır ve onları daha basit ve daha az zararlı formlara dönüştürür (Kulišťáková 2023). Aktif çamur sistemlerinde MK'lerin giderim verimliliği çeşitli faktörlerden etkilenebilir. Giderimi etkileyen önemli faktörlerden biri MK'lerin fizikokimyasal özellikleridir. Suda çözünürlüğü yüksek, moleküler ağırlığı düşük ve biyolojik olarak parçalanabilirliği iyi olan MK'ler genellikle biyolojik prosesler yoluyla giderime daha uygundur. Öte yandan, yüksek oranda hidrofobik olan, karmaşık yapılara sahip olan veya inatçı olan MK'ler mikrobiyal bozunma için zorluk teşkil eder ve daha düşük giderim verimliliği sergileyebilir. Bir diğer önemli faktör de aktif çamur sisteminin işletme koşulları ve tasarım parametrelerinden Hidrolik alıkonma süresi (HRT), çamur yaşı süresi (SRT) ve besi maddesi mevcudiyeti (azot ve fosfor) gibi faktörler mikrobiyal aktiviteyi ve MK'lerin genel giderim verimliliğini etkileyebilir. Yeterli HRT ve SRT, mikroorganizmalar ve MK'ler arasında yeterli temas süresi sağlayarak bunların biyolojik olarak parçalanmasını kolaylaştırır (Das et al. 2023; Giannakis et al. 2016; Katibi et al. 2021). Ayrıca, aktif çamur sistemindeki mikrobiyal topluluğun bileşimi ve çeşitliliği MK'lerin giderimini

önemli ölçüde etkileyebilir. Farklı mikroorganizmalar, belirli bileşikler için değişen metabolik yeteneklere ve tercihlere sahiptir. Bu nedenle, çeşitli bir mikrobiyal topluluk, çok çeşitli MK'leri ayrıştırabilen mikroorganizmalarla karşılaşma olasılığını artırır. Sıcaklık, pH ve çözülmüş oksijen seviyeleri gibi çevresel faktörler de mikrobiyal aktiviteyi ve dolayısıyla kirleticilerin giderim verimliliğini etkiler (Kanaujiya et al. 2019). Aktif çamur sistemleri belirli MK'lerin kısmen giderilmesini sağlayabilirken, bunların etkinliği hedeflenen belirli bileşiklere bağlı olarak değişebilir. Bazı MK'ler sistemde bulunan mikroorganizmalar tarafından kolayca biyolojik olarak parçalanabilir ve bu da yüksek giderim verimliliği ile sonuçlanabilir. Ancak bazı farmasötikler, kişisel bakım ürünleri ve endüstriyel kimyasallar gibi bazı kalıcı MK'ler klasik aktif çamur sistemlerinde sınırlı giderim gösterebilir. Bu bileşikler genellikle karmaşık yapılara sahiptir ve mikrobiyal bozunmaya karşı dirençlidir. Ayrıca, atıksuda düşük konsantrasyonlarda bulunabilirler ve bu da giderimlerini zorlaştırır (Gonzalez-Gil, Carballa, and Lema 2017; Kanaujiya et al. 2019). İnatçı MK'lerin giderimini artırmak için ön arıtma adımları veya ileri teknolojilerin dahil edilmesi gibi sistem değişiklikleri uygulanabilir. Örneğin, aktif çamur sistemine toz aktif karbon (TAK) eklenmesi, kalıcı MK'lerin gideriminin artırılmasında umut vaat etmektedir. TAK yüksek yüzey alanına ve adsorplama kapasitesine sahiptir, bu da MK'lerin atıksudan etkili bir şekilde yakalamasını ve uzaklaştırmasını sağlar. Aktif çamur sistemine TAK eklendiğinde, MK'ler ve mikroorganizmalar arasındaki temas artar ve bozunmaları kolaylaşır. TAK ayrıca mikrobiyal bozunmaya dirençli olabilecek hidrofobik MK'leri adsorbe edebilir ve böylece genel giderim verimliliğini artırabilir (Zahmatkesh et al. 2022). Ayrıca, moleküler biyoloji tekniklerindeki gelişmeler ve yüksek verimli dizileme ve metagenomik gibi moleküler araçların uygulanması, aktif çamur sistemlerinde bulunan mikrobiyal topluluklar hakkında bilgi sağlamıştır. Bu mikrobiyal toplulukların işlevsel potansiyelinin ve çeşitliliğinin anlaşılması, hedef MK'leri parçalayabilen belirli mikroorganizmaların veya mikrobiyal konsorsiyumların belirlenmesine yardımcı olabilir. Bu bilgi, zorlu MK'lerin giderimini artırmak için besin takviyesi veya belirli mikrobiyal kültürlerin eklenmesi gibi sistem koşullarını optimize etmek için kullanılabilir (Edet et al. 2017; Feng et al. 2011; Pratush et al. 2020). Geleneksel aktif çamur sistemleri belirli MK'lerin giderilmesine katkıda bulunabilse de tam bir giderim sağlayamayabileceğini belirtmek önemlidir. MK'lerin varlığı ve potansiyel riskleri fark edilmeye devam ettikçe, daha gelişmiş ve özel arıtma yaklaşımlarının geliştirilmesi ve uygulanması ihtiyacı da artmaktadır. Sonuç olarak, klasik aktif

çamur sistemleri, ilgili spesifik bileşiklere bağlı olarak değişen verimliliklerle de olsa, atıksulardan MK'lerin giderilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Aktif çamur sistemlerinde MK'lerin giderimi, bileşik fizyokimyasal özellikleri, sistem tasarım parametreleri, mikrobiyal topluluk bileşimi ve işletme koşulları gibi faktörlerden etkilenmektedir. Kalıcı MK'lerin giderimini iyileştirmek için ek arıtma adımları, işletme parametrelerinde değişiklikler ve ileri teknolojilerin entegrasyonu gerekli olabilir. Anlayışımızı sürekli geliştirerek ve arıtma yaklaşımlarını optimize ederek, daha yüksek giderim verimliliği elde etmek ve su kaynakları ile çevre sağlığının korunmasını sağlamak için çaba gösterebiliriz (Monisha et al. 2023).

4.2 Mikrokirleticilerin Giderimi İçin Sürdürülebilir Teknolojiler

MK'lerin varlığının ve bunlarla ilişkili potansiyel risklerin giderek daha fazla kabul görmesi, bunların giderilmesi için sürdürülebilir teknolojilerin geliştirilmesine ve uygulanmasına yol açmıştır. Bu teknolojiler sadece MK'leri etkili bir şekilde ortadan kaldırmayı değil, aynı zamanda çevresel etkiyi en aza indirmeyi ve uzun vadeli sürdürülebilirliği teşvik etmeyi amaçlamaktadır. MK'lerin giderilmesine yönelik kayda değer sürdürülebilir teknolojilerden bazıları şunlardır:

4.2.1 İleri Oksidasyon Prosesleri (AOP'ler)

İleri oksidasyon prosesleri (AOP), fizyokimyasal ve biyolojik proseslerin arıtma yöntemleri arasında oluşan boşluğun üstesinden geldiği ve kirleticileri atıksulardan uzaklaştırdığı bilinen, yüksek reaktif türlerin özüne dayanan sulu faz oksidasyon yöntemleridir. AOP uygulamasının amacı, kirleticiyi tamamen mineralize etmek ve kirleticileri ortamdaki uzaklaştırmaktır. Heterojen ve homojen fotokataliz, ozonlama, Fenton süreci ve elektrokimyasal süreçler gibi AOP, toksik maddelerin oksidatif bozunmasını iyileştirmek için biyolojik süreçlerle entegre edilebilir. Bunlar çoğunlukla ilaç, tekstil, deri, kozmetik ve plastik endüstrilerinde uygulanmaktadır (Babu Ponnusami et al. 2023). AOP'ler ilk olarak 1980'lerde içme suyu arıtımında kullanılmaya başlanmış ve hidroksil radikalleri ($\bullet\text{OH}$) veya diğer yüksek reaktif türler ($\bullet\text{Cl}$, Cl_2 , HOCl , OCl^- ve ClO^- , $\bullet\text{SO}_4^-$, O_3 , H_2O_2 ve peroksosülfatlar vd.) kullanılarak organik bileşiklerin tam bir mineralizasyonuna veya toplam oksidasyonunu sağlayarak CO_2 , H_2O ve zararsız inorganik ürünlere dönüşmesine dayanan bir yöntem olarak bilinmektedir. (Dewil et al. 2017; Gorito et al. 2022; Kang et al. 2022). Oksidant oluşumu kimyasal reaksiyonlarla, katalizör kullanımıyla veya enerji

uygulamasıyla (UV ışığı, elektrik enerjisi ve ultrason gibi) olabilir. AOP'lerin, düzenli depolama sızıntı suyu arıtımı ve ikincil atıksu çıkış suyu arıtımı dahil olmak üzere çeşitli atıksu arıtma uygulamalarında MK'lerin giderilmesinde oldukça etkili olduğu gösterilmiştir (Mahtab et al. 2023; Rodrigues-Silva et al. 2023). Geleneksel evsel atıksu arıtma tesisleri, çevreye karışabilen bazı MK'leri her zaman tamamen gideremez. Bu nedenle, AOP'ler MK'lerin atıksudan uzaklaştırılması için oldukça rekabetçi bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. AOP'ler, MK'lerin atıksudan uzaklaştırılmasındaki uygulamaları için kapsamlı bir şekilde çalışılmıştır ve çalışılmaya da devam etmektedir. (Anawar and Ahmed 2019; Bozyiğit et al. 2022; Dai et al. 2023; Gorito et al. 2022; Sözüdoğru et al. 2023). AOP'lerin, farmasötikler ve kişisel bakım ürünleri gibi toksik organik kirleticilerin atıksudan uzaklaştırılmasında da etkili olduğu bulunmuştur (Sözüdoğru et al. 2023).

4.2.2 Membran Filtrasyonu

Membran filtrasyonu, atıksulardan MK'leri giderme kabiliyetiyle dikkat çeken sürdürülebilir bir teknolojidir. Mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve ters osmoz dahil olmak üzere, her biri farklı gözenek boyutlarına ve ayırma mekanizmalarına sahip farklı membran filtrasyon türleri vardır. Biyolojik arıtma ve membran filtrasyonunu birleştiren membran biyoreaktör (MBR) teknolojisi, yüksek verimliliği ve sürdürülebilirliği nedeniyle MK'leri atıksudan uzaklaştırmak için giderek daha fazla kullanılmaktadır (Sözüdoğru et al. 2022). Membran filtrasyonu, bakteriler, virüsler ve askıda katı maddeler de dahil olmak üzere çok çeşitli kirleticileri giderme kabiliyeti nedeniyle MK'lerin atıksudan uzaklaştırılması için umut verici bir teknolojidir (Klatt, Beyer, and Einfeldt 2022). Membran filtrasyon mekanizmaları boyut dışlama, elektrostatik itme ve adsorpsiyonu içerir (Roy, Mostafazadeh, et al. 2020). Boyut dışlama partikülleri boyutlarına göre ayırırken, elektrostatik itme partikülleri yüklerine göre ayırır. Adsorpsiyon, kirleticilerin membran yüzeyine veya membran gözenekleri içine bağlanmasını içerir. Membran filtrasyonu, farmasötikler, pestisitler ve endokrin bozucu bileşikler de dahil olmak üzere çeşitli MK'lerin giderilmesi için uygulanmıştır (Devaisy et al. 2022; Jeong, Chung, and Tong 2021). Ayrıca membran filtrasyonu, MK giderim verimliliğini artırmak için aktif karbon veya ozon gibi diğer teknolojilerle birlikte kullanılabilir (Peyrelasse, Jacob, and Lallement 2022). Yüksek giderim verimliliği, düşük enerji tüketimi ve kompakt tasarım dahil olmak üzere geleneksel arıtma yöntemlerine göre çeşitli avantajlar sunar. Bununla birlikte, MK'lerin giderilmesinde membran filtrasyonunun

verimliliği, membran kirlenmesi, besleme suyu kalitesi ve çalışma koşulları gibi çeşitli faktörlerden etkilenebilir (Roy, Khosravanipour Mostafazadeh, et al. 2020). MK giderimine yönelik membran filtrasyonunun performansını optimize etmek için yeni membran malzemeleri geliştirmek, çalışma koşullarını optimize etmek ve MK'lerin membran filtrasyon sistemlerindeki akıbetini ve taşınımını daha iyi anlamak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

4.2.3 Adsorpsiyon

Son zamanlarda, atıksulardaki MK'leri gidermek için adsorpsiyon yöntemlerinin kullanılması, geleneksel yaklaşımlara uygulanabilir bir alternatif olarak önem kazanmıştır. Basit tasarımı, kullanım kolaylığı, maliyet etkinliği ve kirleticilerin giderilmesinde yüksek verimliliğidir. Karbon bazlı maddeler, nanopartiküller, metal oksitler, karbon nanotüpler, hidroksitler, doğal zeolitler, iyon değişim reçineleri ve modifiye veya kompleks adsorbentler dahil olmak üzere çok çeşitli adsorbent malzemeler, atıksulardaki MK'lerin giderilmesindeki potansiyelleri açısından incelenmiştir. Karbon bazlı adsorbentler, özellikle TAK ve GAK, endüstrilerde, tıpta ve atıksu arıtımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu adsorbentler, geniş spesifik yüzey alanları, gözeneklilikleri, amorf yapıları ve hidrofobiklikleri nedeniyle çeşitli MK'lerin adsorbe etme konusunda güçlü kapasiteye sahip olduklarını göstermiştir. MK'lerin aktif karbon üzerindeki adsorpsiyon davranışı, adsorbentin özelliklerine (örn., aktif karbonun boyutu ve spesifik yüzey alanı), MK'nin özelliklerine (örn., hidrofobiklik ve hidrofilitiklik) ve çevresel faktörlere (örn., pH, tuzluluk ve çözünmüş organik madde) bağlı olabilir. Parçacık boyutu ve spesifik yüzey alanı, MK'lerin aktif karbon üzerindeki adsorpsiyonunu etkileyen önemli faktörler olarak kabul edilir. Normalde parçacık boyutu küçüldükçe aktif karbonların adsorpsiyon hızı, artan yüzey alanı/hacim oranına bağlı olarak artar. Yüksek K_{ow} değeri, suya olan düşük afinite nedeniyle adsorpsiyonu destekler. Hidrofobik MK'lerin adsorbent üzerindeki adsorpsiyonunun K_{ow} ile pozitif bir ilişkisi vardır. pH, tuzluluk ve doğal organik maddeler gibi çevresel faktörler, MK'lerin adsorbent üzerindeki adsorpsiyon davranışlarını etkiler. Bu faktörler, adsorbentin yüzey yükleri veya hidrofobiklik gibi yüzey özelliklerini veya MK'lerin çözünürlük veya ayrışma/iyonlaşma gibi fizikokimyasal özelliklerini değiştirebilir (Bhatt, Bhandari, and Bilal 2022; Yu, Mo, and Luukkonen 2021).

4.2.4 Biyofiltrasyon

Biyolojik filtreleme sistemleri olarak da bilinen biyofiltreler, MK'lerin çevreye salınımını azaltmak için umut verici bir yaklaşım sunmaktadır. Bu

inatçı kirleticileri yakalamak, bozmak veya dönüştürmek için doğal olarak oluşan mikroorganizmaların ve biyolojik süreçlerin gücünden yararlanırlar. Biyofiltrelerin atıksu arıtma stratejilerine entegrasyonu, geleneksel arıtma yöntemlerine büyük ölçüde dirençli olan MK'lerin sorununu ele almak için çok yönlü bir yaklaşım sunmaktadır. Biyofiltrasyon, kirlenmiş su veya havanın, kirleticileri bozan/parçalayan mikroorganizmalar tarafından kolonize edilen kompost veya aktif karbon gibi gözenekli, biyolojik olarak aktif bir malzeme yatağından geçirilmesi sürecini ifade eder (Çifçi and Meriç 2022; Srivastava and Majumder 2008). Damlatmalı filtreler, dolgulu yatak biyofiltreler ve akışkan yatak biyofiltreler dahil olmak üzere, her birinin kendine özgü avantajları ve dezavantajları olan farklı biyofiltrasyon sistemleri vardır. Biyofiltrasyon, farmasötikler, kişisel bakım ürünleri ve plastikleştiriciler gibi MK'lerin giderilmesi için etkili bir teknoloji olabilir. Biyofiltrelerde, mikroorganizmalar MK'leri ikincil substrat olarak ya da yardımcı substrat olarak uzaklaştırabilir. Biyofiltrasyon mekanizmaları fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçleri içerir. Fiziksel mekanizmalar arasında kirleticilerin filtre malzemesinin yüzeyinde hapsedildiği adsorpsiyon ve partiküllerin filtre malzemesinden geçerek uzaklaştırıldığı filtrasyon yer almaktadır. Kimyasal mekanizmalar, kirleticileri daha az zararlı bileşiklere dönüştüren oksidasyon, indirgeme ve hidrolizi içerir. Biyolojik mekanizmalar, kirleticileri enerji ve besin kaynağı olarak kullanan mikroorganizmalar tarafından kirleticilerin metabolize edilmesini içerir (Sinha and Mukherji 2022; Yogalakshmi, Sharma, and Mittal 2022). Bu mekanizmaların kombinasyonu, biyofiltrasyonu MK'lerin atıksudan uzaklaştırılması için etkili bir teknoloji haline getirmektedir. Atıksu arıtımında biyofiltrasyon, geleneksel arıtma yöntemleriyle etkili bir şekilde giderilemeyen MK'leri gidermek için üçüncül bir arıtma işlemi olarak kullanılabilir (Sinha and Mukherji 2022). Ayrıca biyofiltrasyon, MK giderim verimliliğini artırmak için ozonlama gibi diğer teknolojilerle birlikte kullanılabilir (Lee, Howe, and Thomson 2012; Piras et al. 2020). Literatürde biyofiltreler ile çeşitli MK'lerin giderimi üzerine çalışmalar yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir (Sinha and Mukherji 2022; Zearley and Summers 2012; Zuehlke, Duennbier, and Heberer 2007).

5. Mikrokirleticilerin Giderimi İçin Sürdürülebilir Teknolojilerin Karşılaştırılması

MK giderimi için sürdürülebilir teknolojilerin uygulanmasının maliyeti, arıtma tesisinin büyüklüğüne ve kullanılan özel teknolojiye bağlı olarak büyük ölçüde değişebilir. Bu nedenle, MK giderimi için sürdürülebilir teknolojilerin hem verimliliğini hem de maliyetini göz önünde bulundurmak

önemlidir. Sürdürülebilir teknolojiler geliştirilmekte ve MK giderimindeki verimlilikleri açısından karşılaştırılmaktadır. MK giderimi için sürdürülebilir teknolojileri karşılaştırırken, enerji ve kimyasal gereksinimleri, maliyet hususları, ölçeklenebilirlik ve ilgili operasyonel zorluklar gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır (Bhanvase et al. 2021; Patel et al. 2022). Aktif karbon adsorpsiyonu, sürdürülebilirlik açısından enerji ve kimyasal talepleri açısından genellikle avantajlıdır. Düşük enerji tüketimi ve sınırlı kimyasal ilave gereksinimleri, çevresel açıdan uygun bir seçenek sunar. Başlangıç maliyetleri orta seviyededir ve ölçeklenebilir bir teknoloji olarak farklı uygulama büyüklüklerine uyar. Ancak, bazı durumlarda kullanılmış aktif karbonun rejenerasyonu gerekebilir, bu da enerji ve işgücü maliyetlerini artırabilir ve atık yönetimi zorluklarına neden olabilir. Yine de genel olarak aktif karbon adsorpsiyonu, organik kirleticilerin etkili bir şekilde giderilmesi için sürdürülebilir bir ve çevre dostu bir çözüm olarak değerlendirilir (Varsha, Senthil Kumar, and Senthil Rathi 2022). İleri oksidasyon prosesleri, MK'leri gidermek için etkili bir yöntem sunsa da sürdürülebilirlik açısından bazı zorluklar içerir. Bu prosesler yüksek enerji tüketimi ve kimyasal taleplerine sahiptir, bu da maliyetleri artırır. Başlangıç maliyetleri genellikle yüksektir ve büyük tesislerde ölçeklendirilmesi zor olabilir. İşletme zorlukları arasında UV lambalarının bakımı, elektrik enerjisi ihtiyacının çok olması, kimyasal dozajın hassas kontrolü ve yan ürünlerin kontrolü yer almaktadır. İleri oksidasyon prosesleri, belirli uygulamalarda etkili olabilir, ancak enerji ve maliyet konularında dikkatli bir değerlendirme gerektirir ve uygulama gereksinimleri ve kaynaklar dikkate alınmalıdır (Garrido-Cardenas et al. 2020; Konstantinou, Antonopoulou, and Lambropoulou 2014; Kudlek 2018). Membran filtrasyon prosesleri, sürdürülebilirlik açısından çeşitli avantajlar sunar. Bu prosesler, düşük enerji ve kimyasal talepleri ile çevresel etkiyi minimize ederler. Özellikle enerji tüketimi, diğer bazı su arıtma yöntemlerine göre daha düşüktür, ancak yüksek basınç gerektiren sistemler, özellikle ters osmoz, daha fazla enerji tüketebilir. Kimyasal ilaveler, membranların tıkanmasını ve biyofilm oluşumunu önlemek için gerekebilir, ancak genellikle düşük seviyededir. Membran filtrasyonunun başlangıç maliyetleri yüksek olsa da uzun vadede işletme maliyetleri düşüktür ve sistem tasarımına ve verimliliğine bağlı olarak değişebilir. Bu teknoloji, küçük ev tipi sistemlerden büyük endüstriyel tesislere kadar ölçeklenebilir ve farklı uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılır. Ancak, işletme zorlukları, membranların temizliği, tıkanma önleme ve zamanında membran değişimini içerebilir, bu nedenle uygun bakım ve izleme önemlidir. Membran filtrasyonu,

su arıtma, atıksu arıtma, deniz suyu tuz giderme ve gıda işleme gibi birçok alanda etkili bir çevresel arıtma seçeneği olarak kabul edilir (Bhattacharya et al. 2021; Lopera, Ruiz, and Alonso 2019; Sadr and Saroj 2015; Wang et al. 2015). Biyofiltrasyon prosesleri, sürdürülebilir su ve atıksu arıtma uygulamalarında genellikle enerji ve kimyasal talepleri açısından avantajlıdır. Düşük enerji ihtiyacı ve sınırlı kimyasal kullanımı, çevresel etkiyi minimize eder. Başlangıç maliyetleri genellikle düşük olup, özellikle küçük ila orta ölçekli sistemler için uygun bir seçenektir. Ancak, büyük tesislerde ölçeklendirilmesi zor olabilir ve işletme maliyetleri zaman içinde artabilir, özellikle biyolojik organizmaların düzenli bakım ve yeniden üretme gereksinimleri göz önüne alındığında. Ayrıca, işletme zorlukları, sürekli izleme ve bakımın yanı sıra su kalitesi varyasyonları ve tıkanma gibi sorunları içerebilir. Sonuç olarak, biyofiltrasyon, çevre dostu ve sürdürülebilir su ve atıksu arıtma uygulamaları için uygun bir seçenek olarak kabul edilir, ancak uygulama gereksinimleri ve kaynaklar dikkatlice değerlendirilmelidir (Reid et al. 2023; Wu et al. 2023).

6. Mikrokirleticilerin Gideriminde Karşılaşılan Zorluklar ve Geleceğe Yönelik Öneriler

Atıksulardan MK'lerin giderilmesi, yeni MK'lerin ortaya çıkması ve klasik arıtma süreçleri sırasında mevcut olanların tam olarak giderilememesi nedeniyle giderek artan bir endişe kaynağıdır. MK'ler, sucul ekosistemler ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olabilecek farmasötikler, kişisel bakım ürünleri, endokrin bozucu maddeler ve pestisitler gibi bir dizi maddeyi içerir. MK'lerin risk değerlendirmesi ve yönetimindeki boşlukların kapatılması çevresel sürdürülebilirlik için çok önemlidir. Gelecekte yapılacak olan araştırmalar, MK'lerin atıksudan uzaklaştırılmasını iyileştirmek ve çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için yenilikçi ve sürdürülebilir teknolojiler geliştirmeye odaklanmalıdır. Sürdürülebilir teknolojilerin klasik arıtma süreçleriyle entegrasyonu, MK giderim verimliliğini artırmak ve atıksu arıtımının karbon ayak izini azaltmak için umut verici bir yaklaşımdır. Membran biyoreaktörler ve çeşitli ileri oksidasyon proseslerinin MK'leri atıksudan etkili bir şekilde uzaklaştırdığı gösterilmiştir. Doğal sulak alanların ve inşa edilmiş sulak alanların kullanımı gibi sürdürülebilir teknolojiler de MK giderimi için potansiyel göstermiştir. Bu teknolojilerin etkinliğini ve fizibilitesini daha büyük ölçekte değerlendirmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. MK giderimine yönelik sürdürülebilir teknolojilerin kamuoyu tarafından algılanması ve kabul görmesi, bu teknolojilerin başarılı bir şekilde uygulanması için dikkate

alınması gereken önemli bir faktördür. Vatandaşları karar alma süreçlerine dahil etmek ve çevrimiçi anketler yoluyla onlara danışmak, sürdürülebilir teknolojilerin klasik arıtma yöntemlerine etik olarak kabul edilen alternatifler olmasını sağlamaya yardımcı olabilir. Ayrıca, asgari düzeyde yan ürün üreten ve halk tarafından kabul gören sürdürülebilir teknolojilerin geliştirilmesi, atıksu arıtma süreçlerinin genel sürdürülebilirliğine katkıda bulunabilir. Bu nedenle, MK giderimi için sürdürülebilir teknolojiler geliştirirken ve uygularken kamu algısını ve kabulünü dikkate almak çok önemlidir.

7. Sonuç

Sonuç olarak, MK'ler atıksudan uzaklaştırılması sürdürülebilir atıksu arıtımı için çok önemlidir. Farmasötikler ve evsel/endüstriyel kimyasallar gibi MK'ler, son teknoloji ürünü kentsel atıksu arıtma tesislerinde tamamen ortadan kaldırılmamaktadır. Atıksu arıtma proseslerinde MK'lerin akıbetinin anlaşılması, etkili MK giderim stratejilerinin oluşturulması için gereklidir. Membran filtrasyon, ileri oksidasyon prosesleri ve biyofiltre bazlı teknolojiler gibi sürdürülebilir teknolojilerin kullanımı, atıksudan MK gideriminde kritik bir rol oynayabilir. Bu teknolojiler sadece atıksu arıtma tesisleri tarafından üretilen atıksuların kalitesini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda atıksu arıtmanın karbon ayak izini azaltmaya yardımcı olarak sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılmasına katkıda bulunur. MK'lerin atıksudan uzaklaştırılması, sucül ortamlara yönelik potansiyel tehditleri nedeniyle özellikle önemlidir. Aktif çamur gibi biyolojik arıtma proseslerinin MK'lerin atıksudan uzaklaştırılmasında etkili olduğu bulunmuştur. Ancak, sürdürülebilir teknolojiler MK giderimi için daha verimli ve çevre dostu alternatifler sunmaktadır.

Gelecekte, sürdürülebilir atıksu arıtma teknolojileri atıksudan MK gideriminde kritik bir rol oynamaya devam edecektir. Sürdürülebilir atıksu arıtımına yönelik artan talebi karşılamak için düşük karbonlu teknolojiler gibi MK giderimine yönelik yeni sürdürülebilir teknolojiler geliştirmeyi amaçlayan araştırma çabaları gerekli olacaktır. Ayrıca, çevrimiçi anketler aracılığıyla vatandaşların atıksu yönetimiyle ilgili kararlara katılımı, atıksu arıtma uygulamalarının sürdürülebilirliğinin geliştirilmesine yardımcı olabilir. Genel olarak, sürdürülebilir atıksu arıtımı için gelecekteki görünüm, MK giderme teknolojilerinde devam eden ilerlemeler ve karar verme süreçlerine artan toplum katılımı potansiyeli ile umut verici görünmektedir.

Kaynakça

Adewuyi, Adewale. 2020. "Chemically Modified Biosorbents and Their Role in the Removal of Emerging Pharmaceutical Waste in the Water System." *Water* 12(6):1551.

Anawar, Hossain Md, and Golam Ahmed. 2019. "Combined Electrochemical-Advanced Oxidation and Enzymatic Process for Treatment of Wastewater Containing Emerging Organic Contaminants." Pp. 277–307 in *Emerging and nanomaterial contaminants in wastewater*.

Babu Ponnusami, A., Sanyukta Sinha, Hridya Ashokan, Mathew V Paul, Sai Prashant Hariharan, J. Arun, K. P. Gopinath, Quynh Hoang Le, and Arivalagan Pugazhendhi. 2023. "Advanced Oxidation Process (AOP) Combined Biological Process for Wastewater Treatment: A Review on Advancements, Feasibility and Practicability of Combined Techniques." *Environmental Research* 237:116944.

Besha, Abreham Tesfaye, Abaynesh Yihdego Gebreyohannes, Ramato Ashu Tufa, Dawit Nega Bekele, Efrem Curcio, and Lidietta Giorno. 2017. "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(3):2395–2414.

Bhanvase, Bharat A., V. B. Pawade, Shirish H. Sonawane, and A. B. Pandit. 2021. "Nanomaterials for Wastewater Treatment: Concluding Remarks." Pp. 1125–57 in *Handbook of nanomaterials for wastewater treatment*.

Bhatt, Pankaj, Geeta Bhandari, and Muhammad Bilal. 2022. "Occurrence, Toxicity Impacts and Mitigation of Emerging Micropollutants in the Aquatic Environments: Recent Tendencies and Perspectives." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 10(3):107598.

Bhattacharya, Priyankari, Debarati Mukherjee, Nilanjana Deb, Snehasikta Swarnakar, and Sathi Banerjee. 2021. "Indigenously Developed CuO/TiO₂ Coated Ceramic Ultrafiltration Membrane for Removal of Emerging Contaminants like Phthalates and Parabens: Toxicity Evaluation in PA-1 Cell Line." *Materials Chemistry and Physics* 258:123920.

Borrull, Josep, Agustí Colom, Josepa Fabregas, Francesc Borrull, and Eva Pocurull. 2021. "Presence, Behaviour and Removal of Selected Organic Micropollutants through Drinking Water Treatment." *Chemosphere* 276:130023.

Bozyiğit, Gamze Dalgıç, Merve Fırat Ayyıldız, Dotse Selali Chormey, Nouha Bakaraki Turan, Fatih Kapukıran, Güleda Onkal Engin, and Sezgin Bakırdere. 2022. "Removal of Selected Pesticides, Alkylphenols, Hormones

and Bisphenol A from Domestic Wastewater by Electrooxidation Process.” *Water Science and Technology* 85(1):220–28.

Bui, X. T., T. P. T. Vo, H. H. Ngo, W. S. Guo, and T. T. Nguyen. 2016. “Multicriteria Assessment of Advanced Treatment Technologies for Micropollutants Removal at Large-Scale Applications.” *Science of The Total Environment* 563–564:1050–67.

