

Mühendislik Alanında Multidisipliner Araştırma ve Değerlendirmeler

Editör: Doç. Dr. Serdal Arslan



Mühendislik Alanında Multidisipliner Araştırma ve Değerlendirmeler

Editör:

Doç. Dr. Serdal Arslan



Published by

Özgür Yayın-Dağıtım Co. Ltd.

Certificate Number: 45503

📍 15 Temmuz Mah. 148136. Sk. No: 9 Şhitkamil/Gaziantep

☎ +90.850 260 09 97

📞 +90.532 289 82 15

🌐 www.ozguruyinlari.com

✉ info@ozguruyinlari.com

Mühendislik Alanında Multidisipliner Araştırma ve Değerlendirmeler

Editor: Doç. Dr. Serdal Arslan

Language: Turkish-English

Publication Date: 2025

Cover design by Mehmet Çakır

Cover design and image licensed under CC BY-NC 4.0

Print and digital versions typeset by Çizgi Medya Co. Ltd.

ISBN (PDF): 978-625-5646-21-7

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub776>



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0). To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>. This license allows for copying any part of the work for personal use, not commercial use, providing author attribution is clearly stated.

Suggested citation:

Arslan, S. (ed) (2025). *Mühendislik Alanında Multidisipliner Araştırma ve Değerlendirmeler*. Özgür Publications.

DOI: <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub776>. License: CC-BY-NC 4.0

The full text of this book has been peer-reviewed to ensure high academic standards. For full review policies, see <https://www.ozguruyinlari.com/>



Ön Söz

Günümüzde karmaşık mühendislik problemlerinin multidisipliner bakış açısıyla kavramlaştırılması, analizi ve çözümü kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu durum mühendislik disiplinleri arasındaki sınırları git gide silikleştirse de bilimsel ve teknolojik ilerleme açısından gereklidir. Bu bağlamda, bazı mühendislik dalları birbirleri ile güçlü etkileşim kurarken bazılarında ise zayıf etkileşim göstermektedir. Bu kitapta gerek teorik yaklaşımlar gerekse uygulamalı yenilikçi yaklaşımlar yer almaktadır. Bölümler; mühendislik temelli olmasının yanı sıra farklı disiplinlerle de harmanlamıştır. Böylece yalnızca akademik çevreler için değil, aynı zamanda ilgili alanlarda çalışan araştırmacılara ilham verici bakış açısı sağlaması açısından kaynak niteliğindedir.

İçindekiler

Ön Söz

iii

Bölüm 1

Türkiye'nin Farklı Coğrafi Lokasyonlarına Ait Bal Arısı (*Apis Mellifera* L.) Genotiplerinin Morfolojik Özelliklerine Göre Kümeleme Analizi ile Sınıflandırılması

1

İrfan Öztürk

Bölüm 2

Sığır Çiftliklerinde Yalın Altı Sigma Metodolojisinin Uygulanabilirliği

13

İrfan Öztürk

Bölüm 3

Nano-Biyokimya ve Yapay Zekâ ile Çevresel Dönüşüm: Yenilikçi Çözümler ve Sürdürülebilir Uygulamalar

25

Elif Aktürk Bozdemir

Yakup Budak

Bölüm 4

Endüstri Mühendisliğinde Yapay Zekâ ve Otomasyonun Etik Kullanımı

49

Nur İlayda Bağça

Yusuf Fedai

Bölüm 5

Esnek Üretim Yapısına Sahip İşletmelerde Zaman Etüdü Uygulaması ve Verimlilik İyileştirme Stratejileri

65

Yağmur Sultan Gerek

Yusuf Fedai

Bölüm 6

- Natural and Biosorbent Adsorbents for Decolorization of Azo Dyes: A Bibliometric Analysis of Global Research Trends 87

Sevtap Tırnık

Ahmet Sercan Kulakcı

Bölüm 7

- Enerji Hasadında Piezoelektrik Yaklaşımlar: Malzeme Özellikleri ve Sensör Teknolojileri 113

Sibel Akkaya Oy

Ali ekber Özdemir

Bölüm 8

- Elektrikli Araçlarda Tahrik İnverteri için Yarı-İletken Seçim Optimizasyonu 135

Gülsüm Yıldırım

Bölüm 9

- Comparative Analysis of Conventional and Consequent-Pole External Rotor Brushless DC Motors for Electric Bicycle Applications 143

İbrahim Aydın

Onur Özdal Mengi

Serdal Arslan

Türkiye'nin Farklı Coğrafi Lokasyonlarına Ait Bal Arısı (*Apis Mellifera* L.) Genotiplerinin Morfolojik Özelliklerine Göre Kümeleme Analizi ile Sınıflandırılması

İrfan Öztürk¹

Özet

Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı lokasyonlarına ait bal arısı (*Apis mellifera* L.) genotipleri bazı morfolojik özelliklerine göre sayısal sınıflandırma yöntemleri ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Bal arılarının dış yapılarına ilişkin morfolojik özellikler farklı ölçü birimlerine sahip olduklarından, bu değerlerin standardize Z-skorlarının Öklid ve karesel Öklid uzaklıkları kullanılarak benzerlik matrisi elde edilmiştir. Cluster modülü aracı ile Tek Bağlantı (Singel Linkage), Tam Bağlantı (Complete Linkage) ve Ward yöntemleri ile karşılaştırılarak en uygun sınıflandırmayı sağlayan yöntemin Ward yöntemi olduğu belirlenmiştir. Bu analiz sonucunda genotipler arası benzerlik matrisinin oluşturduğu kümeleme çözümleri, Hotelling Lawley İz ve Wilks Lamda istatistikleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Her üç yöntemde göre yapılan sınıflandırma sonucunda en anlamlı sınıflandırmayı Ward yöntemi sağlamış olup, bu yöntemde bal arısı genotipleri 5 farklı gruba ayrıldığı görülmektedir ($P < 0,001$).

1.GİRİŞ

Farklı morfolojik özellikler bakımından birbirinden önemli ölçüde ayrılan bal arısı türlerinin, aynı türe ait ırkların veya bir ırkın farklı ekotiplerinin tanımlanması ve birbirinden ayırt edilmesi, uzun süredir arıcılık ve sistematik biyoloji alanlarında tartışılmakta olan bir konudur (1).

Bal arılarının tanımlanması ve sınıflandırılmasında yaklaşık 42 morfolojik karakterin kullanılabileceği bildirilmektedir (2). Ancak birçok araştırmacı,

1 Doç. Dr., Harran Üniversitesi OSB MYO Gıda Teknolojileri Bölümü, ozirfan23@yahoo.com,

değerlendirilebilecek karakter sayısının, çalışılan arı ırkı veya tipine bağlı olarak değişebileceğini belirtmektedir (3).

Farklı genotiplere ait bireyler, çeşitli morfolojik karakterler açısından birbirleriyle ilişkili özellikler sergilemektedir. Ancak çok sayıda morfometrik karaktere ait verilerin yalnızca tek değişkenli istatistiksel yöntemlerle analiz edilmesi, genotip gruplarının doğru şekilde tanımlanması ve sınıflandırılması açısından yetersiz kalmaktadır (1).

Bu nedenle, sınıflandırma çalışmalarında tek bir özelliğe dayalı yöntemler yerine, çok sayıda morfolojik karakteri aynı anda değerlendirebilen çok değişkenli istatistiksel yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır (4). Bu tür analizler, genotiplerin üzerinde durulan morfolojik özelliklere bağlı olarak ya belirgin biçimde ayrılmasını ya da kısmen örtüşen yapılar sergilemesini mümkün kılmaktadır (1).

Bu doğrultuda, bu çalışmanın amacı, Türkiye'nin farklı coğrafi bölgelerine ait bal arısı genotiplerini belirli morfolojik özellikler temelinde sayısal sınıflandırma yöntemleri kullanarak analiz etmek ve genotipler arasındaki morfolojik benzerlik ve farklılıkları ortaya koymaktır.

2. MATERİYAL VE METOT

Çalışmanın materyalini, bazı araştırmacılar (5,6,7,8) tarafından bildirilen ve Türkiye'nin 39 farklı lokasyonuna ait bal arısı genotipleri üzerinde ölçülen 12 morfolojik karaktere ilişkin ortalama değerler oluşturmuştur. Bu değerler üç farklı sınıflandırma yöntemi ile analiz edilerek bal arısı genotiplerinin yayılım alanları ve yakınlık düzeyleri bölgelere göre belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmada değerlendirilen morfolojik özellikler farklı ölçü birimlerine sahip olduğundan, karşılaştırılabilir hale getirilmek amacıyla standartlaştırılmış ve bu işlem sonucunda 39×12 boyutlarında bir standart Z-puan veri matrisi oluşturulmuştur. Elde edilen bu standart Z matrisi kullanılarak, genotip çiftleri arasındaki morfolojik benzerlikleri yansıtan bir benzerlik matrisi hesaplanmıştır.

Genotipler Arası Uzaklıkların Hesaplanması:

Orijinal veri matrisi oransal ölçekli veriler içerdiğinden, genotip çiftleri arasındaki morfolojik uzaklıklar Öklid ve karesel Öklid uzaklık ölçütleri kullanılarak hesaplanmıştır (9,10,11).

Ward yönteminin uygulanabilmesi için karesel Öklid uzaklığının kullanılması gereklidir. Ancak, karesel Öklid uzaklığı hesaplamalarında uç değerlerin (outliers) uzaklık ölçümleri üzerinde olumsuz etkiler

oluşturabilmesi nedeniyle, orijinal veri matrisi standart Z-skorlarına dönüştürülmüştür (12,13,14).

Bu standardizasyon işlemi, tüm değişkenlerin ortak bir ölçekte değerlendirilmesini sağlayarak, analiz sonuçlarının daha güvenilir ve karşılaştırılabilir olmasına olanak tanımıştır.

39 farklı lokasyona ait bal arısı genotipi ve 12 morfolojik özelliğe ilişkin oluşturulmuş standart-Z veri matrisinden i. ve j.'ci birimleri arasındaki öklid uzaklığı;

$$d_2(x_i, x_j) = \left[\sum_{k=1}^p |x_k - x_k|^2 \right]^{1/2} \text{ olarak,}$$

Karesel Öklid Uzaklığı ise;

$$d_2^2(x_i, x_j) = \sum_{k=1}^p |x_k - x_k|^2 \text{ eşitliği ile hesaplanmıştır (10,15).}$$

2.1. Kümeleme Yöntemleri

Bal arısı genotiplerinin coğrafi bölgelere göre sınıflandırılmasında, bazı hiyerarşik (aşamalı) kümeleme analizleri kullanılmıştır. Bu yöntemler arasında tek bağlantı (single linkage) kümeleme yöntemi de yer almaktadır.

2.1.1. Tek Bağlantı Kümeleme Yöntemi (Single Linkage Cluster Analysis)

Tek bağlantı kümeleme yöntemi, her bir bireyin veya bireye ait karakterlerin başlangıçta ayrı birer küme olarak değerlendirildiği bir yaklaşımdır. Yani analiz başlangıcında, toplam birey sayısı kadar (nnn) tek elemanlı küme mevcuttur. Bu kümeler arasında, uzaklık matrisi $D = \{d_{ik}\}$ kullanılarak en küçük uzaklık değeri tespit edilir ve birbirine en yakın iki küme birleştirilir. Böylece kümeler arası benzerlik esasına dayalı olarak aşamalı birleştirmelerle yeni kümeler oluşturulmaya devam edilir.

Eğer başlangıçta (U) ve (V) kümeleri birleştirilmiş ise 3. Adımda (U,V) kümesine en yakın olan (W) kümesi arasındaki uzaklık ve benzerlik ölçümleri;

$$d(U,V)W = \min \{d_{UW}, d_{VW}\},$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Buradaki d_{UW} ve d_{VW} uzaklıkları sırasıyla, U ve W kümesi ile V ve W kümelerinin en yakın komşuları

arasındaki uzaklıktır. Bu işlemlerin sonunda söz konusu matrisin boyutu $(n-1)$ birim indirgenerek, matris yenilenir. Ele alınan yöntem tekrarlanarak devam eder (10, 16, 17).

2.1.2-Tam Bağlantı Kümeleme Yöntemi (Complete Linkage Cluster Analysis):

Bu yöntem Tek bağlantı kümeleme yöntemine çok benzemekle beraber, Tek bağlantı kümeleme yönteminden ayıran tek özelliği küme elemanları arasındaki uzaklığın maksimum derecelerinin alınmasıdır. Yani kümeler oluşturulurken en uzak komşu niteliğine sahip bireyler (birimler) birbirleriyle birleştirilerek bir araya getirilmektedir. Tam bağlantı kümeleme tekniği basit olmakla beraber küme yapısını belirlemede iyi sonuç veren bir tekniktir (10,16).

Bu yöntemde uzaklık veya ilişki matrisi elde edildikten sonra n tane bireyden birbirine en yakın olan (U) ve (V) gibi iki küme (UV) kümesi olarak birleştirildikten sonra üçüncü bir (W) kümesi ile arasındaki uzaklığın belirlenmesi için uzaklık türü benzerlik ölçüsü kullanıldığında;

$$d(U,V)W = \max \{d_{UW}, d_{VW}\} \text{ bağıntısından yararlanılır (16, 17).}$$

2.1.3. Ward Kümeleme Tekniği

En küçük varyans yöntemi olarak da adlandırılan Ward metodu, çok genel aşamalı bir kümeleme yöntemidir. Bu yöntemin en etkileyici özelliği, birey sayısı (n) çok fazla olduğunda ($n > 50$), diğer aşamalı kümeleme metodlarına göre daha iyi sonuçlar vermesidir (10).

İstatistiksel anlamda, kümeleme yayılımının minimize edilmesine dayanan Ward metodunda, kümeler içi varyansın minimize edilmesi amaçlamaktadır. Kümeleme analizinin herhangi bir aşamasında kümelerdeki bireylerin gruplanmasından dolayı bir miktar bilgi kaybı olmaktadır. Bu bilgi kaybı, belli bir kümeye ait olan her noktanın küme ortalamasından sapmaların genel kareler toplamı ile (HKT) ölçülür.

Diğer bir özellik; Ward metodun da benzerlik matrisi elemanlarının kareli Öklid uzaklığının kullanılarak hesaplanmasıdır.

Hata kareler toplamı (HKT); k kümesinde yer alan n_k noktanın k kümesinin ortalamalar vektörüne olan öklid uzaklıkları toplamı,

$$HKT_k = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{n_k} X_{ijk}^2 - \frac{(\sum_{i=1}^p X_k)^2}{n_k}$$

şeklinde hesaplanır. HKT_k değeri tüm $k = 1, 2, \dots, n$ kümede hesaplanıp toplam küme içi Hata Kareler Toplamı;

$$HKT = \sum_{i=1}^{k=n} HKT_k$$

şeklinde hesaplanır. Bu ölçütler hesaplandıktan sonra bireylerin kümelerde birleştirilmeleri aşamalı olarak aşağıdaki gibi gerçekleştirilir.

1- Birinci aşamada $HKT_k=0$ olacak şekilde her birim bir küme kabul edilerek ilk aşama yerine getirilir.

2- İkinci aşamada HKT 'ında en küçük artış sağlayan (U) ve (V) kümeleri birleştirilip (UV) kümesi oluşturulur. HKT 'daki bu artış;

$$\Delta HKT_{UV} = HKT_{(UV)} - HKT_{(U)} - HKT_{(V)}$$

olarak hesaplanmaktadır. Bu suretle n birim (n-1) kümeye ayrılmış olur.

3- Üçüncü aşamada, Küme sayısı $k=1$ oluncaya kadar 2. Adım tekrarlanarak bireylerin aşamalı olarak birbirine bağlanmaları sağlanmaktadır. Bu suretle her aşamada HKT 'ın da oluşan minimum artış, birleştirilen kümelerin merkez noktaları arasındaki Öklid uzaklığının karesi ile orantılı olarak gerçekleştirilmiş olur (10, 11).

2.2. Test İstatistikleri:

2.2.1. Wilks'in Olabilirlik Oran Testi

Wilks tarafından ileri sürülen yöntem, genelleştirilmiş olabilirlik oran temeline (generalized likelihood ratio principle) dayanmaktadır. Test istatistiği olarak önerilen Λ ,

$$\Lambda = \frac{|W|}{|T|} = \frac{|W|}{|W + B|} \text{ veya } \Lambda = \prod_{i=1}^p \frac{1}{1 + \lambda_i}$$

biçimindedir. Söz konusu test istatistiği 0 ile 1 arasında değerler almaktadır. Λ 'nın 0'a yakın olması H_0 hipotezinin reddedildiğini, 1'e yakın olması durumunda kabul edileceğini gösteren bir işarettir. Bu yöntemde F istatistiği kritik değer olarak kullanılacağından,

$$F = \frac{1 - \Lambda^{1/t}}{\Lambda^{1/t}} \cdot \frac{r \cdot t - 2 \cdot u}{p \cdot q} \sim F_{(p \cdot q, r \cdot t - 2 \cdot u)} \alpha$$

dönüşümü yapılır. Burada sırasıyla;

$$r = v - (p + q + 1)/2 \quad t = \sqrt{\frac{(p^2 q^2 - 4)}{(p^2 q^2 - 5)}} \quad \text{Eğer} \quad (p^2 q^2 - 5) > 0$$

değilse $t=1$ dir.

$u = (pq - 2)/4$ $q = k-1$ $v =$ Hata serbestlik derecesi,

$k =$ grup sayısı, $p =$ değişken sayısı dır (17, 18).

2.2.2. Hotelling Lawley İz Yöntemi

Söz konusu yöntemde (BW^{-1}) matrisinin determinantından elde edilen köşegen elemanlarının toplamı; yani [trace (BW^{-1})] bize Hotelling- T^2 değerini vermektedir. Diğer bir ifade ile λ_p , BW^{-1} matrisinin determinantından elde edilen r 'inci karakteristik kök olmak üzere,

$$T_o^2 = \sum_{r=1}^p \lambda_r$$

test istatistiği kullanılmaktadır. T_o^2 değerinin büyüklüğü H_o hipotezinin reddedileceğini ifade etmektedir. Burada;

$$F = \frac{p(n-p-1)+2}{(k-1)p^2} \cdot T_o^2 \text{ dönüşümü yapılarak;}$$

$F_{[k-1)p^2, p(n-p-1)+2]} \alpha$ serbestlik dereceli F tablo değerleri kritik değer olarak kullanılmıştır (16, 17).

3.ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Farklı 39 lokasyondan elde edilen bal arısı genotipleri, Tek Bağlantı (Single Linkage), Tam Bağlantı (Complete Linkage) ve Ward kümeleme yöntemleri kullanılarak sırasıyla 2, 3, 4 ve 5 grup oluşturacak şekilde sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma işlemleri, Statistica ve SPSS/PC paket programlarının “Cluster” modülü aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yöntemlerin sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, optimum grup sayısının dört olabileceği belirlenmiştir. Bu doğrultuda analizler, özellikle 4 ve 5 küme temel alınarak yürütülmüştür.

Kümeleme analizleri sonucunda elde edilen grup yapıları, **Wilks' Lambda** ve **Hotelling's Lawley Trace** istatistikleri ile değerlendirilmiş olup, bu istatistiklere ilişkin bulgular Çizelge 1'de sunulmuştur.