Chormey, Dotse Selali, Merve Fırat, Çağdaş Büyükpınar, Fatih Erulaş, Okan Tarık Komesli, Fatma Turak, and Sezgin Bakırdere. 2018. “Accurate Determination of Pesticides, Hormones and Endocrine Disruptor Compounds in Complex Environmental Samples Using Matrix Dilution and Matrix Matching with Dispersive Liquid–Liquid Microextraction.” *Pure and Applied Chemistry* 90(11):1703–11.

Çiğçi, Deniz İzlen, and Süreyya Meriç. 2022. “A Critical Review on Biofiltration for Wastewater Treatment: Focus on Organic Micropollutants.” *An Innovative Role of Biofiltration in Wastewater Treatment Plants (WWTPs)* 369–88.

Comerton, Anna M., Robert C. Andrews, David M. Bagley, and Paul Yang. 2007. “Membrane Adsorption of Endocrine Disrupting Compounds and Pharmaceutically Active Compounds.” *Journal of Membrane Science* 303(1):267–77.

Cook, Monica M., Erin M. Symonds, Bert Gerber, Armando Hoare, Edward S. Van Vleet, and Mya Breitbart. 2016. “Removal of Six Estrogenic Endocrine-Disrupting Compounds (EDCs) from Municipal Wastewater Using Aluminum Electrocoagulation.” *Water* 8(4).

Cunha, S. C., L. Trabalón, Silke Jacobs, M. Castro, M. Fernandez-Tejedor, Kit Granby, Wim Verbeke, C. Kwadijk, F. Ferrari, and J. Robbens. 2018. “UV-Filters and Musk Fragrances in Seafood Commercialized in Europe Union: Occurrence, Risk and Exposure Assessment.” *Environmental Research* 161:399–408.

Dai, Jing, Ziqian Wang, Kewen Chen, Dahu Ding, Shengjiong Yang, and Tianming Cai. 2023. “Applying a Novel Advanced Oxidation Process of Biochar Activated Periodate for the Efficient Degradation of Bisphenol A: Two Nonradical Pathways.” *Chemical Engineering Journal* 453:139889.

Das, Pranjal P., Ankush D. Sontakke, Niladri Shekhar Samanta, and Mihir K. Purkait. 2023. “Emerging Contaminants in Wastewater: Eco-Toxicity and Sustainability Assessment.” Pp. 63–87 in *Industrial Wastewater Reuse: Applications, Prospects and Challenges*.

Devaisy, Sukanyah, Jaya Kandasamy, Tien Vinh Nguyen, Md Abu Hasan Johir, Harsha Ratnaweera, and Saravanamuthu Vigneswaran. 2022. "Comparison of Membrane-Based Treatment Methods for the Removal of Micro-Pollutants from Reclaimed Water." *Water* 14(22):3708.

Dewil, Raf, Dionissios Mantzavinos, Ioannis Poullos, and Manuel A. Rodrigo. 2017. "New Perspectives for Advanced Oxidation Processes." *Journal of Environmental Management* 195:93–99.

Edet, U., S. Antai, A. Brooks, A. Asitok, O. Enya, and F. Japhet. 2017. "An Overview of Cultural, Molecular and Metagenomic Techniques in Description of Microbial Diversity." *Journal of Advances in Microbiology* 7(2):1–19.

Faria, Clara V., Bárbara C. Ricci, Ana F. R. R. Silva, Miriam C. S. S. Amaral, and Fabiana V. Fonseca. 2020. "Removal of Micropollutants in Domestic Wastewater by Expanded Granular Sludge Bed Membrane Bioreactor." *Process Safety and Environmental Protection* 136:223–33.

Feng, Yujie, Yanling Yu, Xin Wang, Youpeng Qu, Dongmei Li, Weihua He, and Byung Hong Kim. 2011. "Degradation of Raw Corn Stover Powder (RCSP) by an Enriched Microbial Consortium and Its Community Structure." *Bioresource Technology* 102(2):742–47.

Fernández-Márquez, M., R. Pla, A. S. Oliveira, J. A. Baeza, L. Calvo, N. Alonso-Morales, and M. A. Gilarranz. 2022. "Improvement of Water Filtration Performance of Graphene Oxide Membranes on Nylon Support by UV-Assisted Reduction Treatment: Control of Molecular Weight Cut-Off." *Chemical Engineering Journal* 449:137807.

Garrido-Cardenas, José Antonio, Belén Esteban-García, Ana Agüera, José Antonio Sánchez-Pérez, and Francisco Manzano-Agugliaro. 2020. "Wastewater Treatment by Advanced Oxidation Process and Their Worldwide Research Trends." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17(1):170.

Giannakis, Stefanos, Margaux Voumard, Dominique Grandjean, Anoyo Magnet, Luiz Felipe De Alencastro, and César Pulgarin. 2016. "Micropollutant Degradation, Bacterial Inactivation and Regrowth Risk in Wastewater Effluents: Influence of the Secondary (Pre)Treatment on the Efficiency of Advanced Oxidation Processes." *Water Research* 102:505–15.

Goessens, Tess, Siegrid De Baere, Arne Deknock, Niels De Troyer, Robby Van Leeuwenberg, An Martel, Frank Pasmans, Peter Goethals, Luc Lens, and Pieter Spanoghe. 2022. "Agricultural Contaminants in Amphibian Breeding

Ponds: Occurrence, Risk and Correlation with Agricultural Land Use.” *Science of the Total Environment* 806:150661.

Gonzalez-Gil, Lorena, Marta Carballa, and Juan M. Lema. 2017. “Cometabolic Enzymatic Transformation of Organic Micropollutants under Methanogenic Conditions.” *Environmental Science & Technology* 51(5):2963–71.

Gorito, Ana M., Ana R. Lado Ribeiro, M. Fernando R. Pereira, C. Marisa R. Almeida, and Adrián M. T. Silva. 2022. “Advanced Oxidation Technologies and Constructed Wetlands in Aquaculture Farms: What Do We Know so Far about Micropollutant Removal?” *Environmental Research* 204:111955.

Götz, Christian W., Christian Stamm, Kathrin Fenner, Heinz Singer, Michael Schärer, and Juliane Hollender. 2010. “Targeting Aquatic Microcontaminants for Monitoring: Exposure Categorization and Application to the Swiss Situation.” *Environmental Science and Pollution Research* 17:341–54.

Gul, Ayesha, Nader Ghaffari Khaligh, and Nurhidayatullaili Muhd Julkapli. 2021. “Surface Modification of Carbon-Based Nanoadsorbents for the Advanced Wastewater Treatment.” *Journal of Molecular Structure* 1235:130148.

Imparato, Claudio, Aurelio Bifulco, Brigida Silvestri, and Giuseppe Vitiello. 2022. “Recent Advances in Endocrine Disrupting Compounds Degradation through Metal Oxide-Based Nanomaterials.” *Catalysts* 12(3):289.

Jeong, Nohyeong, Tai-heng Chung, and Tiezheng Tong. 2021. “Predicting Micropollutant Removal by Reverse Osmosis and Nanofiltration Membranes: Is Machine Learning Viable?” *Environmental Science & Technology* 55(16):11348–59.

Jung, Chanil, Ahjeong Son, Namguk Her, Kyung-Duk Zoh, Jaeweon Cho, and Yeomin Yoon. 2015. “Removal of Endocrine Disrupting Compounds, Pharmaceuticals, and Personal Care Products in Water Using Carbon Nanotubes: A Review.” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 27:1–11.

Kanaujiya, Dipak Kumar, Tanushree Paul, Arindam Sinharoy, and Kannan Pakshirajan. 2019. “Biological Treatment Processes for the Removal of Organic Micropollutants from Wastewater: A Review.” *Current Pollution Reports* 5:112–28.

Kang, Ziyang, Xigai Jia, Yuchen Zhang, Xiaoxuan Kang, Ming Ge, Dong Liu, Chongqing Wang, and Zhangxing He. 2022. “A Review on Application of Biochar in the Removal of Pharmaceutical Pollutants through Adsorption and Persulfate-Based AOPs.” *Sustainability* 14(16):10128.

Katibi, Kamil Kayode, Khairul Faezah Yunos, Hasfalina Che Man, Ahmad Zaharin Aris, Mohd Zuhair Mohd Nor, Rabaah Syahidah Azis, and Abba Mohammed Umar. 2021. "Contemporary Techniques for Remediating Endocrine-Disrupting Compounds in Various Water Sources: Advances in Treatment Methods and Their Limitations." *Polymers* 13(19):3229.

Khan, Afzal Husain, Nadeem A. Khan, Sirajuddin Ahmed, Aastha Dhingra, Chandra Pratap Singh, Saif Ullah Khan, Ali Akbar Mohammadi, Fazlollah Changani, Mahmood Yousefi, Shamsad Alam, Sergij Vambol, Viola Vambol, Anwar Khursheed, and Imran Ali. 2020. "Application of Advanced Oxidation Processes Followed by Different Treatment Technologies for Hospital Wastewater Treatment." *Journal of Cleaner Production* 269:122411.

Khan, Nadeem A., Simranjeet Singh, Eduardo Alberto López-Maldonado, N. Pavithra, Perla Fabiola Méndez-Herrera, Juan Ramón López-López, Umair Baig, Praveen C. Ramamurthy, Nabisab Mujawar Mubarak, Rama Rao Karri, and Isam H. Aljundi. 2023. "Emerging Membrane Technology and Hybrid Treatment Systems for the Removal of Micropollutants from Wastewater." *Desalination* 116873.

Klatt, Marten, Falk Beyer, and Jörn Einfeldt. 2022. "Hospital Wastewater Treatment and the Role of Membrane Filtration—Removal of Micropollutants and Pathogens: A Review." *Water Science & Technology* 86(9):2213–32.

Konstantinou, Ioannis K., Maria Antonopoulou, and Dimitra A. Lambropoulou. 2014. "Transformation Products of Emerging Contaminants Formed during Advanced Oxidation Processes." *Transformation Products of Emerging Contaminants in the Environment* 179–228.

Kudlek, Edyta. 2018. "Decomposition of Contaminants of Emerging Concern in Advanced Oxidation Processes." *Water* 10(7):955.

Kulišťáková, Alena. 2023. "Removal of Pharmaceutical Micropollutants from Real Wastewater Matrices by Means of Photochemical Advanced Oxidation Processes—A Review." *Journal of Water Process Engineering* 53:103727.

Kumar, Vinay, Neha Sharma, Mridul Umesh, Pritha Chakraborty, Komalpreet Kaur, Lucky Duhan, Suma Sarojini, B. Thazeem, Ritu Pasrija, Alisa S. Vangnai, and Subhrangsu Sundar Maitra. 2023. "Micropollutants Characteristics, Fate, and Sustainable Removal Technologies for Landfill Leachate: A Technical Perspective." *Journal of Water Process Engineering* 53:103649.

Lee, Carson O., Kerry J. Howe, and Bruce M. Thomson. 2012. "Ozone and Biofiltration as an Alternative to Reverse Osmosis for Removing PPCPs

and Micropollutants from Treated Wastewater.” *Water Research* 46(4):1005–14.

Li, Shi-Yao, Dan Wang, Yu Qiu, Li-Li Wang, and Liu-Pan Yang. 2023. “Application of Macrocyclic-Crosslinked Polymers as Adsorbents for the Removal of Organic Micropollutants from Water.” *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 40:100755.

Lim, Michael, Dominique Patureau, Marc Heran, Geoffroy Lesage, and Jeonghwan Kim. 2020. “Removal of Organic Micropollutants in Anaerobic Membrane Bioreactors in Wastewater Treatment: Critical Review.” *Environmental Science: Water Research & Technology* 6(5):1230–43.

Loganathan, Paripurnanda, Jaya Kandasamy, Shahzad Jamil, Harsha Ratnaweera, and Saravanamuthu Vigneswaran. 2022. “Ozonation/Adsorption Hybrid Treatment System for Improved Removal of Natural Organic Matter and Organic Micropollutants from Water – A Mini Review and Future Perspectives.” *Chemosphere* 296:133961.

Lopera, Agata Egea-Corbacho, Santiago Gutiérrez Ruiz, and José María Quiroga Alonso. 2019. “Removal of Emerging Contaminants from Wastewater Using Reverse Osmosis for Its Subsequent Reuse: Pilot Plant.” *Journal of Water Process Engineering* 29:100800.

Luo, Yunlong. 2014. “A Review on the Occurrence of Micropollutants in the Aquatic Environment and Their Fate and Removal during Wastewater Treatment.” 474:619–41.

Ma, Xiangmeng, Jiling Chen, Binbin Liu, Yufei Huang, Yonghe Tang, and Qun Wei. 2023. “Removal of *Microcystis Aeruginosa* and Microcystin-LR by UV/Fenton System: Characteristics and Degradation Pathways.” *Separation and Purification Technology* 306:122596.

Mahouachi, Lamia, Tushar Rastogi, Wolf-Ulrich Palm, Ibtissem Ghorbel-Abid, Dalila Ben Hassen Chehimi, and Klaus Kümmerer. 2020. “Natural Clay as a Sorbent to Remove Pharmaceutical Micropollutants from Wastewater.” *Chemosphere* 258:127213.

Mahtab, Mohd Salim, Izharul Haq Farooqi, Anwar Khursheed, and Mohd Azfar Shaida. 2023. “5 Advanced Oxidation Processes and Their Applications.” Pp. 85–101 in *Management of Wastewater and Sludge: New Approaches*. CRC Press.

Mathew, Annu T., and M. P. Saravanakumar. 2022. “Removal of Micropollutants through Bio-Based Materials as a Transition to Circular Bioeconomy: Treatment Processes Involved, Perspectives and Bottlenecks.” *Environmental Research* 214:114150.

Mille, Tiphaine, Laurent Soulier, Nathalie Caill-Milly, Pierre Cresson, Gilles Morandeau, and Mathilde Monperrus. 2020. "Differential Micropollutants Bioaccumulation in European Hake and Their Parasites *Anisakis* Sp." *Environmental Pollution* 265:115021.

Monisha, Ravichandran Swathy, Ragupathy Lakshmi Mani, Baskaran Sivaprakash, Natarajan Rajamohan, and Dai-Viet N. Vo. 2023. "Remediation and Toxicity of Endocrine Disruptors: A Review." *Environmental Chemistry Letters* 21(2):1117–39.

Nam, S. W., D. J. Choi, S. K. Kim, N. Her, and K. D. Zoh. 2014. "Adsorption Characteristics of Selected Hydrophilic and Hydrophobic Micropollutants in Water Using Activated Carbon." *J Hazard Mater* 270:144–52.

Neamțu, Mariana, Dominique Grandjean, Andrzej Sienkiewicz, Séverine Le Faucheur, Vera Slaveykova, Julia Janeth Velez Colmenares, César Pulgarín, and Luiz Felipe de Alencastro. 2014. "Degradation of Eight Relevant Micropollutants in Different Water Matrices by Neutral Photo-Fenton Process under UV254 and Simulated Solar Light Irradiation – A Comparative Study." *Applied Catalysis B: Environmental* 158–159:30–37.

Nure, Jemal Fito, and Thabo T. I. Nkambule. 2023a. "The Recent Advances in Adsorption and Membrane Separation and Their Hybrid Technologies for Micropollutants Removal from Wastewater." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 126:92–114.

Nure, Jemal Fito, and Thabo T. I. Nkambule. 2023b. "The Recent Advances in Adsorption and Membrane Separation and Their Hybrid Technologies for Micropollutants Removal from Wastewater." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 126:92–114.

Ofrydopoulou, Anna, Christina Nannou, Eleni Evgenidou, Aikaterini Christodoulou, and Dimitra Lambropoulou. 2022. "Assessment of a Wide Array of Organic Micropollutants of Emerging Concern in Wastewater Treatment Plants in Greece: Occurrence, Removals, Mass Loading and Potential Risks." *Science of The Total Environment* 802:149860.

Ojajuni, Oluwatosin, Devendra Saroj, and Gabriel Cavalli. 2015. "Removal of Organic Micropollutants Using Membrane-Assisted Processes: A Review of Recent Progress." *Environmental Technology Reviews* 4(1):17–37.

Ozelcaglayan, Ezgi Demircan, and Wayne J. Parker. 2023. "β-Cyclodextrin Functionalized Adsorbents for Removal of Organic Micropollutants from Water." *Chemosphere* 320:137964.

Patel, Manvendra, Abhishek Kumar Chaubey, Chanaka Navarathna, Todd E. Mlsna, Charles U. Pittman Jr, and Dinesh Mohan. 2022. "Sorption Removal

of Pharmaceuticals Using Sustainable Biochars.” Pp. 395–427 in Sustainable biochar for water and wastewater treatment.

Peyrelasse, Christine, Matthieu Jacob, and Audrey Lallement. 2022. “Multicriteria Comparison of Ozonation, Membrane Filtration, and Activated Carbon for the Treatment of Recalcitrant Organics in Industrial Effluent: A Conceptual Study.” *Environmental Processes* 9(1):9.

Piras, Francesco, O. Santoro, Tiziano Pastore, Iolanda Pio, Emiliano De Dominicis, Elisa Gritti, Roberto Caricato, Maria Giulia Lionetto, Giuseppe Mele, and Domenico Santoro. 2020. “Controlling Micropollutants in Tertiary Municipal Wastewater by O₃/H₂O₂, Granular Biofiltration and UV₂₅₄/H₂O₂ for Potable Reuse Applications.” *Chemosphere* 239:124635.

Pratush, Amit, Xueying Ye, Qi Yang, Jie Kan, Tao Peng, Hui Wang, Tongwang Huang, Guangming Xiong, and Zhong Hu. 2020. “Biotransformation Strategies for Steroid Estrogen and Androgen Pollution.” *Applied Microbiology and Biotechnology* 104(6):2385–2409.

Rahman, Md. Mostafizur, Maisha Binte Sultan, and Mahbub Alam. 2023. “Microplastics and Adsorbed Micropollutants as Emerging Contaminants in Landfill: A Mini Review.” *Current Opinion in Environmental Science & Health* 31:100420.

Ranjit, Pabbati, Vulise Jhansi, and Kondakindi Venkateswar Reddy. 2021. “Conventional Wastewater Treatment Processes.” *Advances in the Domain of Environmental Biotechnology: Microbiological Developments in Industries, Wastewater Treatment and Agriculture* 455–79.

Ratola, Nuno, Alessandra Cincinelli, Arminda Alves, and Athanasios Katsoyiannis. 2012. “Occurrence of Organic Microcontaminants in the Wastewater Treatment Process. A Mini Review.” *Journal of Hazardous Materials* 239–240:1–18.

Reid, Elliot, Thomas Igou, Yangying Zhao, John Crittenden, Ching-Hua Huang, Paul Westerhoff, Bruce Rittmann, Jörg E. Drewes, and Yongsheng Chen. 2023. “The Minus Approach Can Redefine the Standard of Practice of Drinking Water Treatment.” *Environmental Science & Technology* 57(18):7150–61.

Richardson, Susan D., Michael J. Plewa, Elizabeth D. Wagner, Rita Schoeny, and David M. DeMarini. 2007. “Occurrence, Genotoxicity, and Carcinogenicity of Regulated and Emerging Disinfection by-Products in Drinking Water: A Review and Roadmap for Research.” *Mutation Research/ Reviews in Mutation Research* 636(1):178–242.

Rios-Miguel, Ana B., Tamara J. H. M. van Bergen, Caterina Zillien, Ad M. J. Ragas, Rosalie van Zelm, Mike S. M. Jetten, A. Jan Hendriks, and Cornelia U. Welte. 2023. "Predicting and Improving the Microbial Removal of Organic Micropollutants during Wastewater Treatment: A Review." *Chemosphere* 333:138908.

Rodrigues-Silva, Fernando, Maria Clara V. M. Starling, Daniel Aparecido S. Rodrigues, and Camila C. Amorim. 2023. "Sustainable Treatment of Municipal Secondary Effluent from UASB Systems by Solar Photo-Fenton: CECs Removal and Toxicity Control." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 11(5):110675.

Rodríguez-Chueca, J., E. Laski, C. García-Cañibano, M. J. Martín de Vidales, Á. Encinas, B. Kuch, and J. Marugán. 2018. "Micropollutants Removal by Full-Scale UV-C/Sulfate Radical Based Advanced Oxidation Processes." *Science of The Total Environment* 630:1216–25.

Roman, Malgorzata, Leonardo Gutierrez, Laurens H. Van Dijk, Marjolein Vanoppen, Jan W. Post, Bas A. Wols, Emile R. Cornelissen, and Arne R. D. Verliefde. 2020. "Effect of PH on the Transport and Adsorption of Organic Micropollutants in Ion-Exchange Membranes in Electrodialysis-Based Desalination." *Separation and Purification Technology* 252:117487.

Roy, D., A. Khosravanipour Mostafazadeh, Patrick Drogui, and R. D. Tyagi. 2020. "Chapter 12 - Removal of Organic Micro-Pollutants by Membrane Filtration." Pp. 281–307 in, edited by S. Varjani, A. Pandey, R. D. Tyagi, H. H. Ngo, and C. B. T.-C. D. in B. and B. Larroche.

Roy, D., A. Khosravanipour Mostafazadeh, Patrick Drogui, and R. D. Tyagi. 2020. "Removal of Organic Micro-Pollutants by Membrane Filtration." Pp. 281–307 in *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*.

Sadr, Seyed M. K., and Devendra P. Saroj. 2015. "Membrane Technologies for Municipal Wastewater Treatment." Pp. 443–63 in *Advances in membrane technologies for water treatment*.

Sinha, Prashant, and Suparna Mukherji. 2022. "Biofiltration Process for Treatment of Water and Wastewater." *Transactions of the Indian National Academy of Engineering* 7(4):1069–91.

Souza, F. L., M. Zougagh, C. Sáez, P. Cañizares, A. Ríos, and M. A. Rodrigo. 2021. "Electrochemically-Based Hybrid Oxidative Technologies for the Treatment of Micropollutants in Drinking Water." *Chemical Engineering Journal* 414:128531.

Sözüdoğru, Onur, Elif Seda Koçoğlu, Alper Erdem Yılmaz, Sezgin Bakirdere, and Okan Tarık Komesli. 2022. "Performance Evaluation of A/O Membrane Bioreactor System in the Effective Removal of Endocrine-Disrupting Chemicals: The Effect of SRT and Flux Rate." *Water, Air, & Soil Pollution* 233(4):119.

Sözüdoğru, Onur, Elif Seda Koçoğlu, Alper Erdem Yılmaz, Sezgin Bakirdere, and Okan Tarık Komesli. 2023. "The Experimental Design Approach to Removal of Endocrine Disrupting Compounds from Domestic Wastewater by Electrooxidation Process." *Journal of Applied Electrochemistry* 53(10):1971–90.

Srivastava, N. K., and C. B. Majumder. 2008. "Novel Biofiltration Methods for the Treatment of Heavy Metals from Industrial Wastewater." *Journal of Hazardous Materials* 151(1):1–8.

Surana, Deepti, Juhi Gupta, Satyawati Sharma, Sunil Kumar, and Pooja Ghosh. 2022. "A Review on Advances in Removal of Endocrine Disrupting Compounds from Aquatic Matrices: Future Perspectives on Utilization of Agri-Waste Based Adsorbents." *Science of The Total Environment* 826:154129.

Tadkaew, Nichanan, Faisal I. Hai, James A. McDonald, Stuart J. Khan, and Long D. Nghiem. 2011. "Removal of Trace Organics by MBR Treatment: The Role of Molecular Properties." *Water Research* 45(8):2439–51.

Unuofin, John O. 2020. "Garbage in Garbage out: The Contribution of Our Industrial Advancement to Wastewater Degeneration." *Environmental Science and Pollution Research* 27(18):22319–35.

Varsha, M., P. Senthil Kumar, and B. Senthil Rathi. 2022. "A Review on Recent Trends in the Removal of Emerging Contaminants from Aquatic Environment Using Low-Cost Adsorbents." *Chemosphere* 287:132270.

Vassalle, Lucas, Adrià Sunyer-Caldú, Enrica Uggetti, Rubén Díez-Montero, M. Silvia Díaz-Cruz, Joan García, and M. Jesús García-Galán. 2020. "Bioremediation of Emerging Micropollutants in Irrigation Water. The Alternative of Microalgae-Based Treatments." *Journal of Environmental Management* 274:111081.

Wang, Yifei, Jiaxin Zhu, Haiou Huang, and Hyun-Hee Cho. 2015. "Carbon Nanotube Composite Membranes for Microfiltration of Pharmaceuticals and Personal Care Products: Capabilities and Potential Mechanisms." *Journal of Membrane Science* 479:165–74.

Wu, Xin, Yan Lin, Yongyi Wang, Shaohua Wu, and Chunping Yang. 2023. "Volatile Organic Compound Removal via Biofiltration: Influences, Challenges, and Strategies." *Chemical Engineering Journal* 471:144420.

Xue, Panqi, Yameng Zhao, Danyang Zhao, Meina Chi, Yuanyuan Yin, Yanan Xuan, and Xia Wang. 2021. "Mutagenicity, Health Risk, and Disease Burden of Exposure to Organic Micropollutants in Water from a Drinking Water Treatment Plant in the Yangtze River Delta, China." *Ecotoxicology and Environmental Safety* 221:112421.

Yogalakshmi, K. N., Avimanu Sharma, and Sunil Mittal. 2022. "Biofiltration in Wastewater Treatment Plants: An Overview." *An Innovative Role of Biofiltration in Wastewater Treatment Plants (WWTPs)* 171–88.

Yu, Yangmei, Wing Yin Mo, and Tero Luukkonen. 2021. "Adsorption Behaviour and Interaction of Organic Micropollutants with Nano and Microplastics – A Review." *Science of The Total Environment* 797:149140.

Zahmatkesh, Sasan, Awais Bokhari, Melika Karimian, Musaddak Maher Abdul Zahra, Mika Sillanpää, Hitesh Panchal, Ali Jawad Alrubaie, and Yousof Rezakhani. 2022. "A Comprehensive Review of Various Approaches for Treatment of Tertiary Wastewater with Emerging Contaminants: What Do We Know?" *Environmental Monitoring and Assessment* 194(12):884.

Zearley, Thomas L., and R. Scott Summers. 2012. "Removal of Trace Organic Micropollutants by Drinking Water Biological Filters." *Environmental Science & Technology* 46(17):9412–19.

Zielińska, M., K. Bułkowska, A. Cydzik-Kwiatkowska, K. Bernat, and I. Wojnowska-Baryła. 2016. "Removal of Bisphenol A (BPA) from Biologically Treated Wastewater by Microfiltration and Nanofiltration." *International Journal of Environmental Science and Technology* 13(9):2239–48.

Zuehlke, Sebastian, Uwe Duennbier, and Thomas Heberer. 2007. "Investigation of the Behavior and Metabolism of Pharmaceutical Residues during Purification of Contaminated Ground Water Used for Drinking Water Supply." *Chemosphere* 69(11):1673–80.

BÖLÜM V

YAKIT PİLLERİ

Fuel Cells

Şevval TUNA¹ & Nisa Nur ATAK² & Battal DOĞAN³ & Zeynep ERDEM⁴

¹*Şevval TUNA, Araştırmacı, Gazi Üniversitesi,
Enerji Sistemleri Mühendisliği,
Ankara, Türkiye
E-mail: sevvaltuna726@gmail.com,
ORCID: 0009-0002-2090-1853*

²*Nisa Nur ATAK, Araştırmacı, Gazi Üniversitesi,
Enerji Sistemleri Mühendisliği,
Ankara, Türkiye
E-mail: nisaatak28@gmail.com,
ORCID: 0009-0002-0523-6146*

³*Battal DOĞAN, Doç. Dr., Gazi Üniversitesi,
Enerji Sistemleri Mühendisliği,
Ankara, Türkiye
E-mail: bttldgn@gmail.com,
ORCID: 0000-0001-5542-4853*

⁴*Zeynep ERDEM, Araştırmacı, Gazi Üniversitesi,
Enerji Sistemleri Mühendisliği,
Ankara, Türkiye
e-mail: karalamaci78@gmail.com,
ORCID: 0009-0004-8401-2638*

1. Giriş

Yakıt Hücreleri temiz ve sürdürülebilir enerji üretimi için teknolojik harikalardır. Günümüzde enerji üretimi ve kullanımı, çevresel etkileri ve sürdürülebilirlik endişeleri nedeniyle büyük bir dönüşüm geçirmektedir. Bu dönüşümün önde gelen aktörlerinden biri de yakıt hücreleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Yakıt hücreleri, kimyasal reaksiyonlar yoluyla doğrudan elektrik enerjisi üretme yeteneğine sahip olan, çevre dostu ve verimli enerji kaynaklarıdır. Yakıt hücreleri temel çalışma prensiplerinin basit olması ve potansiyel faydaları yüzünden günümüzde çokça tercih edilir. Yakıt hücreleri temiz, verimli ve çeşitli uygulama alanlarına sahip bir enerji üretim teknolojisi olarak gelecekte daha geniş bir rol oynamaya adaydır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, yakıt hücrelerinin maliyeti düşmeye devam edebilir ve daha yaygın olarak benimsenerek sürdürülebilir enerji dönüşümünü destekleyebilirler.

Yakıt pilleri, enerji sistemleri arasında en basit ve kompakt çalışma sistemine sahip olanlardan biridir. Bu sistemde reaksiyona giren hidrojen ve oksijen gazları kimyasal bir reaksiyonla doğrudan elektrik akımı üretirler. Bu reaksiyonda ürün olarak saf su ve düşük seviyede bir ısı açığa çıkar. Elde edilen ısı, yakıt pili yüzeyinin ısını oluşturur. Bu çalışma prensibi sayesinde yakıt pilleri çevre dostu olarak kabul edilir ve içerisinde hareketli parçalar olmaması nedeniyle sadece gaz girişleri ve çıkışları bulunduğu sessiz ve güvenilirdir. Her bir yakıt pili hücresinin gerilimi 0,9- 1 volt arasında değiştiği için daha fazla enerji üretmek amacıyla birden fazla yakıt pili hücresi kullanmak gerekmektedir. Bu yüzden yakıt pili hücreleri seri veya paralel bağlanabilir. Bu tür bir yapılandırma literatürde genellikle “yığın yakıt pili” olarak adlandırılmaktadır (Şenaktaş, 2005).

Demir'in çalışmasında, enerjinin elde edilme yöntemlerinden maliyeti az ve verimi yüksek olan yakıt pilleri teknolojisi olduğu vurgulanmaktadır. Bu nedenle, dünya genelinde yakıt pillerinin değeri her geçen gün biraz daha artmaktadır. Temelde, yakıt pilleri elektrik enerjisi üretmek için kimyasal enerjiyi kullanan cihazlar olarak kabul edilir. Hidrojen gazının yakıt hücrelerindeki dönüşümü sonucu meydana gelen ürünler ise sadece ısı ve su ile sınırlıdır. Bu çevreci özellikleri sayesinde, yakıt pilleri teknolojisi çevre dostu bir yaklaşım sunar ve ayrıca hareketli parçalar içermediği için sessiz ve güvenilir bir enerji kaynağı olarak öne çıkar (Demir, 2019).

Karaoğlan ve Kuralay tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yakıt pili sistemlerinin diğer enerji sistemlerine göre üstün bir verimliliğe sahip olduğu

bulgusu ortaya konmuştur. Bu çalışmaya göre, yakıt pili sistemleri toplam verimlilik açısından %80 gibi yüksek bir orana, elektriksel verimlilik açısından ise %40-60 aralığına ulaşabilmektedirler. Özellikle Proton Değiştirme Membranı (PEM) yakıt pillerinin oldukça fazla avantajı vardır. Bu avantajların arasında düşük çalışma sıcaklığı aralığına sahip olması (20°C ila 100°C), güç yoğunluğunun fazla olması ve hızlı tepkime süreleri gibi avantajlar sunması sayılabilir. Bunun yanı sıra, PEM yakıt pillerinin sessiz çalışması, gürültü problemini ortadan kaldırması ve bu sayede teknolojiye olan ilgiyi artırması da vurgulanmaktadır (Karaoğlan ve Kuralay, 2014).

Kahraman ve diğ. çalışması, polimer membranlı yakıt pillerinin (PEM) yakın gelecekte otomotiv, taşınabilir uygulamalar ve bağımsız güç üretimi alanlarında en umut verici elektrik üretim cihazlarından biri olarak değerlendirildiğini göstermektedir. Yakıt pili ve ilgili sistemler üzerine yapılan araştırmalar son yıllarda hızla artmaktadır. Ancak maliyet açısından ele alındığında, yakıt pillerinin ticarileştirilmesi ve yaygın şekilde kullanılması için oldukça yüksek maliyetli olduğu görölmektedir (Kahraman, Çevik ve Coşman, 2014).

Askaripour PEM yakıt pili ile ilgili çalışmasında, yakıt pili teknolojisinin hızlı ve kolay devreye alınabilir olması, uygun güç-ağırlık oranına sahip olması, yüksek verimlilik sağlaması ve düşük gürültü seviyeleri gibi avantajları nedeniyle otomotiv ve taşınabilir uygulamalarda alternatif bir güç kaynağı olarak PEM yakıt hücrelerine büyük bir ilgi gösterildiğini belirtmiştir (Askaripour, 2019).

Chammam ve diğ. çalışmasına göre, yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtlara göre birkaç avantaja sahiptir. Bu kaynaklar bol miktarda bulunur, temizdir ve sera gazı emisyonu üretmezler. Ayrıca, fosil yakıtlara göre çevresel etkileri daha düşüktür. Ancak, yenilenebilir enerji kaynaklarının dezavantajları da vardır. Bu kaynaklar düzensizdir ve hava koşullarına bağlıdır. Bu nedenle, bu dezavantajları aşmak için enerji depolama teknolojileri veya yeşil hidrojen üretimi gibi çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Hidrojen üretiminin bir enerji kaynağı olarak geliştirilmesiyle, yakıt hücresi teknolojisi yüksek verimlilik ve sıfır emisyonlu bir enerji üretimi çözümü olarak küresel ilgi çekmektedir. Aynı anda ısıtma, elektrik, soğutma ve tatlı su gibi farklı ürünleri üretmek için çoklu jenerasyon sistemleri kullanılır. Bu bağlamda, bir yakıt hücresine dayalı çoklu jenerasyon sistemi, farklı enerji sistemlerini birleştirerek hidrojen kullanarak farklı enerji türleri ve tatlı su üretme kapasitesine sahip

bütünleşmiş bir sistem olarak tanımlanabilir (Chammam, Tripathi, Alvarez, Alsaab, Romero-Parra, Mayet ve Abdullaev, 2023).

Çalışmalarında, Wang ve diğ. enerji krizi ve çevresel kirlilik gibi acil bir endişeye odaklanarak, yenilenebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesinin önemini vurgulamaktadırlar. Bu bağlamda, PEM yakıt pilleri, sağladıkları yüksek enerji verimliliği, büyük güç yoğunluğu ve çevre dostu yapısıyla, sabit ve taşıt uygulamaları için önemli bir alternatif enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Yakıt hücrelerinin etkili su yönetimi, optimal performans için son derece önemlidir. Yakıt hücrelerinin içinde uygun bir sıvı su içeriğinin korunması, aşırı suyun hücre içinde su taşma sorununa yol açabileceği ve yüksek akım yoğunlukları altında kütle transferini bozabileceği, aksine yetersiz su içeriğinin ise iyonmer membranın kurumasına yol açabileceği unutulmamalıdır (Wang, Zhang, Gao, He, Zhao ve Wang, 2022).

Bayat ve Özalp'ın çalışmasına göre, Proton Değişim Membranı Yakıt Hücreleri (PEMFC'ler), reaktif maddeleri katalizörün varlığında elektrik enerjisi, ısı ve suya dönüştüren gelecek nesil güç kaynaklarıdır. Bu işlem, kimyasal enerjiyi doğrudan ve sürekli olarak elektrik enerjisine dönüştürerek gerçekleşir. Bu tür yakıt hücresi, ilk kez 1959 yılında General Electric tarafından NASA'nın ilk insanlı uzay aracında kullanılmak üzere keşfedilmiştir (Bayat ve Özalp, 2023).

Zang ve diğ. çalışmasına göre, proton değişim membranı (PEM) yakıt hücreleri, otomobillerde içten yanmalı motorun yerine umut verici bir alternatif olarak kullanılmak üzere tasarlanmışlardır (Zang, Hao ve Zhu, 2023).

Shateri ve Torabi çalışmasına göre, fosil yakıtların yüksek tüketiminden kaynaklanan mevcut enerji durumunun üstesinden gelmek, alternatif enerji kaynaklarına doğru ciddi bir kararlılığı gerektirir. Üçten fazla on yıldır, hidrojen ve yakıt hücresi teknolojileri, küresel olarak sürdürülebilir ve temiz bir enerji sistemi oluşturmada alternatif bir çözüm haline gelmiştir ve maliyet ve performansta yaşanan son gelişmeler, ekonomik açıdan haklı bir sebep olarak onları daha cazip hale getirmiştir. Hidrojen yakıt hücreleri, hidrojeni ve oksijeni doğrudan elektriğe dönüştüren elektrokimyasal dönüştürücülerdir. Bu elektrokimyasal reaksiyon, CO₂ emisyonu olmadan yanmasız bir işlem yoluyla yüksek verimli elektrik enerjisi üretimine olanak tanır. Bu nedenle, birçok ülke ulaşım ve sabit/taşınabilir güç üretimi uygulamaları için hidrojen yakıt hücresi teknolojilerini geliştirmektedir (Shateri ve Torabi, 2023).

Leader ve diğ. çalışmasına göre, hidrojen yakıt hücreleri ulaşım, sabit güç ve taşınabilir güç gibi ekonominin birçok sektöründe uygulama bulmuşlardır.

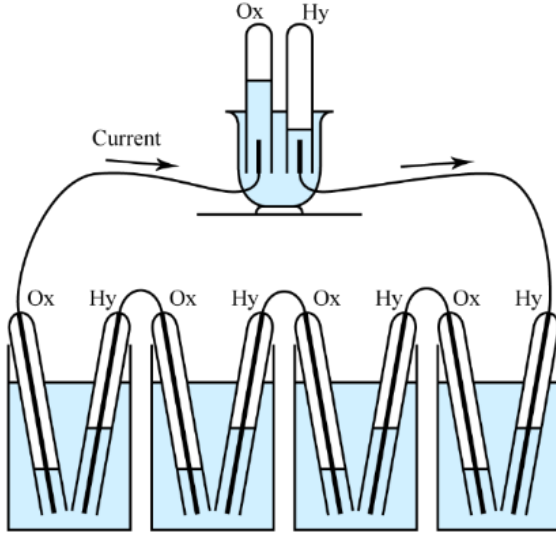
Proton değişim membranı (PEM) yakıt hücreleri, günümüzde var olan birçok sistemden birini temsil eder. Düşük sıcaklıkta proton değişim membranı (LT-PEM) yakıt hücreleri, genellikle 80 ila 100 °C aralığında, suyun kaynama noktasının altında çalışırlar ve bu durum esas olarak katı asit membran malzemesinin işletme gereksinimleri tarafından belirlenir (Leader, Yue, Walluk ve Trabold, 2022).

Shimpalee ve ark., membran ve sülfonatlı aromatik hidrokarbon membranın PEM yakıt hücresindeki etkilerini incelemiştir. Yüksek bağlı nemlerde hidrokarbon membran, Nafion membrana göre daha az su taşıyarak daha iyi bir performans sergilemiştir. Lakin protonun daha iyi iletilmesi için membranın daha fazla hidrasyona ihtiyaç duyduğu düşük bağlı nemlerde Nafion membran daha iyi bir performans sergilemiştir (Shimpalee, Lilavivat, Xu, Rowlett, Mittelsteadt ve Zee, 2018).

2. Yakıt Pillerinin Genel Özellikleri

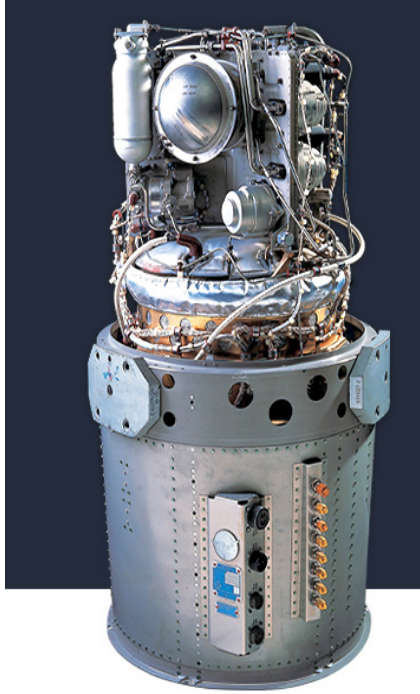
2.1. Yakıt Hücresinin Tarihçesi

Yakıt hücrelerinin tarihi, on dokuzuncu yüzyılın başlarında başlamıştır. 1802 yılında Humphry Davy tarafından geliştirilen basit bir yakıt hücresi, zayıf bir elektrik gücü üretiyordu. Bu cihaz, anodik bölmede karbon yakıtı ve katodik bölmede sulu nitrik asit reaktanı kullanılarak oluşturulmuştu. Ancak, Davy gözlemlerini kaydetmedi ve bilimsel topluluk bu keşfi dikkate almadı. 1800 yılında William Nicholson ve Johann Ritter, suyun elektrikle hidrojen ve oksijene ayrıştırılabileceğini bağımsız olarak keşfettiler. Yakıt hücresi konsepti, suyun elektrolizini tersine çevirerek H₂ ve O₂'nin tepkimesiyle su üretmek için elektrik enerjisi üretme fikrine dayanıyordu. Bu konsept, Christian Friedrich Schönbein tarafından 1838 yılında rapor edildi. Schönbein'in teorilerini kanıtlayan bir gelişme olarak, Sir William Robert Grove gazlı voltaik bir pil inşa etti. Grove'un yakıt hücresi keşfi, 1839 yılında Paris'teki Academie des Sciences'a ve aynı yıl içinde İlerlemenin İngiliz Birliği'ne rapor edildi ve Michael Faraday'ın ilgisini çekti. Bu erken deneyler, H₂-O₂ gaz hücrelerinden katı maddelere kadar genişletildi. 1896 yılında William W. Jacques, kömürden doğrudan elektrik üreten bir pil geliştirdi. Ancak, ilk yakıt hücresi prototipleri pratik olarak kullanışlı cihazlar olarak kabul edilmedi (Katz ve Bollella, 2021).



Şekil 1. 1839’da Sir William R. tarafından icat edilen bir H_2-O_2 gaz yakıt hücresinin ilk çalışan prototipi (Davy and Bacon Paved the Pathway for the Hydrogen Economy, 2023: <https://www.matsusada.com/column/hydrogen-economy.html>).

1896’da yayınlanan “Elektrokimya: Tarih ve Teori” adlı eserde, Nobel Ödülü sahibi Wilhelm Ostwald, Grove’un gazlı pilini “pratik önemi olmayan ancak teorik ilgi taşıyan bir şey” olarak tanımladı. 1889 yılında “Yakıt hücresi” terimi, Ludwig Mond ve Charles Langer tarafından, havayı oksidan ve kömür gazını yakıt olarak kullanan bir hücre oluşturma çabaları sırasında türetilti. Yakıt hücresi teknolojisinin araştırma ve mühendislik faaliyetleri, özellikle 20. yüzyılda, belirli pratik ihtiyaçlar doğrultusunda yoğunlaştı. Yakıt hücreleri, performanslarını optimize etmek amacıyla başarılı bir şekilde mühendislikle geliştirildi ve çok küçükten çok büyük güç cihazlarına kadar çeşitlilik gösterdi. Bu tarih boyunca, özellikle Apollo uzay programı için, yakıt hücreleri uzay programlarının elektrik enerjisi kaynağı olarak büyük ilgi gördü. Elektrikli otomobiller ve şarj edilebilir piller için yakıt hücresi teknolojisi genel halk arasında da en bilinen uygulamalardan biridir (Katz ve Bollella, 2021).



Şekil 2. Apollo 11 uzay aracının alkalın yakıt hücresi (Fuel Cells Launched to the Moon Realized the Dream of Mankind, 2023: <https://www.hyundaimotorgroup.com/story/CONT0000000000001856>)

2.2. Temel Çalışma Prensibi

Kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine çeviren yakıt hücreleri, elektrokimyasal sistemlerdir. Temelde, bir yakıt hücresinin çalışma prensibi, hidrojen (veya diğer yakıt) ve oksijenin bir elektrolit aracılığıyla reaksiyona girmesi sonucu elektrik akımı üretmeye dayanır. Bu reaksiyonlar çeşitli ara basamaklar içerebilir (Şefkat ve Mert, 2018; Geliş, 2020).

PEM yakıt hücresi, iki elektrot ve aralarında bulunan elektrolit tabakasından oluşur. Elektrolit tabakası, yalnızca protonların(H^+) geçişine izin verirken elektronları (e^-) engelleyerek elektrotlar arasındaki kimyasal reaksiyonun düzenli ilerlemesini sağlar. Hidrojen gazı anot tarafına gönderilir, burada gaz kanallarından geçerken hidrojen iyonlarına (protonlar) ve elektronlara ayrışır. Elektronlar dış devre üzerinden katoda taşınırken, protonlar elektrolit tabakasından geçerek katoda ilerler. Katotta, oksijen gazı, protonlar ve elektronlar arasındaki reaksiyon sonucunda su oluşur. Bu reaksiyon, dış devrede

akışkanlık sağlayan elektronları üretirken, protonlar elektrolit üzerinden taşınır. Bu şekilde, PEM yakıt hücresi kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür ve çevre dostu bir enerji kaynağı olarak kullanılır. PEM yakıt hücresinin işleyişi, hidrojenle başlayarak oksijenin redoks reaksiyonuyla sonlanan bir süreci içerir. Anot tarafında hidrojen gazı ayrışırken, katot tarafında oksijen gazıyla birleşerek su oluşur. Elektronlar bu reaksiyonlar sırasında dış devre üzerinde taşınır ve bu akım elektrik enerjisi olarak kullanılabilir. Elektrolit tabakası ise sadece protonların geçişine izin verir, böylece protonlar elektrolit aracılığıyla katoda taşınırken, elektronlar dış devre üzerinden anottan katoda hareket eder. Bu iki paragraf, PEM yakıt hücresinin temel işleyişini detaylı bir şekilde açıklamaktadır: hidrojen ve oksijenin kimyasal reaksiyonu yoluyla enerji dönüşümü, elektron ve proton akışı ve sonuçta üretilen temiz elektrik enerjisi (Kahraman, Çevik ve Coşman, 2014).



Şekil 3. Bir yakıt pilinin şematik olarak çalışma sistemi

Yakıt olarak kullandığımız Hidrojen, havadaki oksijen ve yakıt pili aracılığı ile tepkimeye girerek su ve ısı açığa çıkarır. Yakıt hücresinde elektrik üretimi sonucu oluşan ısının değeri çok fazla değilse su ile yakıt pili dışına atılır. Fakat ısı çok yüksek değerde ise bir soğutma sistemine ihtiyaç duyulabilir (Yu, Duan ve Gu, 2023).

Yakıt pili teknolojisinin en belirgin özelliği, geleneksel pillere kıyasla şarj edilmelerine gerek duymamalarıdır. Yakıt pilleri, yakıt sağlandığı sürece sürekli olarak enerji üretme yeteneğine sahiptir. Yakıt pili, elektrolit (genellikle bir membran), anot ve katot olmak üzere üç ana bileşenden oluşur. Yakıt, anot tarafından, oksitleyici gazlar ise katot tarafından sağlanır. Bu iki taraf arasında gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar sayesinde elektrik enerjisi üretilir. Anot kısmında yakıtlar yükseltgenirken, katot kısmında oksitleyici gazlar indirgenir. Bu reaksiyonların toplam sonucunda su, ısı ve elektrik üretilir. Isının açığa çıkması, tepkimenin ekzotermik olduğu anlamına gelir. Elektrotlar arasındaki elektrolit, iyonların anottan katoda doğru hareket etmesini sağlar. Bu iyon hareketi, elektrik akımının iletimini destekler ve reaksiyonların

gerçekleşmesine yardımcı olur. Sonuç olarak, şarj gerektirmeyen bu sistem, sürekli enerji üretme kabiliyeti ile dikkat çekerken, çevre dostu ve sürdürülebilir enerji üretimine katkıda bulunur.

2.2.1. Hidrojen

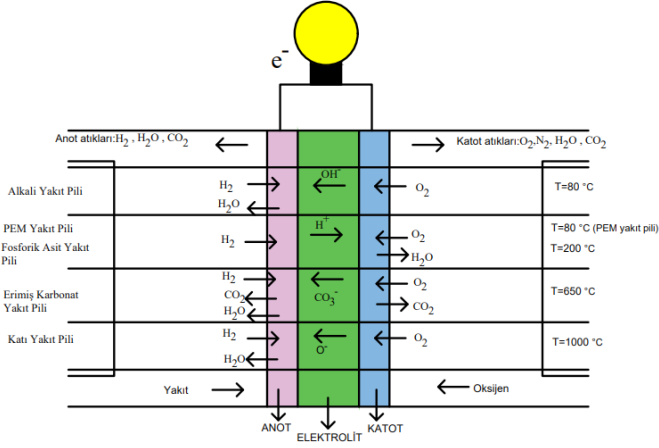
Kokusu ve rengi olmayan hidrojen; gaz fazında havadan 14 kat daha hafif bir elementtir. Sıvı hidrojen ise içten yanmalı motorlarda kullanılan sıvı hidrokarbon yakıtlarına göre yaklaşık 10 kat daha hafiftir. Bu özellik, hidrojenin taşınmasını ve kullanımını kolaylaştırır.

Hidrojen, evrende bol miktarda bulunur. Bu durum, hidrojenin geniş çapta ve sürdürülebilir bir kaynağa sahip olduğunu gösterir. Bu, uzun vadeli enerji gereksinimlerini karşılamada potansiyel sağlar. Hidrojen, kullanımı ve depolanması kolay bir yakıttır. Bu, enerji altyapısına sorunsuz bir şekilde entegre edilmesini sağlar. Ayrıca, hidrojenin doğal düzene olumsuz etkisi düşüktür ve fosil yakıtlarla yakın verime sahip bir enerji taşıyıcısıdır. Bu özellikler, hidrojenin gelecekteki enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahip olabileceğini göstermektedir (Daşdemirli, 2019).

Hidrojenin içeriğinde karbon ve sülfür olmadığı için yanma sürecinde zararlı poliaromatik hidrokarbonlar ve SO₂ gibi maddelerin oluşumu söz konusu değildir. Bu durum, asit yağmuru, fotokimyasal sis ve sera etkisi gibi çevresel sorunlara neden olma riskini minimize eder. Hidrojenin yanma sonucu oluşan tek ürün su buharıdır ve bu su buharı tekrar hidrojen üretimi için geri kazanılabilir. Bu döngüsel süreç, temiz ve sürdürülebilir bir enerji üretimini destekler. Hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla (örneğin rüzgar, güneş, biyokütle) elde edilebilir. Bu yaklaşım, çevre dostu bir enerji üretimi sağlar ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır. Hidrojen üretimi için yenilenebilir kaynakların kullanılması, sürdürülebilir enerji dönüşümünün önemli bir adımını temsil eder (Kahraman, 2007).

2.3. Yakıt Hücreleri Çeşitleri

Yakıt hücrelerinin birçok türü geliştirilmiştir. Bunlar kullanılan proton değiştirici membran türüne, geçişi sağlanan iyon tipine, çalışma sıcaklıkları ve kullanılan yakıt çeşidine göre isimlendirilmektedir (Meral, 2019). Yakıt hücrelerinin çalışma sistemleri benzer olsa da çalışma sıcaklığı, elde edilen elektriksel verim ve kullanım alanları açısından farklıdır. En çok tercih edilen yakıt pilleri çalışma sıcaklığına göre sınıflandırıldığında: PEM yakıt pilleri düşük orta sıcaklıkta çalışmaktadır (Abdelkareem, Elsaid, Wilberforce, Kamil, Sayed ve Olabi, 2021).



Şekil 4. Yakıt hücreleri çeşitleri ve reaksiyonları

Yakıt pilleri, genellikle yapısında kullanılan elektrolitin cinsine isimlendirilir. Tablo 1’de de buna göre bir sınıflandırma yapılmıştır.

Tablo 1. Yakıt Pili Türleri (Fuel Cell Handbook, 2000; Mekhilef, Saidur ve Safari, 2012)

	ALKALİ YAKIT PİLİ	FOSFORİK ASİT YAKIT PİLİ	KATI OKSİT YAKIT PİLİ	PEM YAKIT PİLİ	ERİMiŞ KARBONAT YAKIT PİLİ
ELEKTROLİT	Potasyum hidroksit (KOH)	Fosforik Asit	Stabilize Zirkonyum	Polimer proton değişim membranı	Li / K Karbonat
YÜK TAŞIYICISI	OH^-	H^+	O^{2-}	H^+	CO_3^{2-}
OPERASYON SICAKLIĞI (°C)	90-100	150-200	600-1000	50-100	600-700
ELEKTRİKSEL VERİM (%)	60	>40	35-43	53-58	45-47
Güç Yoğunluğu (W/kg)	10-100	50-1000	<1-3000	<1-250	<1-1000
YAKIT TÜRÜ	Hidrojen	Hidrojen Hidrokarbonlar Fosil Yakıtlar	Hidrojen Hidrokarbonlar	Hidrojen Hidrokarbonlar	Hidrojen Hidrokarbonlar
PİL BİLEŞENİ	Karbon Tabanlı	Grafit Tabanlı	Seramik	Karbon Tabanlı	Nikel, Paslanmaz çelik
UYGULAMA ALANLARI	Uzay Çalışmaları	Ticari Uygulamalar	Ticari ve Sanayi alanda Elektrik Santralleri	Ulaşım araçları, Askeri Sistemler	Elektrik Santralleri

3. PEM Yakıt Pili Elemanları

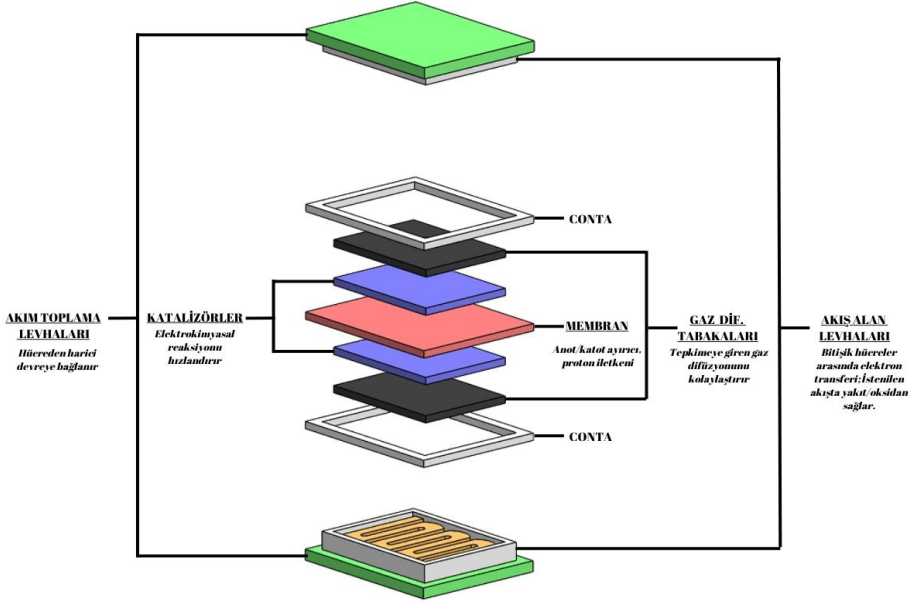
PEM yakıt hücreleri, membran-elektron yığını (MEY), sızdırmazlık contaları ve çift kutuplu tabakalardan oluşmaktadır (Güney, 2019). MEY ise beş parçadan meydana gelmektedir: Merkezde proton iletken membran, daha sonra membranın temas halinde olduğu anot ve katot elektrotları, MEY'in en dışında ise gaz difüzyon tabakalılarıdır (Gümüšoğlu, 2012).

Membranlar (Elektrolit), 10- 100 µm kalınlığa sahip su ve proton geçişini sağlayan bir yapıdır. En önemli görevi proton geçişini sağlamaktır. Protonlar, membranın iyonik iletkenliği dolayısıyla elektrolit boyunca taşınırlar ve bunun için su önemli bir etkidir. Membran seçimi yaparken, yüksek iyonik iletkenliğe, termal ve mekanik kararlılığa, elektronların geçişini engelleyecek yapıda olmasına dikkat etmek gereklidir (Karakış, 2021).

İçerisinde 2-4 nm çapında platin kristaller bulunan katalizör tabakası, 5-50 µm kalınlığında olup elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği bölümdür (Gümüšoğlu, 2012).

Gazları katalizör tabakasına dağıtan ve hidrofobik özelliği sayesinde suyun dışarı atılmasını sağlayan gaz difüzyon tabakası, 100-500 mikron arasında bir kalınlığa sahiptir. Katalizör tabakası ve membran için de mekanik destek sağlayan gaz difüzyon tabakalarının bazı beklentileri karşılaması gereklidir. Bunlar kimyasal ve elektriksel olarak kararlılık, iyi derecede gözeneklilik ve hidrofobik özelliktir (Daşdemirli, 2019).

Yakıt ve oksitleyicinin hücrede dağılması, her bir hücreden akımın diğerine taşınması, ürün olarak oluşan suyun katottan uzaklaştırılması, hücrelerin soğutulması gibi birçok görevi olan bipolar plakalar (Akım toplayıcı tabakalar/ Akış kanalı), çok iyi iletkenlik ve ekonomik olması dolayısıyla genellikle grafitten üretilmektedir. Grafit dışında karbon kompozit polimerler, metal levhalar gibi malzemeler de kullanılabilir. Malzeme seçimi yapılırken, kimyasal uyumluluk, korozyon direnci, maliyet, yoğunluk, elektronik iletkenlik, sızdırmazlık, üretilebilirlik, malzeme dayanımı ve ısı iletkenlik gibi etkenler göz önünde bulundurulmalıdır (Güney, 2019).



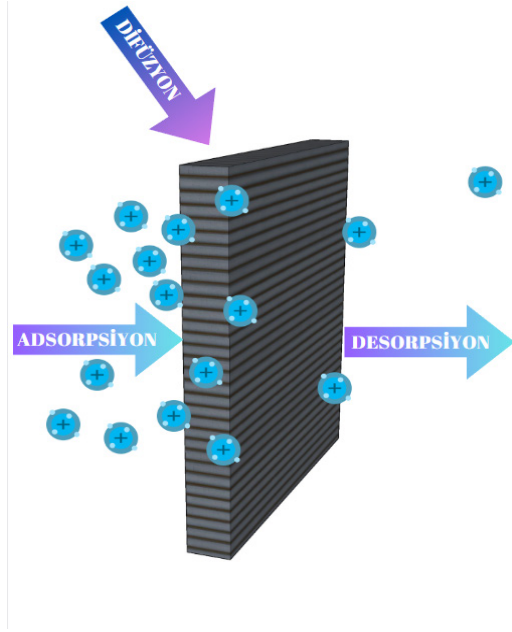
Şekil 2. PEM yakıt hücresi bileşenleri

4. PEM Yakıt Pili Polimer Membranın Özellikleri

PEM yakıt pilleri, elektrik üretiminin temel aktörü olan membranın kritik rol oynadığı bir teknolojik gelişmedir. Bu membran, yakıttan elektrik üretirken protonlara karşı iletken, ancak elektronlara karşı yalıtkan davranır. Bu özellikler, membranın elektronları sistemin dışından taşınması ve bu süreç sonucunda elektrik enerjisi üretilmesini sağlar. Membranın proton iletimine karşı gösterdiği direnç, omik direnç olarak adlandırılır. Omik direnç, çıkış gerilimini düşürme etkisi yaparak, omik kayıplara neden olur.

Membranların su tutma kapasiteleri, içerdikleri su miktarı, tipi, difüzyon katsayıları ve kalınlıkları gibi faktörlere dikkat etmek önemlidir. Membranlar, proton iletimini su aracılığıyla gerçekleştirir. Ancak literatürde yapılan çalışmalar, yakıt pillerinde yetersiz su bulunması durumunda proton iletiminde azalma olduğunu göstermiştir. Tersine, aşırı su bulunması membranın şişmesine ve mukavemetinin düşmesine yol açabilir. Membran malzemesinin su tutma kapasitesinin optimum düzeyde olması, proton iletim veriminin artmasına yardımcı olur. Bu kapasiteyi etkileyen faktörler arasında malzeme özellikleri ve sıcaklık yer alır. Malzeme özellikleri optimal olsa da yüksek sıcaklığın su tutma kapasitesi üzerindeki etkisi de göz ardı edilemez. Ayrıca, membranın su içeriğine bağlı olarak belirlenen su tutma kapasitesi, membranın malzeme

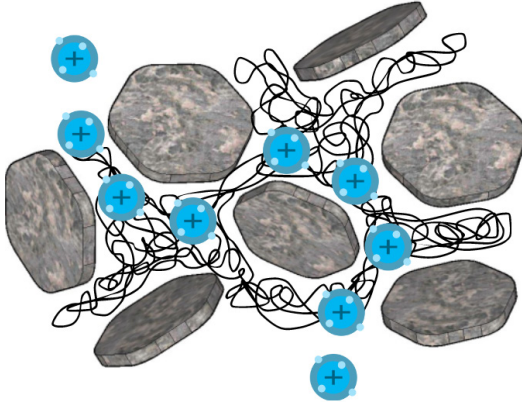
bileşimi tarafından kontrol edilir. Yüksek sıcaklıklarda membranın kuruması, proton iletimini durdurabilir.