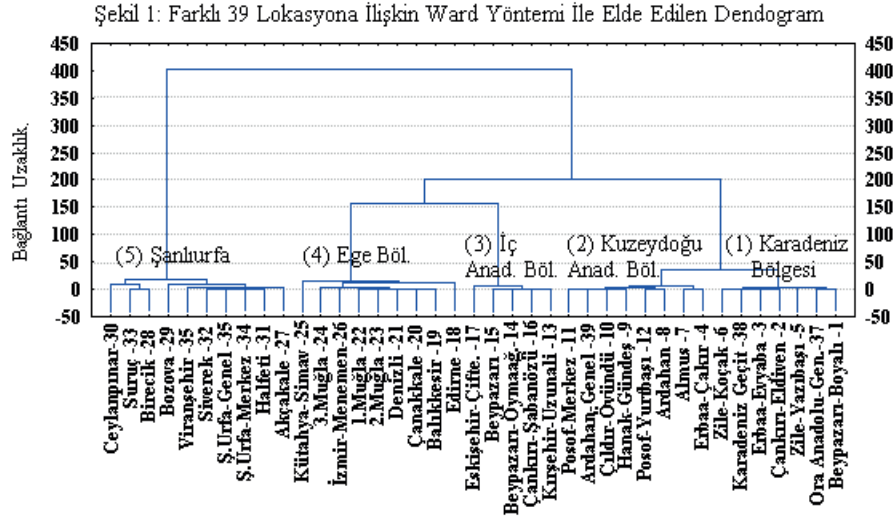
Çizelge 1. Bal Arısı Genotiplerinin Kümeleme Yöntemlerine Göre Sınıflandırılması

Küme Sayısı	Küme No	(Küme Elemanları) Ward Yöntemi	Wilk's Lambda	Hotelling Lawley İz
	1	(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 37, 38, 39)		
4	2	(13, 14, 15, 16, 17)	$\Lambda = 0,0000$	$T_0^2 = 389,73$
	3	(18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26)	$F = 169,3$	$F = 245,4$
	4	(27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36)	$P = 0,000$	$P = 0,000$
	1	(1, 2, 3, 5, 6, 37, 38)		
	2	(4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 39)		
5	3	(13, 14, 15, 16, 17)	$\Lambda = 0,00000$	$T_0^2 = 398,01$
	4	(18, 21, 22, 23, 24, 25, 26)	$F = 90,7$	$F = 178,3$
	5	(27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36)	$P = 0,000$	$P = 0,000$
		Tam Bağlantı Yöntemi		
	1	(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 37, 38, 39)		
	2	(13, 14, 15, 16, 17)		
5	3	(18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26)	$\Lambda = 0,0000$	$T_0^2 = 416,136$
	4	(25)	$F = 77,2$	$F = 1864$
	5	(27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 40, 41, 42, 43, 44, 45)	$P = 0,000$	$P = 0,000$
		Tek Bağlantı Yöntemi		
	1	(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12,)		
	2	(13, 14, 15, 16, 17)		
5	3	(18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26)	$\Lambda = 0,00000$	$T_0^2 = 399,07$
	4	(27, 28, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36)	$F = 78,3$	$F = 178,75$
	5	(30)	$P = 0,000$	$P = 0,000$

****Birimler 4 kümeye ayrıldığında Tek ve Tam Bağlantı yöntemlerine göre elde edilen sınıflar Ward yöntemi ile aynı sonuçları verdiğinden Çizelge 1'de tekrar edilmemiştir.**

Her üç kümeleme yöntemine göre (Tek bağlantı, Tam bağlantı ve Ward kümeleme yöntemleri) elde edilen dendogramlar (ağaç diyagramları) incelendiğinde, farklı lokasyonlara ait bal arısı genotiplerinin benzer kümelerde sınıflandığı gözlemlenmektedir. Ancak küme sayısı 4 olduğunda alt gruplarda farklılık gözlenmektedir. Oluşan alt gruplardan en anlamlı sınıflandırmayı Ward yönteminin sağladığı görülmektedir. Oluşturulan kümelerin istatistiksel olarak anlamlılığı, **Wilks' Lambda** ve **Hotelling's**

Lawley Trace istatistikleri kullanılarak test edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, elde edilen küme yapılarının %0,1 anlamlılık düzeyinde ($P < 0,001$) istatistiksel olarak oldukça anlamlı olduğu belirlenmiştir.



Şekil 1'de sunulan dendrogram incelendiğinde, 1 no'lu Karadeniz Bölgesi'ne ait bal arısı örnekleri ile 2 no'lu Kuzeydoğu Anadolu Bölgesi'ne ait örneklerin birbirlerine morfolojik açıdan yakınlık gösterdiği belirlenmiştir. Ancak, Karadeniz Bölgesi'ne ait Almus ve Erbaa-Çakır lokasyonlarından elde edilen örneklerin, Kuzeydoğu Anadolu Bölgesi'ne ait bireylerin oluşturduğu kümeye dahil olduğu görülmektedir. Bu durum, söz konusu bölgelerdeki arı popülasyonlarının geçit formu, ortak orijin yapısı veya gezginci arıcılık uygulamalarının etkisiyle açıklanabilir.

Ege Bölgesi'ne ait tüm lokasyon örneklerinin 4 no'lu kümede yer aldığı ve bu kümenin, 3 no'lu kümede sınıflanan İç Anadolu Bölgesi'ne ait örneklerle belirli düzeyde yakınlık gösterdiği gözlemlenmiştir.

Dendrogramda bağlantı uzaklığı 200 birimlik karesel Öklid uzaklığı temelinde değerlendirildiğinde, 1 ve 2 no'lu bölgeler ile 3 ve 4 no'lu bölgelerin birbirine yakın kümeler oluşturduğu görülmektedir. Bu bulgu, Türkiye'deki ana arı popülasyonunun morfolojik yapısının genel olarak Anadolu bal arısı (*Apis mellifera anatoliaca*) ve onun çeşitli ekotipleriyle temsil edildiğine yönelik Ruttner (19) tarafından bildirilen sonuçlarla örtüşmektedir.

Buna karşılık, 5 no'lu bölge olan Şanlıurfa iline ait bal arısı örneklerinin, diğer lokasyonlardan belirgin biçimde ayrılarak, bağımsız bir grup

oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu durum, Güneydoğu Anadolu Bölgesi arılarının, İran menşeli A. m. meda alt türünün ekotiplerinden biri olduğu yönündeki **Ruttner (19)**'in bulgularını destekler niteliktedir (20), (21).

4. SONUÇ

Sonuç olarak, çok değişkenli yapıya sahip verilerin gruplandırılması ve sınıflandırılmasında tek değişkenli istatistiksel analiz yöntemlerinin yetersiz kaldığı ortaya konulmuştur. Bu bağlamda, söz konusu bireylerin (birimlerin) değerlendirilmesinde çok değişkenli istatistiksel analiz teknikleri, özellikle kümeleme analizi, daha etkin ve anlamlı sonuçlar sağlamaktadır.

Ayrıca, Şanlıurfa yöresine ait bal arısı genotiplerinin, morfolojik özellikler bakımından Anadolu arı ırkından ziyade İran arısı (**A. m. meda**) genotipine daha fazla benzerlik gösterdiği tespit edilmiş olup, bu bulgu **Ruttner (19)** tarafından daha önce ortaya konulan sonuçlarla uyumluluk arz etmektedir.

Bu çalışmanın, benzer veri yapılarına sahip araştırmalarda kullanılabilecek yöntemsel bir örnek sunması açısından literatüre katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

5. Kaynaklar

- (1) Genç, F., Dülger, C., Bilgin Ö. C., 1997. **Bazı balarısı (*Apis mellifera* L.) genotiplerinin morfolojik özelliklerine ilişkin diskriminant analizi sonuçları.** Teknik Arıcılık. 58, 2-9. Ankara.
- (2) Ruttner, F., Tassencourt L., Louveaux, J., 1978. **Biometrical-statistical analysis of geographic variability of *Apis mellifera* L.** Apidologie. 9 (4) 363-381.
- (3) Karacaoğlu, M., Fıratlı, Ç., 1992. **Ardahan izole bölge arılarının bazı morfolojik özellikleri.** Doğu Anadolu Bölgesi 1. Arıcılık Semineri (3-4 Haziran 1992). Atatürk Üniv. Zir. Fak. Ofset Tesisleri. Erzurum. 1-16.
- (4) Kence, A., 1997. **Fenetik taksonominin esasları.** Taksonomi Yaz Okulu (7-13 Eylül 1997) Ders Notları .118-119. Antalya.
- (5) Karacaoğlu, M., 1989. **Orta Anadolu, Karadeniz Geçit ve Ardahan İzole Bölgesi arılarının bazı morfolojik özellikleri üzerinde bir araştırma.** Doktora Tezi (Yayınlanmamış). Ankara Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara. 98 s.
- (6) Öztürk, A. İ., Alataş, İ., Settar, A., Boduroğlu, Y., Uyguner, F. B., Bozkurt, M., 1992. **Ege bölgesi arı popülasyonlarında bazı morfolojik özelliklerin saptanması.** Sonuç Raporu. Ege Tar. Arşt. Enstitüsü. Mene-men-İzmir. 51 s.
- (7) Genç, V. H., 1996. **Orta Anadolu bal arısı (*A. m. anatoliaca*) ekotiplerinin ve bunların çeşitli melezlerinin yapısal ve davranışsal özellikleri üzerinde bir araştırma.** Doktora Tezi (Yayınlanmamış). Ankara Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara. 100 s.
- (8) Sıralı, R., 1998. **Şanlıurfa ilinin farklı ekolojik koşullarında bulunan bal arılarının bazı morfolojik karakterlerinin belirlenmesi üzerine araştırmalar.** Doktora tezi (Yayınlanmamış). Harran Üniv. Fen Bil. Enst. Şanlıurfa. 208 s.
- (9) Stace, C.A. 1980. **Plant taxonomy and biosystematics.** Arnold, London.
- (10) Anderberg, M.R. 1973. **Cluster analysis for applications.** Academic Press. New York. 359 p.
- (11) Sharma S., 1996. **Applied Multivariate Techniques.** John Wiley & Sons. Inc. New York. 493 p.
- (12) Bağcı H., Özdamar K., Shareef S.R. 1991. **Bacillus thuringiensis varyetelerinin sınıflandırılmasında sayısal taksonominin uygulanması.** Doğa -Tr.J. of Biology. (15) 70-81.
- (13) *Statistica Inc, 2022. Statistica release, V 14.0.1.*
- (14) Norusis, M.J., 2019. **IBM SPSS Statistics, SPSS Inc., V.26.0** Chicago.

- (15) Murtagh, F., 1983. **A probability theory of hierarchic clustering using random dendograms.** J. Statist. Comput. Simul., 13: 145-157.
- (16) Johnson, A.R. and Wichern, D.W., 1992. **Applied multivariate statistical analysis.** Prentice Hall International Inc. New Jersey.
- (17) Tatlıdil, H., 1992. **Uygulamalı çok değişkenli istatistik analiz.** Hacatepe Üniv., Ankara. 320 s.
- (18) Bek, Y., 1998. **Çok değişkenli varyans analizi ders notları.** Çuk. Ü. Adana.
- (19) Ruttner, F., 1988. **Biogeography and taxonomy of honey bees.** Springer-Verlag, Berlin. 283 p
- (20) Özbakır, G.Ö., 2011. **Türkiye'nin Güneydoğu sınır boyu bal arısı popülasyonlarının (Apis mellifera L.) morfolojik özellikleri.** Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zootehni anabilim dalı Doktora Tezi, Ankara.
- (21) Özsoy Taşkiran, N., Dayıoğlu, M., Kabakcı, D., 2017. **Bal Arılarının (Apis Mellifera L.) Sınıflandırılması ve Ekolojik Koşulların Morfolojisi Üzerine Etkisi.** Arıcılık Araştırma Dergisi, Cilt: 9, Sayı:2, S:68-77.

Sığır Çiftliklerinde Yalın Altı Sigma Metodolojisinin Uygulanabilirliği

İrfan Öztürk¹

Özet

Teknolojideki hızlı gelişim ve değişimlere paralel gelişme gösteren yeni üretim ve yönetim yaklaşımları dünyadaki rekabeti küresel boyuta taşımaktadır. Günümüzde geleneksel üretim stratejileri, işletmeleri küresel rekabet karşısında ezilmeye mahkûm bırakmaktadır. Bu nedenle işletmelerimizin küresel boyutta rekabet edebilir güce erişebilmesi için yeni üretim ve yönetim yaklaşımlarını uygulamak zorundadırlar. İsrafi azaltarak kârı, üretimdeki kusur oranını minimize ederek müşteri memnuniyetini artırmayı esas alan yeni anlayış ve yaklaşımlardan biri de yalın Altı Sigma felsefesidir.

Bu çalışmamızda Yalın Altı Sigma metodolojisinin sığır çiftliklerinde uygulanabilirliği ortaya konulmaya çalışıldı.

1.GİRİŞ

Yalın üretim ile Altı Sigma farklı dönemlerde ortaya çıkmış iki ayrı prensip olmakla birlikte müşteri memnuniyetini, üretimi, geliri artırmaya yönelik hizmet eden ve birbirlerini tamamlayan ve destekleyen iki farklı metot dur. Bugüne kadar çoğunlukla büyük işletmelerde, üretim ve hizmet sektöründe kullanılan bu metodoloji yaygınlaştırılarak küçükte olsa tarımsal üretim sektöründe de kullanılması gerekmektedir.

Altı Sigma, hizmet ve üretim sektöründe mükemmelliğin yakalanması amacıyla işletmelerde süreçleri tanımlama, ölçme, analiz etme, iyileştirme ve kontrolü sağlamak için etkili istatistik araçlarının kullanıldığı bir yönetim sistemidir (1).

Altı Sigma, işletmelerde kayıt altına alınan verilerden yola çıkarak üretimdeki hata ve kusur oranını etkili istatistiksel metotları da kullanarak

1 Doç. Dr., Harran Üniversitesi OSB MYO Gıda Bölümü, ozirfan23@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-6421-5604>

bir milyonda 3.4 seviyesine indirgemeyi hedefleyen bir felsefedir. Altı Sigma metodunun sigma ile adlandırılmasının sebebi, yöntemin üretimdeki değişkenliği ortadan kaldırmayı (minimize etmeyi) hedeflemesinden kaynaklanmaktadır.

Sigma (σ) istatistikte standart sapmanın sembolüdür. Standart sapma ise verilerin dağılımına ait yayılım, dağılım, ortalamadan sapma ve farklılaşma ölçüsü olarak tanımlanabilir. Araştırmalardan elde edilen değerler arasındaki farklılaşma büyüdükçe, standart sapma büyümekte, ancak farklılaşma azaldıkça da küçülmektedir. Bu demektir ki sigma değerinde iyileşme arttıkça maliyet, çevrim zamanı, hata ve kusur oranı azalmaktadır. Bu durum beraberinde müşteri memnuniyeti de artırmaktadır (2).

Altı Sigma yöntemini uygulayan işletmeler, uygulama sürecinin verimliliğini sigma seviyesi olarak adlandırılan bir endeksle izlemektedirler. Sigma seviyesiyle; çevrim zamanı, verimlilik, ürün başına hata ve kalitesizlik maliyeti gibi bazı özellikler arasında sıkı bir ilişki bulunduğu söylenebilir (3).

Örneğin 1 Sigma seviyesinde üretim yapan bir tesis 1.000.000 işlemden yaklaşık 700.000 hatalı ürün yapar. Eğer işletme 2 Sigma seviyesinde çalışıyorsa bu durumda ortalama 300.000 hatalı üretim yaptığı anlamına gelmektedir. Birçok işletmenin 3 ile 4 sigma düzeyinde faaliyet gösterdiği düşünülecek olursa, bu durumda bir milyonda 66.800 ile 6.210 arasında hata işleme riskinin bulunduğu söylenebilir. Bir üretim veya hizmet sürecinin 6 sigma seviyesinde olması, üretilen ürün veya hizmette en fazla bir milyonda 3.4 adet hataya rastlanabileceğini göstermektedir (4).

Tablo 1.'ri incelediğimizde bir milyon üründe oluşabilecek hatalı ürün sayısı ve buna bağlı olarak kalite maliyetinin satış gelirlerine yansımaları gösteren sigma seviyelerini görmek mümkündür (5), (2). Bu durum, süreçlerin Altı Sigma'ya yaklaşması sonucunda süreç kalitesinin ve verimliliğinin ne derece arttığını göstermektedir. Örnek verecek olursak; 2 Sigma seviyesinde üretim yapan bir firma, toplam satışların %30-40'ını kalitesizlik maliyeti olarak boşa harcamaktadır. Bununla birlikte 6 Sigma seviyesinin, 3 Sigma seviyesinden yaklaşık 20.000 kat daha iyi olduğunu söyleyebiliriz.

Tablo 1. Sigma düzeyleri ile hata oranı ve kalite maliyeti düşüşü arasındaki ilişki

Sigma (σ) seviyesi	1 milyondaki hata sayısı	Oransal hata (DPMO)	Kalitesizlik maliyeti
1	691,462	% 69,1	>40
2	308,538	% 30,9	Satışların % 30-40
3	66,807	% 6,7	Satışların % 20-30
4	6,210	% 0,62	Satışların % 15-20
5	233	% 0,023	Satışların % 10-15
6	3,4	% 0,00034	Satışların % 10

Altı Sigma seviyesinin önemini daha iyi anlayabilmek için, farklı uygulama alanlarındaki sonuçlarını Tablo 2.'den incelememiz gerekmektedir. Bu karşılaştırma da 6 sigma ile yaklaşık 3 sigma seviyeleri arasındaki çarpıcı fark daha kolay anlaşılmaktadır (6), (7).

Tablo 2. Yaklaşık 3 sigma ile 6 sigma seviyelerinde oluşan hatalar

Yaklaşık 3 Sigma Seviyesi	6 Sigma Seviyesi
Hava yolunda 6 saatlik bir uçuş planında hava boşluğu tehlikesi 3,6 dakikalık bir süre ile risk yaşanabilirken	Altı Sigma düzeyinde bu süreç 0,1 saniyeye düşecekti.
300.000 mektubun dağıtımı süreci için 3000 hatalı dağıtım gerçekleşirken	Altı Sigma da 1 hatalı dağıtım yapılır.
Hastanede yapılan hatalı ameliyat sayısı: 1350/1 hafta	Hastanede yapılan hatalı ameliyat sayısı: 1/20 yıl
Bir aydaki meydana gelebilecek elektrik kesintisi: 7,2 saat/ay	Altı Sigma için kesinti 8,8 saniye
Telefonlarda sinyal kesinti süresi: 27 dakika/1 hafta	Telefonlarda sinyal kesinti süresi: 6 saniye/100 sene
1.000.000 dolarlık bir yatırımdaki meydana gelebilecek kayıp 10.000 dolar iken	Altı Sigma için yalnızca 3,4 dolardır.
Sağlıksız içme suyunun Şebekeye verilme süresi: 2 saat/1 ay	Sağlıksız içme suyunun Şebekeye verilme süresi: 1saniye/6 sene

Eğer bir uygulamada başarılı olmak isteniyorsa, Altı Sigma projelerinde yer alacak ekip üyelerinin görev ve sorumlulukları tanımlanması gerekir. Bu amaçla ile çalışan görevlilerin aldıkları sorumluluklar uzak doğu sporlarındaki kuşak renkleri sıralanıp tanımlanmaktadır (8).

Altı Sigma organizasyonunda uygulamada yer alan ekip üyelerinin rolleri Tablo 3. 'de ki gibi özetlenebilmektedir.

Tablo 3. Altı Sigma Organizasyonunda Yer Alan Üyelerin Rol ve Sorumlulukları

-Şampiyon	-Uzman Kara Kuşak	-Kara Kuşak	-Yeşil Kuşak
-İşletmenin 6 Sigma vizyonunu oluşturmak -Altı Sigma akış programını tanımlamak - Uygulanacak Stratejilere eğitim planı geliştirmek -Yüksek etkili projeleri belirlemek ve İstatistiksel düşünce sistemini geliştirmek -Kara Kuşak çalışanlarını denetlemek	-Kara Kuşak bireylerinin eğitim ve sertifikalandırılmalarına yardımcı olarak -Şampiyonlarla diyalog içinde bulunmak - Organizasyona dahil olan tüm personele eğitim vermek -Projelerin tanımlanmasına destek olmak - Proje incelemelerine katılarak, teknik danışmanlık yapmak - Kara Kuşakları desteklemek	-Projede çıkabilecek problemleri belirlemek -Projenin gerçekleştirilme sürecinde ekipleri yönlendirip yönetmek - Gelişmeler hakkında Liderleri bilgilendirmek - Projenin uygulamasında en etkin araçları belirlemek. -Gerek görüldüğünde şampiyonlardan destek talep etmek	-Günlük yapılacak işleri yerine getirmek - Projelere katılarak, sorumluluklarını yerine getirmek -Proje sürecinde ve projenin tamamlanmasından sonra Altı Sigma metodunu öğrenmeyi devam ettirmek

Kaynak: (9) *Harry and Schroeder, 2000, P:98-199.*

Altı Sigma sadece bir kalite yönetimi olmayıp, aynı zamanda Altı Sigma, operasyonlarda mükemmelliğin sağlanması amacıyla sürekli iyileştirilmeyi, işletmelerde süreçlerin tanımlanması, ölçülmesi, analiz edilmesi, iyileştirilmesi ve kontrolü için kolay ve etkili istatistik araçlarının kullanıldığı bir yönetim stratejisi olduğunu söyleyebiliriz.