Şekil 3. PEM yakıt hücresinde H^+ iyonlarının geçişi

Membran kalınlığındaki artış, proton geçişine karşı direnci artırır ve yakıt hücresinin performansını düşürebilir. Sonuç olarak, PEM yakıt pilleri için membranın su tutma kapasitesinin optimize edilmesi, elektrik üretim verimliliğini artırmak için kritik bir adımdır. Membranın malzeme ve fiziksel özelliklerinin yanı sıra, çalışma sıcaklığı da su tutma kapasitesini etkileyen faktörler arasındadır. Polimer membranlar, PEM yakıt pillerinde önemli bir rol oynar. Bu membranlardan beklenen belirli özellikler vardır. İlk olarak, yüksek proton iletkenliği, membranın elektrik akısını kolaylıkla sağlaması gerektiği anlamına gelir. Bu, yakıt hücresinin verimliliğini artırır. İkinci olarak, polimer membranlar termal kararlılık göstermelidir. Yakıt hücresi yüksek sıcaklıklarda çalıştığında, membranın yapısı bozulmamalı ve performansı etkilenmemelidir. Üçüncü olarak, mekanik dayanıklılık, membranın mukavemetini ifade eder. Yakıt hücresi çeşitli koşullarda kullanılabilir olmalıdır, bu nedenle membranlar dayanıklı olmalı ve hasara karşı dirençli olmalıdır. Dördüncüsü su yönetimidir ve su yönetimi PEM yakıt hücresinin verimli çalışması için önemlidir. Membran, yakıt hücresinin içindeki su miktarını kontrol edebilmeli ve fazla

suyun uzaklaştırılmasına yardımcı olmalıdır. Beşinci olarak, düşük maliyetli membranlar araştırmacılar için önemlidir. Ekonomik açıdan uygun olan membranlar, PEM yakıt pillerinin ticari uygulamalarda daha yaygın olarak kullanılmasını sağlar. Bir başka özellik atık bertarafının kolay olmasıdır. PEM yakıt hücrelerinin çevresel etkilerini azaltmaya yardımcı olur. Membranların kullanım süresi sona erdiğinde, kolayca geri dönüştürülebilir veya güvenli bir şekilde bertaraf edilebilir olmalıdır. Diğer isten özelliklerden birisi de kolay üretimdir. Büyük ölçekte membran üretimi mümkün kılınır.



Şekil 4. PEM yakıt pilinde kullanılan polimer membranın yapısı

Yüksek verimlilikle membranlar üretebilmek, PEM yakıt hücrelerinin geniş çapta kullanımını destekler. Son olarak, içeriğindeki katkıların çözünmemesi önemlidir. Membranın yapısına eklenen katkı maddelerinin membran içinde çözünmemesi, membranın istenen özelliklerini korumasını sağlar. Tüm bu özellikler bir arada düşünüldüğünde, ideal bir PEM yakıt pil membranı yüksek proton iletkenliği, termal kararlılık, mekanik dayanıklılık, etkin su yönetimi, düşük maliyet, kolay atık bertarafı, kolay üretim ve katkı maddelerinin çözünmemesi gibi özelliklere sahip olmalıdır. Bu şekilde, PEM yakıt pilleri daha verimli, ekonomik ve çevre dostu bir enerji kaynağı haline gelebilir.

Nafion membranların PEM yakıt hücrelerindeki önemli bir membran türü olduğu ve literatürde bildirildiği gibi yaygın olarak kullanıldığı vurgulanmaktadır. Yaygınca kullanılan Nafion gibi perflorosülfonik membranların malzeme özellikleri PEM elektrolizi için oldukça iyidir ama kullanım ömürleri sona erdikten sonra atılması zor olabilir çünkü yapılarında flor içerirler. Bu yüzden çevresel açıdan sürdürülebilir bir alternatif olarak mevcut membranların yerine

hidrokarbon membranlar kullanılması membranların ömürleri sona erdikten sonra atılması ile oluşan çevresel zarar daha aza inecektir. Bu çalışmaların amacı, PEM elektrolizinde kullanılan membranların maliyetini düşürmek, performanslarını artırmak ve çevresel etkilerini azaltmaktır.

5. Yakıt Pillerinin Geleceği

PEM yakıt pilinden elde edilen elektrik enerjisi, sistem tarafından ölçülen akım, gerilim ve zaman da akış değerleri kullanılarak ölçülmektedir. Bu elektrik enerjisinin kaynağı ise oksijen ve hidrojenin reaksiyonu sonucu oluşan enerjidir (Dalğış, 2019).

Enerji üretiminin %85'i yenilenemeyen enerji kaynaklarından karşılanmaktadır ve bu kaynakların (benzin, kömür, doğal gaz gibi) yakında tükenecek olması pahalı olmasına yol açmaktadır. Fosil yakıtlar CO₂, metan emisyonları, sera gazı ve azot oksit miktarını artırmakta ve hava kalitesinin bozulmasına sebep olmaktadır. Motorlu taşıtların sebep olduğu CO, NO_x ve hidrokarbonlar en önemli egzoz kirleticilerdendir. Ayrıca asit yağmurlarının (SO_x ve NO_x) sebeplerinden biri olan elektrik santrallerinin oluşturduğu kükürttür. Bu olumsuz etkenler dolayısıyla daha sürdürülebilir teknolojilere yönelmek oldukça önemlidir. Hidrojen enerjisi, fosil yakıtlara kıyasla sürdürülebilir bir çözümdür (Düz, 2020).

PEM yakıt hücreleri, yüksek enerji dönüşümü, düşük üretim maliyeti, düşük sıcaklık aralıklarında çalışması ve taşınabilir uygulama alanlarında kullanılmasından dolayı hidrojen enerjisini kullanan umut verici bir teknolojidir (Karakış, 2021). Yakıt hücreleri, hibrit elektrikli araçlar, kesintisiz güç kaynağı, konut invertörleri gibi alanlarda güç üretimini kolaylaştırır ve gelecekte daha çok gelişmesi beklenmektedir. Günümüzde PEM yakıt hücreleri ile çalışan araçlar piyasaya sürülüyor. Örneğin, Japonya'nın 2020'de kullandığı Olimpiyat otobüsü, PEM yakıt hücresi ile çalışmaktaydı (George, Sehgal, Rana ve Kumar, 2022). Honda Clarity, Toyota Mirai, GM ZH2 ve Hyundai Tucson gibi çeşitli yakıt hücreli araçlar geliştirilmiştir. Yaşanabilecek elektrik kesintilerinden dolayı PEM yakıt pillerinin, bankalar ve telekomünikasyon şirketleri için yedek güç kaynağı olarak kullanılması düşünülmektedir. Doğrudan elektrik gücü, yüksek güç yoğunluğu ve büyük enerji kapasitesi dolayısıyla uçaklarda yardımcı güç olarak kullanılması da amaçlanmaktadır. 20.000'den fazla forklift, dört eyalette PEM yakıt hücreleriyle çalışan 20'den fazla otobüs ve 30'dan fazla hidrojen benzin istasyonu bulunan Amerika'da, 2025 yılına kadar Kaliforniya eyaletinde 200 tane daha hidrojen benzin istasyonu planlanmaktadır (Wang, Diaz, Chen, Wang ve Adroher, 2020).

Türkiye’de ise Ford Trucks Ballard’ın FCmove™ XD 120kW yakıt hücreli motorlarını, 2025’teki Avrupa gösterilerinden önce F-MAX 44 tonluk uzun yol çekici kamyonlarına monte etmeyi planlıyor (h2 view, tarih yok). Ayrıca Bursa’da bulunan Karsan’ın son zamanlarda ürettiği yakıt pilli e-ATA HYDROGEN otobüsleri temiz ve sürdürülebilir toplu taşıma açısından oldukça önemlidir. Hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı yakıt hücrelerinin gelecek yıllarda daha da gelişeceği tahmin edilmekte ve 2030 yılında otomotiv pazarının %15’inin yakıt pilli araçlardan oluşacağı ön görülmektedir (KARSAN- HİDROJEN yakıtlı aracını dünyaya tanıttı, 2023: <https://www.enerjiekonomisi.com/karsan-hidrojen-yakitli-aracini-dunyaya-tanitti/22610/>).

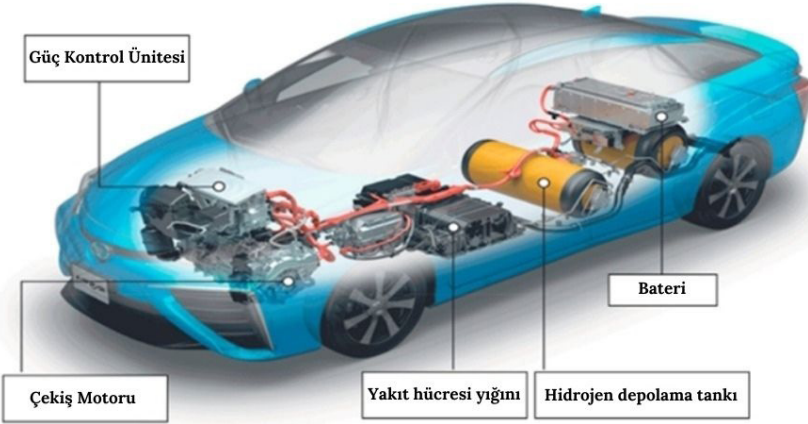


Şekil 3. Karsan e-ATA HYDROGEN otobüsü (e-ATA HYDROGEN, 2023: <https://www.karsan.com/tr/e-ata-hydrogen-genel-bakis>)



Şekil 4. Yakıt pilli kullanan araçlar
(Wang, Diaz, Chen, Wang ve Adroher, 2020)

Yakıt hücreleri, geleneksel güç üretim sistemlerine kıyasla farklı çalışma prensibine sahip olan teknolojilerdir. Özellikle hidrojen yakıt hücreli araçlarda, hidrojen yakıt olarak kullanılmaktadır. Bu yakıt hücreli araçlarda hidrojen, ya doğrudan veya önce hidrojen taşıyıcısına dönüştürülerek sisteme entegre edilmektedir. Hidrojenin doğrudan araca verilmesi tercih ediliyorsa, genellikle hidrojen depolamak ve taşımak için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Örneğin, metal hidritler gibi maddeler hidrojeni emebilir ve içerdiği hidrojeni belirli şartlarda salarlar. Bu sayede hidrojen, araçta depolanabilir ve yakıt hücresinde kullanılmak üzere elde tutulabilir. Alternatif olarak, hidrojen taşıyıcısı olarak metanol gibi maddeler de kullanılabilir. Metanol, yakıt hücresinde hidrojene dönüştürülebilir ve bu dönüşüm sırasında elektrik enerjisi üretilebilir. Bu yöntemler, yakıt hücreli araçlarda hidrojenin depolanması ve taşınması için kullanılan farklı stratejileri temsil eder. Metal hidritler gibi depolama yöntemleri ve metanol gibi hidrojen taşıyıcıları, yakıt hücresi teknolojisinin günlük yaşamda daha geniş bir şekilde uygulanabilir hale gelmesine yardımcı olabilir. Bu yaklaşımlar, sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan talebi karşılayan ve çevresel etkileri azaltan alternatif enerji üretim yöntemlerinin birer örneğidir (Şenol, Üçgül ve Acar, 2006).



Şekil 5. Toyota Mirai parçaları (Olabi, Wilberforce ve Abdelkareem, 2021)

6. Sonuçlar

Yakıt hücreleri, enerji üretimi alanında çevre dostu ve sürdürülebilir bir gelecek sağlama potansiyeli taşıyan önemli teknolojilerdir. Bu çalışma teknolojinin genel özelliklerini, çeşitli avantajlarını ve gelecekteki kullanımını vurgulamaktadır. Yakıt pilleri, temiz enerji üretimi amacıyla kimyasal reaksiyonları kullanarak yakıtları doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren

cihazlardır. Bu reaksiyonlar, hidrojen ve oksijen gibi temiz yakıtlar kullanılarak gerçekleştirilir ve yan ürün olarak sadece su ve ısı üretilir. Bu özellikleri, asit yağmuru, fotokimyasal sis ve sera etkisi gibi çevresel sorunları minimize eder. Hidrojen, yakıt hücrelerinin en yaygın yakıtıdır. Hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elde edilebilir, böylece çevre dostu bir enerji üretimi sağlar ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır. Bu yaklaşım, gelecekteki enerji üretiminin sürdürülebilirliğini destekleyen önemli bir adımdır. Yakıt hücrelerinin farklı türleri, elektrolit tipi, çalışma sıcaklığı ve kullanılan yakıt türü gibi faktörlere göre sınıflandırılır. PEM yakıt pilleri düşük ve orta sıcaklıklarda, erimiş karbonat ve katı oksit yakıt pilleri ise yüksek çalışma sıcaklıklarında çalışırlar. Her tür yakıt hücresi farklı avantajlar sunar ve farklı uygulama alanlarına hitap edebilir. Gelecekteki kullanım açısından, yakıt hücreleri temiz enerji üretiminin artan taleplerine cevap verme potansiyeline sahiptir. Ulaşım, enerji üretimi, endüstriyel süreçler ve ev enerjisi depolama gibi çeşitli alanlarda kullanılabilecekleri düşünülmektedir. Bu teknolojinin çevre dostu ve verimli yapısı, enerji üretimi ve tüketimi dengesini olumlu bir şekilde etkileyerek sürdürülebilir bir enerji geleceğine katkı sağlayabilir. Yakıt pilleri, temiz enerji üretimi ve çevre koruma hedeflerini bir araya getiren önemli bir teknolojidir. Hidrojen tabanlı yakıt hücreleri, yenilenebilir kaynaklarla birleşerek gelecekte enerji üretiminin ve kullanımının daha sürdürülebilir ve çevre dostu bir şekilde gerçekleşmesine yardımcı olabilir.

Kaynakça

A.G. Olabi, Tabbi Wilberforce, Mohammad Ali Abdelkareem. (2021). Fuel cell application in the automotive industry and future perspective. *Energy*, 214. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118955>

Aida Farsi, Marc A. Rosen. (2022). PEM fuel cell-assisted lithium ion battery electric vehicle integrated with an air-based thermal management system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(84), s. 35810-35824. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.153>

Askaripour, H. (2019). Effect of operating conditions on the performance of a PEM fuel cell. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 144(118705), 1.

Bayat, M., & Özalp, M. (2023, July 15). Effects of leak current density and doping level on energetic, exergetic and ecological performance of a high-temperature PEM fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(60), s. 23212-23229. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.277>

Chammam, A., Tripathi, A. K., Alvarez, J. R., Alsaab, H. O., Romero-Parra, R. M., Mayet, A. M., & Abdullaev, S. S. (2023, October). Multiobjective optimization and performance assessment of a PEM fuel cell-based energy system for multiple products. *Chemosphere*, 337(139348).

İlkılıç C., Öner C., Aytaç Z. İ., Deviren H., Hazar H. (2017). Yakıt Pillerinin Yapısı, Çalışma Prensibi ve Çeşitleri. *1st International Conference on Energy Systems Engineering*.

Dalğıç, B. F. (2019, Ağustos). PEM YAKIT HÜCRESİNDE HİDROJEN GAZINDAKİ NEM ORANINA BAĞLI OLARAK ELEKTRİK ÜRETİMİNDEKİ DEĞİŞİMİN İNCELENMESİ. Batman.

Daşdemirli, Y. (Haziran 2019). PEM YAKIT PİLLERİNDE ÇALIŞMA PARAMETRELERİNİN PERFORMANSA ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ. KARABÜK.

Demir, M. (2019, Nisan). SICAKLIĞA BAĞLI OLARAK POLİMER ELEKTROLİT MEMBRAN YAKIT HÜCRESİNİN PERFORMANS ANALİZİ. Batman: BATMAN ÜNİVERSİTESİ.

Yu D., Duan C., Gu B. (2023). Design and evaluation of a novel plan for thermochemical cycles and PEM fuel cells to produce hydrogen and power: Application of environmental perspective. *Chemosphere*(334). doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138935>

Düz, D. D. (2020, EKİM). FEN VE MATEMATİK BİLİMLERİ Teori, Güncel Araştırmalar ve Yeni Eğilimler. *IVPE*.

Enerji Ekonomisi. (tarih yok). Ağustos 2023 tarihinde <https://www.enerjiekonomisi.com/karsan-hidrojen-yakitli-aracini-dunyaya-tanitti/22610/> adresinden alındı

Fuel Cell Handbook (Cilt 5). (2000, October). EG&G Services Parsons, Inc. https://www.academia.edu/28514516/Fuel_Cell_Handbook_Fifth_Edition adresinden alındı

Geliş, K. (2020). Şeffaf bir PEM Yakıt Hücrelerinin Performansının Değerlendirilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*(8), s. 1852-1863. doi: 10.29130/dubited.692558

Gümüsoğlu, T. (2012). PEM YAKIT HÜCRESİ PERFORMANSINI ETKİLEYEN PARAMETRELERİN OPTİMİZASYONU. *İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ, FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ, YÜKSEK LİSANS TEZİ*.

Güney, S. Y. (2019). PEM YAKIT HÜCRELERİ İÇİN MEMBRAN-ELEKTROT-YİĞİNLARININ HAZIRLANMASI VE KARAKTERİZASYONU. *İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü*

Eğitim Enstitüsü-Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı-DOKTORA TEZİ.
<https://acikerisim.iuc.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/20.500.12831/4493/4493.pdf?sequence=1&isAllowed=y> adresinden alındı

h2 view. (tarih yok). Ağustos 2023 tarihinde <https://www.h2-view.com/story/ford-f-max-trucks-to-be-equipped-with-ballard-fuel-cells-for-european-project/> adresinden alındı

Hyundai Motor Group. (tarih yok). Ağustos 7, 2023 tarihinde <https://www.hyundaimotorgroup.com/story/CONT0000000000001856> adresinden alındı

Kahraman, H., Çevik, I., & Coşman, S. (2014). Sıkıştırma Basıncının PEM Yakıt Pili Performansına Etkisi. Karabük.

Karakış, M. (2021). PEM YAKIT HÜCRESİ KATOT ELEKTRODUNDA KULLANIM POTANSİYELLERİNİ İNCELEMELER ÜZERE ÇEVREL FAZ KATALİZÖRLERİN SENTEZİ, KARAKTERİZASYONU VE ELEKTROKATALİTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ. *KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ, FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ, YÜKSEK LİSANS TEZİ.*

Karaoğlan, M. U., & Kuralay, N. S. (2014). PEM YAKIT HÜCRESİ MODELİ. *Mühendis ve Makina*, 55(657), s. 51-58.

KARSAN. (tarih yok). Ağustos 2023 tarihinde <https://www.karsan.com/tr/e-ata-hydrogen-genel-bakis> adresinden alındı

Katz, E., & Bollella, P. (2021). Fuel Cells and Biofuel Cells: From Past to Perspectives. *Israel Journal of Chemistry*, s. 68-84.

Leader, J. O., Yue, Y., Walluk, M. R., & Trabold, T. A. (2022). Voltage degradation of high-temperature PEM fuel cells operating at 200 C under constant load and start-stop conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(43), 18820-18830.

Matsusada Precision. (tarih yok). Ağustos 13, 2023 tarihinde <https://www.matsusada.com/column/hydrogen-economy.html> adresinden alındı

Meral, P. (2019, Mayıs). PEM TİPİ YAKIT HÜCRELERİNDE TASARIM VE İŞLETME PARAMETRELERİNİN HÜCRE PERFORMANSINA ETKİSİ. *SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ YÜKSEK LİSANS TEZİ.*

Abdelkareem M. A., Elsaid K., Wilberforce T., Kamil M., Sayed E. T., Olabi A. (2021). Environmental aspects of fuel cells: A review. *Science of The Total Environment*, 752. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141803>

Kahraman N., Akansu S. O., Albayrak B. (2007). İçten Yanmalı Motorlarda Alternatif Yakıt Olarak Hidrojen Kullanılması. *Mühendis ve Makina*, 48(569).

<https://www.mmo.org.tr/haziran-2007-enerji-ozel-sayisi/makale/icten-yanmali-motorlarda-alternatif-yakit-olarak-hidrojen-adresinden-alindi>

Mekhilef S., Saidur R., Safari A. (2012). Comparative study of different fuel cell technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), s. 981-989. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.020>

Shateri, M., & Torabi, F. (2023, March 1). Influence of liquid water accumulation on the impedance of a PEM fuel cell operating in dead end mode: Physical modeling and experimental validation. *Electrochimica Acta*, 443(141940). doi:<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.141940>

Shimpalee S., Lilavivat V., Xu H., Rowlett J. R., Mittelsteadt C. & Zee J. W. (2018). The Effect of Membrane Properties on Performance and Transports inside Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. *165*(11).

George S., Sehgal N., Rana K.P.S., Kumar V. (2022). A comprehensive review on modelling and maximum power point tracking of PEMFC. *Cleaner Energy Systems*, 3. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cles.2022.100031>

Şefkat, G., & Mert, Ö. A. (2018, Temmuz 30). PEM YAKIT PİLİNİN SİMULİNK MODELİ ve ANALİZİ. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(2). doi: 10.17482/uumfd.400337

Şenaktaş, B. (2005). *Hidrojen enerjisi, üretimi ve uygulamaları*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

Şenol R., Üçgül İ., & ACAR M. (2006, Aralık). YAKIT PİLİ TEKNOLOJİSİNDEKİ GELİŞMELER VE TAŞITLARA UYGULANABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ. *Mühendis ve Makina*, s. 37-49.

Wang, Y., Zhang, P., Gao, Y., He, W., Zhao, Y., & Wang, X. (2022). Optimal design of cathode gas diffusion layer with arrayed grooves for performance enhancement of a PEM fuel cell. *Renewable Energy*, 199, 697-709.

Wang Y., Diaz D. F. R., Chen K. S., Wang Z., Adroher X. C. (2020). Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells – A review. *32*, s. 178-203. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.06.005>

Zang L., Hao L., & Zhu X. (2023, May 15). Effect of the pore structure of cathode catalyst layer on the PEM fuel cell cold start process. *Energy*, 271(126993). doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126993>

BÖLÜM VI

YAKIN ALAN (KAYNAK) YER HAREKETİ

Near Field (Source) Ground Motion

Berrak FIRAT

*(Araş.Gör.Dr.), İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa,
Jeofizik Mühendisliği, E-mail: berrakf@iuc.edu.tr,
ORCID: 0000-0002-9344-7199*

1. Giriş

Deprem esnasında sismik kaynaktan yayılan dalgalar ve yüzeydeki özellikleri, kaynak mekanizması, kaynaktan uzaklık, yayılım modeli, zemin özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterirler. Faya yakın alanlarda meydana gelen depremlere yakın alan depremleri denir. Literatürde çalışmacılar tarafından yakın fay, yakın kaynak ya da episantral alan olarak isimlendirildikleri görülür. Buna karşın tüm araştırmacılar uzak alan teriminde hem fikirdirler. Yakın alan yer hareketinin özellikleri uzak alan yer hareketlerinden sadece şiddet açısından değil hareketin doğası ve tipolojik açıdan da farklılık gösterir (Grimaz ve Malisan, 2014).

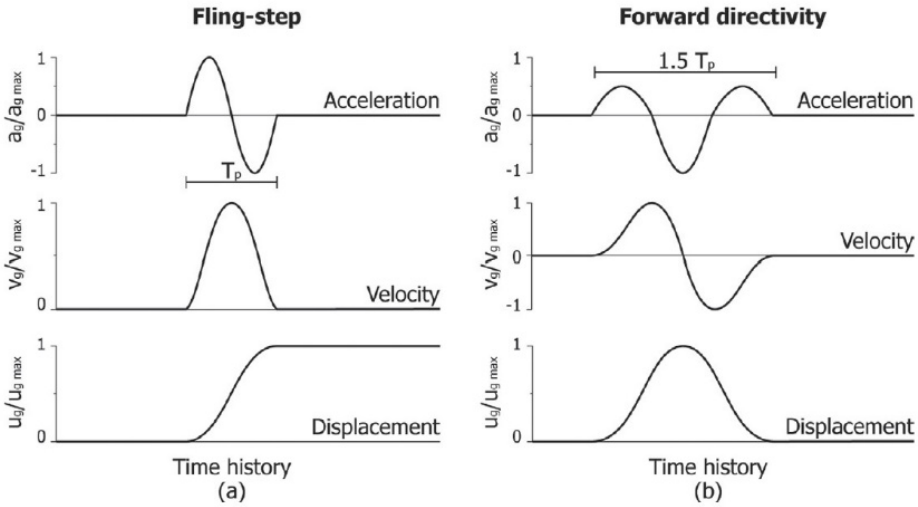
Yakın alan yer hareketi ile tanımlanan, deprem merkez üssünden 40km^2 ve daha yakın alanlardaki yer hareketleridir. Bazı araştırmacılar bu alanın 20km^2 ile 25km^2 ile sınırlanmışlardır.

Yakın alan yer hareketlerinde, uzak alana kıyasla hareketin süresi belirgin biçimde kısalmakta, genlikler artmakta (Somerville ve diğ., 1997), baskın olarak yüksek frekanslı dalgalar gözlenmektedir (Abrahamson ve Silva, 1997). Fay kırığına yakın bölgelerdeki kuvvetli yer hareketi kayıtlarında genellikle uzun periyotlu, yüksek genlikli hız sinyalleri gözlenmektedir.

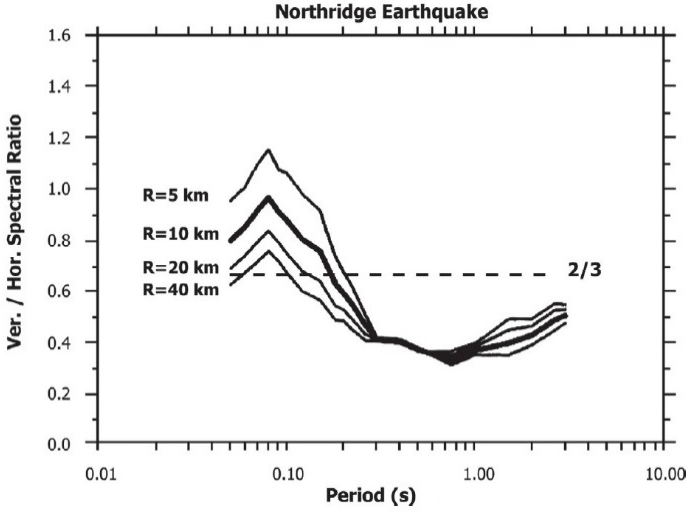
Yakın alan kuvvetli yer hareketi kayıtlarında düşey bölü yatay (D/Y) ivme tepki spektrumlarında normalden yüksek değerler, yönsellik (directivity) ve ötelenme etkisi (fling step) olarak tanımlanan uzak alan kayıtları bulunmayan etkiler görülebilmektedir (Fırat., 2017).

İleri yönsellik etkisi hız-zaman kayıtlarında, faya normal bileşende, maksimum ve minimum genlik değerlerine sahip iki yönlü puls şeklinde gözlenmektedir (Fırat., 2017). Ötelenme etkisi faya paralel bileşende tek yönlü hız pulsü şeklinde gözlenirken, yer değiştirme-zaman serisi kayıtlarında kalıcı deplasmanlar olarak yer almaktadır (Şekil 1). Bu etkiler, değişik tektonik çevrelerde gözleniyor olsa da en sık doğrultu atımlı faylarda tespit edilmişlerdir (Mukhopadhyay ve Gupta, 2013). D/Y ivme tepki spektrumlarında maksimum düşey ivmenin maksimum yatay ivmeye oranlarının 2/3'ten büyük olması (Elgamel ve He, 2003), yakın alan yer hareketi kayıtlarında gözlenen farklılıklardır (Şekil 2).

Meksika, Michoacan 1985 depremi ve Amerika, Loma Prieta 1989 depreminde kaynağın birkaç on kilometre uzaklıklarına kadar olan alanlarda ciddi hasarlar gözlenmiştir. Hasarın nedenleri alışılmadık zemin koşulları (Meksika depremi), direkt gelen ve yansıyan S dalgalarının yapıcı girişimleri ile, yakın alan yer hareketlerine bağlanmıştır (Rupakhety, 2008). Campbell (1982), büyük depremlerin kaynağa yakın alanlardaki düşey bölü yatay ivme oranlarının (D/Y), daha küçük ve kaynaktan uzaktaki alanlardakinden oldukça farklı olduğunu bulmuşlardır. Bu çalışmalara dayanarak Campbell (1982), yapılar için düşey yer hareketi hesaplamalarında D/Y oranının 2/3 varsayılarak yeniden değerlendirilmesi gerektiğini belirtmiştir.



Şekil 1: a)Ötelenme etkisi b)İleri Yönsellik. Not:Zaman serileri maksimum ivme, hız ve yer değiştirme değerleri ile normalize edilmiştir.

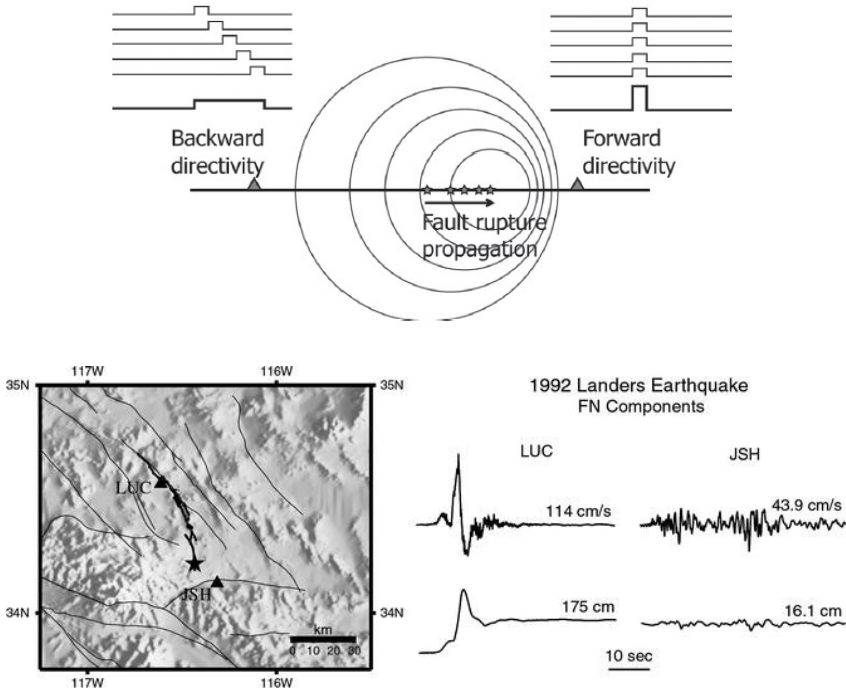


Şekil 2: Northridge depremine ait fay düzleminde 5, 10, 20 ve 40 km uzaklıklardaki düşey bölü yatay spektral oran.

2. Yönsellik, Öteleme, Düşey bölü Yatay Spektral Oran

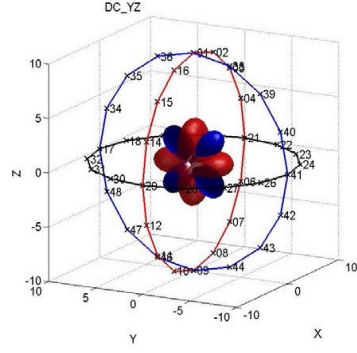
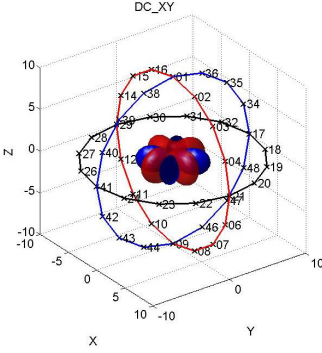
2.1. Yönsellik (Directivity)

Yer içinde meydana gelen hareket yüzeyi kırıldığında yüzey faylanması gerçekleşir. Kırık, deprem sırasında aniden ya da fay kribi (fault creep) şeklinde zamanla gerçekleşebilir. Fay kribi yüzey boyunca meydana gelen yavaş kaymayı ifade eden bir terimdir. Fay üzerindeki hareket istasyona doğru ilerliyorsa burada ileri yönsellik etkisinden söz edilir. Faya normal bileşende (FN) yani fay düzlemine dik yönde hareketin süresi kısa, hız-zaman serisinin başlangıç genliği farklı yönlerdeki istasyonlara nazaran daha büyüktür. Eğer kırılma istasyondan uzaklaşacak şekilde ilerliyorsa faya normal bileşende, bu kez hareketin süresi uzun ve genlik değerleri daha küçüktür (Şekil 3a). 1992 Landers depremini kaydeden LUC ve JSH istasyonlarında ileri ve geri yönsellik etkileri gözlenmiştir (Şekil 3b).