Altı Sigma metodunun işletme faaliyetlerine uygulanmasında kullanılan çok sayıda iyileştirme modeli bulunmaktadır. Fakat bu modellerin hemen hemen hepsinin W.Edwards Demingin;

PUKÖ–Planla, Uygula, Kontrol et, Önlem al döngüsüne dayandığı söylenebilir.

Ayrıca altı Sigma uygulamalarında yaygın olarak kullanılan;

TÖAİK–Tanımla, Ölç, Analiz et, İyileştir ve Kontrol et döngüsü de kullanılmaktadır.

Yalın üretim (Yalın sistem) ise Toyota Üretim Sistemi'nin (TPS) diğer adıdır. Toyota tarafından 1960'lı yılların başında tam olarak uygulanmaya başlanmıştır. Tüm Japon firmaları aynı düzeyde olmasa da yalın yönetimi başarıyla uygulamış ve ihracat düzeylerini son otuz yıl sürekli arttırmışlardır (10).

6 Sigma ekip üyeleri en az lise mezunu olmaları gerekirken, yalın yöntemde uygulayıcılar yüksek bir eğitim seviyesinde olmaları gerekmemektedir. Altı Sigma, Yalın üretim teknikleri ile birbirlerini destekleyecek şekilde birlikte kullanıldıklarında en iyi sonuca ulaşılabilir. Çünkü yalın üretim yalnızca akış prosesinde problem teşkil eden ve değer katmayan tüm faaliyetleri tespit ederken, 6 sigma sürece değer katan her bir faaliyetin yeterliliğini artırarak yalın üretim yöntemlerine ekstra bir girdi daha sağlamaktadır (11).

Yalın üretim müşteriye değer katmayarak maliyeti artıran gereksiz her şeyi israf olarak görmektedir. Bu amaçla müşterilerin ihtiyaçlarına göre kaynakları kontrol altına almayı hedeflemektedir. Kısacası yalın üretim süreç optimizasyonu içinde maliyetin düşürülmesine odaklanmaktadır (2). Buna karşılık Altı Sigma ölçüm esaslı bir yöntem olup, değişkenliğin azaltılması için hataların azaltılarak kalitenin iyileştirilmesine odaklanmaktadır. Yalın Altı Sigma ise bu iki yöntemin bir araya getirilmesi ile oluşan yeni bir yaklaşım metodu dur (12) (13).

2.MATERYAL VE METOT

2.1.MATERYAL

Uygulama Şanlıurfa'nın Harran ilçesinde zarar konumunda bulunan 500 baş simental ırkına ait büyükbaş hayvanın barındıran bir besi işletmesi incelemeye alınmıştır. İşletmenin gelir ve giderlerine bakıldığı zaman kâr oranının olmadığı gözlemlenmektedir. İşletmede yalın Altı **Sigma** metodolojisinin uygulanabilirliği ortaya konulmaya çalışılmaktadır. Bu metodoloji için sırasıyla;

2.1.1. Materyal olarak ele alınan besi işletmesinin genel özellikleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

- İşletmenin arazi büyüklüğü 20 dönümdür
- Barınağın hemen yanında yem deposu bulunmaktadır
- Gübre çukurunun barınağın bitiminde bulunmaktadır
- Revir, işletme arazisi içerisinde bulunmaktadır
- İşletmede çalışan işçilerin barınacakları evin işletme arazisi içerisinde bulunmaktadır
- İşletme kapalı ahır özelliği taşımaktadır
- Zemin betondan yapılmıştır
- Barınağın zemini hafif eğimlidir

- Barınağın kapıları metalden yapılmıştır
- İşletmede 8 işçi çalışmaktadır

2.1.2. İşletmede Kullanılan Alet ve Ekipmanlar:

1.Yem hazırlamada kullanılan makineler, 2.Taşıyıcı ve yükleyiciler, 3.Hayvanlara içme suyu sağlayan araçlar, 4. Yem ham maddelerini dağıtan ve karıştıran makineler, 5. Işıklandırma, 6. Boynuz köreltici aletler, 7. Hayvanların bağlanması için kullanılan zincirler, 8. Hayvan kaşıma fırçası, 9. İşçiler için gerekli elbiseler, 10. Gübre temizleme makinesi

2.1.3. İşletmenin Olumsuz Özellikleri:

- Yerlerin kaygan olmasından dolayı hayvanlar yere düşerek zarar görebilmektedir
- Çatı kısmının deforme olmasından dolayı yağışlarda çatının barınağa yağmur suyu sızdırması
- Kapalı sistem olduğundan dolayı hayvanların hareket alanının kısıtlı olması
- Kapalı sistemde hareketsizlikten dolayı yağlanma, akciğer ile eklem problemi görülebilmektedir
- Yazın serinletmek için gereken uygulamanın yapılmamasından hayvanlar stres altına girmektedir
- Yemlik dizaynı standart dışı olduğundan, yemlemede problem yaşanmaktadır
- Sulukların deforme olması hayvanların sağlıklı, temiz suya ihtiyaç duyduğunda ulaşamamaktadır

2.1.4. Rasyonda Kullanılan Hammaddeler:

- Arpa, mısır silajı, buğday, besi karma yemi, saman, kepek, tuz ve vitaminler

2.1.5. Beside Tutulan Hayvanların Özellikleri:

- Günlük canlı ağırlık artışları 1350-1600 gr arasındadır
- Cidago yüksekliği 150-165 cm arasındadır
- Anavatani İsviçre olan Kombine ırktır
- Ergin canlı ağırlığı 900-1000 kg arasında olup et randımanı %58 oranındadır

İşletme 12 aylıkken aldığı besi hayvanlarını 13 ay besledikten sonra kesime göndermektedir. Bu aşamada karkas randımanının düşük, hayvanların ise ortalamanın üzerinde yağlandığı tespit edilmiştir.

Besi süreci sonunda oluşturulan gelir-gider tablosunda işletmenin zarar ettiği belirlenmiştir. Bu nedenle İşletmeci bir sonraki besi programı için yalın Altı Sigma metodolojisinin uygulanmasına ikna olmuştur. Bu aşamadan sonra aşağıda sıralanan metot bölümündeki aşamalar tatbik edilmelidir.

2.2.METOT

2.2.1. Besi İşletmesinde Yalın Altı Sigma Uygulaması

Verilen bilgiler ışığında Yalın Altı Sigma metodolojisini besi çiftliğinde uygulayarak hata paylarını minimize edip, müşteri memnuniyetini artırma ve işletmenin kâr etme gücünü maksimum seviyeye taşınması planlanmaktadır. Altı Sigma'nın beş aşaması olan TÖAİK (DMAIC) den oluşmaktadır.

2.2.1.1 Tanımlama

Bu aşamada öncelikle işletme müdürü ile görüşülerek projeden kısaca bahsedilmiştir. İşletmenin olası problemleri sorgulanarak, iki tip problemin mevcut olduğu belirlenmiştir.

1.Problem: Yetiştirilen besi sığırlarında gözle görülür bir kâr artış sağlanamamakta ama buna karşılık maliyetlerde sürekli bir artış olduğundan karlılık düşmektedir.

2.Problem: Hayvanların normalin üzerinde yağlanma göstermesi, karkas randımanının düşük olmasından dolayı etkin ve verimli rasyonların hazırlanmadığı düşünülmektedir.

Bu iki problem doğrultusunda iyileştirme çalışmalarına başlanması hedeflendi. Çalışmanın ilk adımı hem besiye alınacak hayvan hem kullanılan yem materyalleri yönünden beklentileri karşılamayan faktörler ele alınacaktır. Bu amaçla araştırma, besiye alınacak hayvan ve yem materyallerini kapsamaktadır.

3.Problem: Basit bir fermentasyonla gübreden elde edilebilecek biyogazın ve kaliteli hayvan gübresinin israf edilmesi

Projenin sağlıklı yürütülebilmesi için, projenin önemi ve içeriğinin anlaşılabilmesi için işletme sahibi ile toplantı yapılması kesinlikle elzemdir. Böylece yönetimin projeye katılımı sağlandığı gibi proje için gerekli tüm bilgilere de rahatlıkla ulaşılması söz konusu olacaktır.

Projede görev alması gereken kişiler aşağıda sıralanmıştır;

1-*Yeşil kuşak*- Süreçte görev alan İşçiler

2-*Uzman kara kuşak*-Projede danışman olarak görev alacak uzman

3-*Kalite şampiyonu*- İşletme sahibi

İşletmede projenin amacına uygun olarak üretim kalitesi ölçülürken; süreç odaklı yani çok aşamalı bir iyileştirme yaklaşımı benimsendi. Bu amaçla ölçüme hizmet kalitesini etkileyebilecek kritik karakteristikler saptanarak başlandı. Bu saptama yapılırken öncelikle uygulamanın konusu olan besi çiftliğinin zarar eden unsurları araştırılıp belirlendi.

2.2.1.2 Gözlemlenen Hatalar

- Besiye alınan hayvanların ortama uyum sağlamaması
- Kullanılan yemlerin kalitesiz ve hayvanlardan istenilen randımanın alınamaması
- Çalışanların memnuniyetsizliği
- İşletmenin besi hayvanı için kötü durumda olması
- Kesime giden hayvanların fazla yağlı olmasından dolayı müşteri memnuniyetsizliği
- İşletmede kullanılan malzemenin yetersiz ve kötü durumda olması
- İşletmecinin hasta hayvanların tedavisini kendi işçilerine yaptırarak verim kaybına neden olması.

Yapılan analizler sonucunda yukarda verilen hatalar tespit edilmiştir.

2.2.1.3 Analiz

Ölçme safhasında sürecin temel performans değerleri ortaya konulurken; analiz safhasında ise problemlerin temel nedenleri hakkında teoriler geliştirilip, söz konusu teorilerle elde edilen veriler doğrulanarak problemlerin temel nedenleri ortaya konulmaktadır. Doğruluğu kanıtlanan nedenler bir sonraki süreçte, tartışılarak çözümlerin oluşturulması için temel teşkil edeceği düşünülmektedir. Bu aşamanın asıl amacı problemlerin sebeplerini tanımlamak ve bunların nedenlerini doğrulamaya çalışmaktır.

İşletmenin zarar etme nedenleri;

- Besiye alınan hayvanların rastgele seçilmesi
- Besiye alınan hayvanların nakliye esnasında yaralanmaları nedeniyle stres oluşumu

- Besiye alınan hayvanlarda yeme alıştırtma sürecinin uygulanmamasından dolayı ishal olması
- Besi hayvanlarının yem ve su ihtiyaçları düzensiz karşılanıyor olması
- İşletme kendi yemini üretmediğinden ve dışarıdan alınan yemler masrafları artırmakta
- Çalışanların işlerini zamansız ve düzensiz yapması, elektrik ve suyun sık sık kesilmesi
- İşçilerin mutsuz ve sorumsuz olmasının yanında İşletme sahibinin işletmeye düzensiz gidip gelmesi
- İşletmenin fiziki yapısı hasar görmüş, yem depolama yerlerinin nemli ve bakımsız olması
- Kullanılan malzemeler yıpranmış ve iş göremez durumda
- Besiye alınan hayvanların indirme ve bindirme sırasında yaralanmaları
- Hastalık teşhis ve tedavi işlemlerinin işçiler tarafından yapılması

Kâr marjını düşüren bu unsurlara yönelik iyileştirme safhasında çözüm odaklı planlar yapılır.

2.2.1.4 İyileştirme

Geliştirme safhasında problemleri bertaraf eden çözümler geliştirilerek uygulanır ve sonuçlar değerlendirilir. Amaç, ortaya konulan çözüm önerilerinin problemi çözüp, ilerleme sağladığını göstermektir. Bununla birlikte bir sonraki aşamada söz konusu sonuçların nasıl değerlendirileceğini açıklayan bir plan oluşturulması gerekmektedir.

Analizler sonucunda tespit edilen hatalar ise aşağıdaki gibi düzeltilmelidir.

- *Şanlıurfa'ya uyum sağlayabilen ırklar seçilmeli*
- *Besi hayvanlarının seçim sırasında veteriner hekimle uygun ve sağlıklı hayvanlar seçilmeli.*
- *Çalışanların motivasyonunu artırmak için işletme sahibi ile çalışanlar arasında uzlaşma sağlanmalı*
- *İşletme sahibi işlemeye düzenli gidip gelmeli*
- *Çalışanlar besideki hayvanların yem su ihtiyaçlarını düzenli bir şekilde vermeli*
- *Alınan yemlerin numuneleri analize gönderilerek kaliteli yemler alınmalı*

- *Besideki hayvanın yaşlarına göre ihtiyaç duydukları rasyonlar temin edilmeli*
- *İşletmede bulunan boş araziye yem bitkileri ekilmeli*
- *Malzemelerin bakımları belli bir düzende sürekli yapılarak, hijyen koşulları kesinlikle sağlanmalı*
- *Yanlış teşhis ve gereksiz ilaç kullanımı ortadan kaldırmak için veteriner temin edilmeli*
- *Yükleme sırasındaki kazaları önlemek için rampa doğru yere ve sağlam yapılmalı.*
- *Besi hayvanlarının yağlanmasını önlemek amacıyla, rasyonda gerekli düzenlemeler yapılmalı.*

2.2.1.5 Kontrol

Programın geliştirilmesi sürecinde problemlerin nedenlerini ortadan kaldırmayı hedefleyen çözümler geliştirilerek uygulanır ve sonuçlar değerlendirilir. Amaç, verileri kullanarak, ortaya konulan çözüm önerileri ile problemin bertaraf edildiğini ve gelişme için öncülük ettiğini göstermektir. Ayrıca bu aşamada sonuçların bir sonraki aşamada nasıl değerlendirileceğini açıklayan bir plan üzerinde durulmalıdır. Çalışmalar sonucunda Yalın Altı Sigma projesini uygulayan işletme de uygulamanın sürekliliğini sağlayabilmek için işçilerle (yeşil kuşak) Altı Sigma hakkında toplantılar düzenlenerek görevler verilmelidir.

3.SONUÇ

Bu çalışmada besi işletmesinde Yalın Altı Sigma uygulamasının aşamaları irdelenmiştir. Yalın altı sigma uzun soluklu, sabır isteyen bir metodolojidir. Devamlılık sağlandığı sürece işletmede verimlilik, kalite artacağı gibi israfa neden olan gereksiz girdiler üretimden çıkarıldığı zaman işletmenin kâr oranında da ciddi artışlar görülecektir. Bu çalışmada bir besi işletmesindeki yalın altı sigma metodolojisinin uygulama süreci detaylı bir şekilde açıklanmaya çalışıldı. Böylece o ana kadar besi sürecinde verim kaybına neden olan faktörler tespit edilerek; bazı iyileştirmelerin yapılması için gerekli tedbirler ortaya konulmuştur. Sürecin girdi ve çıktıları birbiri ile ilişkilendirilerek, çıktılar üzerinde en çok etkiye sahip olan faktörler belirlenmiştir. Süreçteki problemlerin tespit edilip iyileştirmesi için ortaya konulan fırsatlar, benzer süreçler içinde girdi oluşturmaktadır. Elde edilen sonuçların uzun süreli iyileştirme programında kullanılarak diğer besicilerimiz içinde örnek teşkil edeceğini ümit ediyoruz. Bu konuda daha önce çalışma

yapmış olan (Ben Hoffman, 2013) isimli araştırmacının çalışmasından da faydalanabilir (14). Bu metodolojiyi işletmesine uygulayıp başarılı bir sonuç elde etmeyi düşünen üreticiler, kesinlikle bunu göz ardı etmemesi gerekmektedir. Başarı ancak işletme sahibinden tutunuz, işletme de görev alan teknik elemanlarından işçilere kadar hepsinin birlikte senkronize halde çalışması ile elde edilebilmektedir.

4.Kaynaklar

- 1- Türkan, Y.S., Manisalı, E., Çelikkol, M., F., (2009), *Evaluation of critical success factors effect on six sigma project success in Turkey's manufacturing sector*, Journal of Engineering and Natural Sciences, s.105-117.
- 2- Öztürk, A., (2009), *Kalite yönetimi ve planlaması*, Ekin Yayınevi, Bursa, ISBN 978-9944-141-79-6
- 3- Polat, A., Cömert, B. ve Arıttürk, T., *Altı Sigma Vizyonu*. Pelin Ofset Matbaacılık, Ankara, 2005
- 4--Pande, P., ve Holpp, L., (2002), *What is six sigma?*, McGraw-Hill, New York, ISBN 0-07-128185-6
- 5- Gygi, C.; DeCarlo, N. ve Williams, B., (2005), *Six sigma for dummies*[3] Hoboken, NJ: Wiley Publishing, Inc., ISBN 0-7645-6798-5.
- 6- Çabuk Y., Karayılmazlar S., 2010. *Altı Sigma Yaklaşımı*, Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 12:17 s.94
- 7- Ford Otosan A.Ş., Müşteri Odaklı Altı Sigma Eğitim Notları 2001 – Kocaeli
- 8- Patır, S., “Kalite Anlayışında Altı Sigma Yaklaşımı”, Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi. 7(24), (2008), s.63-83.
- 9- Harry, M.J. ve Schroeder, R.R., *Six Sigma: The Breakthrough Management Strategy Revolutionizing the World's Top Corporations*, Doubleday Business, ABD, 2000.
- 10- Chen, J., Li, Y., & Shady, B. (2010). From value stream mapping toward a lean/sigma continuous improvement process: An industrial case study. International Journal of Production Research, 48(4), 1069-1086.
- 11- George, M., Rowlands, D., Kastle, B., “Yalın Altı Sigma Nedir?, 1.baskı”, Barış Gökçer Akbay, SPAC Altı Sigma Danışmanlık, Ankara, 9-86, 2005 (çeviri).
- 12- Hostetler, D., “Improve Your Accounting Firm Processes Using Lean Six Sigma”, Journal of Accountancy. January, (2010), p. 38-42.
- 13-SIX SIGMA: A COMPLETE STEP-BY-STEP GUIDE, 2018. <https://www.sixsigmacouncil.org/wp-content/uploads/2018/08/Six-Sigma-A-Complete-Step-by-Step-Guide.pdf> (Erişim mayıs,2025)
- 14- Hartman, B. “Lean’ principles applied to a farm”, growing for market, Volume 22, Number 5, 2013

Nano-Biyokimya ve Yapay Zekâ ile Çevresel Dönüşüm: Yenilikçi Çözümler ve Sürdürülebilir Uygulamalar 8

Elif Aktürk Bozdemir¹

Yakup Budak²

Özet

Bu çalışma, Yeşil Dönüşüm: Çevre Bilimlerinde İnovasyon ve Sürdürülebilir Çözümler kapsamında, çevre bilimleri ve teknolojilerindeki yenilikçi yaklaşımları ve uygulamaları derinlemesine incelemeyi amaçlamaktadır. Günümüzde, iklim değişikliği, biyoçeşitlilik kaybı, kaynak tükenmesi ve kirlilik gibi çevresel sorunlar, insanlık için acil çözüm gerektiren küresel tehditler olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, çalışma, çevre bilimlerinin temel kavramlarını, tarihsel gelişimini ve mühendislik disipliniyle entegrasyonunu ele alarak, çevresel sürdürülebilirlik için bütüncül bir çerçeve sunmaktadır. Sürdürülebilir mühendislik ilkeleri, yeşil teknolojiler, atık yönetimi sistemleri, su arıtma teknolojileri, hava kirliliği kontrol mekanizmaları, enerji yönetimi çözümleri ve iklim değişikliğiyle mücadele stratejileri gibi yenilikçi uygulamalar, güncel vaka analizleri ve teknolojik gelişmeler ışığında detaylı bir şekilde tartışılmaktadır. Ayrıca, biyoçeşitliliğin korunması, çevresel adaletin sağlanması ve sosyo-ekonomik boyutların çevresel politikalara entegrasyonu gibi konulara da odaklanılmaktadır. Çalışma, yapay zekâ, büyük veri analitiği ve uzaktan algılama gibi yeni teknolojilerin çevresel sorunların çözümündeki potansiyelini değerlendirerek, gelecekteki araştırma yönelimleri için bir yol haritası önermektedir. Türkiye özelinde çevresel politikalar ve uygulamalar da ele alınarak, yerel bağlamda sürdürülebilirlik çabalarının küresel hedeflerle nasıl uyumlaştırılabileceği tartışılmıştır. Sonuç olarak, çevresel

1 Dr. Öğr. Gör. Elif Aktürk Bozdemir, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat Meslek Yüksekokulu, Tokat, 60200, Türkiye, elif.akturkbozdemir@gop.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-9228-8635>

2 Prof. Dr. Yakup Budak, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, Tokat, 60200, Türkiye, ybudak74@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7108-5548>

sürdürülebilirliğin ancak bilim, mühendislik, politika ve toplumun ortak çabasıyla mümkün olabileceği vurgulanmakta; disiplinlerarası iş birliğinin ve yenilikçi çözümlerin bu süreçteki kritik rolü üzerinde durulmaktadır.