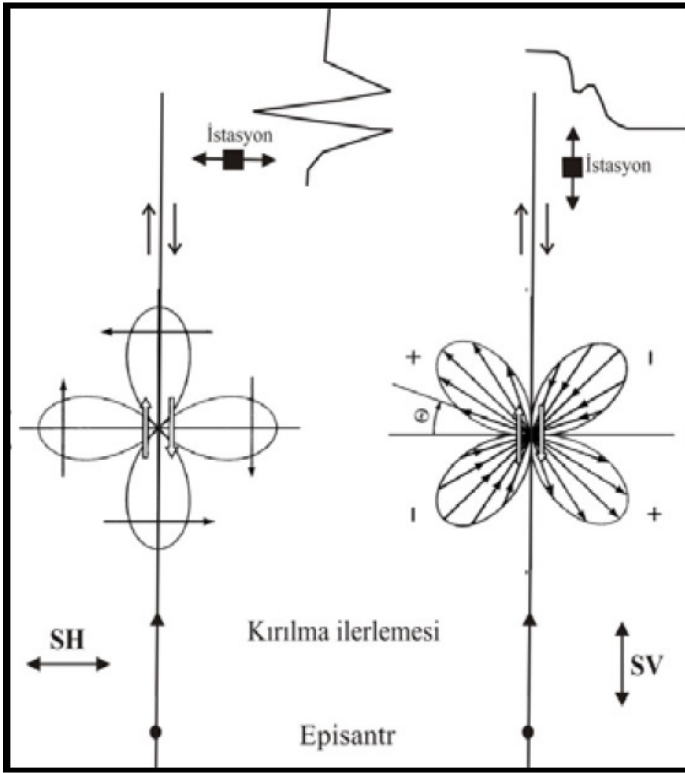
Şekil 3: a) İleri ve Geri yönsellik etkisini gösteren şema (Chioccarelli, 2010'dan yeniden düzenlenmiştir). b) 1992 Landers depremini kaydeden LUC ve JSH istasyonlarındaki hız ve yer değiştirme-zaman serileri.

İleri yönsellik için iki koşulun bir arada oluşması gerekmektedir. İlki kırılma yönü istasyona doğru olmalı ve kırılma hızı kayma dalga hızına yakın bir değerde olmalıdır (Somerville ve diğ., 1997). İkincisi hiposantr ile istasyon arasındaki dalga yayılım doğrultusu, faydaki kayma yönü ile aynı doğrultuda olmalı yani SH yayılım modeli faya normal bileşende maksimum olmalıdır (Şekil 4). İleri yönsellik etkisinin maksimum olabilmesi için kırılmanın, kaymanın ve dalga ilerlemesinin kaynaktan istasyona olması gerekmektedir (Somerville ve diğ., 1997). Doğrultu atımlı faylarda bu koşullar sıklıkla oluşmaktadır. SH dalga yayılımı maksimum değerini fayın kayma yönüyle aynı olan atım yönünden almaktadır (Şekil 5). SV dalga yayılımı maksimum değerini faya paralel yönde almaktadır (Şekil 6). Kırılma ilerleyişi ister iki yönlü (bilateral) ister tek yönlü (semilateral) gerçekleşsin her koşulda SH dalgasının yapıcı girişimi oluşacaktır. SV dalgasının yapıcı girişimi kırılmanın ilerleme doğrultusuna bağlıdır. Yönsellik etkisi fayın kırılma hızının kayma dalgasının yayılma hızına yakın (yaklaşık %80) olduğu zaman oluşmaktadır (Ansary ve Yamazaki, 1998).



Şekil 4: SH dalga yayılım modeli.

Şekil 5: SV dalga yayılım modeli.



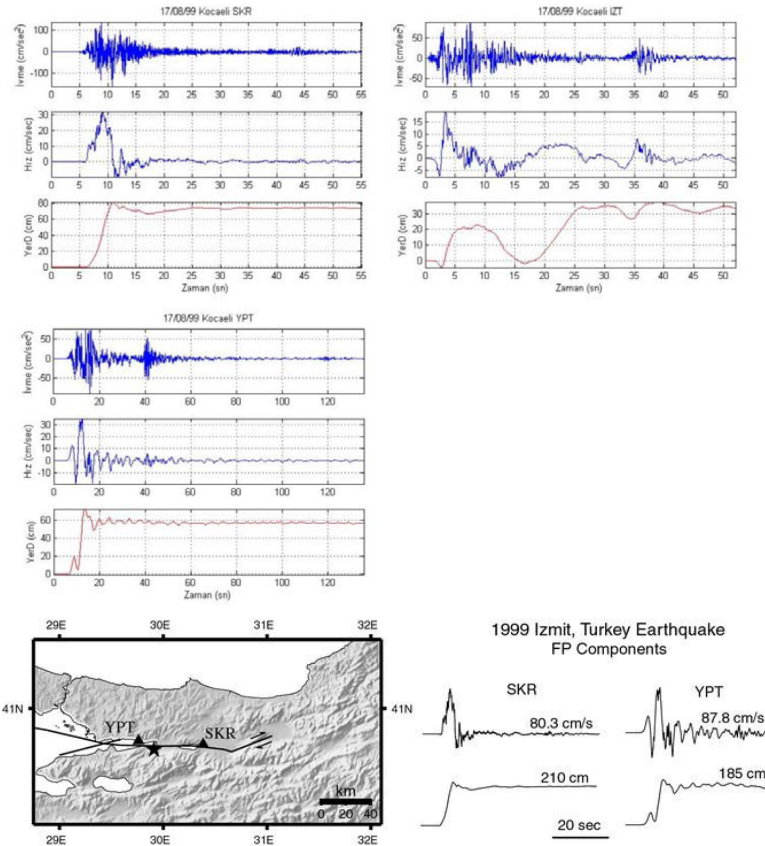
Şekil 6: Faya normal ve paralel yönlereki yayılım modeli (Somerville ve diğ., 1997).

2.2. Ötelenme (Fling Step)

Yerkabuğunda meydana gelen gerilme birikimi ve deformasyon süreci Elastik Reboud Teorisi (ERT) ile açıklanmaktadır. ERT göre, kilitli bir fayın her iki tarafında yerkabuğundaki hareketler sonucunda gerilme birikimi meydana

gelmektedir. Gerilme birikimi faydaki sürtünme kuvvetini aştığında, burada biriken enerji fay boyunca ani bir yer değiştirmeyle serbest kalır (Lay ve Wallace, 1995). Fling Step (Ötelenme) fay boyunca meydana gelen kalıcı yer değiştirmeyle ilişkilidir (Fırat., 2014).

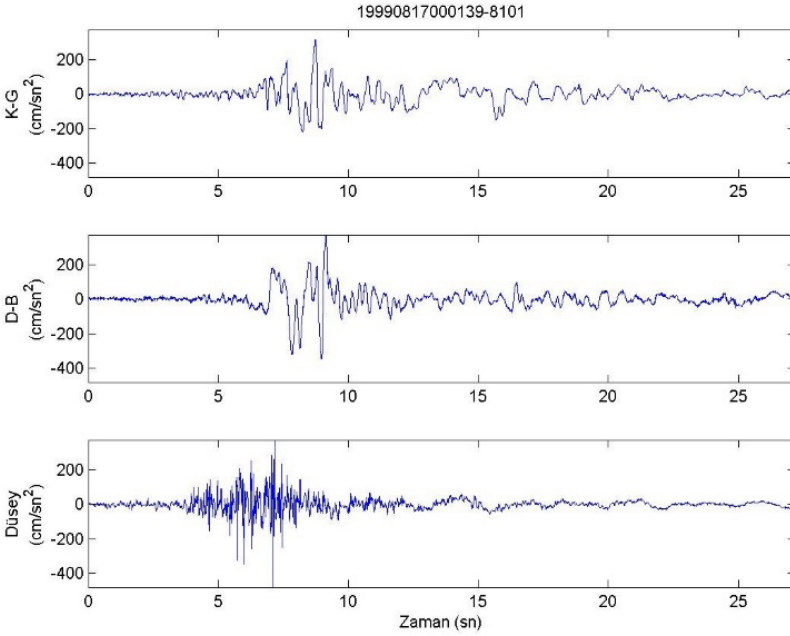
Ancak bazı depremlerde (Kocaeli, 1999; Düzce, 1999; Kahramanmaraş, 2023) fayın kırılma hızının kayma dalga hızından daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. Bu duruma süper kayma kırılması (süper shear rupture) denilmekte ve bu durumda ötelenme etkisi gözlenmektedir. Yatay atımlı faylarda ötelenme etkisi faya paralel yönde, düşey atımlı faylarda ise faya normal yönde oluşmaktadır (Stewart ve diğ., 2001). 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremini kaydeden SKR (Sakarya), IZT (İzmit) ve YPT (Yarımca) istasyonlarına ait ivme zaman serilerinden hesaplanan hız ve yer değiştirme kayıtlarında faya paralel bileşende oluşan ötelenme etkisi şekil 7’de verilmiştir. Ötelenme yüzey kırığı ile aynı doğrultudaki doğu-batı bileşenli kayıtlarda gözlenmiştir. İstasyonlara ait zemin sınıfı Ec8 sırasıyla, C, B ve D kategorilerinde yer almaktadır.



Şekil 7: Kocaeli depremini kaydeden SKR, YPT ve IZT istasyonlarındaki ötelenme etkisi.

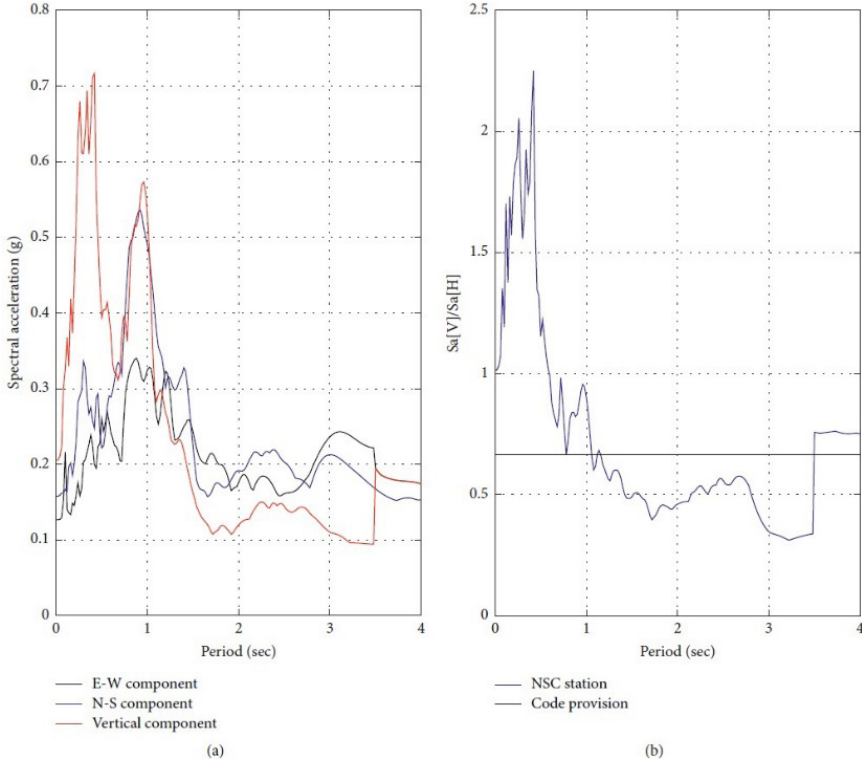
2.3. Düşey bölü Yatay Spektral Oran

Yakın alan yer hareketinin düşey bileşeninin özellikleri, yatay bileşenden belirgin bir biçimde farklılık göstermektedir. Yatay bileşenlerdeki kayıtlarda uzun periyotlu sinyaller gözlenirken, düşey bileşen yüksek frekans içeriğine sahiptir. Kocaeli depremini kaydeden 8101 numaralı Düzce istasyonunda bu farklılık rahatlıkla gözlenmektedir (Şekil 8).



Şekil 8: Kocaeli depremini kaydeden 8101 numaralı istasyona ait ivme-zaman serisi.

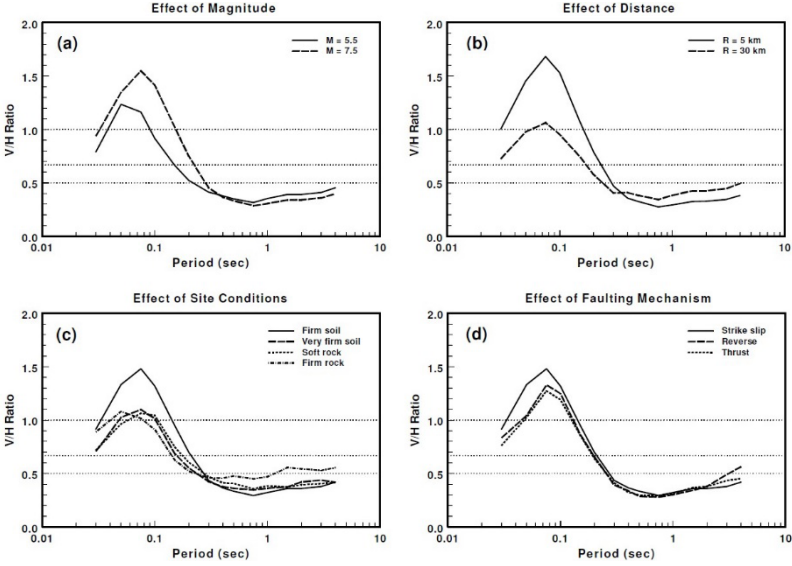
Düşey yer hareketini göz ardı eden yaklaşım iki sebepten ötürü kaynaklanır. Birincisi sismolojik temele dayanmakta ve genellikle düşey ivmenin, yatay ivmeden daha küçük olmasından kaynaklanmaktadır. İkincisi yapısal özelliklerle ilgilidir ve uygun şekilde projelendirilip inşa edilmiş yapılarda düşey yüklere karşı büyük bir güvenlik faktörünün mevcut olduğu fikrine dayanır. Ancak yakın geçmişte meydana gelen Northridge (1994, ABD), Kobe (1995, Japonya), Gorkha (Nepal, 2015) depremlerinde alışılmadık ve varsayılan 2/3 değerinin üzerinde düşey bölü yatay (D/Y) ivme tepki spektrum oranları hesaplanmıştır (Gautam ve Baruwal, 2021) (Şekil 9).



Şekil 9: a)2015 Gorkha depremine ait ivme tepki spektrumları b)D/Y spektral oran

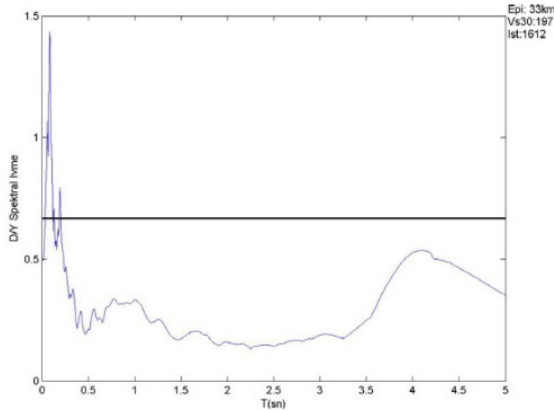
Yakın alan düşey yer hareketleri, depreme dayanıklı tasarım ilkelerinin en son şeklinin uygulandığı bölgelerde ve yapılarda dahi, yatay bileşenin sebep olabileceğinden çok daha ağır ve doğrudan düşey bileşene atfedilebilecek yıkımlar meydana getirmiştir (Papazoglou ve Elnashai, 1996).

D/Y spektral oran üzerinde faylanma türü, zemin koşulları, büyüklük ve mesafe incelendiğinde, kısa periyotlarda depremin büyüklüğünün ve kaynak uzaklığının etkisinin oldukça büyük olduğu belirlenmiştir. Şekil 10a ve 10b’de D/Y spektral oran üzerinde uzaklık ve büyüklüğün etkisi gösterilmiştir. Şekil 10c’de D/Y oranların farklı zemin kategorilerindeki değişimi verilmiştir. Kısa periyotlarda sert zeminde diğer zemin türlerine göre en büyük D/Y oran gözlenmekte iken uzun periyotlarda farklı zemin türlerinde bu oran birbirine yakındır. Şekil 10d’de faylanma mekanizmasının oran üzerindeki değeri gösterilmiştir. Doğrultu atımlı, ters ve bindirme faylanmalarda uzun periyotlarda değerler hemen hemen aynı iken kısa periyotta doğrultu atımlı faylanma türünde D/Y oran değeri daha yüksek elde edilmektedir (Bozorgnia ve Campbell, 2003).

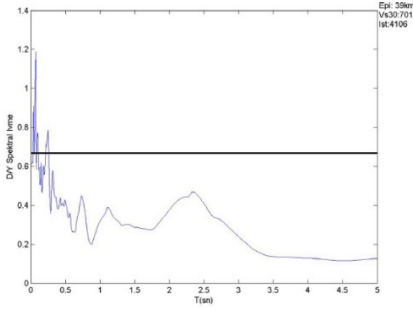


Şekil 10: a) D/Y spektral oran üzerinde büyüklüğün etkisi b) uzaklığın etkisi
c) zemin koşullarının etkisi d) faylanma mekanizmasının etkisi
(Bozorgnia ve Campbell, 2003).

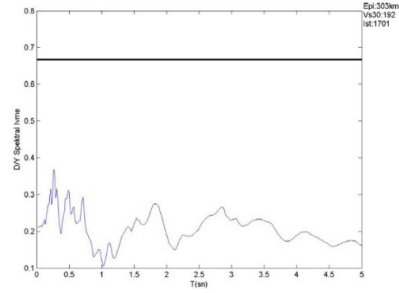
Şekil 11-12'de Kocaeli depremini kaydeden 1612 ve 4106 numaralı yakın alan istasyonlara ait D/Y spektral oranlar verilmiştir. İstasyonların uzaklıkları sırasıyla 33 ve 39 km'dir. 1612 ve 4106 numaralı istasyonlar yüksek frekanslarda yani 0.5 saniyeden daha kısa periyotlarda deprem mühendisliğince kabul edilen 2/3 oranını aşmaktadır. Şekil 13'te aynı depremi kaydeden uzak alan istasyonu 1701 gösterilmiştir. Dış merkez uzaklığı 303 km'dir. D/Y spektral oranın yakın alan istasyonlarına kıyasla çok daha düşük olduğu görülmektedir (Fırat., 2017).



Şekil 11: 1612 numaralı istasyona ait D/Y spektral oran.

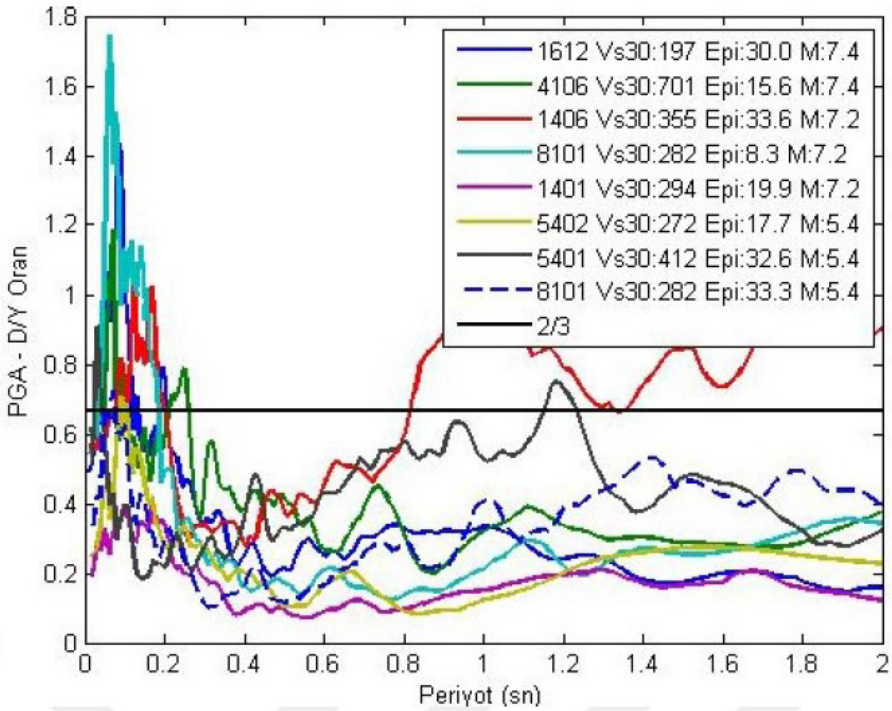


Şekil 12: 4106 numaralı istasyona ait D/Y spektral oran.



Şekil 13: 1701 numaralı istasyona ait D/Y spektral oran.

17 Ağustos Kocaeli, 12 Kasım Düzce 1999 ve 28 Ağustos 2000 Sakarya depremlerini kaydeden yakın kaynak alan istasyonlarının D/Y spektral oranları Şekil 14’te verilmiştir. Burada D/Y oranının deprem mühendisliğince kabul edilen $2/3$ oranını 0.4sn ve daha kısa periyotlarda aştığı görülmektedir.



Şekil 14: Farklı büyüklükteki depremlere ait yakın alan istasyonlardaki D/Y spektral oranlar.

3. Sonuç

D/Y oran yerel zemin koşullarına, kaynaktan uzaklığa ve periyoda bağlı olarak değişirken, büyüklük ve faylanma mekanizması ile zayıf bir ilişkisi vardır. Kawase ve Aki (1990) ve Silva (1997)'ye göre, büyük uzaklıklarda, SV dalgası kritik açıdan daha büyük açılarla gelmekte ve yüzeyde etkili bir şekilde ilerlemediğinden ve düşey bileşende direk gelen P dalgası hakim olduğundan D/Y oranı büyümektedir. Sert zeminlerde ise, bu etkinin azalmasını Silva (1997) şu şekilde açıklamaktadır; daha küçük S dalga hızı direnci ve daha küçük S dalga ve P dalga hız değişimi sonucu S'den P'ye enerji dönüşümünün daha az olması sonucu D/Y oranı da azalmaktadır.

Ötelenme, yönsellik etkileri ile D/Y spektral oranlar mühendisler ve bilim insanları tarafından deprem dayanıklı yapılar tasarlanırken dikkate alınmalıdır. Özellikle düşey deprem yüküne karşı yapının kendi ağırlığının yeterli olacağı düşünülen alanlarda bu geçerlidir. Bu etkilerin hesaba katılmadığı veya yanlış hesaplandığı durumlarda, yapılar depremde daha savunmasız hale gelebilir ve ciddi hasar görebilirler.

Kaynakça

Ansary, M.H. and Yamazaki, F. (1998). Behavior of horizontal and vertical SV at JMA sites, Japan. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE* 124, 606-616.

Bozorgnia, Y and Campbell, K.W. (2003). The vertical-to-horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified V/H and vertical design spectra. *Journal of Earthquake Engineering*, 2003.

Fırat, B. (2014). *Seismic Hazard In Marmara Region, 7th Workshop on NonLinear Dynamics and Earthquake Prediction*, Trieste, ITALYA, 29 Ağustos-11 Eylül 2004, pp.14-14.

Fırat, B. (2017). Marmara Bölgesi'nin Kuvvetli Yer Hareketi Karakteristiklerinin Belirlenmesi, (Doktora Tezi), İstanbul Üniversitesi.

Campbell, K.W. (1982). A Study of the near-source behavior of peak vertical acceleration, *EOS*, Vol. 63, p.1,037.

Elgamal, A. ve He, L. (2003). Vertical Earthquake Ground Motion Records: An Overview. *Journal Of Earthquake Engineering*.

Gautam, D ve Baruwat, R. (2021). Strong Far-Field Vertical Excitation and Building Damage: A Systematic Review and Future Avenues. *Advances in Civil Engineering*, Volume 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/8819064>

Grimaz, S. ve Malizan, P. (2014). Near field domain effects and their consideration in the international and Italian seismic codes, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 2014.

Kawase, H. ve Aki, K. (1990). Topography effect at the critical SV-wave incidence: Possible explanation of damage pattern by the Whittier Narrows California earthquake of 1 October 1987. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80, 1-30.

Lay, T. ve Wallace ,T. C. (1995). *Modern global seismology*. 521 pp., Academic Press.

Papazoglou, A. J. ve Elnashai, A. S. (1996). Analytical and field evidence of the damaging effect of vertical earthquake ground motion, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, 1109-1137.

Silva, W. (1997). Characteristics of vertical strong ground motions for applications to engineering design. <http://www.pacificengineering.org/nceer/Characteristics%20of%20vertical%20strong%20ground%20motions.pdf>.

Somerville, P.G., Smith, N.F., Graves, R.W. ve Abrahamson, N.A. (1997). Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological Research Letters*. 68, 199–222.

BÖLÜM VII

BUTRALİNİN CAMSI KARBON ELEKTROTLA DİFERANSİYEL PULS VOLTAMETRİSİ YÖNTEMİ KULLANILARAK ELEKTROKİMYASAL ANALİZİ

*Electrochemical Analysis of Butraline with Glassy Carbon
Electrode by Differential Pulse Voltammetry Method*

Berna KOÇAK¹ & Hüseyin ÇELİKKAN

¹(Dr. Öğr. Üyesi), Munzur Üniversitesi Tunceli Meslek Yüksekokulu,

Tunceli Türkiye

E-mail: bernakocak@munzur.edu.tr

ORCID:0000-0002-2398-1492

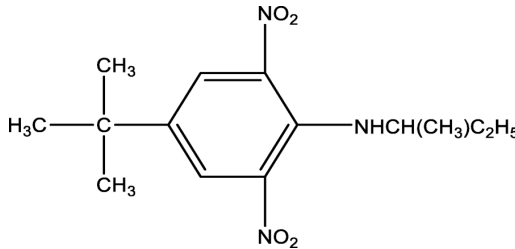
²(Prof. Dr.), Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi, Ankara, Türkiye

E-mail: celikkan@gazi.edu.tr

ORCID:0000-0002-8016-308

1. Giriş

Butralin, 4-(1,1-dimetiletil)-(1-metilpropil)-2,6-dinitrobenzenamin yapısına sahip olan dinitroanalin grubu bir herisittir (Wang ve ark., 2023).



Şekil 1. Butralinin kimyasal yapısı (Yang, ve ark., 2020)

Butralin pamuk, pirinç, mısır , ayçiçeği, yer fıstığı, karpuz, pancar, şeker kamışı ve sebze mahsullerinde yıllık geniş yapraklı yabancı otların ve otların çıkış öncesi kontrolü için toprağa yada doğrudan suya uygulanarak kullanılır (Gerent, ve ark., 2021; Chen ve ark., 2023; Wang ve ark., 2023). Butralinin geniş yapraklı yabancı otların kontrollünde %70'in üzerinde başarı gösteriği görülmüştür (Chen ve ark., 2023). Bu olumlu etkisinin yanında butralinin uzun süreli ve kontrolsüz kullanımı, butralinin kararlı kimyasal özelliği ve uzun kalıntı süresinden dolayı su ve toprakta butralinin bulunmasına neden olur(Yangve ark., 2020;Monteiro ve ark., 2023). Bu durum insan sağlığı ve çevre için tehdit oluşturmaktadır. Bunun yanında son zamanlarda yapılan çalışmalarda butralin ile tedavi edilen dişi farelerde DNA, böbrek ve karaciğer hasarına sebep olduğu görülmüştür (Xu ve ark., 2022). Bu nedenle butralinin analizi çok önemlidir. Literatürde butralinin analizi kromatografik(Wang ve ark., 2022; Liu, ve ark., 2004; Qinghang ve ark., 2021) ve elektrokimyasal (Gerentve ark., 2021; Monteiro ve ark., 2023) yöntemlerle yapılmıştır. Elektroanalitik yöntemler, kromatografik yöntemlere göre daha kolay ve pahalı cihazlara gerek duyulmadan yapılan yöntemlerdir. Bunun yanında elektrokimyasal yöntemler için herhangi bir ön derişime ihtiyaç duyulmadan az miktarda numune miktarıyla analiz yapmak mümkündür(Dindar ve ark., 2021; Kocak, ve ark., 2023). Bu nedenle bu çalışmada butralinin analiz için elektrokimyasal yöntem tercih edilmiştir. Bu çalışmanın amacı, butralinin herhangi bir ön deriştirme işlemi olmadan doğrudan camsı karbon elektrot kullanarak hızlı, basit ve seçici bir şekilde elektrokimyasal analizinin gerçekleştirilmesiydi.

2. Deneysel Çalışmalar

2.1. Cihazlar ve Elektrotlar

Deneysel çalışmalar boyunca yapılan voltametrik ölçümler, İviumPocketstatpotansiyotatla (potentiostat/galvanostatimpedanceanalyzer) yapıldı ve sonuçlar ivium yazılımı incelenmiştir. Stok çözeltilerin ve tampon çözeltilerin hazırlanmasında kullanılan deiyonize su, milliporedirect-3QV marka cihazdan temin edilmiştir. pH ölçümleri Ohausstarter 3000 Bench pH metre ile tartım işlemleri ise Bell marka ($\pm 0,0001$ g hassasiyetinde) hassas terazi kullanılarak yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda üçlü elektrot sistemi kullanılmıştır. Çalışma elektrodu olarak camsı karbon elektrot (CHI104), referans elektrot olarak Ag/AgCl (3 M NaCl) elektrot (MF-2052, BASİ) ve karşıt elektrot olarak ise Pt tel kullanılmıştır.

2.2. Kimyasallar ve Çözeltiler

Deneysel çalışmalar sırasında kullanılan bütün kimyasallar analitik saflıkta olup (asetonitril, sodyum hidroksit, sülfürik asit, hidroklorik asit, sodyum hidrojen fosfat, sodyum dihidrojen fosfat, kalsiyumklorür, kurşun(II) nitrat, nikelnitrat, kobalt(II) nitrat, bakır(II) nitrat) Merck firmasından temin edilmiştir. Butralin %99 saflıkta olup Dr.Ehrenstorfer GmbH markadır.

Butralin stok çözeltisi $1.0 \times 10^{-2} \text{M}$ konsantrasyonunda olup asetonitril içerisinde hazırlanmıştır. Hazırlan bu çözelti $+4^\circ\text{C}$ 'de buzdolabında saklanmıştır. Butralin elektrokimyasal analizi için en iyi çalışma ortamını belirlemek amacıyla pH(1-13) arasında çözeltiler hazırlanmıştır. pH 1 için 0,1 M H_2SO_4 , pH 2 için 0,01 M H_2SO_4 çözeltisi, pH 3 ile 12 aralığı için fosfat tamponu ve pH 13 için 0,1 M NaOH çözeltisi kullanıldı.