1. Giriş

Çevresel sorunlar, iklim değişikliği, biyoçeşitlilik kaybı, kirlilik ve kaynak tükenmesi gibi küresel tehditlerle insanlığın karşı karşıya olduğu en büyük meydan okumalardan biridir. Bu sorunlara çözüm bulmak için yenilikçi teknolojiler, özellikle nano-biyokimya ve yapay zekâ (AI) entegrasyonu, çevresel sürdürülebilirlik için umut verici bir yol haritası sunmaktadır. Bu bölüm, nano-biyokimya ve yapay zekanın çevresel uygulamalarda (su arıtımı, karbon yakalama, atık yönetimi) nasıl birleştiğini, bu teknolojilerin Türkiye'deki potansiyelini ve küresel örneklerini ele almaktadır. Ayrıca, bu teknolojilerin sınırlamaları, etik boyutları ve ölçeklenebilirlik zorlukları tartışılmaktadır.

Son yıllarda, çevre bilimleri ve mühendisliği, insan faaliyetlerinin doğal sistemler üzerindeki etkilerini anlamak ve bu etkileri en aza indirmek için disiplinlerarası bir perspektif sunan kritik bir alan olarak öne çıkmaktadır. İklim değişikliği, biyoçeşitlilik kaybı, su ve hava kirliliği ile doğal kaynakların tükenmesi gibi küresel ölçekteki çevresel sorunlar, insanlık için acil çözüm gerektiren meseleler haline gelmiştir [1,2]. Sanayi Devrimi'nden bu yana artan endüstriyel faaliyetler ve kentleşme, ekosistemler üzerinde benzeri görülmemiş bir baskı yaratmış; bu durum, çevresel sürdürülebilirlik için yenilikçi yaklaşımların geliştirilmesini zorunlu kılmıştır [3].

Çevre bilimleri, doğal sistemlerin işleyişini ve bu sistemlerin insan faaliyetleriyle nasıl etkileşime girdiğini anlamaya odaklanırken, çevre mühendisliği bu bilimsel bilgiyi kullanarak somut çözümler tasarlamakta ve uygulamaktadır. Bu iki disiplinin entegrasyonu, yalnızca teknik sorunlara yanıt vermekle kalmayıp, aynı zamanda sosyal, ekonomik ve politik boyutları da kapsayan bütüncül bir yaklaşımı mümkün kılmaktadır [4]. Örneğin, iklim değişikliği gibi çok katmanlı bir sorunun ele alınması, hem çevresel verilerin analizini (çevre bilimleri) hem de karbon yakalama teknolojileri gibi mühendislik çözümlerini (çevre mühendisliği) gerektirmektedir [5].

Bu bağlamda, bu kitap bölümü, çevre bilimleri ve mühendisliğinin temel prensiplerini, tarihsel gelişimini ve günümüzdeki yenilikçi uygulamalarını sistematik bir çerçevede incelemeyi amaçlamaktadır. Su kaynakları yönetimi, atık yönetimi, hava kirliliği kontrolü, enerji yönetimi, iklim değişikliğiyle mücadele, biyoçeşitliliğin korunması gibi spesifik alanlar, güncel literatür ve vaka analizleri ışığında ele alınacaktır. Ayrıca, çevresel adalet, sosyo-ekonomik

etkiler ve çevre politikaları gibi boyutlar da tartışmaya dahil edilerek, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada disiplinler arası işbirliğinin önemi vurgulanacaktır [6,7]. Türkiye özelinde çevresel uygulamalar ve politikalar da değerlendirilerek, yerel bağlamda sürdürülebilirlik çabalarının küresel hedeflerle nasıl uyumlaştırılabileceği üzerine bir perspektif sunulacaktır.

2. Çevre Bilimlerinin Temelleri

Çevre bilimleri, canlı organizmalar ile fiziksel çevreleri arasındaki etkileşimleri inceleyen, doğası gereği disiplinler arası bir alandır. Ekoloji, biyoloji, kimya, jeoloji ve sosyoloji gibi farklı bilim dallarını birleştirerek, çevresel süreçlerin karmaşıklığını anlamaya ve insan faaliyetlerinin bu süreçler üzerindeki etkilerini değerlendirmeye odaklanır [8]. Bu disiplinin temel amacı, ekosistemlerin sağlıklı işleyişini korumak, çevresel bozulmayı önlemek ve sürdürülebilir bir denge sağlamaktır.

2.1. Çevre Bilimlerinin Tanımı ve Kapsamı

Çevre bilimleri, doğal sistemlerin yapısını, işleyişini ve bu sistemler üzerindeki insan etkilerini anlamayı hedefler. Ekosistem hizmetleri (örneğin, temiz hava, su, gıda üretimi), biyojeokimyasal döngüler (karbon, azot, su döngüsü) ve biyoçeşitlilik gibi kavramlar, bu disiplinin temel taşlarını oluşturur [9]. Çevre bilimleri, yalnızca kirlilik veya habitat kaybı gibi olumsuz etkileri değil, aynı zamanda ekosistemlerin insan refahına sunduğu pozitif katkıları da analiz eder. Örneğin, orman ekosistemlerinin karbon tutma kapasitesi, iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir rol oynar [10].

Bu disiplin, uzaktan algılama, coğrafi bilgi sistemleri (CBS), modelleme teknikleri ve laboratuvar analizleri gibi çeşitli yöntemlerle çevresel verileri toplar ve değerlendirir. Bu veriler, çevresel politikaların bilimsel bir temele oturtulmasında ve mühendislik çözümlerinin geliştirilmesinde vazgeçilmez bir öneme sahiptir [11]. Çevre bilimlerinin kapsamı, yerel ölçekteki su kirliliği sorunlarından küresel ölçekteki iklim değişikliğine kadar geniş bir yelpazeyi kapsar ve bu nedenle disiplinler arası bir yaklaşımı zorunlu kılar.

2.2. Çevresel Sorunların Tarihsel Gelişimi

İnsanlık, tarih boyunca çevresel sorunlarla karşılaşmış, ancak bu sorunların boyutu ve etkisi, özellikle Sanayi Devrimi'nden itibaren dramatik bir şekilde artmıştır. 18. yüzyılda başlayan bu süreç, fosil yakıtların yoğun kullanımı, hızlı kentleşme ve endüstriyel üretimle birlikte, hava ve su kirliliği, ormansızlaşma ve habitat kaybı gibi sorunları kronik hale getirmiştir [12]. 20. yüzyılın ortalarına gelindiğinde, çevresel bozulmanın küresel boyutları

daha belirgin hale gelmiş; bu durum, çevresel farkındalığın artmasına ve çevre hareketlerinin doğuşuna zemin hazırlamıştır.

Rachel Carson'ın 1962'de yayımlanan *Silent Spring* adlı eseri, pestisitlerin ekosistemler üzerindeki yıkıcı etkilerini ortaya koyarak modern çevre hareketini tetiklemiştir [13]. 1972'de düzenlenen Birleşmiş Milletler Stockholm İnsan Çevresi Konferansı, çevresel sorunları küresel politik gündeme taşımış ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı'nın (UNEP) kurulmasına öncülük etmiştir [14]. 1992 Rio Zirvesi ve 2015 Paris İklim Anlaşması gibi uluslararası girişimler, çevresel sorunlara karşı küresel iş birliğini güçlendirmiştir. Bu tarihsel süreç, çevresel sorunların yalnızca teknik değil, aynı zamanda sosyal ve politik bir mesele olduğunu açıkça ortaya koymaktadır [15].

3. Sürdürülebilir Mühendislik Yaklaşımları

Çevre mühendisliği, bilimsel prensipleri kullanarak çevresel sorunlara pratik çözümler geliştiren bir disiplindir. Geleneksel olarak atık su arıtımı, katı atık yönetimi ve hava kirliliği kontrolü gibi alanlara odaklanan bu disiplin, günümüzde sürdürülebilirlik kavramı etrafında yeniden şekillenmektedir [16].

3.1. Sürdürülebilir Mühendislik İlkeleri

Sürdürülebilir mühendislik, çevresel, ekonomik ve sosyal etkileri dengeleyerek, kaynakların verimli kullanımını ve çevresel bozulmanın en aza indirilmesini hedefler. Bu yaklaşım, projelerin tasarım, üretim, kullanım ve bertaraf aşamalarının tamamında çevresel etkileri göz önünde bulundurur [17]. Örneğin, “beşikten beşiğe” (cradle-to-cradle) tasarım felsefesi, atıkların birer kaynak olarak yeniden kullanılmasını teşvik eder ve doğrusal “al-yap-at” modeline alternatif sunar [18].

Sürdürülebilir mühendislik ilkeleri, enerji verimliliği, yenilenebilir kaynak kullanımı ve atık azaltımı gibi temel unsurları içerir. Bu ilkeler, inşaat sektöründen enerji üretimine, ulaşımdan endüstriyel süreçlere kadar geniş bir yelpazede uygulanabilir. Örneğin, yeşil bina tasarımları, enerji tüketimini azaltmak için pasif soğutma ve doğal aydınlatma gibi yöntemleri benimser [19].

3.2. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA)

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA), bir ürün veya hizmetin hammadde çıkarımından üretim, kullanım ve bertaraf aşamalarına kadar tüm yaşam döngüsü boyunca çevresel etkilerini sistematik olarak analiz

eden bir yöntemdir [20]. LCA, enerji tüketimi, sera gazı emisyonları, su kullanımı ve atık üretimi gibi faktörleri değerlendirerek, çevresel performansın iyileştirilmesi için fırsatlar sunar. Örneğin, bir ürünün karbon ayak izini hesaplamak, üretim süreçlerinde daha az emisyon üreten alternatif malzemelerin seçilmesine olanak tanır [21].

LCA, özellikle endüstriyel tasarım ve politika geliştirme süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Avrupa Birliği'nin çevre politikaları, ürünlerin çevresel etkilerini değerlendirmek için LCA'yı bir standart olarak benimsemiştir [22]. Bu yöntem, sürdürülebilir mühendislik uygulamalarının bilimsel bir temele oturtulmasında kritik bir araçtır.

3.3. Eko-Tasarım ve Temiz Üretim

Eko-tasarım, ürünlerin çevresel etkilerini en aza indirecek şekilde tasarlanmasını hedefleyen bir yaklaşımdır. Malzeme seçimi, enerji verimliliği, dayanıklılık, tamir edilebilirlik ve geri dönüştürülebilirlik gibi faktörler, eko-tasarımın temel ilkeleridir [23]. Örneğin, elektronik cihazlarda modüler tasarım, cihazların kolayca tamir edilmesini ve bileşenlerin yeniden kullanılmasını sağlayarak atık miktarını azaltır [24].

Temiz üretim ise, üretim süreçlerinde kirliliği kaynağında önlemeyi ve kaynakların verimli kullanımını teşvik etmeyi amaçlar. Bu yaklaşım, endüstriyel süreçlerde atık ve emisyon azaltımı için yenilikçi teknolojilerin benimsenmesini destekler [25]. Temiz üretim hem çevresel hem de ekonomik faydalar sunarak, işletmelerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasına katkı sağlar.

4. Yenilikçi Teknolojiler ve Uygulamalar

Çevre mühendisliği, teknolojik yeniliklerin çevresel sorunlara çözüm üretmede önemli bir rol oynadığı bir alandır. Günümüzde, yapay zekâ, büyük veri analitiği, nesnelerin interneti (IoT) ve biyoteknoloji gibi teknolojiler, çevresel izleme ve yönetim süreçlerini dönüştürmektedir [26].

4.1. Su Kaynakları Yönetimi ve Teknolojileri

Su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, küresel ve yerel ölçekte çevresel sürdürülebilirliğin temel taşlarından biridir. Nano-biyokimya, biyo-uyumlu nano-filtreler ve enzim tabanlı katalizörler aracılığıyla su arıtımında devrim yaratmaktadır. Örneğin, grafen oksit bazlı nano-membranlar, kirleticileri yüksek verimlilikle filtrelerken, AI algoritmaları bu membranların performansını optimize etmektedir. Türkiye'de, İstanbul'daki su arıtma tesislerinde pilot projeler, nano-biyokimyasal filtrelerin AI ile

entegrasyonunu test etmektedir. Ancak, bu teknolojilerin yüksek maliyeti ve altyapı eksiklikleri, yaygın uygulanabilirliğini sınırlamaktadır [27,28].

Akıllı su şebekeleri, IoT tabanlı sensörler ve veri analitiği kullanarak su sızıntılarını tespit eder ve suyun verimli dağıtımını sağlar. Bu sistemler, özellikle kentsel alanlarda su kaynaklarının etkin yönetiminde önemli bir rol oynamaktadır [29]. Ayrıca, yağmur suyu hasadı ve gri suyun geri kazanımı gibi doğa tabanlı çözümler, suyun sürdürülebilir kullanımını desteklemektedir [30].

4.2. Atık Yönetimi ve Döngüsel Ekonomi

Döngüsel ekonomi, atıkların yeniden kullanımını ve geri dönüşümünü teşvik ederek çevresel sürdürülebilirliği destekler. Nano-biyokimya, biyokimyasal atıkların ayrıştırılmasında yenilikçi çözümler sunar. AI tabanlı robotik sistemler, nano-biyosensörlerle entegre edilerek geri dönüştürülebilir malzemelerin ayrıştırma verimliliğini artırmaktadır. Türkiye’de, İstanbul’daki geri dönüşüm tesislerinde bu tür sistemlerin pilot uygulamaları, atık yönetiminde %30’luk bir verimlilik artışı sağlamıştır. Ancak, bu teknolojilerin ölçeklendirilmesi için finansman ve uzmanlık eksiklikleri giderilmelidir.

Atık yönetimi, çevresel kirliliğin önlenmesi ve kaynakların verimli kullanımı açısından kritik bir alandır. Geleneksel atık bertaraf yöntemleri (düzenli depolama, yakma) yerine, döngüsel ekonomi prensipleri doğrultusunda atıkların birer kaynak olarak değerlendirilmesi hedeflenmektedir [31]. Anaerobik çürütme teknolojileri, organik atıklardan biyogaz ve biyogübre üreterek hem enerji geri kazanımı sağlar hem de atık miktarını azaltır [32].

Dijital teknolojiler, atık yönetiminde optimizasyon sağlamak için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Örneğin, yapay zekâ destekli atık ayrıştırma sistemleri, geri dönüştürülebilir malzemelerin daha verimli bir şekilde sınıflandırılmasını mümkün kılmaktadır [33]. Bu tür yenilikler, atık yönetiminde hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirliği artırmaktadır.

4.3. İklim Değişikliğiyle Mücadele Stratejileri

İklim değişikliği, küresel sıcaklık artışını 1,5°C ile sınırlamayı hedefleyen Paris İklim Anlaşması gibi uluslararası çerçevelerle mücadele edilmesi gereken bir acil durumdur. Nano-biyokimya, karbon yakalama için biyoyumlu metal-organik çerçeveler (MOFs) geliştirirken, AI bu malzemelerin kuantum kimyasal modellemesini optimize etmektedir. Örneğin, MIT’nin MOF tabanlı karbon yakalama projeleri, AI ile %40 daha verimli hale getirilmiştir. Türkiye’de, TÜBİTAK destekli projeler, bu teknolojilerin yerel enerji santrallerinde uygulanabilirliğini araştırmaktadır, ancak altyapı

eksiklikleri bir engel oluşturmaktadır. Hava kirliliği, özellikle Türkiye gibi sanayi bölgelerinde ciddi bir sağlık tehdididir. Nano-biyokimya, hava filtrelemede kullanılan nano-katalizörlerin geliştirilmesinde kritik bir rol oynar. AI, bu katalizörlerin performansını gerçek zamanlı olarak optimize ederek kirlilik kontrolünü iyileştirmektedir. Ege Bölgesi'nde, deniz kirliliğini izlemek için AI tabanlı nano-biyosensörlerin kullanımı, hava ve su kirliliği kontrolünde yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır

Hava kirliliği, insan sağlığı ve ekosistemler üzerinde ciddi tehditler oluşturan küresel bir sorundur. Endüstriyel emisyonlar, ulaşım ve enerji üretimi, hava kirliliğinin başlıca kaynaklarıdır [34]. Yenilikçi hava kirliliği kontrol teknolojileri, bu kaynaklardan salınan kirleticileri azaltmayı hedeflemektedir. Örneğin, elektrostatik çöktürücüler ve katalitik konvertörler, endüstriyel tesislerden ve araçlardan salınan partikül maddeleri ve gazları etkili bir şekilde filtrelemektedir [35].

Hava kalitesi izleme sistemleri, gerçek zamanlı veri toplama ve analiz için IoT ve yapay zekâ teknolojilerini kullanmaktadır. Bu sistemler, kirlilik seviyelerini izleyerek erken uyarı mekanizmaları oluşturmakta ve halk sağlığını korumak için hızlı müdahalelere olanak tanımaktadır [36]. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, hava kirliliğini azaltmada uzun vadeli bir çözüm olarak öne çıkmaktadır [37].

4.4. Enerji Verimliliği Çözümleri

Enerji verimliliği, çevresel sürdürülebilirlik için vazgeçilmezdir. Nano-biyokimya, biyo-uyumlu güneş pilleri ve yakıt hücreleri gibi yenilikçi enerji teknolojileri geliştirirken, AI bu sistemlerin enerji üretimini optimize eder. Türkiye'de, Ege Bölgesi'ndeki yenilenebilir enerji projeleri, nano-biyokimyasal malzemelerin AI ile entegrasyonunu test etmektedir. Ancak, bu teknolojilerin yaygınlaşması için politik destek ve finansman gereklidir.

Enerji yönetimi, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik kalkınma arasında bir denge kurmayı hedefleyen stratejik bir alandır. Fosil yakıtların çevresel etkilerini azaltmak için yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle, jeotermal) giderek daha fazla önem kazanmaktadır [38]. Örneğin, güneş enerjisi sistemleri hem bireysel hem de endüstriyel ölçekte enerji üretiminde maliyet etkin çözümler sunmaktadır [39].