2.3. Elektrot Yüzeyinin Temizlenmesi

Elektrokimyasal çalışmalarda, elde edilen sonuçların tekrar edilebilirliği çok önemlidir. Bu nedenle butralinin elektrokimyasal çalışmalarında kullanılan camsi karbon elektrodun (CKE) yüzeyi her deneyden önce temizlenmiştir. Temizleme işlemi parlatma pedi üzerine dökülen $0,05 \mu\text{m}$ Al_2O_3 (alümina)'in deiyonize su ile bulamaç haline getirilerek yapılır. Camsi karbon elektrodun yüzeyi bu bulamaç üzerinde 8 çizilecek şekilde dairesel hareketler yapılarak temizlendikten sonra deiyonize su ile yıkanır ve elektrot yüzeyindeki alümina kalıntısını uzaklaştırmak amacıyla camsi karbon elektrot 5 dk boyunca ultrasonik banyoda bekletilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

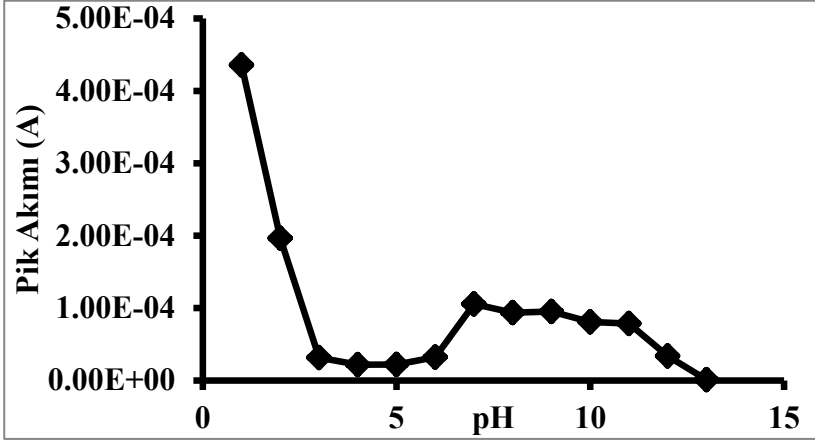
3.1. Butralinin Elektrokimyasal Davranışının İncelenmesi

Butralinin elektrokimyasal davranışının incelenmesi CKE ile DV yöntemi kullanılarak yapılmıştır.

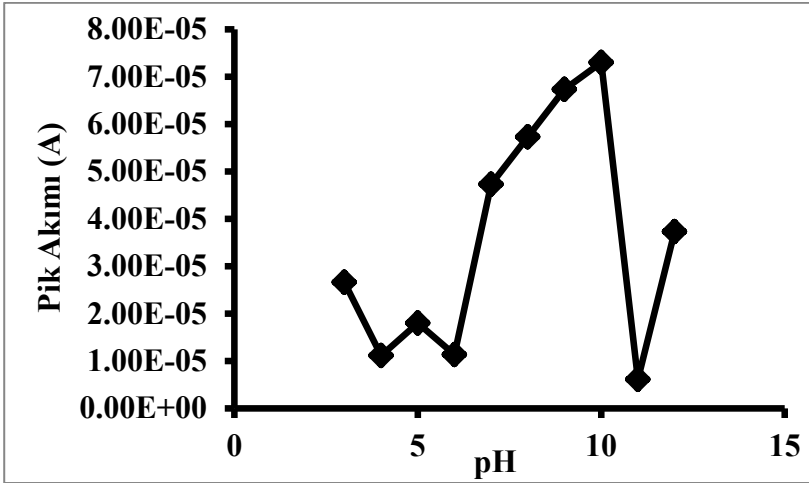
3.2. pH 'ın Butralinin Pik Akımı ve Pik Potansiyeline Etkisi

Butralinin çalışma ortamının belirlenmesi amacıyla diferansiyel puls-voltametri (DPV) yöntemi kullanılmıştır. Burada butralinin pik akımı ve pik potansiyeline pH'ın etkisi incelenmiştir. Çalışma ortamı olarak 0,1M H_2SO_4 çözeltisi (pH=1), 0,01 M H_2SO_4 çözeltisi (pH=2), fosfat tamponu (pH=3-12) ve 0,1M NaOH (pH=13) çözeltisi kullanılmıştır. Butraline ait iki pik akımı görülmüştür ve pH'ın etkisi bu pik akımlarına göre değerlendirilmiştir. Butra-

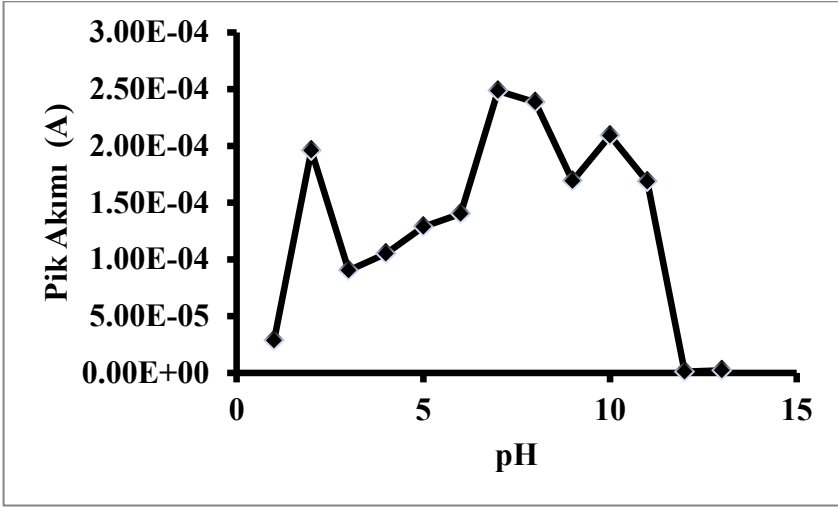
linin 1. pik akımı (Şekil 2.), 2.pik akımı (Şekil 3.) ve toplam pik akımının (Şekil 4.) pH ile değişimi incelendiğinde toplam pik akımının pH ile değişiminde en yüksek pik akımının pH 7 fosfat tamponunda görüldüğü tespit edilmiştir. Bu nedenle bundan sonraki çalışmalarda pH 7 fosfat tamponu tercih edilmiştir.



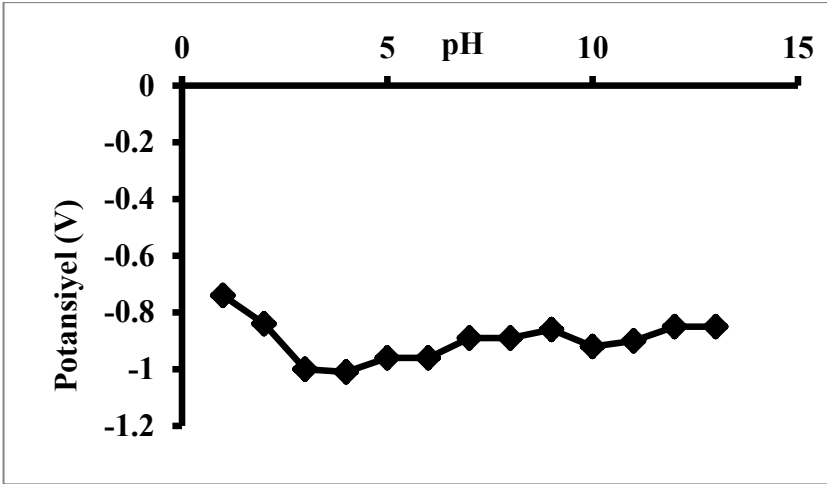
Şekil 2. $8,0 \times 10^{-5}$ M butralinin 1. pik akımına pH'nin etkisi (CKE üzerinde, DPV yöntemiyle)



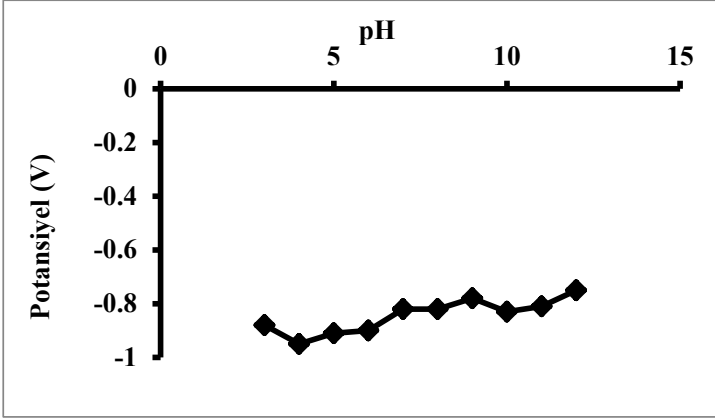
Şekil 3. $8,0 \times 10^{-5}$ M butralinin 2. pik akımına pH'nin etkisi (CKE üzerinde, DPV yöntemiyle)



Şekil 4. $8,0 \times 10^{-5} \text{M}$ butralinin toplam pik akımına pH'nin etkisi (CKE üzerinde, DPV yöntemiyle)



Şekil 5. $8,0 \times 10^{-5} \text{M}$ butralinin 1. pik potansiyeline pH'nin etkisi (CKE üzerinde, DPV yöntemiyle)



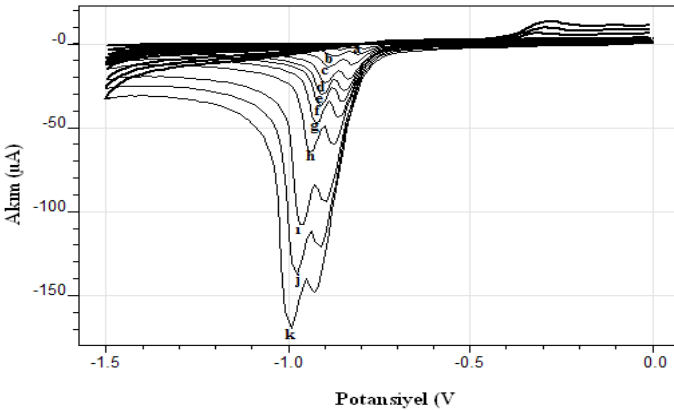
Şekil 6. $8,0 \times 10^{-5} \text{M}$ butralinin 2. pik potansiyeline pH'ın etkisi (CKE üzerinde, DPV yöntemiyle)

Şekil 5. ve şekil 6.'da görüldüğü üzere pH asidik bölgeden bazik bölgeye gittikçe 1. pik potansiyeli ve 2. pik potansiyelinde azda olsa bir artış görülmüştür.

3.3. Tarama Hızın Butralinin Pik Akımına Etkisi

Tarama hızının butralinin pik akımı üzerine etkisini incelemek amacıyla farklı tarama hızlarında (5 mV s^{-1} ile 1000 mV s^{-1}) butralinin dönüştürümlü voltamogramları (DV) alınmıştır (Şekil 7.)

$8 \times 10^{-5} \text{ M}$ butralinin DV'ları pH 7,0 fosfat tamponu içerisinde 0 V 'dan başlayarak $-1,5 \text{ V}$ 'a kadar negatif yönde potansiyel taraması yapılmıştır. Şekil 7.'de görüldüğü üzere iki pik akımı görülmüştür.

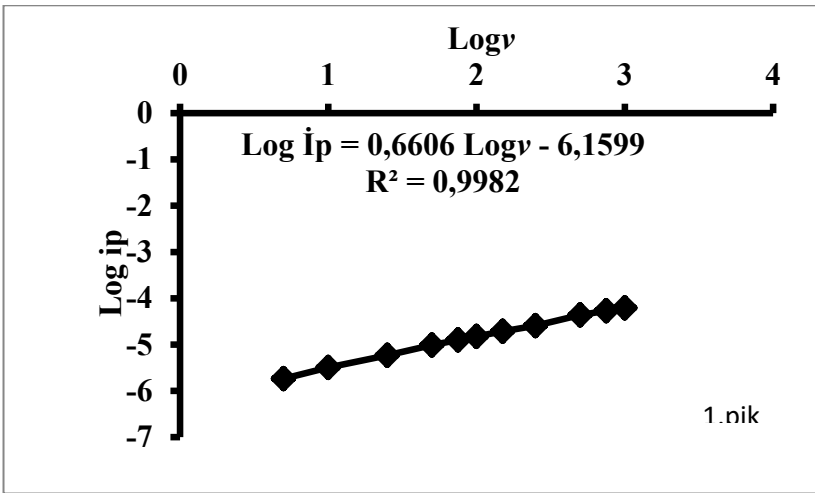


Şekil 7. $8 \times 10^{-5} \text{ M}$ butralinin CKE üzerinde pH 7 fosfat tamponu içerisinde alınan $5 - 1000 \text{ mV s}^{-1}$ tarama hızı aralığındaki DV'leri ;a)5, b)10, c)25, d)50, e) 75, f)100, g)150, h)250, ı)500, j)750, k)1000 mV s^{-1} .

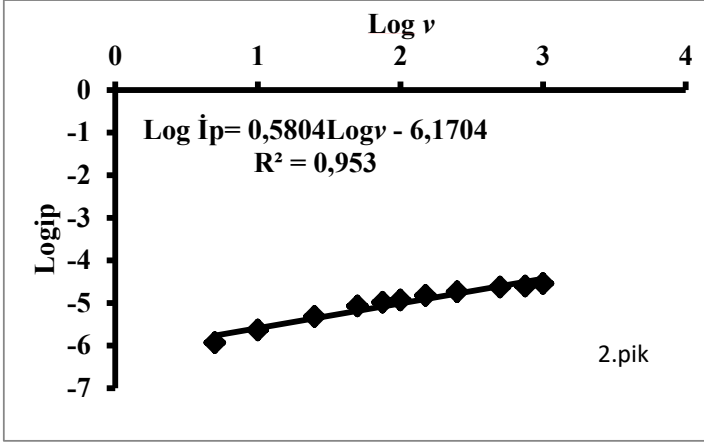
Çizelge 1. Farklı tarama hızlarında ($5 - 1000 \text{ mV s}^{-1}$), 8×10^{-5} Mbutralinin CKE üzerinde pH 7 fosfat tamponunda alınan DV ait pik potansiyelleri (1.potansiyel ve 2. potansiyel) ve akımları

Tarama Hızı (mV s^{-1})	1. Pik Potansiyeli (V)	1. Pik akımı (μA)	2. Pik Potansiyeli (V)	2. Pik akımı (μA)
5	-0,86	1,835	-0,796	1,171
10	-0,874	3,205	-0,81	2,320
25	-0,89	5,853	-0,826	4,794
50	-0,9	9,731	-0,838	8,476
75	-0,91	12,57	-0,85	10,38
100	-0,916	14,97	-0,856	11,76
150	-0,926	19,30	-0,866	1497
250	-0,944	25,62	-0,88	18,28
500	-0,968	43,61	-0,904	23,60
750	-0,984	53,60	-0,92	24,86
1000	-1,0	61,97	-0,93	28,52

Butralin CKE üzerindeki davranışının difüzyon mu yoksa absorbsiyon kontrollü olup olmadığına karar vermek için 1.pik akımı ve 2. pik akımı için tarama hızının logaritmasına ($\text{Log } v$) karşı pik akımının logaritması ($\text{Log } i_p$) grafiğe geçirilmiştir.

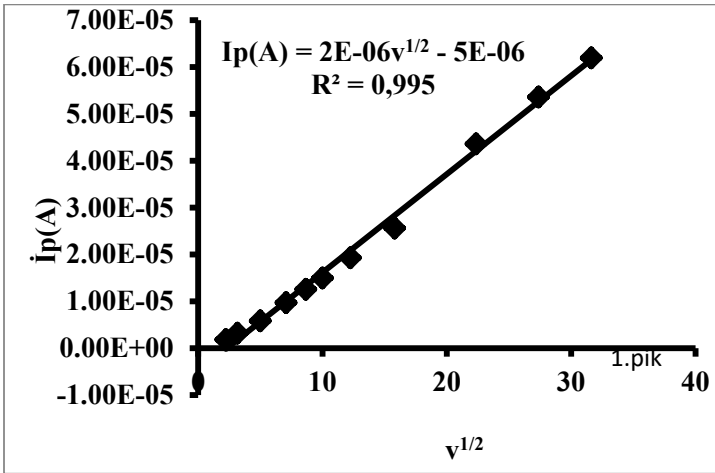


Şekil 8. 8×10^{-5} M butralinin 1.pik akımı için farklı tarama hızlarında alınan DV elde edilen $\text{Log } i_p - \text{Log } v$ grafiği (GCE üzerinde, pH 7,00 fosfat tamponunda)

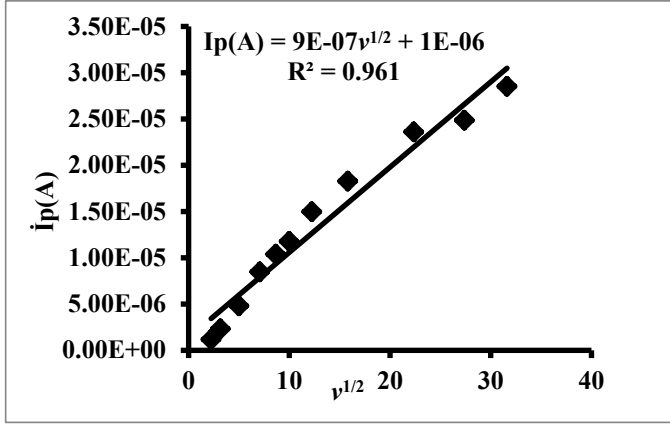


Şekil 9. 8×10^{-5} M butralinin 2. pik akımı için farklı tarama hızlarında alınan DV elde edilen Logip – Logv grafiği (GCE üzerinde, pH 7,00 fosfat tamponunda)

1. Pik akımının logaritma değerlerinin, tarama hızının logaritma değerleri ile değişimi incelendiğinde (Logip ve Logv arasında) eğimin 0,6606 olduğu, 2. pik akımı için ise 0,5804 olduğu Şekil 8. ve Şekil 9.'da açıkça görülmektedir. Logip-Logv arasındaki eğimin 1 yakın olması butralinin CKE üzerindeki davranışının adsorbisyon, 0,5' e yakın olması difüzyon kontrollü olduğunu gösterir (Laviron, E. 1979). Burada butralinin 1.pik akımı ve 2.pik akımı için çizilen Logip-Logv grafiklerin (Şekil 8. ve Şekil 9.) eğiminden butralin CKE üzerindeki davranışının difüzyon kontrollü olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 10. 8×10^{-5} M butralinin 1. pik akımı için farklı tarama hızlarında alınan DV elde edilen $i_p - v^{1/2}$ grafiği (GCE üzerinde, pH 7,00 fosfat tamponunda)

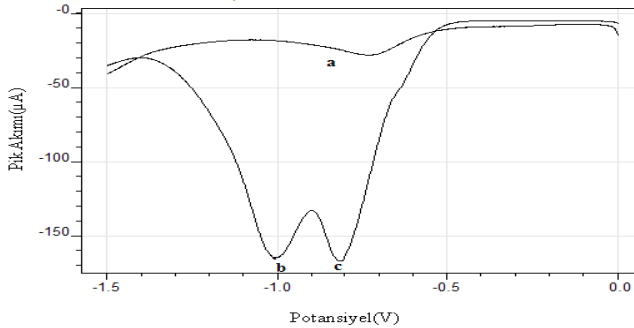


Şekil 11. 8×10^{-5} M butralinin 1. pik akımı için farklı tarama hızlarında alınan DV elde edilen $v^{1/2} - i_p$ grafiği (GCE üzerinde, pH 7,00 fosfat tamponunda)

Bunun yanında butralinin CKE üzerindeki davranışının difüzyon kontrollü olduğunu göstermek amacıyla pik akımı ve tarama hızını karekökü arasındaki ilişki incelenmiştir. Şekil 10 ve Şekil 11.de görüldüğü üzere 1. pik akımı ve 2. pik akımı için $i_p - v^{1/2}$ grafiklerinin doğrusal olması butralinin elektrot yüzeyindeki davranışının difüzyon kontrollü olduğunu gösterir (Sturm ve ark., 1997).

3.4. Butralinin DPV Yöntemi İle Elektrokimyasal Analizi

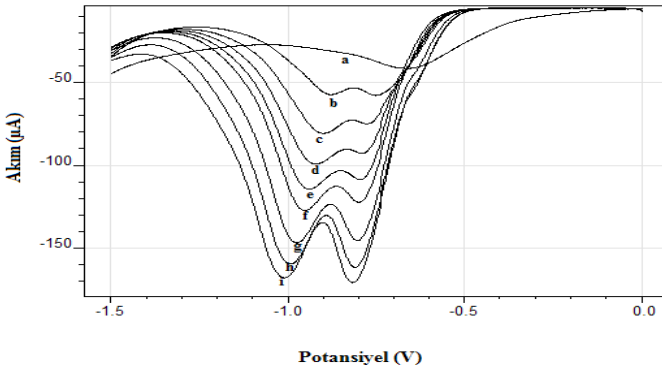
Butralinin pH 7 fosfat tamponu, GCE üzerinde elektrokimyasal davranışı DPV ile incelendiğinde, DV'de olduğu gibi iki pik akımı gözlenmiştir. 1. pik akımı $-1,004 \pm 0,544V$ potansiyelde gözlenirken 2. pik akımının potansiyeli $-0,814 \pm 0,860V$ olarak gözlenmiştir



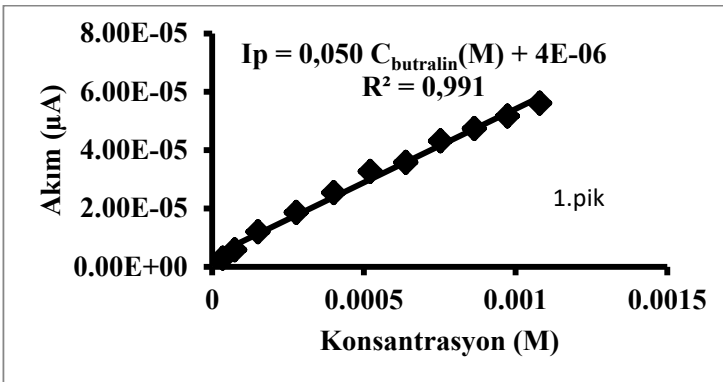
Şekil 12. $1,184 \times 10^{-3}$ Mbutralinin pH 7 fosfat tamponunda CKE üzerinde alınmış DPV. a) Tampon çözelti(%25asetonitril) b)1. pik akımı, c) 2. pik akımı,

3.5. Butralinin DPV Yöntemiyle, CKE'la Çalışma Aralığının Belirlenmesi

Butralinin pik akımları ve konsantrasyon arasındaki ilişki CKE üzerinde DPV yöntemi ile incelenmiştir. Butralinin farklı konsantrasyonlarda alınan DPV'ları Şekil 12.'de gösterilmektedir. Bu DPV kullanılarak elde edilen pik akımlarından yararlanarak kalibrasyon doğrusu çizilmiştir. Kalibrasyon doğrusu butralinin 1. pik akımına ve 2. pik akımına göre ayrı ayrı çizilerek çalışma aralıkları belirlenmiştir. Butralinin 1. pik akımına göre çizilen kalibrasyon doğrusu Şekil 13.'de de gösterilmektedir. Bu kalibrasyon doğrusundan yararlanarak 1. pik akımı için çalışma aralığı $3,50 \times 10^{-5} \text{ M}$ ile $0,00108 \text{ M}$ olarak belirlenmiştir.

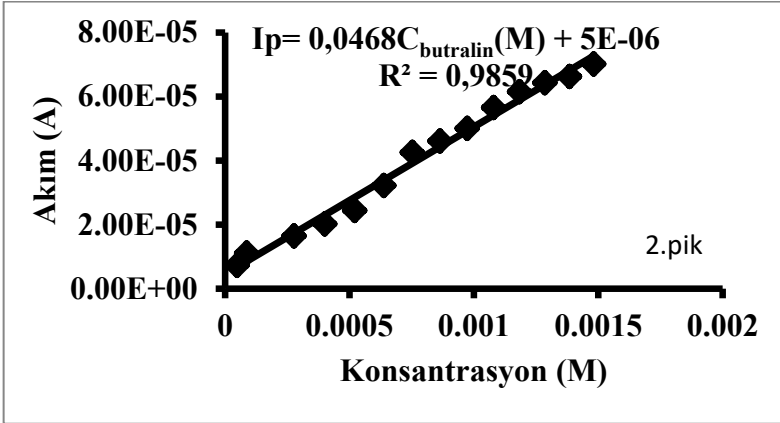


Şekil 13. Farklı konsantrasyonlardaki butralinin CKE'la pH 7 fosfat tamponunda (%25asetonitril içerisinde) DPV yöntemiyle alınan voltamogramları; a) destek elektrolit b) $1,51 \times 10^{-4}$ c) $2,78 \times 10^{-4}$ d) $4,01 \times 10^{-4}$ e) $5,21 \times 10^{-4}$ f) $6,38 \times 10^{-4}$ g) $8,64 \times 10^{-4}$ h) $1,08 \times 10^{-4}$ i) $1,285 \times 10^{-4} \text{ M}$.



Şekil 14. Butralinin konsantrasyona karşı pik akımı grafiği (1. pik akımı, CKE'la pH 7 fosfat tamponundaki (%25asetonitril)).

Butralinin 2. pik akımına göre kalibrasyon grafiği Şekil 15'de gösterilmektedir. Bu kalibrasyon grafinden yararlanarak 2. pik akımı için çalışma aralığı $4,849 \times 10^{-5}$ M ile 0,00129 M olarak belirlenmiştir.



Şekil 15. Butralinin konsantrasyona karşı pik akımı grafiği (2.pik akımı için, CKE'la pH 7 fosfat tamponundaki(%25asetonitril)).

3.6. Butralin'in Gözlenebilirlik Sınırı (LOD) ve Tayin Edilebilirlik Sınırının (LOQ) Parametrelerinin Hesaplanması.

Kalibrasyon grafiğindeki en düşük konsantrasyondan bir sonraki konsantrasyonda (1×10^{-4} M) 5 ayrı hücrede 3'er kez tekrarlanan voltamogramlar alındı ve her hücrede alınan voltamogramlarının pik akımlarının ortalaması alınarak bunların ortalaması ve standart sapması hesaplanmıştır. LOD değeri $3s/m$ formülünden, LOQ değeri ise $10s/m$ formülünde hesaplanmıştır. 1.pik için LOD değeri $4,435 \times 10^{-5}$ M iken LOQ değeri $1,48 \times 10^{-4}$ M olarak bulunmuştur. 2.pik için LOD değeri $1,897 \times 10^{-4}$ M iken LOQ değeri $6,32 \times 10^{-4}$ M olarak bulunmuştur. 1×10^{-4} M butralinin CKE üzerinde 1.ve 2. pik akımının ve pik potansiyelinin günler arası tekrarlanabilirliği incelenmiştir. 1.pik akımı için yüzde bağıl standart sapma(%BSS) 1,92 iken 2. pik akımı için %BSS 9,33 olarak bulunmuştur. 1. pik potansiyeli için %BSS 0,785 iken 2.pik potansiyeli için %BSS 0,663 olarak bulunmuştur. 1×10^{-4} M butralinin 1.pik ve 2. pik akımının ve pik potansiyelinin gün içi tekrarlanabilirliği incelenmiştir. 1.pik akımı için % BSS 2,81 iken 2.pik akımı için %BSS 3,07 olarak bulunmuştur. 1.pik potansiyeli için %BSS 0,54 iken 2.pik potansiyeli için %BSS 0,86 olarak bulunmuştur. Buradabutralin CKE üzerinde 1.pik akımının ve potansiyelinin gün içi ve günlerarasitekraredilebilirliğinin %5'in altında olduğu görülmektedir.

Bu elektrotun gün içi ve günlerarası tekraredilebilirliğinin iyi olduğunu gösterir (Kocak ve ark.,2023)

3.7. Girişim Etkisi

Butralin analizi için geliştirilen yöntemin seçiciliğini belirlemek için toprak ve su içerisinde bulunan bazı metal katyonların butraline girişim etkisi incelenmiştir. Bunu için yapılan çalışmalarda herhangi bir metal katyonu olmadığında DPV ile alınan pik akımlarının metal katyonları varlığında alınan pik akımlarına oranı % olarak verilmiştir. Girişim etkisini incelemek için $1 \times 10^{-4}M$ konsantrasyonundaki butraline $1 \times 10^{-4}M$ ve $5 \times 10^{-4}M$ metal katyonları ilave edilerek girişim etkisi incelenmiştir. Girişim etkisi incelenen metal katyonları Co(II), Ni(II), Cu(II), Pb(II), Ca(II)'dur. Bu çizelge 2'de gösterilmiştir. Çizelge 2. incelendiğinde butralin ile metal katyonlarının oranı (1:1) olduğunda seçiciliğinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Butralin metal katyonlarının oranı (1:5) olduğunda bu yöntem için girişim yapabileceği görülmektedir.

Çizelge 2. Butraline bazı metal katyonlarının girişim etkisi

Girişim etkisi incelenen katyonlar	$1 \times 10^{-4}M$ butraline metal katyonlarının girişim etkisi (1.pik akımı için)	$1 \times 10^{-4}M$ butraline metal katyonlarının girişim etkisi (2.pik akımı için)	$5 \times 10^{-4}M$ butraline metal katyonlarının girişim etkisi (1. pik akımı için)	$5 \times 10^{-4}M$ butraline metal katyonlarının girişim etkisi (2. pik akımı için)
Cu ⁺²	% 100,34	% 120,02	% 129,35	% 135
Ni ⁺²	%115	% 120	% 146	% 126
Co ⁺²	%107	%95,6	%123	% 102
Ca ⁺²	% 100	%98,5	%103	%99
Pb ⁺²	%114	%104	%146	%109

4. Sonuç

Bu çalışmada dinitroanalin grubu bir herbisit olan butralinin elektrokimyasal analizi CKE üzerinde gerçekleştirilmiştir. Butralin CKE üzerindeki davranışı DV ile elektrokimyasal analizi ise DPV yöntemi ile yapılmıştır. Butralin optimum deney şartları altında çalışma aralığı, LOD, LOQ ve gün içi ve günlerarası tekrar edilebilirliği belirlenmiştir. Bunun yanında butralinin elektrokimyasal analizine toprak ve suda bulunan bazı metallerin girişim etkisi incelenmiştir. Butralin ile

metal katyonlarının oranı (1:1) olduğunda seçiciliğinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Sonuçlar CKE üzerinde DPV yöntemi ile butralinin toprak ve su numunelerinde kullanılabileceğini göstermektedir. Bunun yanında butralinin CKE ile elektrokimyasal analizi ilk defa bu çalışmada yapılmıştır

Kaynakça

Wang, Q., Li, J., Li, R., Pan, X., Dong, F., Wu, X. (2023). Rapid elimination of butralin residues on tobacco, in water and soils by newly isolated *Bacillus* sp. LY05. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(1), 109213.

Gerent, G. G., Santana, E. R., Martins, E. C., Spinelli, A. (2021). A non-mercury electrode for the voltammetric determination of butralin in foods. *Food Chemistry*, 343, 128419.

Chen, Z., Kang, S., Ren, X., Cheng, Y., Li, W., Zhao, L. (2023). Large-scale fate profiling of butralin between cultivated and processed garlics for multi-risk estimations. *Science of The Total Environment*, 873, 162369.

Yang, L., Song, X., Zhou, X., Zhou, Y., Zhou, Y., Gong, D., Chen, L. (2020). Residual behavior and risk assessment of butralin in peanut fields. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 1-14.