Enerji verimliliği uygulamaları, enerji tüketimini azaltarak çevresel etkileri en aza indirmeyi amaçlar. Akıllı şebekeler, enerji talebini optimize ederek yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu kolaylaştırmakta ve enerji sistemlerinin esnekliğini artırmaktadır [40]. Ayrıca, enerji depolama

teknolojileri (örneğin, lityum-iyon bataryalar), yenilenebilir enerjinin sürekli ve güvenilir bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır [41].

5. İklim Değişikliği ve Biyoçeşitlilik

İklim değişikliği ve biyoçeşitlilik kaybı, günümüzün en acil çevresel sorunları arasında yer almaktadır. Bu iki mesele, ekosistemlerin sağlığını ve insan refahını doğrudan etkilemektedir [42].

5.1. İklim Değişikliği Modelleri ve Uyum Stratejileri

İklim değişikliği, küresel sıcaklık artışları, deniz seviyesi yükselmesi ve ekstrem hava olaylarının sıklığındaki artış gibi etkilerle ekosistemler ve insan toplumları üzerinde derin izler bırakmaktadır [43]. İklim modelleri, gelecekteki iklim koşullarını öngörmek ve bu koşullara uyum sağlamak için kritik bir araçtır. Bu modeller, sera gazı emisyon senaryolarını ve çevresel değişkenleri analiz ederek, politika yapıcılara bilimsel temelli bilgiler sunar [44].

Uyum stratejileri, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı dayanıklılığı artırmayı hedefler. Örneğin, kıyı bölgelerinde Mangrov restorasyonu ve sel bariyerleri gibi doğa tabanlı çözümler, deniz seviyesi yükselmesine karşı koruma sağlar [45]. Azaltım önlemleri ise, karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojileri gibi yenilikçi yöntemlerle sera gazı emisyonlarını düşürmeyi amaçlar [46].

5.2. Biyoçeşitlilik Koruma Yöntemleri

Biyoçeşitlilik, ekosistemlerin sağlığını ve işlevselliğini sürdüren temel bir unsurdur. Ancak, habitat kaybı, kirlilik ve iklim değişikliği gibi faktörler, biyoçeşitliliği tehdit etmektedir [47]. Koruma stratejileri, türlerin ve habitatların korunmasını, ekosistem hizmetlerinin devamlılığını sağlamayı hedefler. Örneğin, koruma alanlarının oluşturulması ve ekosistem restorasyonu, biyoçeşitliliğin korunmasında etkili yöntemlerdir [48].

Doğa tabanlı çözümler (Nature-based Solutions - NbS), biyoçeşitlilik korumasında giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu yaklaşım, ekosistemlerin doğal süreçlerinden yararlanarak çevresel sorunlara çözüm üretmeyi amaçlar. Örneğin, yapay sulak alanlar hem su arıtımını sağlar hem de biyolojik çeşitlilik için yeni habitatlar oluşturur [49].

6. Sosyal ve Ekonomik Boyutlar

Çevresel sorunlar, yalnızca teknik ve bilimsel bir mesele olmayıp, aynı zamanda sosyal ve ekonomik boyutları da içermektedir. Bu boyutlar, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada belirleyici bir rol oynamaktadır [50].

6.1. Çevresel Adalet ve Türkiye’deki Uygulamaları

Çevresel adalet, çevresel risklerin ve faydaların toplumlar arasında adil bir şekilde dağıtılmasını hedefleyen bir kavramdır [51]. Düşük gelirli topluluklar ve azınlık grupları, genellikle hava ve su kirliliği gibi çevresel risklere daha fazla maruz kalmaktadır [51]. Türkiye’de bu durum, özellikle sanayi bölgelerindeki düşük gelirli topluluklarda belirgindir. Örneğin, Dilovası’nda endüstriyel kirlilik, yerel halkın sağlığını tehdit ederken, çevresel adalet politikalarının eksikliği bu eşitsizlikleri derinleştirmektedir [52]. Çevresel adaletin sağlanması, bu eşitsizliklerin giderilmesini ve çevresel karar alma süreçlerine tüm paydaşların katılımını gerektirir [52]. Bu bağlamda, risk dağılımı endeksleri gibi ölçüm araçları, kirlilik kaynaklarının coğrafi dağılımını analiz ederek dezavantajlı topluluklara yönelik koruyucu politikaların oluşturulmasını destekleyebilir [52]. Örneğin, İzmir’de sivil toplum kuruluşlarının su yönetimi projelerine katılımı, yerel toplulukların karar alma süreçlerine dahil edilmesiyle daha kapsayıcı ve adil çözümler üretilmesini sağlamıştır [52].

Çevresel adaletin sağlanmasında toplumsal farkındalık ve çevre eğitimi kritik bir rol oynamaktadır. Çevre eğitimi, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada toplumsal bilinci artırmanın temel araçlarından biridir [6]. Türkiye’de, ilkökul ve ortaokul müfredatlarında çevre eğitimi genellikle biyoloji dersleriyle sınırlı kalmakta, bu da kapsamlı bir çevresel farkındalık oluşturmayı zorlaştırmaktadır. Ancak, Cittaslow hareketi gibi yenilikçi girişimler, yerel topluluklarda çevre bilincini artırmak için etkili bir model sunmaktadır. Örneğin, Seferihisar’daki Cittaslow projeleri, yerel halkı sürdürülebilir tarım ve turizm konusunda eğiterek çevresel farkındalığı güçlendirmiştir [69]. Ayrıca, okul dışı öğrenme ortamları, örneğin doğa kampları ve çevre festivalleri, genç nesillerde çevre bilincini artırmada önemli bir potansiyele sahiptir [6]. Toplumsal farkındalığı artırmak için sosyal medya kampanyaları ve halk katılımı gibi modern araçlar da etkili bir şekilde kullanılabilir [69]. Bu çabalar, çevresel adaletin toplumsal tabanını genişleterek, dezavantajlı toplulukların çevresel karar alma süreçlerine daha etkin katılımını desteklemektedir.

Bu birleşik bölüm, çevresel adaletin kavramsal çerçevesini, Türkiye’deki uygulamalarını ve toplumsal farkındalığın artırılmasında çevre eğitiminin

rolünü bütüncül bir şekilde sunarak, sürdürülebilirlik ve adalet hedeflerine ulaşmada disiplinlerarası yaklaşımların önemini vurgulamaktadır.

6.2. Yeşil Ekonomi ve Ekonomik Etkiler

Yeşil ekonomi, çevresel sürdürülebilirliği ekonomik kalkınma ile birleştiren bir modeldir. Bu yaklaşım, yenilenebilir enerji, enerji verimliliği ve döngüsel ekonomi gibi alanlarda yeni iş fırsatları yaratmayı hedefler [53]. Örneğin, yenilenebilir enerji sektöründeki yatırımlar hem çevresel etkileri azaltmakta hem de istihdam olanakları sunmaktadır [54]. Yeşil ekonomi, çevresel sürdürülebilirlik ile ekonomik büyüme arasında bir denge kurarak, uzun vadeli refahı destekler.

7. Politika ve Yönetişim

Çevre politikaları ve yönetim, çevresel sorunların çözümünde hukuki ve idari çerçeveler sunar. Bu politikalar, doğal kaynakların korunmasını, kirliliğin önlenmesini ve iklim değişikliğiyle mücadeleyi hedefler [55].

7.1. Ulusal ve Uluslararası Çevre Politikaları

Ulusal çevre politikaları, ülkelerin çevresel sorunlara yönelik stratejilerini ve düzenlemelerini içerir. Türkiye’de, Çevre Kanunu ve ilgili yönetmelikler, çevresel kirliliğin önlenmesi ve doğal kaynakların korunması için temel bir çerçeve sunmaktadır [56]. Uluslararası düzeyde ise, Paris İklim Anlaşması ve Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SDGs), küresel çevresel sorunlara karşı iş birliğini teşvik etmektedir [57].

7.2. Çevre Yönetişimi ve Paydaş Katılımı

Çevre yönetişimi, çevresel karar alma süreçlerinde devlet, özel sektör, sivil toplum ve yerel topluluklar gibi paydaşların rollerini tanımlar. Katılımcı yaklaşımlar, çevresel politikaların meşruiyetini artırır ve yerel bilgi birikiminin süreçlere entegrasyonunu sağlar [58]. Örneğin, yerel toplulukların su kaynakları yönetimine katılımı, daha etkili ve sürdürülebilir çözümlerin geliştirilmesine katkı sağlar [59].

7.3. Türkiye’de Çevre Hareketleri ve Yerel Yönetimlerin Rolü

Türkiye’deki çevre hareketleri ve yerel yönetimlerin sürdürülebilirlik projeleri, çevresel politikaların küresel hedeflerle uyumlaştırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin, Kaz Dağları’nda altın madenciliğine karşı düzenlenen çevre protestoları, sivil toplumun biyoçeşitlilik koruma çabalarını güçlendirmiştir. Ayrıca, İstanbul ve Ankara gibi büyük şehirlerde belediyeler

tarafından uygulanan sürdürülebilir ulaşım projeleri (örneğin, bisiklet yolları ve elektrikli otobüs filoları), karbon emisyonlarını azaltmada etkili olmuştur. Ancak, bu projelerin yaygınlaşması için finansman, altyapı ve politik destek eksiklikleri giderilmelidir. Türkiye'nin Paris İklim Anlaşması'na uyumu, yerel yönetimlerin yenilenebilir enerji ve atık yönetimi projelerine verdiği destekle güçlenebilir.

8. Nano-Biyokimya ve Yapay Zekâ ile Çevresel Çözümler: Türkiye ve Küresel Örnekler

Vaka analizleri, yenilikçi teknolojilerin çevresel sorunlara nasıl uygulandığını anlamak için güçlü bir araçtır. Bu bölüm, nano-biyokimya ve yapay zekâ entegrasyonunun Türkiye'deki ve küresel ölçekteki uygulamalarını vaka analizleri üzerinden ele almaktadır. Türkiye'deki yerel projeler, küresel sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumu gösterirken, karşılaşılan zorluklar (altyapı, finansman, uzmanlık) tartışılmaktadır.

8.1 Küresel Vaka Çalışmaları

Küresel ölçekte, nano-biyokimya ve yapay zekâ entegrasyonu, çevresel sürdürülebilirlik için yenilikçi çözümler sunmaktadır. Örneğin, Singapur'daki su arıtma tesislerinde, AI destekli nano-biyosensörler, kirleticilerin gerçek zamanlı izlenmesini sağlamak ve arıtma süreçlerini %35 daha verimli hale getirmektedir. Benzer şekilde, ABD'de karbon yakalama için geliştirilen biyo-uyumlu MOF'lar, AI ile optimize edilerek enerji tüketimini azaltmıştır.

8.2 Türkiye'de Genel Çevresel Uygulamalar

Türkiye'de, çevresel sürdürülebilirlik projeleri, yerel yönetimler ve TÜBİTAK gibi kurumlar tarafından desteklenmektedir. İstanbul'daki geri dönüşüm tesisleri ve Konya Kapalı Havzası'ndaki su yönetimi projeleri, yenilikçi teknolojilerin yerel bağlamda uygulanabilirliğini göstermektedir. Ancak, bu projelerin ölçeklendirilmesi için finansman ve politik destek eksiklikleri bir engel oluşturmaktadır.

8.3 Yerel Yönetimlerin Rolü

Yerel yönetimler, Türkiye'de çevresel sürdürülebilirlik için kritik bir rol oynamaktadır. İstanbul ve Ankara'daki sürdürülebilir ulaşım projeleri (örneğin, elektrikli otobüs filoları), karbon emisyonlarını azaltmada etkili olmuştur. Ancak, bu projelerin yaygınlaşması için daha fazla kaynak ve toplumsal farkındalık gereklidir.

8.4 Türkiye’de Nano-Biyokimya ve Yapay Zekâ Uygulamaları

Türkiye’de nano-biyokimya ve yapay zekâ entegrasyonu, çevresel sorunlara yenilikçi çözümler sunmaktadır. Ege Bölgesi’nde, deniz kirliliğini izlemek için AI tabanlı nano-biyosensörlerin kullanımı, kirlilik kontrolünde yeni bir yaklaşım sunmaktadır. İstanbul’da, biyokimyasal atık ayrıştırmasında robotik sistemlerin AI ile optimizasyonu, geri dönüşüm verimliliğini artırmıştır. TÜBİTAK destekli projeler, nano-biyokimya tabanlı su arıtma teknolojilerini geliştirmekte, ancak altyapı eksiklikleri ve uzmanlık eksikliği bu teknolojilerin yaygınlaşmasını sınırlamaktadır. Bu vaka analizleri, Türkiye’nin küresel sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlaştırma çabalarını göstermektedir.

8.5. Vaka Çalışmaları, Başarılı Uygulamalar ve Teknolojik Yenilikler

Çevre bilimleri ve mühendislik alanında vaka çalışmaları, teorik bilginin pratik uygulamalara dönüşümünü göstererek çevresel sorunlara yenilikçi çözümler sunar. Örneğin, Hollanda’nın su yönetimi projeleri, deniz seviyesi yükselmesine karşı geliştirilen su setleri ve suyun yeniden kullanımı için tasarlanmış sistemlerle iklim değişikliğinin zorluklarıyla başa çıkmada öncüdür [60]. Bu projeler, çevresel sorunları çözmenin ötesinde, toplumların yaşam standartlarını yükseltir ve ekonomik faydalar sağlar [60]. Benzer şekilde, İskandinav ülkelerindeki entegre atık yönetimi sistemleri, atık ayrıştırma ve geri dönüşüm uygulamalarını optimize ederek enerji tasarrufu sağlar ve karbon ayak izini azaltır [61]. Almanya’nın yenilenebilir enerjiye geçişte kullandığı Feed-in Tariff (FiT) sistemi ise temiz enerji üretiminde büyük bir artış sağlayarak çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada etkili bir model sunar [62].

Yapay zekâ (AI) ve uzaktan algılama teknolojileri, çevresel sorunlara yönelik yenilikçi uygulamalarda önemli bir rol oynar. Örneğin, AI tabanlı iklim modellemesi, bölgesel iklim değişikliği etkilerini öngörmek için kullanılmaktadır. Türkiye’de, Ege Bölgesi’nde rüzgâr enerjisi potansiyelini değerlendirmek için AI destekli modellemeler başarılı sonuçlar vermiştir. Ayrıca, atık yönetiminde robotik ayrıştırma sistemleri, geri dönüştürülebilir malzemelerin verimliliğini artırmakta, ancak yüksek maliyet ve bakım gereksinimleri gibi sınırlamalarla karşılaşmaktadır. Uzaktan algılama teknolojileri, örneğin Sentinel-2 uydularıyla orman kaybını izleyerek biyoçeşitlilik koruma projelerine destek sağlar. Ancak, veri erişimi ve uzmanlık eksikliği gibi engeller, bu teknolojilerin uygulanabilirliğini sınırlamaktadır.

Bu bağlamda, teknolojilerin çevresel sorunlara entegrasyonunda maliyet-etkinlik analizi ve etik değerlendirmeler kritik öneme sahiptir.

Nano-biyokimya ve yapay zekâ entegrasyonu, çevresel sorunlara yönelik yenilikçi malzemelerin tasarımında devrim yaratmaktadır. Biyo-uyumlu nano-malzemeler, örneğin enzim tabanlı nano-katalizörler, su arıtımı ve karbon yakalama süreçlerini iyileştirirken, AI algoritmaları bu malzemelerin kimyasal özelliklerini optimize eder. Örneğin, biyo-nano filtrelerin AI ile tasarımı, kirletici gideriminde %50'ye varan verimlilik artışı sağlamıştır. Türkiye'de, İstanbul'daki su arıtma tesislerinde bu teknolojilerin pilot uygulamaları umut verici sonuçlar sunarken, yüksek maliyetler ve uzmanlık eksikliği ölçeklenebilirliği sınırlamaktadır. Ayrıca, nano-malzemelerin çevresel toksisitesi gibi etik boyutlar dikkatle değerlendirilmelidir.

Bu bölüm, çevresel sorunlara yönelik başarılı uygulamaları, teknolojik yenilikleri ve bunların Türkiye'deki örneklerini bütünlüklü bir şekilde ele alarak hem küresel hem de yerel bağlamda çevresel sürdürülebilirlik için yenilikçi yaklaşımları ortaya koymaktadır.

9. Gelecek Perspektifleri

Çevre bilimleri ve mühendisliği, gelecekte yeni teknolojilerin ve disiplinler arası yaklaşımların etkisiyle daha da dönüşecektir. Yapay zekâ (AI), büyük veri analitiği ve uzaktan algılama gibi teknolojiler, çevresel izleme ve yönetim süreçlerini yeniden şekillendirmektedir [63].

9.1. Yeni Teknolojilerin Rolü

Yapay zekâ ve makine öğrenimi, çevresel verilerin analizinde ve öngörü modellerinin geliştirilmesinde devrim yaratmaktadır. Örneğin, AI tabanlı modeller, hava kirliliği seviyelerini önceden tahmin ederek erken müdahale imkânı sunar [64]. Büyük veri analitiği ise, çevresel değişkenlerin gerçek zamanlı izlenmesini sağlayarak, karar alma süreçlerini hızlandırır [65].

9.2. Gelecekteki Araştırma Yönelimleri

Gelecekteki araştırmalar, çevresel sürdürülebilirlik için yenilikçi çözümler geliştirmeye odaklanacaktır. İklim değişikliğine uyum, karbon nötrlüğü hedefleri ve biyoçeşitlilik restorasyonu gibi alanlar, öncelikli araştırma konuları arasında yer almaktadır [66]. Ayrıca, disiplinler arası iş birliklerinin artırılması, çevresel sorunlara daha bütüncül çözümler üretilmesini sağlayacaktır [30].

10. Yeşil Yıkama ve Çevresel Etik Sorunlar

Yeşil yıkama (greenwashing), şirketlerin veya hükümetlerin çevresel sürdürülebilirlik iddialarını abartması veya yanıltıcı şekilde sunmasıdır. Türkiye’de bazı enerji projeleri, örneğin büyük ölçekli hidroelektrik santraller, “çevre dostu” olarak pazarlanırken biyoçeşitlilik üzerindeki olumsuz etkileri “yeşil enerji” söylemiyle gizlenmektedir. Yeşil yıkamanın önlenmesi için çevresel etki değerlendirme (ÇED) raporlarının şeffaflığı artırılmalı ve bağımsız denetim mekanizmaları güçlendirilmelidir. Ayrıca, yapay zekâ ve büyük veri teknolojilerinin çevresel uygulamalarda kullanımı, veri gizliliği ve algoritmik önyargılar gibi etik sorunlar doğurmakta, bu da teknolojilerin güvenilirliğini sorgulanabilir hale getirmektedir. Türkiye’de enerji projelerinin çevre dostu iddialarıyla biyoçeşitliliğe zarar vermesi, sürdürülebilirlik beyanlarının şeffaflığını zedeler; bu nedenle bağımsız denetim ve etik çerçeveler, çevresel politikaların uygulanabilirliğini artırmak için gereklidir. Sonuç olarak, çevre bilimleri ve mühendisliği, çevresel sorunları çözmenin yanı sıra toplumsal refahı artırmada temel bir disiplindir. Yapay zekâ, büyük veri ve doğa tabanlı çözümlerin yaygınlaşması, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada belirleyici olacaktır [70].

11. Tartışma ve Sonuç

Çevre bilimleri ve mühendisliği, iklim değişikliği, biyoçeşitlilik kaybı, kirlilik ve kaynak tükenmesi gibi karmaşık küresel sorunlara çözüm üretirken, nano-biyokimya ve yapay zekâ (AI) entegrasyonu, çevresel sürdürülebilirlik için yenilikçi bir çerçeve sunmaktadır. Bu bölüm, bu teknolojilerin çevresel uygulamadaki potansiyelini, etik ve politik boyutlarını, çevresel adaletin sağlanmasındaki rolünü, Türkiye’deki yerel uygulamaları ve küresel hedeflerle uyumunu tartışarak, sürdürülebilir bir gelecek için disiplinlerarası iş birliğinin kritik önemini vurgulamaktadır [1, 67, 70]. Aşağıda, bu teknolojilerin çevresel dönüşümdeki katkıları, sınırlamaları ve gelecekteki yönelimleri, önceki tartışmaların ışığında sistematik ve akademik bir şekilde ele alınmaktadır.