Refaie, A. A., Ramadan, A., Sabry, N. M., Khalil, W. K., Mossa, A. T. H. (2020). Over-gene expression in the apoptotic, oxidative damage and liver injure in female rats exposed to butralin. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 31383-31393.

Xu, X., Guo, X., Song, S., Wu, A., Xu, C., Kuang, H., Liu, L. (2022). Gold-based strip sensor for the rapid and sensitive detection of butralin in tomatoes and peppers. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 39(7), 1255-1264.

Monteiro, M. C., Winiarski, J. P., Santana, E. R., Szpoganicz, B., & Vieira, I. C. (2023). Ratiometric Electrochemical Sensor for Butralin Determination Using a Quinazoline-Engineered Prussian Blue Analogue. *Materials*, 16(3), 1024.

Sreedhar, M., & Reddy, S. J. (2002). Electrochemical reduction and differential pulse polarographic determination of butralin and isopropalin in environmental samples at a mercury electrode. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 75(10), 2155-2159.

Dindar, C. K., Erkmen, C., Uslu, B. (2021). Electroanalytical methods based on bimetallic nanomaterials for determination of pesticides: Past, present, and future. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 32, e00145.

Wang, X., You, Q., Hou, Z., Yu, X., Gao, H., Gao, Y., Lu, Z. (2022). Establishing the HPLC-MS/MS method for monitoring the residue and degradation of butralin in ginseng during field and risk assessments. *Agronomy*, 12(11), 2675.

Liu, H., Ding, C., Zhang, S., Liu, H., Liao, X., Qu, L., Wu, Y. (2004). Simultaneous residue measurement of pendimethalin, isopropalin, and butralin in tobacco using high-performance liquid chromatography with ultraviolet detection and electrospray ionization/mass spectrometric identification. *Journal of agricultural and food chemistry*, 52(23), 6912-6915.

Qinghang, Y. O. U., Pai, P. E. N. G., Yutong, S. O. N. G., Nan, F. A. N. G., Zongli, Z. H. U., Xingang, H. O. U., Zhiguang, H. O. U. (2021). Residues and dissipation dynamics of butralin in ginseng by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *农药学学报*, 23(4), 739-746.

Kocak, B., İpek, Y., Kececi, A. (2023). A novel electrochemical sensor for metoprolol analysis based on glutardialdehyde-zinc oxide modified boron doped diamond electrode. *Diamond and Related Materials*, 131, 109558.

Yang, L., Song, X., Zhou, X., Zhou, Y., Zhou, Y., Gong, D., Chen, L. (2020). Residual behavior and risk assessment of butralin in peanut fields. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 1-14.

Laviron, E. 1979. General expression of the linear potential sweep voltammogram in the case of diffusionless electrochemical systems. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry* 101 (1):19-28. doi:10.1016/S0022-0728(79)80075-3.

Sturm, J. C., Canelo, H., Nunez-Vergara, L. J., Squella, J. A. (1997). Voltammetric study of ketorolac and its differential pulse polarographic determination in pharmaceuticals. *Talanta*, 44(5), 931-937.

Kocak, B., İpek, Y., Kececi, A. (2023). A novel electrochemical sensor for metoprolol analysis based on glutardialdehyde-zinc oxide modified boron doped diamond electrode. *Diamond and Related Materials*, 131, 109558.

BÖLÜM VIII

SİYAH BAYBURT TAŞININ BAZI MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Determination of Some Engineering Properties of Black Bayburt Stone

Ömer CAN¹ & Anıl AKSOY² & Volkan KÜPÇÜ³

¹(Doç. Dr.), Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

E-mail: omer.can@comu.edu.tr

ORCID: 0000-0002-8182-2967

²(Öğr. Gör.), Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi,

E-mail: anil.aksoy@comu.edu.tr

ORCID: 0000-0002-0842-3919

³Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD),

E-mail: volkan.kupcu@afad.gov.tr

ORCID: 0009-0009-9103-3564

1. Giriş

Türkiye doğal yapı taşları bakımından zengin kaynaklara sahiptir. Doğal yapı taşı üretimi özellikle volkanik tüf açısından değerlendirilecek olursa kuzeydoğu Anadolu bölgesinde çok miktarda bulunmaktadır. Ancak ülkemizde doğal yapıtaşlarının çıkarılması ve ekonomiye dönüştürülmesi konusunda çok sayıda işletme ve ocak yurt çapında faaliyet göstermektedir.

Bayburt; volkanik, sedimenter ve metamorfik kayaçların oluşturduğu bir bölgedir. Oldukça fazla çeşitlilikte doğal taş bulunmakta ve bunların bir kısmı ekonomiye dönüştürülmektedir. Ancak Bayburt taşı ile ilgili çalışmalar çok sınırlı seviyede kalmış ve taşın ekonomik katkısı azalmıştır. Doğal olarak jeolojik

yapısından dolayı her yörenin malzemelerinin farklılık göstermektedir. Bazı konaklar, camiler, restoranlar, okullar vb. gibi günümüzde toplum tarafından aktif olarak kullanılan yapılarda kullanılan doğal yapı taşlarının, deprem kuvveti veya herhangi bir başka bir dış kuvvet etkisi altında nasıl davranacağını bilmek can ve mal kaybı açısından çok önem arz etmektedir.

Mühendislik özellikleri bilinmeyen bir malzemeden bir mühendislik yapısı yapmak ekonomiklik ve can kaybı açısından riskler taşımaktadır. Örneğin, malzeme özellikleri bilinmediğinden dolayı ya gereğinden çok daha kalın duvar inşa edilerek ekonomik olmayan veya gereğinden daha ince duvar kalınlığı inşa edilerek can ve mal kaybına sebebiyet verir. Bu yüzden can ve mal kaybını önlemek ve güçlendirme çalışmaları veya ekonomik ve sağlam yeni inşaatların yapılabilmesi için yapılması gereken yapı analizlerinin gerçeği yansıtması için yapıda kullanılan bu doğal taşların bazı mühendislik özelliklerinin bilinmesi gerekir. Literatürde yapılmış olan benzer çalışmaları şöyle sıralayabiliriz.

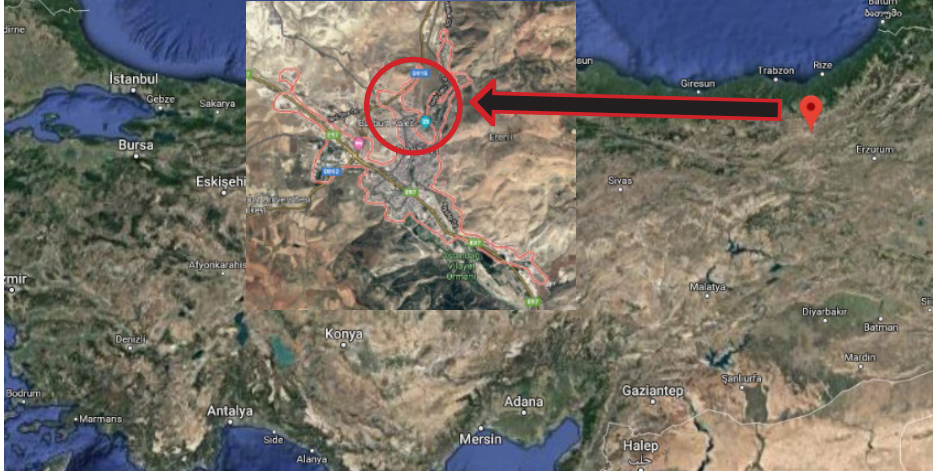
Topal ve Doyuran Kapadokya tufunun jeolojik özelliklerini araştırmıştır. Sonuçta Kapadokya tufunun çok zayıf durabilitesinin olduğunu belirlemişlerdir (Topal ve Doyuran, 1997). Bayülke ve diğerleri, tarihi yapıların davranış ve dayanımlarının belirlenmesi için yapılan yapısal analizlerde yapının modelinin gerçeğe uygun bir biçimde belirlenmesi gerekir. Ayrıca yapının geometrik olarak gerçeğe yakın bir biçimde modellenmesi yanında, yapıdaki malzemenin mekanik özelliklerinin de gerçeğe uygun değerlerde belirlenmesinin önemlidir. Gerçeğe yakın boyutların, mekanik ve kütle özellikleri kullanılması yapı güvenliği ve davranışını doğru hesaplanmasını sağlayacağını belirtmiştir (Bayülke, Kuran ve Bozkurt, 2015). Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde çıkartılan ve yapılarda kaplama malzemesi vb. olarak kullanılan, Tokat diyabazı, Bitlis Ahlat taşı, Mardin Midyat taşı ve Bayburt taşı gibi doğal taşların fiziksel ve mekanik özellikleri hakkında birçok araştırma yapılmıştır (Uysal, Akçakoca ve Topal, 2003; Yılmaz ve diğerleri, 2004). Bayburt taşının Beyaz, sarı ve yeşil renklerde olanları fiziksel ve mekanik özellikleri daha önce araştırılmıştır. Ancak literatürde siyah Bayburt taşının fiziksel ve mekanik özellikleri rastlanmamıştır.

Bu çalışmada; Siyah Bayburt taşının (SBT) bazı fiziksel ve mekanik özellikleri deneysel yöntemlerle belirlenerek çalışma literatüre katkı sağlamış olacaktır. Yığma bina olarak yapılan binaların geleneksel yöntemler kullanarak yapmak yerine mühendislik hizmeti alarak üretilmesinin önu açılacak ve yığma yapıların çeşitli mühendislik hesaplamaları tahminden uzak, daha doğru şekilde yapılabilecektir.

2. Malzeme ve Yöntem

2.1. Malzeme

SBT'nin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi için ocaktan çıkartılan kayalardan yaklaşık 25x30x60 cm boyutlarında bloklar alınmıştır. Şekil 1'de taş ocağının yaklaşık yeri verilmiştir. Taş ocağından alınan kayalardan, laboratuvarında kesilerek, TS 699'da belirtilen boyutlarda numuneler üretilmiştir (Türk Standartları Enstitüsü [TS] 699, 1987).



Şekil 1. Numunelerin Alındığı Bölge

2.2. Metod

Numuneler üzerinde TS 699'da önerilen deneylerden Tek Eksenli Basınç deneyi, Eğilme Deneyi (etüv kuru durumda) , su emme deneyi (atmosfer basıncı etkisinde), Birim Hacim Ağırlık Deneyi ve Yüzey Aşınma Kaybı (Böhme) Deneyi yapılmıştır. Deneyler Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

2.2.1. Basınç Dayanımı Deneyi

Blok halinde çıkarılan SBT'den 6 adet atölyede sulu kesim ile, 71x71x71 mm boyutlarında numuneler üretilmiştir. Etüv kuru haline getirildikten sonra, 2000 kN kapasiteli pres kullanılarak, ASTM D2938-95'e göre deney yapılmıştır (American Society for Testing and Materials [ASTM] D2938-95, 2002) . Tek eksenli basınç dayanımı formülü, Eşitlik-1'de verilmiştir. Basınç dayanımı (σ_c) Denlem-1'deki bağıntıya göre hesaplanmıştır.

Burada; kırılma yükü (P) ve kesit alanı (A) olarak gösterilmiştir. Deneysel numuneleri Şekil 2’de, Deneysel kullarılan tek eksensel basınç presi şekil 3’te verilmiştir.

$$\sigma_c = \frac{P_k}{A} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (1)$$



Şekil 2. Basınç Dayanım Deneysel Numuneleri



Şekil 3. Basınç Dayanım Deneysel Düzenegi

2.2.2. Eğilme Deneysel

Kayaçların eğilme dayanımlarının bulunması için SBT’den 3 adet numune hazırlanmıştır. Numune boyutları (b×h×l) sırayla 102×57×203 mm boyutlarındadır. Eğilme deneysel ASTM C99’a göre üç noktadan mesnetli eğilme dayanımı deneysel gerçekleştirilmiştir (American Society for Testing and Materials [ASTM] C99-87, 2006). Eğilme dayanımı, Eşitlik-2’ye göre hesaplanmıştır.

$$f_{eğ} = \frac{3 * P_k * l}{2 * b * h^2} \quad (2)$$

Burada; Eğilme dayanımı değerini f_{eg} , kırılma yükünü P_k , numune genişliği ve yüksekliğini sırasıyla b ve h , deney numunesinin alt mesnetler arasında kalan boyunu l olarak gösterilmiştir. Eğilme deneyi düzeneği ve deney numunesi Şekil 4'te gösterilmektedir. Eğilme deneyinde 800 kN kapasiteli pres kullanılmıştır.



Şekil 4. Eğilme Dayanımı Deneyi Düzeneği

2.2.3. Su Emme Deneyi

SBT kayalarından 6 adet, TS 699'da belirtilen boyutlarda numuneler üretilmiştir. Deney numuneleri ve deney düzeneği Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. Su emme numuneleri ve deneyi düzeneği

2.2.4. Birim Ağırlık Deneyi

Blok halinde çıkarılan kayalardan 3 adet SBT, 71x71x71 mm boyutlarında numuneler üretilmiş ve TS 699'a göre deney yapılmıştır. Birim Ağırlığı deney numunesinin resmi Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Birim Ağırlık Deneyi Numunesi

2.2.5. Aşınma Direnci Deneyi

Aşınma direncinin bulunması deneyinde 71x71x71 mm boyutlarında küp numuneler kullanıldı. Aşınma deneyi, TS 699'a göre Böhme cihazı yardımıyla yapıldı (Şekil 7). Böhme cihazı, 30 devir/dk hızla dönen bir diskin üzerinde dönen ve her 22 devir tamamlandığında, cihazı otomatik olarak durduracak sisteme sahip düzenekten oluşmaktadır. Bu deney için Aşındırıcı olarak Zımpara tozu (korundum) kullanılır. Disk üzerine bu toz serilerek toplam 16 döngüde numune aşındırılır. Her bir döngü 22 devirden oluşmaktadır.



Şekil 7. Aşınma Direnci (Böhme) Deney Düzeneği

3. Bulgular ve Değerlendirme

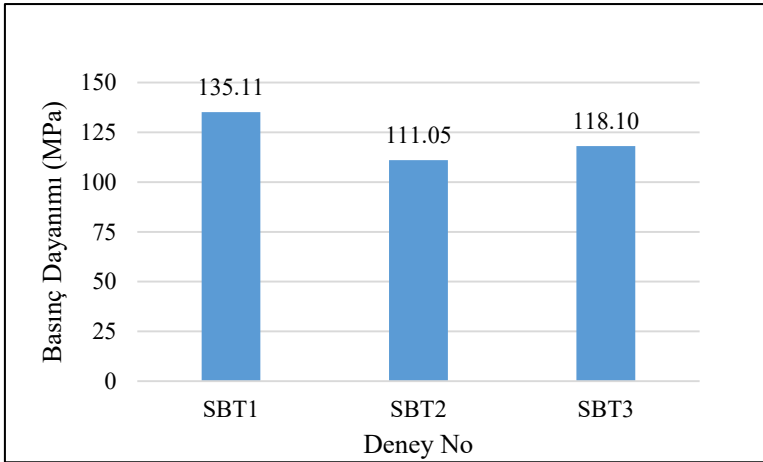
3.2.1. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi (UCS) Sonuçları

SBT'nin kaplama veya doğal yapı taşı olarak kullanılabilmesi için TS EN 1469 ve TS EN 1467'e göre basınç dayanımı değerinin en az 50 MPa olması gerekmektedir (Türk Standartları Enstitüsü European Norm [TS EN] 1469, 2015; Türk Standartları Enstitüsü European Norm [TS EN], 2022). Kuru numunelerin basınç dayanımı değerleri ortalama 121.42 MPa'dır. Standartta istenen sınır değerlerini SBT fazlasıyla sağlamıştır. Basınç dayanım deney sonuçları Tablo 1'de, grafiği Şekil 8'de verilmiştir.

Tablo 1. SBT Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları

Numune Adı	Numune Boyutları			Kırılma yükü (N)	σ_c (MPa)	Ortalama σ_c (MPa)
	En (mm)	Boy (mm)	Alanı (mm ²)			
SBT1	70.2	70.4	4942.08	667700	135.11	121.42
SBT2	70.3	70.5	4956.15	550400	111.05	
SBT3	70.0	70.1	4907.00	579500	118.10	

σ_c : Basınç Dayanımı



Şekil 8. SBT Basınç Dayanımı Grafiği

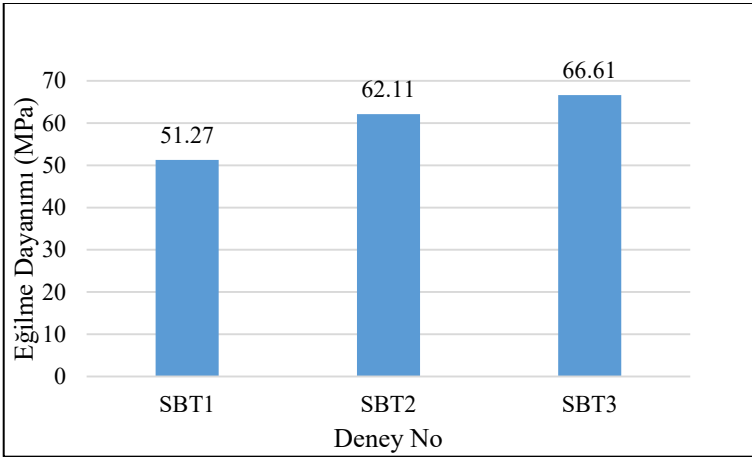
3.2.2. Eğilme Deneyi

Blok halinde çıkarılan kayaçların eğilme dayanımlarının bulunması için 3 adet 102×57×203 mm boyutlarında prizmatik numuneler kullanılmıştır.

Eğilme deneyi ASTM C99'a göre yapılmıştır. Eğilme deneyi sonuçları Tablo 2'de ve grafiği Şekil 9'da verilmiştir. Ortalama Eğilme dayanımı 59.99 MPa bulunmuştur. TS EN 1469 (2015) ve TS EN 1467 (2022)'e göre eğilme dayanımı değerinin en az 5.0 MPa olması gerekmektedir. Kuru eğilme dayanımı değerleri, istenen sınır değerlerinin çok üstünde bulunmuştur. SBT'nin eğilme dayanımı, Bölgede çıkartılan diğer Bayburt taşlarına göre büyük olduğu görülmektedir (Deniz İskender ve diğerleri, 2005).

Tablo 2. SBT Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları

Numune Adı	Numune Boyutları			Kırılma Yüğü (N)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Ort. Eğilme Dayanımı (MPa)
	En (mm)	Boy (mm)	Yükseklik (mm)			
SBT1	102	203	57	55800	51.27	59.99
SBT2	102	203	57	67600	62.11	
SBT3	102	203	57	72500	66.61	



Şekil 9. SBT Eğilme Dayanımı Grafiği

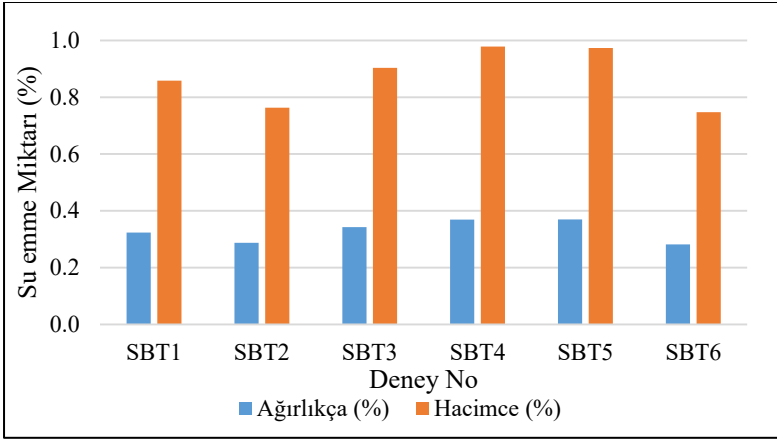
3.2.3. Su Emme Deneyi

Blok halinde çıkarılan kayaçların Siyah renkli taştan 6 adet TS 699'da belirtilen boyutlarda numuneler üretilmiştir. TS EN 1469 (2015) ve TS EN 1467 (2022)'ye göre, açık hava basıncında hacimce ve ağırlıkça su emme değerlerinin %0.75'ten daha az olması gerektiği belirtilmektedir. SBT'nin gerek ağırlıkça

(%0.33) ve gerekse hacimce (% 0.87) su emme değerleri, yaklaşık olarak standartlardaki sınır değerlerde kalmıştır. Deney Sonuçları Tablo 3'te, sonuçlara ait grafik Şekil 10'da gösterilmiştir.

Tablo 3. Su Emme Deneyi Sonuçları

Numune Adı	Ağırlıkça su emme miktarı (%)	Hacimce su emme miktarı (%)	Ort. Ağırlıkça su emme miktarı (%)	Ort. Hacimce su emme miktarı (%)
SBT1	0.32	0.85	0.33	0.87
SBT2	0.28	0.76		
SBT3	0.34	0.90		
SBT4	0.36	0.98		
SBT5	0.37	0.97		
SBT6	0.28	0.74		



Şekil 10. Siyah Bayburt Taşı Su Emme Deneyi Grafiği

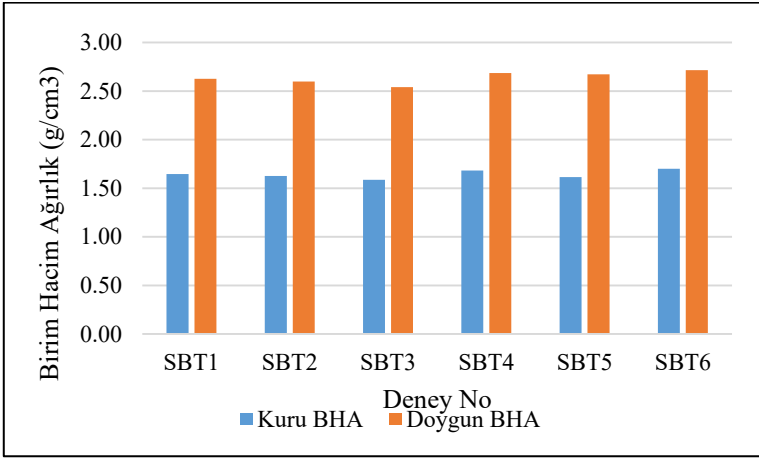
3.2.4. Birim Ağırlık Deneyi

Blok halinde çıkarılan kayaçların Siyah renkli taştan 3 adet atölyede sulu kesim ile, 71x71x71 mm boyutlarda numuneler üretilmiştir. Birim Ağırlığına ait deney sonuçları Tablo 4'te, sonuçlara ait grafik ise Şekil 11'de gösterilmiştir. TS EN 1469 (2015) ve TS EN 1467 (2022)'de, belirtilen doğal taşların birim ağırlık değerlerinin 2.55 g/cm³'ten büyük olması önerilmektedir. SBT'nin Ortalama

Doğun Birim ağırlığı 2.64 g/cm³ olarak bulunmuş olup, bu değerler sınır değerinin üzerindedir.

Tablo 4. Birim Ağırlık Deneyi Sonuçları

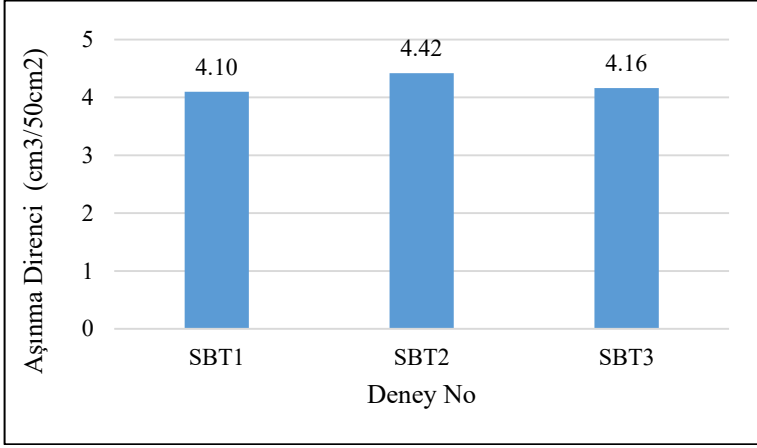
Numune Adı	Kuru BHA (g/cm ³)	Doğun BHA (g/cm ³)	Ort. Kuru BHA (g/cm ³)	Ort. Doğun BHA (g/cm ³)
SBT1	1.65	2.63	1.64	2.64
SBT2	1.63	2.60		
SBT3	1.59	2.54		
SBT4	1.68	2.69		
SBT5	1.62	2.67		
SBT6	1.70	2.72		



Şekil 11. SBT Birim Hacim Ağırlık Deneyi Grafiği

3.2.5. Aşınma Direnci Deneyi

Ortalama Aşınma direnci deney Sonucu 4.23 cm³/50cm² olarak bulunmuştur. Sonuçlara ait grafik ise Şekil 12’de gösterilmiştir. TS EN 1469 (2015) ve TS EN 1467 (2022)’de, doğal taşların aşınma direnci değerinin 15 cm³/50cm²’yi geçmemesi istenmektedir. Deney sonucunda bulunan SBT’nin aşınma değeri ilgili standartta verilen sınır çok altındadır.



Şekil 12. SBT Aşınma Direnci Deneyi Grafiği

4. Sonuçlar

Bayburt ili doğal yapı taşları bakımından çok çeşitliliğe sahip bir ilimizdir. Bayburt ili Bayburt taşı olarak bilinen volkanik tüfleri ile meşhur olmuştur. Bayburt ili sınırları içinde Beyaz ve sarı ve yeşil Bayburt taşı olarak 3 tip yaygın olarak bilinmekte ve kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda Zeytin dalı olarak tarif edilen Siyah renkli Bayburt taşı da yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu sebeple çalışmada bu Siyah Bayburt taşının malzeme özelliklerinin yanı sıra mekanik özellikleri de araştırılmış ve bulunan sonuçlar Tablo 4’te verilmiştir. Bulunan sonuçlar numunelerin alındığı taş ocağına göre farklılıklar gösterebilir.

Tablo 4. Tüm Deney sonuçlarının genel gösterimi

Deneyler	SBT Deney sonuçları*
Basınç Dayanımı (MPa)	121.42
Eğilme Dayanımı (MPa)	59.99
Hacimce Su emme (%)	0.87
Birim Ağırlık (g/cm ³) Doygun	2.64
Birim Ağırlık (g/cm ³) Kuru	1.64
Aşınma Direnci (cm ³ /50cm ²)	4.23
(*: Deney sonuçlarının ortalaması verilmiştir.)	

- SBT'nin Basınç dayanımı ortalama 121.42 MPa bulunmuştur. Basınç dayanımı değerlerinin, diğer Bayburt tüflerine göre yaklaşık iki katına yakın olduğu görülmüştür. SBT'nin basınç dayanımının bölgeden çıkartılan diğer tüflere göre daha yüksek olmasının sebebi boşluk miktarının az olması kaynaklandığı düşünülmektedir.

- SBT'nin Eğilme dayanımı ortalama 59.99 MPa bulunmuştur. Eğilme dayanımı değerlerinin, bölgede çıkartılan beyaz Bayburt taşına göre yaklaşık 4,7 katı, sarı Bayburt taşına göre yaklaşık 10 katı daha yüksek dayanımda çıkmıştır.

- SBT'nin su emme değerleri ortalama ağırlıkça %0.33 ve hacimce % 0.87 bulunmuştur. Bölgeden çıkartılan diğer tüflere göre daha düşük çıkmıştır. Doğal taşların binalarda dış kaplama malzemesi olarak kullanılabilmesi için düşük su emme oranına sahip olması istenir. Ayrıca doğal taşlarda su emme oranının düşük olması, fiziksel özellikleri olumlu etkileyen bir faktördür.

- SBT'nin Ortalama Birim ağırlığı 2.64 g/cm³ olarak bulunmuş olup, Bu değerler TS EN 1469 (2015) ve TS EN 1467 (2022)'de belirtilen sınır değerinin üzerinde bulunmuştur.

- SBT'nin Ortalama Aşınma direnci 4.23 cm³/50cm² olarak bulunmuştur. Bu değer sınır değerinin altındadır.

Sonuç olarak Siyah Bayburt Taşı (Tüfü) üzerinde yapılan deney sonuçlarını TS EN 1469 (2015) ve TS EN 1467 (2022)'deki sonuçlara göre karşılaştırıldığında doğal yapı taşı olarak kaplama ve döşemede kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Kaynakça

Adin, H. (2007). Mardin ve Midyat'ta kullanılan Bina Yapı Taşlarının Bazı Özelliklerinin Tespit Edilmesi, *Mühendis ve Makina*, 48(570), 13-17.

ASTM D2938-95. (2002). *Standard test method for unconfined strength of intact rock core specimens*, ASTM Standards.

ASTM: C99-87. (2006). *Standard test method for modulus of rupture of dimension stone*, ASTM Standards.

Bayülke, N., Kuran, F., & Bozkurt, O. (2015). *Simav'da 2011 Depreminde Hasarlı Camilerin Onarım ve Güçlendirme Öncesi ve Sonrası Dinamik Özellikleri*, 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Erzurum Şubesi, Bildiriler Kitabı I, 59-70.

Deniz İskender, Ö., Ali Faik, A., Demir, E., Aytaç, T. (2005). *Bayburt Stone and Natural Stone Potential Mine Geology Report*. https://eticaret.mta.gov.tr/index.php?route=product/product&product_id=11562.

Kahraman, E., Kılıç, A. M. (2016). Çamlıbel (Tokat) Diyabazlarının Fiziko-Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2), 159-166.

Şimşek, O., Erdal, M. (2004). “Ahlat taşının (ignimbrit) bazı mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırılması”, *G. Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 17(4), 71-78.

Topal, T., Doyuran, V. (1997).”Engineering geological properties and durability assessment of the Cappadocian tuff”, *Engineering Geology*, 47(1-2), 175-187, ISSN 0013-7952, [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(97\)00017-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(97)00017-3).

TS 699. (1987). *Tabii Yapı Taşları-Muayene ve Deney Metotları*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 1469. (2015). “Doğal taş mamulleri- Kaplamada kullanılan plakalar- Özellikler” Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 1467. (2022). *Doğal taşlar-Ham bloklar-Özellikler*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Uysal, Ö., Akçakoca, H., Topal, İ. (2003). *Bazı doğal taşların tekno-mekanik özellikleri ve uygun kullanım alanlarının belirlenmesi, IV. Mermer Sempozyumu (MERSEM)*, Afyon.

Yılmaz, A. O., Alp, İ., Demir, C., Arslan, M., Kolaylı, H. (2004). Bayburt Tüfünün (Bayburt Taşı) Fiziksel, Mekanik, Petrografik Özellikleri. 153-157.

BÖLÜM IX

TEKNOLOJİK ÜRÜNLERİN ÜRETİM TAHMİN DEĞER İNCELEMESİ: ROBOTLAR, ROBOT KOL KULLANIMI (FABRİKA KULLANIMI), ENDÜSTRİYEL ROBOTLAR, İROBOT

*Production Estimate Value Analysis of Technological Products:
Robots, Robot Arm Usage (Factory Usage),
Industrial Robots, Irobot*

Rabia KOCAER

(Öğr. Gör.), Afyon Kocatepe Üniversitesi

E-mail: rabiakocaer@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6078-0972

1. Giriş

Dünyada ve Türkiye’de Robot üretim değerleri belirlenip, robot ile aynı işleve sahip robot kolu, akıllı araba ve akıllı süpürge (İROBOT) veri incelemesi yapıp, Geçmiş yıllardaki üretim değerleri göz önünde bulundurularak 2040 yılına kadar tahmin değerleri belirlenip, grafikleri çizilmiştir.