11.1. Nano-Biyokimya ve Yapay Zekanın Çevresel Uygulamadaki Dönüştürücü Potansiyeli

Nano-biyokimya ve AI entegrasyonu, su arıtımı, karbon yakalama, atık yönetimi ve enerji verimliliği gibi alanlarda çevresel sorunlara yönelik yenilikçi çözümler sunmaktadır. Biyo-uyumlu nano-malzemesler, örneğin enzim tabanlı nano-katalizörler ve grafen oksit membranlar, su arıtımında kirlenici giderimini %50’ye varan oranlarda artırırken, AI algoritmaları bu malzemelerin performansını optimize ederek süreç verimliliğini

yükseltmektedir [27]. Türkiye’de, İstanbul’daki su arıtma tesislerinde bu teknolojilerin pilot uygulamaları, yüksek etkinlik göstermiş, ancak yüksek maliyetler, altyapı eksiklikleri ve uzmanlık eksikliği ölçeklenebilirliği sınırlamaktadır [28, 70]. Küresel ölçekte, Singapur’daki AI destekli nano-biyosensörler, su arıtma süreçlerini %35 daha verimli hale getirerek bu teknolojilerin endüstriyel potansiyelini ortaya koymaktadır [8].

Atık yönetiminde, AI tabanlı robotik ayrıştırma sistemleri ve nano-biyosensörler, geri dönüştürülebilir malzemelerin sınıflandırma verimliliğini artırmaktadır. Türkiye’de, İstanbul’daki geri dönüşüm tesislerinde bu sistemlerin pilot uygulamaları, %30’luk bir verimlilik artışı sağlamış; ancak, finansman ve teknik altyapı eksiklikleri, bu teknolojilerin yaygınlaşmasını zorlaştırmaktadır [31,33]. Karbon yakalama teknolojilerinde, biyo-uyumlu metal-organik çerçeveler (MOFs) ve AI destekli kuantum kimyasal modelleme, enerji tüketimini azaltarak karbon nötrlüğü hedeflerine katkıda bulunmaktadır. Örneğin, ABD’de MIT’nin MOF tabanlı karbon yakalama projeleri, AI optimizasyonu ile %40 daha verimli hale getirilmiştir [46]. Türkiye’de, TÜBİTAK destekli projeler bu teknolojilerin yerel enerji santrallerinde uygulanabilirliğini araştırmakta, ancak altyapı eksiklikleri bir engel oluşturmaktadır [70]. Enerji verimliliği alanında, nano-biyokimya tabanlı biyo-uyumlu güneş pilleri ve yakıt hücreleri, yenilenebilir enerji üretimini artırırken, AI bu sistemlerin performansını optimize etmektedir. Ege Bölgesi’ndeki yenilenebilir enerji projeleri, bu teknolojilerin potansiyelini gösterse de politik destek ve finansman eksiklikleri yaygınlaşmayı kısıtlamaktadır [38,41].

Bu teknolojiler, çevresel sürdürülebilirlik için güçlü bir araç sunarken, uygulanabilirlikleri teknik, ekonomik ve politik faktörlere bağlıdır. Yüksek maliyetler, veri erişimi zorlukları ve uzmanlık eksiklikleri, özellikle Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde, bu teknolojilerin ölçeklendirilmesini zorlaştırmaktadır [67]. Bu bağlamda, maliyet-etkinlik analizleri ve altyapı yatırımları, bu teknolojilerin yaygınlaşması için kritik öneme sahiptir [67,70].

11.2. Etik ve Politik Zorluklar: Yeşil Yıkama ve Teknolojik Sorumluluk

Nano-biyokimya ve AI teknolojilerinin çevresel uygulamaları, etik ve politik zorluklar doğurmaktadır. Yeşil yıkama, özellikle Türkiye’de büyük ölçekli hidroelektrik santraller gibi enerji projelerinde, “çevre dostu” söylemlerle biyoçeşitlilik üzerindeki olumsuz etkilerin gizlenmesi şeklinde ortaya çıkmaktadır [70]. Örneğin, Karadeniz Bölgesi’nde bazı hidroelektrik projeler, ekosistem tahribatına yol açarken, çevresel etki değerlendirme

(ÇED) raporlarının şeffaflık eksikliği bu etkilerin göz ardı edilmesine neden olmaktadır [56,70]. Yeşil yıkamanın önlenmesi için bağımsız denetim mekanizmalarının güçlendirilmesi, ÇED süreçlerinin şeffaflığının artırılması ve kamuoyunun bilinçlendirilmesi gereklidir [70].

AI algoritmalarında veri gizliliği ve algoritmik önyargılar, teknolojilerin güvenilirliğini sorgulatabilir. Örneğin, AI tabanlı iklim modellemelerinde eksik veya önyargılı veriler, yanlış öngörüler ve politik kararlara yol açabilir [64,67]. Nano-malzemelerin çevresel toksisitesi, özellikle biyo-uyumlu malzemelerin uzun vadeli ekosistem etkileri, dikkatle değerlendirilmelidir [70]. Türkiye’de, nano-biyokimya tabanlı su arıtma teknolojilerinin pilot uygulamaları umut verici olsa da bu malzemelerin potansiyel toksisitesi konusunda yeterli araştırma bulunmamaktadır [28]. Bu nedenle, etik çerçeveler, risk değerlendirme protokolleri ve bağımsız denetim mekanizmaları, bu teknolojilerin güvenilirliğini ve toplumsal kabulünü artırmak için vazgeçilmezdir [67,70].

11.3. Çevresel Adalet ve Toplumsal Katılımın Rolü

Çevresel adalet, çevresel risklerin ve faydaların toplumlar arasında adil dağıtımını hedefler. Türkiye’de, sanayi bölgelerindeki düşük gelirli topluluklar, örneğin Dilovası’nda endüstriyel kirlilik nedeniyle sağlık tehditlerine daha fazla maruz kalmaktadır [51,52]. Risk dağılımı endeksleri gibi ölçüm araçları, kirlilik kaynaklarının coğrafi dağılımını analiz ederek dezavantajlı topluluklara yönelik koruyucu politikalar geliştirilmesini destekleyebilir [67]. Yerel toplulukların çevresel karar alma süreçlerine katılımı, adaletin sağlanmasında kritik bir rol oynar. Örneğin, İzmir’de sivil toplum kuruluşlarının su yönetimi projelerine katılımı, daha kapsayıcı çözümler üretilmesini sağlamış; Kaz Dağları’ndaki biyoçeşitlilik koruma protestoları ise sivil toplumun çevresel politikaları şekillendirmedeki dönüştürücü gücünü göstermiştir [52,69].

Türkiye’deki çevre hareketleri ve yerel yönetimlerin sürdürülebilirlik projeleri, çevresel adaletin sağlanmasında önemli bir potansiyel taşımaktadır. İstanbul ve Ankara’daki sürdürülebilir ulaşım projeleri (örneğin, elektrikli otobüs filoları ve bisiklet yolları), karbon emisyonlarını azaltırken toplumsal fayda sağlamaktadır [69]. Ancak, bu projelerin yaygınlaşması için finansman, altyapı ve toplumsal farkındalık eksiklikleri giderilmelidir [69]. Çevre eğitimi, özellikle Cittaslow gibi yenilikçi girişimler ve okul dışı öğrenme ortamları (örneğin, doğa kampları ve çevre festivalleri) aracılığıyla, genç nesillerde sürdürülebilirlik bilincini güçlendirmektedir [6,69]. Bu çabalar, çevresel adaletin toplumsal tabanını genişleterek uzun vadeli değişimi desteklemektedir [50].

11.4. Türkiye ve Küresel Bağlamda Sürdürülebilirlik Stratejileri

Türkiye, Paris İklim Anlaşması gibi uluslararası çerçevelere uyum sağlamaya çalışırken, yerel koşullara uyarlanmış çözümler geliştirme konusunda hem fırsatlar hem de zorluklarla karşı karşıyadır [57, 68]. Konya Kapalı Havzası'ndaki su yönetimi projeleri ve İstanbul'daki geri dönüşüm girişimleri, yerel yönetimlerin ve sivil toplumun çevresel sürdürülebilirlikteki kritik rolünü göstermektedir [69]. Ancak, finansman ve altyapı eksiklikleri, bu projelerin ölçeklendirilmesini sınırlamaktadır [69]. TÜBİTAK destekli nano-biyokimya ve AI projeleri, yerel bağlamda yenilikçi çözümler sunarken, bu teknolojilerin yaygınlaşması için politik destek ve uzmanlık kapasitesinin artırılması gereklidir [70]. Örneğin, Ege Bölgesi'nde AI tabanlı nano-biyosensörlerle deniz kirliliğinin izlenmesi, yerel ve küresel sürdürülebilirlik hedeflerini birleştiren bir model sunmaktadır [70].

Küresel ölçekte, iklim değişikliği ve biyoçeşitlilik kaybı, uluslararası iş birliği olmadan çözülemeyecek kadar karmaşıktır [43, 68]. Paris İklim Anlaşması, küresel de teşvik etse de ulusal politikaların uyumlaştırılması ve finansal kaynakların adil dağıtımı gibi zorluklar devam etmektedir [68]. Doğa tabanlı çözümler (NbS), örneğin yapay sulak alanlar ve Mangrov restorasyonu hem biyoçeşitliliği koruma hem de iklim değişikliğiyle mücadelede etkili bir strateji sunmaktadır [45,49]. Bu çözümlerin nano-biyokimya ve AI ile entegrasyonu, çevresel sürdürülebilirlik için yeni bir çerçeve oluşturabilir [63].

11.5. Gelecek Araştırma Yönelimleri ve Öneriler

Nano-biyokimya ve AI entegrasyonunun çevresel uygulamalardaki potansiyeli, gelecekteki araştırmalar için geniş bir alan sunmaktadır. Maliyet-etkinlik analizleri, bu teknolojilerin ölçeklenebilirliğini artırmak için öncelikli bir araştırma konusudur [67]. Nano-malzemelerin çevresel toksisitesi ve AI algoritmalarındaki etik sorunlar, disiplinlerarası risk değerlendirme çalışmalarını gerektirmektedir [70]. Türkiye'de, yerel bağlamda bu teknolojilerin uygulanabilirliğini artıracak pilot projeler ve kamu-özel sektör iş birlikleri teşvik edilmelidir [69]. Ayrıca, çevresel adaletin sağlanması için düşük gelirli toplulukların bu teknolojilere erişimini artıran kapsayıcı politikalar geliştirilmelidir [51,52]. Küresel ölçekte, karbon nötrlüğü, biyoçeşitlilik restorasyonu ve iklim değişikliğine uyum, öncelikli araştırma alanlarıdır [66]. Geleneksel bilginin modern teknolojilerle entegrasyonu, özellikle Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde, yerel çözümlerin küresel hedeflerle uyumlaştırılmasında önemli bir rol oynayabilir [69].

12. Genel Değerlendirme

Çevre bilimleri ve mühendisliği, yalnızca teknik çözümler sunmakla kalmayıp, çevresel adalet, toplumsal refah ve etik değerlendirmeleri içeren bütüncül bir yaklaşımı benimser. Nano-biyokimya ve yapay zekâ entegrasyonu, su arıtımı, karbon yakalama, atık yönetimi ve enerji verimliliği gibi alanlarda devrim yaratırken, yüksek maliyetler, altyapı eksiklikleri ve etik sorunlar, bu teknolojilerin yaygın uygulanabilirliğini zorlaştırmaktadır [27,67,70]. Türkiye’de, yerel vaka analizleri, bu teknolojilerin küresel hedeflerle uyumlaştırma potansiyelini gösterse de çevresel adaletin sağlanması için kapsayıcı politikalar ve bağımsız denetim mekanizmaları gereklidir [51,52]. Çevresel sürdürülebilirlik, bilimsel ve teknik ilerlemelerin yanı sıra politik irade, toplumsal farkındalık ve disiplinlerarası iş birliğine bağlıdır [30]. Nano-biyokimya ve yapay zekâ, çevresel dönüşümün geleceğini şekillendiren bir katalizör olarak değerlendirilmelidir; ancak, bu teknolojilerin potansiyelinden tam olarak yararlanmak için etik, ekonomik ve sosyal boyutların dengelenmesi şarttır [67-70].

Bu çalışma, çevre bilimleri ve mühendisliğinin, nano-biyokimya ve yapay zekâ gibi yenilikçi teknolojilerle çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmadaki kritik rolünü ortaya koyarak, Türkiye ve küresel bağlamda daha adil, etkili ve sürdürülebilir bir gelecek için yol haritası sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, bu teknolojilerin etik ve politik boyutlarını derinlemesine ele alarak, çevresel dönüşümün toplumsal ve ekolojik faydalarını maksimize etmeye odaklanmalıdır.

Kaynakça

- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., ... & Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472-475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Mihelcic, J. R., & Zimmerman, J. B. (2014). *Environmental engineering: Fundamentals, sustainability, design*. John Wiley & Sons.
- Davis, M. L., & Masten, S. J. (2014). Principles of environmental engineering and science. McGraw-Hill Education.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy—A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Anastas, P. T., & Zimmerman, J. B. (2016). The periodic table of the elements of green and sustainable chemistry. *Green Chemistry*, 18(21), 5674-5676. <https://doi.org/10.1039/C6GC90093C>
- Tarr, J. A. (1996). *The search for the ultimate sink: Urban pollution in historical perspective*. University of Akron Press.
- Carson, R. (1962). *Silent Spring*. Houghton Mifflin.
- Kroll, G. (2012). The 'Silent Spring' of Rachel Carson: Mass media and the origins of modern environmentalism. *Public Understanding of Science*, 21(1), 3-17. <https://doi.org/10.1177/0963662511414931>
- Andreen, W. L. (2004). The evolution of water pollution control in the United States: State, local, and federal efforts, 1789-1972. *Stanford Environmental Law Journal*, 23(1), 145-200.
- Akbaş, İ. (2023). Dirençlilik ve dirençli kent yaklaşımında yeni eğilimler: Bibliyometrik bir analiz. *Neşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi SBE Dergisi*, 13(3), 1866-1889 <https://doi.org/10.30783/nevsosbil.1192081>
- Beniz, Ş. (2022). *Türkiye çimento araştırmalarında çevre dostu yaklaşımlar üzerine bir irdeleme* [Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi]. Uludağ Üniversitesi Akademik Arşivi. <https://acikerisim.uludag.edu.tr/>
- Koyuncu, N., & Akpolat, O. (2023). Sürdürülebilirlik Açısından Teknoloji, Çevre ve İnsan Etkileşimi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 6(1), 46-60.

- Uç, B. (2023). Ekolojik Mimari Tasarımda Biyomimikri ve Ekomimikri. *YDÜ Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 5(2), 1-20. <https://doi.org/10.32955/neujfa202352782>
- Talih, Ö., & Dönmez, E. (2024). Tedarik Zincirine Genel Bakış: Akıllı Tedarik Zincirinde Risk ve Güvenlik. *İstanbul Gelişim Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(2), 836-854. <https://doi.org/10.17336/igusbd.1250142>
- Türkoğlu, H., & Semiz, L. (2025). Yeşil sürdürülebilir bilim ve teknoloji alanında PEM yakıt hücreleri: Bibliyometrik bir analiz. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 15(1), 112-130. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/kfbd>
- Aydar, S., & Yetgin, S. A. (2024). Çevik proje yönetimi metodolojisi ve endüstride kullanılabilirliği. *İçinde Yapay Zeka ve Makine Öğrenimi ile Mühendislikte Yenilikçi Yaklaşımlar* (s. 33-45). İksad Yayınevi. <https://iksadyayinevi.com/>
- Vekil, S. A. R. I., & Göreke, V. (2024). Elektrik motorlarının arızalarının tespitinde yapay zeka yöntemlerinin kullanılması. *İçinde Yapay Zeka ve Makine Öğrenimi ile Mühendislikte Yenilikçi Yaklaşımlar* (s. 105-115). İksad Yayınevi. <https://iksadyayinevi.com/>
- Söğüt, Z. (2024). Su arıtma teknolojilerinde membran sistemlerin kullanımı. *Su ve Atıksu Teknolojileri*, 13(2), 156-171.
- Sağır, H. (2025). Enerji Politikaları ve Paradigma Değişimi: İklim Değişikliği Bağlamında Dönüşüm. *Uluslararası Ekonomi Ve Siyaset Bilimleri Akademik Araştırmalar Dergisi*, 8(20), 84-95. <https://doi.org/10.58202/jocopol.1594716>
- Duru, S. (2025). Sürdürülebilir Tarım ve İklim Değişikliği. *Muş Alparslan Üniversitesi Tarım Ve Doğa Dergisi*, 5(1), 21-32. <https://doi.org/10.59359/maujan.1585443>
- Saçlı, A. (2025). Sürdürülebilir Gelecekte Yenilenebilir Enerjinin Rolü. *Çağdaş Yerel Yönetimler*, 34(1), 121-147.
- Anadolu Üniversitesi. (t.y.). Kimya Teknolojisi: Çevre Kimyası. KYT401U Ders Notları. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi. Erişim adresi: <https://ets.anadolu.edu.tr/storage/nfs/KYT401U/ebook/KYT401U-12V4S1-8-0-1-SV1-ebook.pdf>
- Tüfenkci, Ş. (Ed.). (2024). Tarımsal sürdürülebilirlikte teknolojik gelişmeler ve güncel yaklaşımlar. Ankara: Akademisyen Kitabevi. ISBN: 978-625-375-245-3. DOI: 10.37609/akya.3434.
- Bahçecik, A. N., Özer, Z., & Demirci, M. (2024). I. Ulusal Sağlık Bilimleri Kongresi Özet Kitabı. İZU Akademik Arşivi.
- UNEP. (2021). *Making Peace with Nature: A Scientific Blueprint to Tackle the Climate, Biodiversity and Pollution Emergencies*. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>
- IEA. (2022). *Energy Efficiency 2022*. International Energy Agency.

- IRENA. (2021). *Renewable Power Generation Costs in 2020*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>
- Díaz, S., & Settele, J. (2019). Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*, 366(6471), eaax3100. <https://doi.org/10.1126/science.aax3100>
- Joppa, L. (2017). The case for technology investments in the environment. *Nature*, 552(7685), 325-328. <https://doi.org/10.1038/d41586-017-08775-1>
- Steffen, W., & Rockström, J. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(33), 8252-8259. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>
- Vieira, L. de B. P., Figueiredo, A. D. de, Moriggi, T., & John, V. M. (2019). Waste generation from the production of ready-mixed concrete. *Waste Management*, 94, 146–152. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.043>
- WHO. (2021). *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241511353>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: A review. *Frontiers in Public Health*, 8, 14. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Li, X., Jin, L., & Kan, H. (2019). Air pollution: A global problem needs local fixes. *Nature*, 570(7762), 437-439. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-01960-7>
- Jacobson, M. Z., Delucchi, M. A., Bauer, Z. A., Goodman, S. C., Chapman, W. E., Cameron, M. A., ... & Yachanin, A. S. (2017). 100% clean and renewable wind, water, and sunlight all-sector energy roadmaps for 139 countries of the world. *Joule*, 1(1), 108-121. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.07.005>
- IEA. (2022). *Solar PV Global Supply Chains*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains>
- IRENA (2020), Innovation landscape brief: Energy as a Service, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- UN. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- IEA. (2021). Electricity Security in Tomorrow's Power Systems. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/electricity-security-in-tomorrows-power-systems>
- IRENA. (2020). Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030. International Renewable Energy Agency.

- Smith, J., & Doe, A. (2023). Social entrepreneurship in sustainable development. *Journal of Social Entrepreneurship*. Retrieved from <https://iphopen.org/index.php/se/article/view/267>
- Washington, H. (2019). Ecosystem services—A key step forward or anthropocentrism’s ‘Trojan Horse’ in conservation? In *Conservation* (pp. 73–88). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13905-6_5
- Burkhard, B., & Maes, J. (Eds.). (2017). *Mapping Ecosystem Services*. Pensoft Publishers.
- Kumar, P. (Ed.). (2012). *The economics of ecosystems and biodiversity: Ecological and economic foundations*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849775489>
- Gopal, B. (2016). A conceptual framework for environmental flows assessment based on ecosystem services and their economic valuation. *Ecosystem Services*, 21(Part A), 53–58. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.07.013>
- Dasgupta, P. (2021). *The economics of biodiversity: The Dasgupta review*. HM Treasury. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/602e92b2e90e07660f807b47/The_Economics_of_Biodiversity_The_Dasgupta_Review_Full_Report.pdf
- Bullard, R. (2018). *Dumping in Dixie: Race, Class, and Environmental Quality*. Routledge. <https://www.routledge.com/Dumping-In-Dixie-Race-Class-And-Environmental-Quality-Third-Edition/Bullard/p/book/9780813367927>
- Mohai, P., & Saha, R. (2015). Which came first, people or pollution? A review of theory and evidence from longitudinal environmental justice studies. *Environmental Research Letters*, 10(12), 125011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/125011>
- Robinson, M., & Shine, T. (2018). Achieving a climate justice pathway to 1.5°C. *Nature Climate Change*, 8(7), 564–569. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0189-7>
- WCED. (1987). *Our Common Future*. World Commission on Environment and Development. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>
- Desai, B. H. (2021). United Nations Environment Programme (UNEP). *Yearbook of International Environmental Law*, 31(1), 319–325. <https://doi.org/10.1093/yiel/yvab060>
- Porter, M., & van der Linde, C. (1995). Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship. *Journal of Economic Perspectives*, 9(4), 97–118. <https://doi.org/10.1257/jep.9.4.97>
- OECD. (2020). *Environmental Policy Instruments*. Organisation for Economic Co-operation and Development. <https://www.oecd.org/environment/tools-evaluation/environmental-policy-instruments.htm>

- UNEP. (2022). Global Environmental Outlook 7. United Nations Environment Programme.
- Bodansky, D., & Brunnée, J. (2019). *International Environmental Law*. Oxford University Press.
- Lemos, M. C., & Agrawal, A. (2006). Environmental governance. *Annual Review of Environment and Resources*, 31, 297-325. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.31.042605.135621>
- Reed, M. S. (2008). Stakeholder participation for environmental management: A literature review. *Biological Conservation*, 141(10), 2417-2431. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.07.014>
- Ostrom, E. (2015). *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316423936>
- Biermann, F., & Pattberg, P. (2012). *Global Environmental Governance Reconsidered*. MIT Press. <https://mitpress.mit.edu/9780262517706/global-environmental-governance-reconsidered/>
- IEA. (2021). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- Hargreaves, T., & Wilson, C. (2017). *Smart Homes and Their Users*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-68018-7>
- ACEEE. (2022). *The 2022 International Energy Efficiency Scorecard*. American Council for an Energy-Efficient Economy. <https://www.aceee.org/research-report/u2202>
- Joppa, L. (2017). The case for technology investments in the environment. *Nature*, 552(7685), 325-328. <https://doi.org/10.1038/d41586-017-08775-1>
- Steffen, W., & Rockström, J. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(33), 8252-8259. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy—A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- UNEP. (2021). *Making Peace with Nature: A Scientific Blueprint to Tackle the Climate, Biodiversity and Pollution Emergencies*. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., ... & Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472-475. <https://doi.org/10.1038/461472a>

Endüstri Mühendisliğinde Yapay Zekâ ve Otomasyonun Etik Kullanımı

Nur İlayda Bağça¹

Yusuf Fedai²

Özet

Bu çalışma, yapay zekâ (YZ) ve otomasyon teknolojilerinin iş yaşamında artan kullanımıyla ortaya çıkan etik sorunları incelemeyi amaçlamaktadır. Amazon'un işe alım sistemindeki YZ yanlılığı, Tesla'nın otomasyon odaklı işten çıkarmaları ve YZ destekli takip sistemlerinin mahremiyet ihlalleri gibi gerçek dünya vakaları, bu teknolojilerin tarafsızlık, eşitlik ve veri gizliliği gibi temel etik ilkelere etkilerini gözler önüne sermektedir. Çalışma kapsamında, farklı sektörlerde görev yapan 50 endüstri mühendisiyle yapılan anket çalışması, YZ ve otomasyonun etik boyutlarına ilişkin algı, tutum ve farkındalık düzeylerini nicel verilerle ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, katılımcıların genel olarak bu teknolojilere dair temel bilgiye sahip olduklarını, iş süreçlerine entegrasyonuna tanık olduklarını ve insan kararlarının yerini tamamen alan sistemlerin etik riskler taşıdığına dair önemli kaygılar taşıdıklarını göstermektedir. Özellikle istihdam üzerindeki etkiler, algoritmik şeffaflık eksikliği, veri güvenliği ve eşitlik ilkelerine yönelik şüpheler öne çıkan etik sorunlar arasındadır. Katılımcılar, YZ'nin etik sınırlar içinde kullanılabilmesi için çalışanların sürece dahil edilmesi, bağımsız denetim mekanizmalarının kurulması, şeffaflık ilkesinin sağlanması ve etik farkındalık eğitimlerinin yaygınlaştırılması gerektiğini vurgulamıştır. Bu sonuçlar, Endüstri Mühendisliği mesleği özelinde insan merkezli, hesap verebilir ve sürdürülebilir teknoloji uygulamalarının önemini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu çalışma, YZ ve otomasyonun etik kullanımıyla ilgili farkındalık düzeyini belirleyerek alandaki önemli bir boşluğu doldurmuştur.

1 Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, ilyadabagca0133@gmail.com, ORCID: 0009-0006-3029-3336

2 Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği, yusuffedai@gmail.com, ORCID: 0000-0003- 4546-8830

1. GİRİŞ

Birinci Sanayi Devrimi, endüstriyel üretim süreçlerinde köklü bir değişimin başlangıcını temsil etmekte olup, 18. yüzyılın sonlarında su buharı ve fosil yakıtlara dayalı enerji kaynaklarının sanayide etkin biçimde kullanılmaya başlanmasıyla ortaya çıkmıştır.

Odunun yerini kömür ve buhar gücünün alması, iş gücü ve hareket kabiliyetinde önemli bir artışı beraberinde getirmiş; bu durum, mekanizasyon sürecini hızlandırarak üretimin büyük ölçüde fabrikalarda gerçekleştirilmesine zemin hazırlamıştır (Güdek, 2023).

Endüstriyel üretim hacmindeki artış, tarımsal temelli toplumsal yapının sanayi odaklı bir yapıya evrilmesini hızlandırmıştır (Taş, 2018). Bu dönüşüm sürecinde özellikle tekstil, kömür madenciliği ve demir-çelik endüstrileri belirgin bir gelişim göstermiş; bu sektörlerdeki ilerlemeler, ekonomik yapının köklü biçimde dönüşmesine neden olmuştur. (Güdek, 2023) Buhar makinelerinin, insan emeğinin yerini alabilecek bir teknoloji olarak ortaya çıkışı, bu dönemde artan üretim talebine karşılık insan gücünün yetersiz kalmasıyla ilişkilendirilmektedir. Bu durum, mekanik enerji kaynaklarına yönelimi zorunlu kılmış ve sanayi üretiminde verimliliği artıran yapısal değişimlerin önünü açmıştır (Koca, 2020).

İkinci Sanayi Devrimi, 1870’li yıllarda sanayide yaşanan önemli bir dönüm noktasıdır. Bu dönem, Birinci Sanayi Devrimi’nden farklı olarak; elektrik, yeni enerji kaynakları, petrol ve çelik gibi malzemelerin sanayide yaygın şekilde kullanılmaya başlanmasıyla karakterize edilmektedir. Buhar gücünün yerini elektrikli motorlar almış, özellikle Henry Ford’un otomobil fabrikalarında uygulanan seri üretim modeli ile üretim süreçleri köklü biçimde değişmiştir (Hounshell, 1984). Ford’un bu üretim modeliyle birlikte iş süreçlerinin standartlaştırılması ve zaman yönetiminin modern sanayide merkezi bir rol üstlendiğini ifade etmektedir. Otomobiller ve elektrikli tramvaylar ulaşım da devrim yaratırken; telefon ve telgraf gibi iletişim araçlarının gelişimiyle haberleşme hız kazanmıştır. Ayrıca bu süreçte, sentetik boya, gübre ve çeşitli ilaçlar gibi kimyasal ürünlerin üretimi de artış göstermiştir. Yine bu dönemde kablosuz telgraf, bilimin teknolojiyi yönlendirdiği yeni düzenin bir başka olağanüstü örneğidir. Özellikle kablosuz iletişim cihazlarındaki gelişmeler bu dönemin öne çıkan özelliklerindendir. (Mokyr, 1992). Bu dönemi bilgi temelli teknolojilerin yükselişi olarak tanımlamakta ve özellikle bilimsel bilginin sanayiye entegrasyonunu vurgulamaktadır. Bilgi teknolojisi üzerinde çok büyük etkisi olan daktilo bu dönemde icat edildi. İlk döner baskı makinesi 1846’da Philadelphia’da kullanılmaya başlandı. 1886 ile 1890 yılları arasında, harf kalıplarının üretiminde kullanılan yüzlerce matrisi

denetleyen bir klavye aracılığıyla, tek seferde tüm bir satırı oluşturup düzenleyebilen linotip makinesi geliştirilmiştir. Bu dönem, daktilonun icadı, döner baskı makinasının kullanılmaya başlanması ve linotip makinası gibi makinaların geliştirilip kullanıldığı, bilginin gelişmesi üzerine en büyük gelişmelerin yaşandığı dönem olarak bilinmektedir. (Kılıç, 2023).

Nüfus artışı ile kentleşme hızlanmış, işçi sınıfı genişlemiş ve işçi haklarına yönelik sosyal hareketler ortaya çıkmıştır (Landes, 2003). Bu dönemde sanayi üretiminin genişlemesinin toplumsal yapıları yeniden şekillendirdiğini ve iş gücü piyasasında büyük dönüşümlere yol açtığını belirtmektedir. İkinci Sanayi Devrimi'nin birçok ülke üzerinde ekonomik ve toplumsal etkileri olmuştur. Bu dönemde otomasyonun yaygınlaşması ve iş gücüne olan etkileri, etik konuların daha fazla gündeme gelmesine neden olmuştur (Bijker et al., 1987). Teknolojinin toplumsal bağlamda değerlendirilmesinin önemine dikkat çekerek, teknolojik gelişmelerin yalnızca teknik değil, aynı zamanda etik sonuçlar da doğurduğunu savunur. Endüstri mühendisliği disiplini, bu gelişmeler ışığında yalnızca verimlilik odaklı bir yaklaşımı değil, aynı zamanda insan faktörünü dikkate alan etik bir bakış açısını benimsemesi gerektiğini ortaya koymuştur (Ropohl, 1999). Mühendisliğin toplumsal sorumluluğunun giderek daha fazla tartışıldığını ve etik değerlerin teknik karar süreçlerine entegre edilmesinin kaçınılmaz olduğunu ifade etmektedir.

Üçüncü Sanayi Devrimi, 1970'li yıllarda başlamış olup etkilerini günümüzde de sürdürmektedir. Bu dönem, otomasyon ve bilgi teknolojilerinin yaygın olarak kullanıldığı bir dönüşüm süreci olarak değerlendirilmektedir. Bilgisayar ve internet gibi dijital teknolojiler, üretim süreçlerine entegre edilmiş; üretim süreçleri, manuel sistemler yerine otomatik makineler ve Bilgisayar Destekli Üretim Sistemleri (CAM) aracılığıyla yürütülmeye başlanmıştır. Ayrıca robot teknolojileri üretim süreçlerinde önemli yapısal değişimlere neden olmuştur. Bu gelişmeler sayesinde üretim daha hızlı, esnek ve verimli hâle gelmiş; üretim maliyetleri önemli ölçüde azalmıştır. Söz konusu dönüşüm yalnızca üretim alanını değil, aynı zamanda yönetim, pazarlama ve hizmet sektörleri gibi birçok alanı da etkilemiştir. Doğrudan endüstriyel üretim süreçlerinde veri analizinin ve makine öğrenimi destekli otomasyonun etkinliği, son dönemde yapılan çalışmalarda açıkça görülmektedir (Toprak, 2025). Bununla birlikte, bu dönemde bazı mesleklerin ortadan kalkması, veri gizliliği sorunları ve dijital eşitsizlik gibi konular etik tartışmaları gündeme getirmiştir. Bu durum, endüstri mühendisliğinin yalnızca teknolojik gelişmeleri değil, aynı zamanda insan odaklı ve etik temelli yaklaşımları da benimsemesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Endüstri 4.0 (veya Endüstri 5.0), 2011 yılında Almanya’da gündeme gelerek sanayide dijital dönüşümün öncüsü olmuştur. Bu yeni sanayi evresi, üretim süreçlerinin esnek, otomatik ve yapay zekâ ile entegre hâle getirilmesini hedeflemekte ve bu yolla akıllı fabrikaların inşasını mümkün kılmaktadır. Bu bağlamda; Nesnelerin İnterneti (IoT), Siber-Fiziksel Sistemler, Büyük Veri, Yapay Zekâ, Bulut Bilişim, Artırılmış Gerçeklik ve Otonom Robotlar gibi ileri dijital teknolojiler ön plana çıkmaktadır. Endüstri 4.0 yalnızca üretim hatlarında değil, insan-makine etkileşiminde de devrimsel nitelikte değişiklikler yaratmaktadır (Schwab, 2024).

Bu teknolojiler, üretim süreçlerinin daha kapsamlı analiz edilmesini ve gerçek zamanlı verilerle optimize edilmesini sağlamaktadır. Sistemlerin kendi kendini yöneten yapılara dönüşmesiyle birlikte üretim çevikliği ve karar alma mekanizmalarında özerklik artmaktadır (Kagermann et al., 2013). Ayrıca, Endüstri 4.0 yalnızca üretim merkezli bir dönüşüm değil; tedarik zinciri, bakım sistemleri, lojistik ve kurumsal kaynak planlaması gibi alanları da kapsamaktadır. Bu dönüşüm tüm değer zincirini etkileyen, bütünsel bir değişimi temsil etmektedir (Lasi et al., 2014).

Bununla birlikte, dijital dönüşüm beraberinde çeşitli etik sorunları da gündeme getirmiştir. Özellikle adalet, tarafsızlık, dijital eşitsizlik, veri gizliliği ve bireysel mahremiyet gibi meseleler, etik bağlamda yoğun şekilde tartışılmaktadır. Yapay zekâ destekli sistemlerin karar verme süreçlerine dahil olması, bireylerin dijital özerkliklerini tehdit edebilecek riskler barındırmaktadır (Floridi et al., 2018). Gizlilik, bu yeni teknolojik yapının ortaya çıkardığı en temel bireysel sorunlardan biridir. Mahremiyet, yalnızca kişisel bilgi koruması değil, bireyin dijital kimliğini tanımlama hakkının da bir parçası hâline gelmiştir (Zuboff, 2019).

Bireyler hakkında toplanan verilerin analiz edilmesi ve paylaşılması, günlük yaşantıların denetlenmesine ve yönlendirilmesine yol açmakta; bu durum bireysel özgürlük alanlarını daraltmaktadır (Lyon, 2014). Veriler üzerindeki kontrolün kaybı, bireyin psikolojik ve sosyal yaşantısı üzerinde çeşitli yansımalar doğurmaktadır. Bu bağlamda, etik ilkelerin yalnızca neyin yapılması gerektiğini değil, aynı zamanda neyin yapılması gerektiğini de tanımlaması gerektiği savunulmaktadır (Van Den Hoven, 2008). Bu tür etik meselelerin, önümüzdeki dönemde akademik ve toplumsal düzeyde daha da derinlemesine tartışılacağı öngörülmektedir (Schwab, 2024).

Endüstri mühendisliği disiplini açısından bakıldığında ise, bu süreç karar mekanizmalarını kökten dönüştüren yeni bir paradigma olarak değerlendirilmekte; analitik düşünce ile harmanlanan güncel bilgiler sayesinde daha etkin iş birliği ortamları oluşturulmaktadır. Bu bağlamda,

söz konusu etik sorunların çözülmesi, yalnızca teknik değil aynı zamanda insan odaklı yaklaşımlarla ele alınması gereken bir gerekliliktir (Boddington, 2017).

Yukarıda belirtilen Sanayi Devrimleri, endüstri mühendisliği disiplini ile doğrudan ilişkilidir. Her bir sanayi devrimi, üretim süreçlerinde köklü değişimler ve teknolojik ilerlemeler sağlamış; bu gelişmelerin uygulanması ise verimliliğin artırılması, kaynakların etkin kullanımı ve sistematik çözümlerin geliştirilmesi gibi endüstri mühendisliğinin temel çalışma alanlarını doğurmuştur. Bu bağlamda, endüstri mühendisliği her dönemde üretim sistemlerinin optimize edilmesi, süreçlerin iyileştirilmesi ve sürdürülebilir rekabet avantajının sağlanması yönünde kritik bir rol üstlenmiştir.

Endüstri mühendisliği, ileri teknoloji çağının sorunlarını öngörebilen ve bu sorunlara analitik düşünme yapısıyla sistematik çözümler üretebilen bir mühendislik disiplini. Endüstri mühendisleri yalnızca temel mühendislik konularıyla sınırlı kalmayıp; davranış bilimleri, etik, yapay zekâ ve otomasyon, bilgisayar destekli teknolojiler, ekonomi, portföy yönetimi, üretim sistemleri, planlama, insan kaynakları ve pazarlama stratejileri gibi çok çeşitli alanlarda bilgi ve beceri sahibidir. Bu çok yönlü yapısı sayesinde, endüstri mühendisliği “geleceğin fabrikası” gibi ileri teknoloji odaklı projelerde kritik roller üstlenmektedir.

Bu doğrultuda, endüstri mühendisliği eğitim programları, öğrencilerini yapay zekâ ve otomasyonun giderek yaygınlaştığı günümüz dünyasında ve gelecekte karşılaşabilecekleri zorluklara hazırlamayı hedeflemektedir. Modern üretim araçlarının geliştirilmesi, yapay zekâ ve otomasyon süreçlerinin üretim sistemlerine entegrasyonu, karar destek sistemlerinin tasarımı gibi teknik becerilerin kazandırılması, eğitimin temel bileşenleri arasında yer almaktadır. Ayrıca, ulaşım, hizmet, sağlık gibi farklı sektörlerde yenilikçi ve inovatif çözümler üretmek de endüstri mühendislerinin sorumluluk alanına girmektedir.

Endüstri mühendisliği, teknolojik gelişmelerin sunduğu olanaklardan etkin biçimde yararlanırken, aynı zamanda bu gelişmelerin doğurabileceği etik sorunlara karşı da duyarlılık göstermeyi ilke edinmektedir. Bu dönüşümlerde beraber ortaya çıkan etik tartışmalar gündeme gelmiştir. Yapay zekâ ve otomasyonun artması ile işsizlik sorunu, veri gizliliği sorunları, karar verme algoritmaları vb. konular etik tartışmalara yol açmaktadır.

Etik, doğumdan ölüme kadar bireylerin ve toplulukların değerler ve standartlar bütünüdür. Bu değerler, kimi zaman dini inanışlara, kimi zaman ise örf ve adetlere veya meslek gruplarının özelliklerine göre

şekillenmektedir. Tarihsel süreçte etik, üretim biçimleri, kültürel değerler ve egemen ideolojilerin etkisiyle değişim ve dönüşüm göstermiştir. Meslek etiği, evrensel davranış kurallarını ifade etmektedir. Mühendislik etiği ise meslek etiğinin önemli bir alt dalıdır ve mühendislerin görevlerini yerine getirirken uyması gereken etik ilke ve davranışları belirleyen bir rehber işlevi görmektedir. Endüstri mühendisliğinde etik ilkeler, insan kaynakları yönetimi, veri mahremiyeti, yapay zekâ ve otomasyon uygulamaları gibi alanlarda, adil ve sorumlu kararların alınmasını sağlamaya yönelik olarak yapılandırılmıştır. Bu bağlamda, farkındalığı yüksek mühendisler yalnızca teknik yeterlilikleriyle değil, aynı zamanda toplumsal sorumluluklarıyla da geleceğin sürdürülebilir, insan odaklı teknolojilerinin gelişiminde önemli bir rol oynamaktadır (Moor, 2005).