Araştırmada Eğilim (Trend) Yüzdeleri Analizi kullanılmıştır. Trend Yüzde Analizi: Trend yüzdesini analiz etmek için en az 5 yıllık finansal, üretim ve satış analiz verilerini bilmeniz gerekir. Bu tekniği uygularken, analiz tüm yıllara ait hesap değerini seçilen yıl için aynı hesap değeri ile karşılaştırır. Ulusal ekonomi politikalarında tarımdan sanayiye geçiş ve ihracata yönelik tedbirler gibi kararlar, söz konusu ekonomik olayların temellerini ve yapılarını etkilemekte ve kısa vadede kalıcı yön vermektedir. Serinin uzun vadeli trendini gösteren bu geçmişe trend denir. Ekonomik yapıyı etkileyen bu kararların makroekonomik

etkileri olma eğilimindedir. Ancak bir şirketin üretim kararları, satış ve pazarlama politikaları gibi mikro düzeyde trend etkilerinden de bahsedebiliriz. Ekonomik zaman serisi trendleri her zaman aynı seviyede ve aynı yönde kalmaz. Serinin trendi yukarı veya aşağı olabilir.

Ek olarak, trendler her zaman aynı oranda yükselip düşmez. Yapılan seçimler, bir ekonomik zaman serisinde yükseliş eğilimi ve diğerinde düşüş eğilimi ile sonuçlanabilir. Bir ekonomik zaman serisinin eğiliminin bile doğrusal olması gerekmez. Eğimli veya üstel trend modelleri de bunun için geliştirilmiştir. Trendlerin oluşturulması çok uzun sürerse, yeni trendler ortaya çıkabilir. Bu sefer gereğinden kısa yapmak, serinin ana unsuru olan orta vadeli hareketlerle karıştırılabilir: dögüsel dalgalanabilir.

2. Seçilen Teknolojik Ürünler ve Özellikleri

Araştırmada Robotlar, Robot Kol Kullanımı (Fabrika Kullanımı), Endüstriyel Robotlar, IROBOT üretim tahmin değer incelemesinde kullanılan teknolojik ürünlerdir.

2.1 Robotlar:

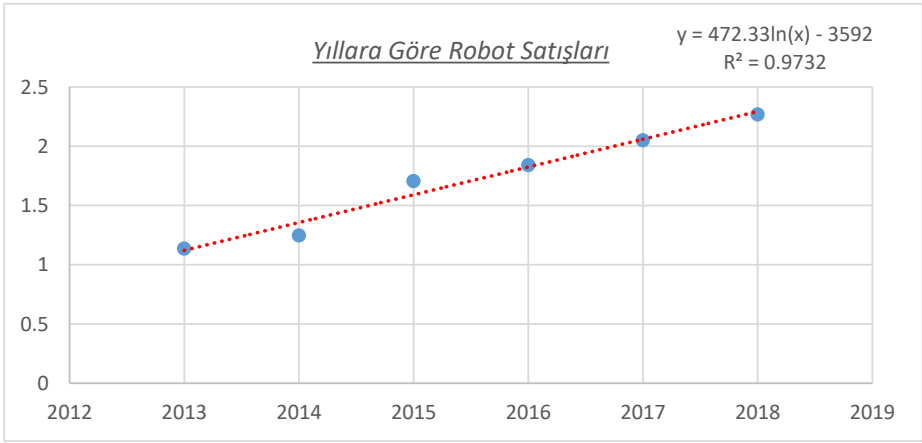
“Robotlar, yeniden programlanabilir. Malzemeleri, parçaları, araçları, özel ekipmanları vb. hareket ettirebilen çok işlevli makinelerdir.” Robotlar ile geleneksel otomatik makineler arasındaki fark: daha fazla eklem hareket etmesi, daha hızlı çalışması, ekipmanları yanlış yerlere takması gibi hareketleri yoktur.

Bir mekanik parçanın tamamını tanımlamadaki en önemli faktör, çevresini algılama yeteneğidir. Bu algılamalar çeşitli sensörler sayesinde yapılmaktadır. Sensörlerden aldığı verileri yorumlamak ve nasıl tepki vereceğine karar vermek için bellekteki yazılımı kullanması gerekiyor. Çevre hakkında bilgi alabilen sensörler, bu bilgiyi işleyebilen mikro işlemciler ve efektleri etkinleştiren aktüatörler olmak üzere robotlar üç ana bölümden oluşmaktadır.

Endüstri 4.0’ın temel ilkelerinden biri olan insan-robot işbirliğinde önemli ilerlemeler kaydediliyor. İnsanlar, makinelerin kolayca taklit edemeyeceği becerilere sahiptir. Ayrıca, yüksek derecede otomasyonun genellikle aşırı maliyetlere yol açabileceği görüşü de vardır. İnsanlar ve robotlar arasındaki simbiyotik işbirliğinin yeni ve ekonomik çözümler sunabilmesinin bir yolu var. Günümüzde pek çok yeni uygulamada insan ve makineler, insansız insanların yanı sıra insan-robot iş birliği içinde çalışmaktadır. Karanlık bir akıllı

fabrikaların yanında insanlar kontrol ve izleme görevlerini yerine getirirken, robotlar fiziksel olarak güç gerektiren, bileğe dayalı görevleri yerine getirir. Bu nedenle, her ikisi de kendi özel becerilerini sunar. İnsanların hayatlarını kolaylaştırmak ve iyileştirmek için Nesnelerin İnterneti (IoT) platformlarına entegre edilmek üzere çeşitli robotlar geliştirilmektedir. 2016 yılında bir insan simbiyotik robotu geliştiren bir şirket vardı. Hitachi, insanlarla iletişim kuran ve işbirliği yapan bir hizmet destek robotu geliştirmiştir. Ayrıca, az sayıda araştırma, işçilerin bilgisayarlaşma ve robotlaşma nedeniyle tehlike altında olduğuna dair endişeleri dile getirdi.

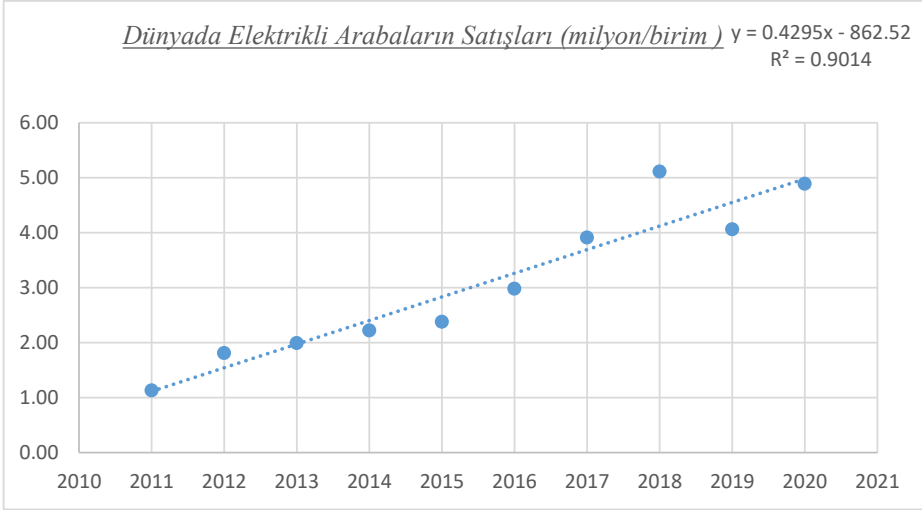
Grafik 1: Yıllara Göre Robot Satışları



Grafik 1'de geçmiş yıllara kapsayan (2013-2020) robot satış verileri gösterilmiştir. Her yıl artış gösteren bir grafik elde edilmiştir.

2.2 Robot Kolu (Fabrika kullanımı):

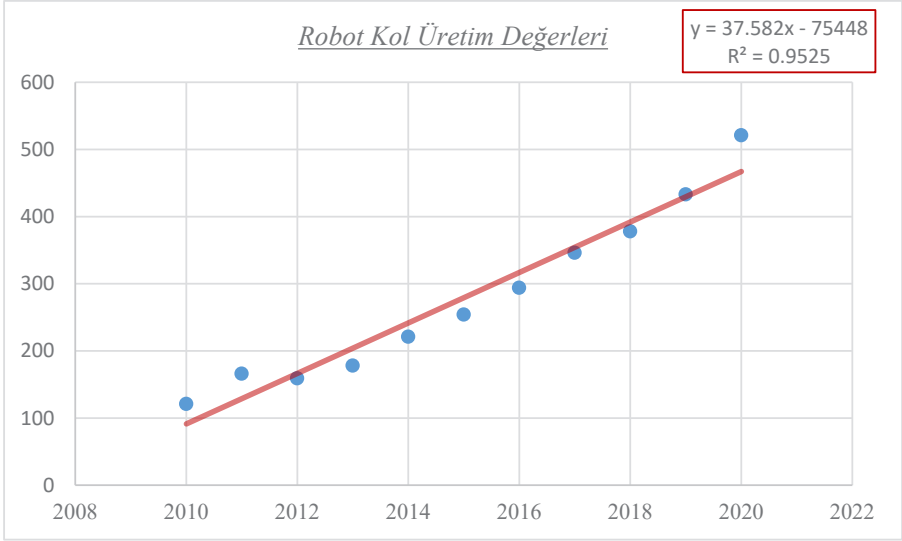
Günümüzde endüstriyel üretim ekipmanlarının temelini robotik kollar oluşturmaktadır. Sistem, çeşitli hidrolik, pnömatik ve elektrik motorlu sistemler kullanılarak imal edilmekte ve endüstrinin birçok alanında kullanılmaktadır. Bir robotik kol, bir dizi programlanabilir mekanik parça veya karmaşık bir robotun parçası olarak tanımlanabilir. Günümüzde robotik kollar endüstrinin ayrılmaz bir parçası haline geldi. İnsan gücünü en aza indirmek, hataları azaltmak ve üretim verimini artırmak günümüz teknolojisine önemli katkı sağlamaktadır.

Grafik 2: Dünyada Elektrikli Arabaların Satışları (milyon/birim)

Grafik 2 'de 2011-2020 yıllarını kapsayan elektrikli arabaların satış verileri gösterilmiştir. Zaman zaman ufak düşüşler meydana gelse de her yıl artış gösteren bir grafik elde edilmiştir.

2.3 Endüstriyel Robotlar:

Uluslararası Robotik Federasyonu'nun (IFR) son tahminleri. 2019 yılına kadar dünya genelindeki fabrikalara 1,4 milyondan fazla yeni endüstriyel robot kurulacak (Oktay Fırat, 2015). Avrupa Birliği, küresel otomasyon yarışında ön saflarda yer almaktadır. Avrupa Birliği şu anda küresel fabrika otomasyonu sıralamasında ön sıralarda yer alıyor ve 10.000 çalışan başına ortalamanın üzerinde endüstriyel robota sahip ülkelerin %65'i AB'ye katılıyor. Robotik endüstrisindeki en güçlü büyüme Çin'de yaşanıyor. 2019'da endüstriyel robotların küresel pazar hacminin %40'ı tek başına burada satılacak. Endüstriyel robotlara yönelik müşteri talebi de çeşitli faktörler tarafından belirlenir. Buna yeni malzemelerin işlenmesi, enerji verimliliği, gelişmiş otomasyon konseptleri ve gerçek fabrika ile Endüstri 4.0 ve Endüstriyel İş İnterneti tarafından tanımlanan sanal dünya arasında bağlantı kurma dahildir.

Grafik 3:Robot Kol Üretim Değerleri

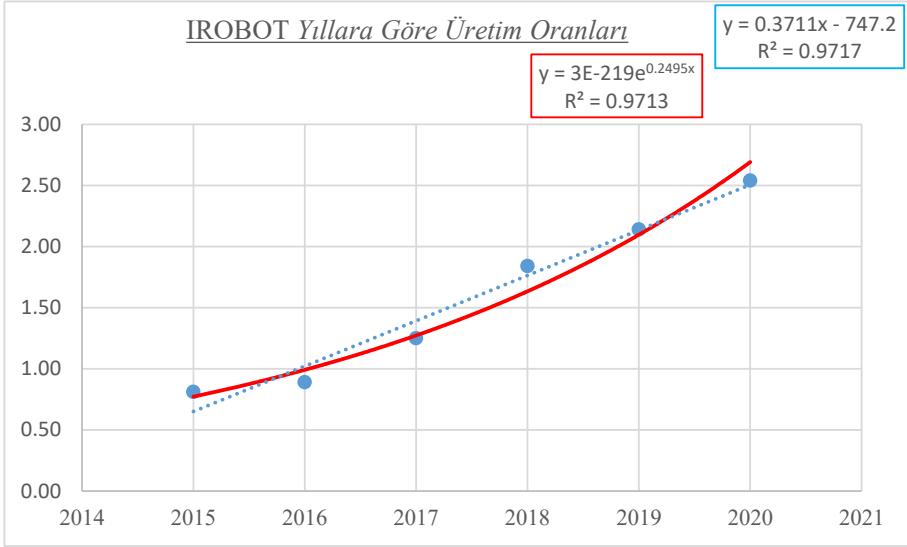
Grafik 3 'de 2010-2020 yıllarını kapsayan robot kol üretim verileri gösterilmiştir. Her yıl artış gösteren bir grafik elde edilmiştir.

2.4 İROBOT:

1996 yılında Ariel® Profesyonel Mayın Tespit ve Yıkım Robotu geliştirildi. Başlangıçta mayın temizleme amaçlı olan bu taktik savunma robotu, 11 Eylül 2001 saldırıları sırasında Dünya Ticaret Merkezi'nin kalıntılarının aranmasına yardım etti ve ayrıca Pentagon'un hasarlı bölgelerini inceledi.

2002 yılında robotlar herkesin hayatına girdi. O yıl ilk Roomba robot elektrik süpürgesi piyasaya sürüldüğünde, Packbaio modeli ABD Donanması için standart ekipmandı. Üç yıl sonra iRobot, birinci sınıf scuba cihazı Scoova'yı robot ailesine ekledi ve yeni profesyonel robotlar geliştirmek için yoğun bir şekilde çalışmaya devam etti. En son gelişme, 2011 yılında dünyanın en iyi robot elektrikli süpürgeleri olan Roomba 700 serisi robot elektrikli süpürgelerin yeni neslinin piyasaya sürülmesiyle geldi.

İRobot 'un 20 yılı aşkın tarihi, bir dizi devrim ve kilometre taşı içerir. Profesyonel robotlarımız, barışı koruma görevlerine sadakatle katılıyor ve umutlar tükenirken bile yaşam arıyor. Bugün dünya çapında satılan 15 milyondan fazla Roomba robot elektrikli süpürge var ve bu sayı artmaya devam ediyor.

Grafik 4: IROBOT Yıllara Göre Üretim Oranları

Grafik 4 'de 2015-2020 yıllarını kapsayan robot kol üretim verileri gösterilmiştir. Her yıl artış gösteren bir grafik elde edilmiştir.

3. Teknolojik Tahmin Tabloları ve Yorumlama

Tablo 1, 2013'ten 2018'e kadar Türkiye'deki yıllık robot satışlarını göstermektedir. Bu verilere göre 2013'te 1.136, 2014'te 1.246, 2015'te 1.705, 2016'da 840, 2017'de 50, 2018'de 2.000, 2018'de 2.000 adet olmak üzere toplam 267 adet devreye alınmıştır. Endüstriyel robot fabrikası. En önemli büyüme faktörleri otomotiv tedarikçileri, yiyecek ve içecek endüstrisi ve kimya ve plastik endüstrisidir. Otomotiv sektörü %39 ile sektör liderliğini korurken, metal sektörü %14 ile ikinci, plastik ve kimya sektörü %11 ile üçüncü sırada yer alıyor. Fabrikalarda robot uygulamaları söz konusu olduğunda ilk sırayı yüzde 60 ile nakliye uygulamaları alırken, bunu yüzde 19 ile kaynak uygulamaları takip ediyor. IFR tarafından yayınlanan Dünya Robot Raporu 2019'a göre, Türkiye'nin 2018'deki endüstriyel robot yoğunluğuna ilişkin bir araştırma, sayının hala düşük seviyede olduğunu gösteriyor. İmalat sanayinde 10.000 çalışana 30, otomotiv sektöründe 10.000 çalışana 210 robot düşerek bu sektörde de önemli bir paya sahiptir. Diğer endüstrilerde her 10.000 çalışana yalnızca 19 robot düşmektedir. Otomasyon, yapay zekâ ve dijital teknolojiler Türkiye'de bazı iş kayıplarına neden oluyor, ancak artan verimlilik, artan yatırım ve büyüyen hizmet ekonomisi sayesinde 2040 yılına kadar 7,3 milyon yeni iş

yaratacak. Otomasyon ve dijitalleşmenin etkisi nedeniyle 2030 yılına kadar 7,6 milyon iş kaybedilebilir. 2040 yılına kadar 8,9 milyon yeni iş yaratılacak ve dijitalleşmenin üretkenlik, ekonomik büyüme ve sosyal değişim üzerindeki etkisi tahmin ediliyor.

Tablo 1: Yıllara Göre Robot Satışları Tahmin Tablosu

Yıllara Göre Robot Satışları		
Yıl	Robot Satışları	Tahmin Lineer
2013	1,136	1,036
2014	1,246	1,270
2015	1,705	1,505
2016	1,84	1,739
2017	2,05	1,973
2018	2,267	2,207
2019		2,442
2020		2,676
2021		2,910
2022		3,145
2023		3,379
2024		3,613
2025		3,848
2026		4,082
2027		4,316
2028		4,550
2029		4,785
2030		5,019
2031		5,253
2032		5,488
2033		5,722
2034		5,956
2035		6,190
2036		6,425
2037		6,659
2038		6,893
2039		7,128
2040		7,362

Tablo 2 'de Otomasyon Seviyesi Tanımı Sistem Kabiliyeti; Seviye 1, Sürücü Yardımı Sürücü aracı kontrol eder. Seviye 2 Kısmi Otomasyon Kendi kendine giden sistemler birçok yeteneğe sahiptir ve sürücü sistemin ön saflarında yer alır. Seviye 3 koşullu otomasyon otonom sistemleri neredeyse tüm araç kontrol fonksiyonlarını üstlenir. Ancak, gelecekteki tehlikeleri önlemek için sürücünün aracın önünde olması gerekir. Yüksek derecede otomasyona sahip Seviye 4 otonom sistem, tüm araç fonksiyonlarını kontrol edebilir. Bazı durumlarda sürücünün kontrolü elinde tutması gerekir. Araçlar yönetim, dönüş, fren ve park sistemleri ile kontrol edilmektedir. Seviye 5 tam otomatik otonom sistem, bir insanın gerçekleştirebileceği herhangi bir işlevi gerçekleştirebilir.

Geleceğin otomobillerinin günümüz araçlarından sürücüsüz olmaları yönüyle ayrılacağı anlaşılan beşinci seviye otonom ile ilgili bazı değişikliklerin pazarda uygulama zamanları verilmektedir. Araç ve altyapı teknolojisi, mevzuat ve cep telefonlarının durumu gibi faktörlerin toplumun bu yeni duruma geçişinde önemli bir etkiye sahip olacağı açıkça görülüyor. Çalışma, 2025 yılına kadar uluslararası pazarda satılan araçların %20'sinin otonom sürüş fonksiyonlarıyla donatılacağını ve 2030 yılına kadar 44 milyon aracın otonom sürüş fonksiyonlarıyla donatılacağını varsayıyor. Örneğin 5G teknolojisi 2029'dan, robot taksiler ise 2025'ten itibaren topluma tanıtılacak. Bağlantılı araçların insanların hareket bilgilerinden yararlanacağı ve sistemlerin daha uyumlu çalışması amacıyla paylaşılacağı düşünüldüğünde, kişisel bilgilerin paylaşımı konusunda oldukça fazla tartışma bekleyebiliriz. Yani geleceğin arabalarına baktığımızda, arabaya ve arabadan altyapıya bağlanabilen arabalar olacak ve zamanla otonom dereceleri artacak. Buradan, 2040 yılına kadar otomotiv endüstrisinde otonom ve ağ bağlantılı fonksiyonların öne çıkmasıyla birlikte, otomotiv endüstrisinde yapısal değişikliklerin meydana geldiği sonucuna varabiliriz.

Tablo 2: Dünyada Elektrikli Arabaların Satışları (milyon/birim)

Dünyada Elektrikli Arabaların Satışları (milyon/birim)		
Yıl	Satış	Tahmin
2011	1,13	1,20
2012	1,81	1,63
2013	1,99	2,06
2014	2,22	2,49
2015	2,38	2,92
2016	2,98	3,35
2017	3,91	3,78
2018	5,11	4,21
2019	4,06	4,64
2020	4,89	5,07
2021		5,50
2022		5,93
2023		6,36
2024		6,79
2025		7,22
2026		7,65
2027		8,08
2028		8,51
2029		8,94
2030		9,37
2031		9,79
2032		10,22
2033		10,65
2034		11,08
2035		11,51
2036		11,94
2037		12,37
2038		12,80
2039		13,23
2040		13,66

2010 ile 2020 yılları arasında dünyayı fethedecek robotların sayısı yukarıdaki Tablo 3'te gösterilmiştir. 2017 ile 2020 yılları arasında dünya genelindeki fabrikalara 1,7 milyon yeni endüstriyel robotun kurulacağı tahmin ediliyor. 2018'de 378.000, 2019'da 433.000 ve 2019'da 521.000 yeni robot piyasaya sürülecek. 2016 yılında endüstriyel robotların en önemli müşterisi elektrik ve elektronik sektörü oldu. Bu sektördeki robotik satışlar (bilgisayar

ve cihazlar, radyo, televizyon ve iletişim ekipmanları, tıbbi cihazlar, hassas ve optik cihazlar) 2013'ten bu yana önemli ölçüde arttı. Bölge 2014'te 46.000 ve 2015'te 65.000 sattı. 2016 yılında satışlar %41 artarak 91.300 adede ulaşmıştır. Sektör, 2016 yılında toplam arzın %31'ini oluşturdu. 2011'den 2016'ya kadar ortalama yıllık büyüme oranı %19 idi. 2040 yılında endüstri büyüme oranının %40 olacağı tahmin edilmektedir.

Tablo 3: Robot Kol Üretim Değerleri

Robot Kol Üretim Değerleri		
Yıl	Üretim	Tahmin
2010	121	91,82
2011	166	129,402
2012	159	166,984
2013	178	204,566
2014	221	242,148
2015	254	279,73
2016	294	317,312
2017	346	354,894
2018	378	392,476
2019	433	430,058
2020	521	467,64
2021		505,222
2022		542,804
2023		580,386
2024		617,968
2025		655,55
2026		693,132
2027		730,714
2028		768,296
2029		805,878
2030		843,46
2031		881,042
2032		918,624
2033		956,206
2034		993,788
2035		1031,37
2036		1068,952
2037		1106,534
2038		1144,116
2039		1181,698
2040		1219,28

Son yıllarda ülkemizde de satışları artan IROBOTların insanların hayatlarını kolaylaştırmak için daha çok tercih edileceği öngörülmektedir. Şarj ile çalışan robot iş gücü etkilememektedir. Fazla bakım istememektedir. 2015-2020 arası ciddi bir artış göstermiş olup, 2040 yılında yüzde 50 büyüme oranı görüleceği tahmin edilmektedir.(Tablo 4)

Tablo 4: IROBOT Yıllara Göre Üretim Oranları

IROBOT Yıllara Göre Üretim Oranları		
Yıl	Üretim	Tahmin
2015	0,81	0,5665
2016	0,89	0,9376
2017	1,25	1,3087
2018	1,84	1,6798
2019	2,14	2,0509
2020	2,54	2,422
2021		2,7931
2022		3,1642
2023		3,5353
2024		3,9064
2025		4,2775
2026		4,6486
2027		5,0197
2028		5,3908
2029		5,7619
2030		6,133
2031		6,5041
2032		6,8752
2033		7,2463
2034		7,6174
2035		7,9885
2036		8,3596
2037		8,7307
2038		9,1018
2039		9,4729
2040		9,844

4. Sonuç

Robot ürünlerin akıllı araba, robot kolları, robotlar yukarıda belirtilen grafik ve tablolardan yola çıkarak 2040 yılına kadar olan süreçte tahminler yapılmıştır. Öncelikle Robot kullanımının ürün çeşitliliği arttırması, nitelikli ve ucuz işgücü, üretim kapasitesi, kaliteli ve sürdürülebilir üretim altyapısı olarak avantajlarından bahsedebiliriz. İşgücünü çok ucuzlattığı için insanların işsiz kalmalarına neden olmakta, rutin işlemlerde yanlış veri varsa sürekli yanlış ürünü verir, fazla bakım istemektedir, az geri bildirimle çalışırken hata olursa hatanın geri bildirimini yavaş olabilir. Bunlarda robot kullanımlarının dezavantajları arasında sıralayabiliriz.

Türkiye Sanayi Robotu İhracatı Türkiye'nin sanayi robotu (GTİP kod 847950) ihracatı bu ürün için dünya ihracatının %0,2'sini temsil etmektedir, dünya ihracatındaki sıralaması ise 26'dır. Türkiye'nin 2019 yılı ithalat değeri 2018 yılına göre %13 artış ile 17 Milyon ABD Doları olarak gerçekleşmiştir.

Türkiye'den endüstriyel robot ithalatı IFR raporuna göre Türkiye, otomobil ve ticari araçlar için bir üretim üssü olduğundan, endüstriyel robotların tanıtımı için umut verici bir pazar olarak ortaya çıktı. Ayrıca, 2017 yılında Türkiye'de üretilen yaklaşık 1,7 milyon binek ve ticari araç, büyüyen ekonomisi ve çok genç nüfusu ile Türkiye'yi kazançlı bir ülke haline getirdi. Robot yoğunluğu açısından da Türkiye'nin hala çok düşük bir seviyede olduğuna dikkat çekilerek, bu rakamlar Türkiye'nin endüstriyel robot pazarı için çok önemli ve büyüyen bir pazar olduğunu gösteriyor.

Otomotiv sektöründeki yapısal değişimleri araştıran çalışma, elektrik motorlarının piyasada kullanımının yanı sıra otonom ve ağ bağlantılı fonksiyonların ön plana çıkacağını ve üretimlerini artıracığını ortaya koyuyor. Çoğunluğu gelişmiş ülkelerden olmak üzere 100'e yakın firma ile bu alanda kıyasıya bir rekabet yaşanıyor. Otomotiv sektöründe yaşanan bu yapısal değişim sürecinde küresel pazarda bazı oyuncuların gerileyerek pazar payını kaybetmesi beklenirken, küresel pazara yeni oyuncuların girerek belirli kalıpları kırması beklenmektedir. Önümüzdeki birkaç yıl içinde üretimi hızlandırmak için şarj tesislerinin genişletilmesi ve böylece elektrikli araçların Türkiye'de yaygın olarak bulunması gerekecek. Ayrıca park yerlerinin yeniden düzenlenmesi ile elektrikli araçlar için ayrılmış park yerlerinin güvence altına alınması gerekmektedir. Özellikle İstanbul, Ankara, İzmir gibi trafiğin yoğun olduğu şehirlerde elektrikli araç kullanımının yaygınlaştırılması çok önemli. Bu nedenle, hava kalitesinin kötüleştiği yerlerde bile önemli iyileştirmeler elde edilebilir.

BİT alanındaki gelişmelere paralel olarak, robot teknolojisi bu günlerde giderek daha popüler hale geliyor ve günlük kişisel kullanımın içine giriyor.

Öte yandan, robotik sistem alt sistemleri, bileşenleri ve bileşenleri için üretim ve geliştirme yetenekleri oluşturmak maliyetli ve zordur. İşlemciler, devreler, sensörler ve iletişim sistemleri gibi alt sistemlerin ve bileşenlerin geliştirilmesinin robotik ve yapay zekâ tabanlı çözümlerin çoğalması beklenmektedir. Bu gelişmeler, kişisel kullanımdan uzun menzilli güdümlü füzelere kadar çok geniş bir yelpazede yeni yetenekler ve performans artışları ifade etmekte ve bu alanlarda araştırma ve geliştirme faaliyetleri dikkat çekmektedir. Üretim hatlarında otomasyonun hızla yaygınlaşmasıyla birlikte, yakın gelecekte inşaat ve gemi yapımı gibi emek yoğun alanlarda standardize robot sistemleri giderek daha popüler hale gelecektir. Bu da daha az insan emeği ile daha hızlı, daha ekonomik ve daha verimli projeler anlamına geliyor. Robotik teknoloji, üretimde verimliliği ve rekabet gücünü artıran bir faktör olarak karşımıza çıkıyor. Gelişmekte olan ülkelerde rekabet gücünü artırmak için robotik teknolojiyi kullanmanın ana motivasyonudur. Dolayısıyla yapay zekâ ve robot teknolojisinin 21. yüzyılın akıllı ordusunun belkemiğini oluşturacağı kesin gözükmektedir.

Kaynakça

Kılıç, S. & Alkan, R. M. (2018). Dördüncü Sanayi Devrimi Endüstri 4.0: Dünya ve Türkiye Değerlendirmeleri. Girişimcilik İnovasyon ve Pazarlama Araştırmaları Dergisi, 2 (3) , 29-49 . DOI: 10.31006/gipad.417536

Küresel Otomotiv Sektörünün Değişimi Ve Yerli Otomobil Projesinin Geleceği hakkında 10.08.2020 tarihinde erişim: https://setav.org/assets/uploads/2019/02/R127_Otomotiv.pdf

Tunalı, H. İstanbul Üniversitesi Açık Ve Uzaktan Eğitim Fakültesi İktisat Uzaktan Eğitim Lisans Programı “İktisadi Kalkınma” Ders Notu. Erişim:http://auzefkitap.istanbul.edu.tr/kitap/iktisat_ue/uygulamaliista.pdf

Tor Kadioğlu, C (2020). Tüketicilerin Akıllı Robot Süpürge Kullanımı Üzerine Bir Araştırma. Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi, 55(4), 2515 - 2537. 10.15659/3.sektor-sosyal-ekonomi.20.11.1450

Sung, J., Guo, L., Grinter, R. & Christensen, H. (2007). “My Roomba Is Rambo”: Intimate Home Appliances, UbiComp. Ubiquitous Computing, 47(17), 145-162

Rise of the Industrial Robots: Statista (2020). URL1:<https://www.statista.com/statistics/1022991/worldwiderobotic-vacuum-cleaner-revenue/> (Erişim Tarihi: 20.08.2020)

URL2:<https://www.statista.com/chart/11397/rise-of-the-industrial-robots/> (Erişim Tarihi: 20.08.2020)

URL3:<https://www.statista.com/statistics/1022991/worldwide-robotic-vacuum-cleaner-revenue/> (Erişim Tarihi: 20.08.2020)

URL4:Robot Verileri: <https://www.stendustri.com.tr/robot-yatirimlari/2020-yilinda-520-bin-yeni-robot-is-basinda-h91832.html> (Erişim Tarihi: 20.08.2020)