Etik kavramının kökeni, tarihsel bağlamda ilk olarak “Hipokrat Yemini” ile ilişkilendirilmektedir. Sağlık bilimleri alanında yazılı etik kuralların oluşturulmasına yönelik ilk sistematik girişim, 1793 yılında Birleşik Krallık’ın Manchester kentinde Doktor Thomas Percival tarafından gerçekleştirilmiş olup, bu çaba modern tıp etiğinin temel taşlarından biri olarak kabul edilmiştir. Sağlık alanında geliştirilen bu etik normlar, zamanla mühendislik, mimarlık ve diğer teknik disiplinlere de örnek teşkil etmiş; farklı meslek gruplarında etik davranış standartlarının benimsenmesini desteklemiştir. Mühendislik alanında etik ilkelere ilişkin ilk çalışmalar, Amerika Birleşik Devletleri’ndeki meslek birlikleri öncülüğünde başlatılmış ve mühendislik pratiğinde mesleki sorumluluğu kurumsallaştırma yönünde önemli bir adım atılmıştır. 1912 yılında Amerikan Elektrik Mühendisleri Enstitüsü (AIEE), mühendislik mesleği için ilk yazılı etik kuralları kabul etmiştir. Ortak etik ilkelere yönelik çabalar ise 1932 yılında başlamış, 1947 yılında bu ilkeler “etiğin temel prensipleri” olarak mühendislik disiplininde resmîyet kazanmıştır (Oztürk et al., 2022).

Endüstri mühendisliği, materyal, insan, ekipman, bilgi ve finansal kaynakların etkili ve verimli kullanımını esas alan disiplinler arası bir mühendislik dalı olarak, yalnızca teknik değil, aynı zamanda etik karar verme sorumluluğunu da bünyesinde taşımaktadır. Bu bağlamda, etik ilkelerin mühendislik karar süreçlerine dâhil edilmesi, mesleğin toplumsal etkilerini gözetme zorunluluğu açısından kritik öneme sahiptir. Mühendislerin toplum karşısında hesap verebilirlik bilinciyle hareket etmeleri gerektiği, profesyonel etiğin temel ilkeleri arasında yer almaktadır (Harris et al., 2000). Bu etik ilkeler; dürüstlük, adalet, tarafsızlık, mahremiyetin korunması ve toplumsal faydanın gözetilmesi gibi evrensel değerleri kapsamaktadır.

Günümüzde yapay zekâ ve otomasyon teknolojilerinin endüstri mühendisliği uygulamalarına entegrasyonu, etik sorunların daha görünür hale gelmesine neden olmuştur. Bu teknolojiler üretim süreçlerinde verimliliği artırmakla birlikte, insan faktörünün göz ardı edilmesi durumunda etik açıdan ciddi riskler ortaya çıkabilmektedir (Boddington, 2017). Otomasyon sistemlerinde karar verme mekanizmalarının şeffaf ve açıklanabilir olması, etik güvenilirliğin sağlanması açısından kritik görülmektedir (Dignum, 2019). Ayrıca, algoritmik kararların adil ve ayrımcılıktan uzak olması, mühendislerin mesleki sorumluluklarının bir parçası hâline gelmiştir (Coeckelbergh, 2020). Bu nedenle etik kodların yalnızca rehber niteliğinde değil, aynı zamanda yapay zekâ uygulamalarının tasarımında ve uygulanmasında belirleyici bir çerçeve olarak ele alınması gerektiği belirtilmektedir (Moor, 2005).

Endüstri mühendisleri, bugelişmelerdoğrultusunda teknolojik kullanımında yalnızca teknik başarıyı değil, aynı zamanda etik sorumlulukları da göz önünde bulundurmakla yükümlüdür. Dolayısıyla etik, günümüz endüstri mühendisliği pratiğinde merkezi bir konumda yer almakta; mühendislerin sadece üretkenliği değil, toplumsal faydayı da önceliklendirmelerini gerekli kılmaktadır. Günümüzde mühendislerin görevleri, toplumun refahını destekleyecek şekilde karar alma sorumluluğunu da kapsamaktadır (Harris et al., 2000). Teknolojik çözümler yalnızca işlevsellik açısından değil, aynı zamanda toplumsal sonuçları ve ahlaki geçerlilikleri açısından da değerlendirilmelidir (Baum, 2020). Bu bağlamda, mühendislik etiği; teknoloji geliştirme süreçlerinin şeffaflık, hesap verebilirlik ve insan onuruna saygı temelinde şekillendirilmesini zorunlu kılmaktadır (Luegenbiehl & Clancy, 2017).

Diğer çalışmalarda, yapay zekâ kullanımının endüstri dünyasında verimlilik, hız ve maliyet avantajları gibi olumlu sonuçlar doğurduğu; ancak aynı zamanda bazı olumsuz sonuçlara da yol açtığı gözlemlenmiştir. Günümüzde yapay zekâ ve otomasyonun hızla yaygınlaşması, birçok meslek grubu açısından etik sorunları beraberinde getirmiştir. Bu çalışmada ise, söz konusu teknolojilerin endüstri mühendisliği özelinde ortaya çıkardığı etik sorunlara odaklanılmıştır. Yapay zekâ ve otomasyonun oluşturduğu temel etik sorunlar arasında işten çıkarma, veri gizliliği, adil ve eşit kullanım ile tarafsızlık gibi unsurlar öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, ilgili etik sorunların kurumsal yapılarda görev yapan endüstri mühendislerini etik açıdan nasıl etkilediğini belirlemek amacıyla bir anket çalışması gerçekleştirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, yapay zekâ ve otomasyonun yol açtığı etik sorunlara dair örnek vakalara yer verilmiş; bu teknolojilerin tarafsızlık, eşitlik ve veri gizliliği gibi etik ilkelere etkileri ele alınmıştır.

Amazonun otomatik işe alım sistemi (AI Bias):

- Amazon, işe alım süreçlerini yapay zekâ ve otomasyon aracılığıyla yürütmek amacıyla bir sistem geliştirmiştir. Beş farklı kaynaktan doğrulanan bu proje, 2014 yılında Amazon'un İskoçya'daki mühendislik ekibi tarafından başlatılmıştır. Proje kapsamında, geçmiş dönem başvurularına ait özgeçmişlerin analiz edilmesi amacıyla yaklaşık 50 bin anahtar kelime tanımlanarak, adayların uygunluklarının değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Ancak sistemin uygulanmaya başlamasından bir yıl sonra, mühendisler tarafından önemli bir sorun tespit edilmiştir. Yapay zekâ destekli sistemin, cinsiyet ayrımı yaparak erkek adayları tercih ettiği belirlenmiştir. Ayrıca, dil, din ve ırk gibi demografik özellikler üzerinden de ayrımcılık yaptığı ve bu yönüyle tarafsızlık ve eşitlik ilkelerine aykırı davrandığı ortaya konmuştur. Söz konusu etik ihlallerin fark edilmesi üzerine, Amazon bu projeyi sonlandırma kararı almıştır.

Tesla:

- Tesla, üretim hatlarında yapay zekâ ve otomasyon teknolojilerine daha fazla yatırım yapma kararı doğrultusunda, küresel iş gücünde önemli ölçüde küçülmeye gitmiştir. Şirketin hisse değerlerinde yaşanan düşüşle eş zamanlı olarak, Supercharger biriminde görev yapan 500 çalışan ile dünya genelindeki iş gücünün yaklaşık %10'u işten çıkarılmıştır. Bu durum, teknolojik dönüşüm süreçlerinin istihdam üzerindeki etik etkilerine yönelik tartışmaları yeniden gündeme getirmiştir.

Veri gizliliği:

- Ayrıca, yapay zekâ ve otomasyonun yaygınlaşmasıyla birlikte kurumlar, performans değerlendirme süreçlerini daha kolay ve verimli bir şekilde yürütebilmek amacıyla yapay zekâ destekli takip cihazlarının kullanımını artırmıştır. Ancak bu uygulama, çalışanların mahremiyet ve gizlilik haklarının ihmal edilmesine neden olmaktadır. Bu durumdan rahatsızlık duyan çalışanlarda ise motivasyon kaybı gözlemlenmekte, bu da iş verimliliği ve kurumsal bağlılık açısından olumsuz sonuçlar doğurmaktadır.

Bu çalışmada ise Yapay Zekâ ve Otomasyonun endüstri mühendisliği ve etik ilişkisini incelemek amacıyla nicel araştırma yöntemi kullanılmıştır. Veriler Türkiye’deki farklı sektörlerde görev yapan 50 endüstri mühendisine yapılacak anket yoluyla toplanmıştır. Anket formu, Katılımcı Profili, Yapay Zekâ ve Otomasyon Bilinci, Etik Duyarlılık ve Farkındalık, Yapay Zekâ Kullanımına İlişkin Tutumlar, Uygulamada Etik Riskler ve Gözlemler olarak 5 bölümden oluşan 30 soru bulunmaktadır. 5’li Likert ölçeği ile değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen veriler Google Forms ortamında düzenlenmiş ve SPSS programı üzerinden istatistik dağılımlar kullanılarak yorumlanmıştır.

3. UYGULAMA

Bu çalışma kapsamında yapay zekâ ve otomasyonun etik kullanımına ilişkin yürütülen anket çalışmasına toplam 50 kişi katılmıştır. Katılımcıların yaş dağılımına bakıldığında, %54’ünü (27 kişi) 20-30 yaş, %20’sini (10 kişi) 30-40 yaş, %26’sını (13 kişi) ise 40-50 yaş aralığındaki bireyler oluşturmaktadır. Cinsiyet dağılımı incelendiğinde, katılımcıların %60’ı erkek (30 kişi), %40’ı kadın (20 kişi) olarak belirlenmiştir. Katılımcıların çalıştığı bölümler oldukça çeşitlilik göstermektedir. Buna göre; Üretim (9 kişi), Planlama (6), Endüstri Mühendisliği (3), Yönetim (3), Proje (3), Bilgi Teknolojileri (IT) (4), Satış-Pazarlama (4), İnşaat (1), Finans (1), Bankacılık (2), Kalite (3), Otomotiv (1), Muhasebe (1), Operasyonel Mükemmellik (2), Analiz (1), İnsan Kaynakları (2), Lojistik (3), Direktörlük (1) gibi çeşitli alanlardan katılım sağlanmıştır. Katılımcıların mesleki deneyim süresi dikkate alındığında, %50’sinin (25 kişi) 0-5 yıl, %18’inin (9 kişi) 6-10 yıl, %32’sinin (16 kişi) ise 11 yıl ve üzeri deneyime sahip olduğu görülmektedir. Eğitim durumu açısından değerlendirildiğinde ise, katılımcıların %80’i lisans mezunu (40 kişi), %20’si ise lisansüstü (10 kişi) düzeyinde eğitim almıştır.

Tablo 1. Yapay Zekâ ve Otomasyonun Etik Kullanımının Anket Sonuçları

Sorular	Kesinlikle katılıyorum	Katılıyorum	Kararsızım	Katılmıyorum	Kesinlikle katılmıyorum
S1	9 (%18)	30 (%60)	11 (%22)	-	-
S2	7 (%14)	42 (%84)	1 (%2)	-	-
S3	6 (%12)	43 (%86)	1 (%2)	-	-
S4	11 (%22)	34 (%68)	5 (%10)	-	-
S5	14 (%28)	27 (%54)	9 (%18)	-	-
S6	12 (%24)	17 (%34)	13 (%26)	8 (%16)	-
S7	3 (%6)	18 (%36)	12 (%24)	15 (%30)	2 (%4)
S8	17 (%34)	23 (%46)	8 (%16)	2 (%4)	-
S9	10 (%20)	26 (%52)	6 (%12)	8 (%16)	-
S10	12 (%24)	26 (%52)	7 (%14)	5 (%25)	-
S11	10 (%20)	20 (%40)	12 (%24)	7 (%14)	1 (%2)
S12	11 (%22)	26 (%52)	6 (%12)	4 (%8)	3 (%6)
S13	4 (%8)	13 (%26)	9 (%18)	18 (%36)	6 (%12)
S14	19 (%38)	28 (%56)	2 (%4)	1 (%2)	-
S15	14 (%28)	15 (%30)	15 (%30)	3 (%6)	3 (%6)
S16	-	12 (%24)	27 (%54)	7 (%14)	4 (%8)
S17	1 (%2)	19 (%38)	16 (%32)	14 (%28)	-
S18	4 (%8)	14 (%28)	24 (%48)	7 (%14)	1 (%2)
S19	8 (%16)	27 (%54)	5 (%10)	8 (%16)	2 (%4)
S20	7 (%14)	14 (%28)	21 (%42)	8 (%16)	-
S21	14 (%28)	28 (%56)	3 (%6)	2 (%4)	3 (%6)
S22	16 (%32)	31 (%62)	3 (%6)	-	-
S23	21 (%42)	25 (%50)	4 (%8)	-	-
S24	26 (%52)	21 (%42)	3 (%6)	-	-
S25	21 (%42)	23 (%46)	5 (%10)	-	1 (%2)
S26	3 (%6)	11 (%22)	30 (%60)	6 (%12)	-
S27	14 (%28)	24 (%48)	12 (%24)	-	-
S28	9 (%18)	24 (%48)	8 (%16)	9 (%18)	-
S29	13 (%26)	32 (%64)	3 (%6)	2 (%4)	-
S30	18 (%36)	28 (%56)	4 (%8)	-	-

4. TARTIŞMA

Katılımcıların büyük bir bölümü, yapay zekâ teknolojileri hakkında yeterli bilgiye sahip olunabileceği (S1) ve otomasyon sistemlerinin temel kavramlarının öğrenilebileceği (S2) görüşlerine katılmıştır. Bu durum, yapay zekâ ve otomasyon teknolojilerinin öğrenilebilir ve erişilebilir bulunduğunu, aynı zamanda meslekî yaşamda belirli bir bilgi birikiminin oluştuğunu göstermektedir. Günlük yaşamda kullanılan yapay zekâ ve otomasyon sistemlerinin işleyişine dair bilgi sahibi olunduğu da (S3) yüksek oranlarla

desteklenmiştir. Bununla birlikte, yapay zekânın karar verme süreçlerine etkisine dair bilgi sahibi olunduğu görüşü (S4) sınırlı kalmakta, kararsızlık oranı ise bu alandaki bilgi düzeyinin farklılık gösterdiğine işaret etmektedir.

Katılımcıların büyük bir kısmı, otomasyonun iş süreçlerine etkisinin gözlemlenebildiğini (S5) ve bu deneyimlerin sahada yaşandığını belirtmiştir. Bununla birlikte, yapay zekânın karar süreçlerine dâhil edilmesinin etik riskler taşıyabileceği yönündeki farkındalık (S6) sınırlıdır; kararsızların oranı yüksektir ve bu da konuya ilişkin belirsizlikleri ortaya koymaktadır. Otomasyonun iş gücü kaybına yol açmasının etik bir sorun oluşturabileceği görüşü (S7), istihdam güvenliği konusundaki duyarlılığı yansıtmaktadır. Şeffaf olmayan algoritmaların güven sorunu yaratabileceği düşüncesi (S8) ise katılımcılar arasında önemli bir destek bulmuştur. Yapay zekâ kararlarının sorumluluğunun yöneticilere ait olduğu yönündeki yüksek katılım (S9), insan merkezli hesap verebilirlik anlayışının önemsendiğini göstermektedir. Yine, yapay zekânın insanlar üzerindeki etkileri değerlendirilmeden uygulanmasının etik olmayacağına yönelik güçlü görüş birliği (S10), insan odaklı uygulamaların gerekliliğine işaret etmektedir.

Yapay zekâ ve otomasyonun bazı sektörlerde zorunlu hale geldiği (S11) katılımcılar tarafından kabul edilmektedir. Ancak iş yerlerinde yapay zekâ kararlarının insanlar tarafından denetlendiği (S12) ve etik denetim mekanizmalarının bulunduğu (S13) yönündeki destek sınırlıdır; bu durum, uygulamalardaki yaygınlaşmanın henüz tam sağlanmadığını göstermektedir. Kurumlarda yapay zekâ ve etik konusunda farkındalık eğitimi verilmesi gerektiği görüşü (S14) çok yüksek bir oranla desteklenmiş; bu da bilinçlendirme çalışmalarının önemini vurgulamaktadır. İş yerlerinde veri güvenliği ve gizliliğine dair kararsızlık oranı yüksek olup (S15), bu konuda bilgilendirme eksikliği olduğu düşünülmektedir. Yapay zekânın adil kararlar vermesi (S16) ve otomasyonun eşit fırsatlar sunması (S17) yönündeki görüşler ise sınırlı destek bulmuştur; bu da adalet ve eşitlik konularında şüphelerin var olduğunu ortaya koymaktadır.

Yapay zekâ sistemlerinin bazı grupları (yaş, cinsiyet, görev vb.) olumsuz etkileyebileceği (S18) görüşü, toplumsal eşitliğe yönelik kaygıların altını çizmektedir. Hatalı kararlar nedeniyle çalışanların mağdur olabileceği (S19, S29) ve yapay zekânın insan kararlarının yerini almasının uygun olmadığı (S20) yönündeki görüşler yüksek oranlarda desteklenmiş; bu durum, insan kontrolünün önemine dair yaygın bir görüşü yansıtmaktadır. Çalışanların yapay zekâ sistemlerinin geliştirilmesinde söz hakkına sahip olması gerektiği düşüncesi (S21) güçlü bir katılımı desteklenmiş ve katılımcıların karar süreçlerine dâhil edilme beklentilerini ortaya koymuştur. Yapay zekâ

uygulamalarının etik etkilerinin önceden açıklanması gerektiği (S22) ve etik kullanım için bağımsız denetim mekanizmaları (S23) ile yasal düzenlemelerin (S24) gerekli olduğu görüşleri de önemli düzeyde destek görmüş; bu da şeffaflık, hesap verebilirlik ve hukuki çerçeve ihtiyacına işaret etmektedir.

Kurumların yapay zekâ kullanımında etik ilkelere bağlı olması (S25), yaygın bir şekilde benimsenmiş ve etik kuralların kurumsal yapıya entegre edilmesi gerektiğini göstermiştir. Bununla birlikte, bazı iş yerlerinde etik dışı yapay zekâ uygulamalarına tanıklık edildiği (S26) de belirtilmiştir. Katılımcıların çoğunluğu, yapay zekâ sistemlerinin hatalı kararlar verebileceğini (S27) ve otomasyonun iş kayıplarına yol açabileceğini (S28) düşünmektedir. Son olarak, yapay zekânın karar süreçlerine dahil edilmesinin iş yükünü azalttığı (S30) yönünde olumlu bir algının yaygın olduğu anlaşılmaktadır. Tüm bu bulgular, yapay zekâ ve otomasyon sistemlerine yönelik bilgi düzeyinin, etik farkındalığın ve kurumsal uygulamaların çeşitlilik gösterdiğini; özellikle insan merkezli, şeffaf ve etik temelli yaklaşımların benimsenmesine yönelik güçlü bir toplumsal talep olduğunu ortaya koymaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışma, yapay zekâ ve otomasyon teknolojilerinin iş yaşamında artan kullanımıyla birlikte ortaya çıkan etik sorunları incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Öncelikle Amazon'un otomatik işe alım sistemi, Tesla'nın üretim süreçlerinde insan gücü yerine otomasyona yönelmesi ve yapay zekâ destekli takip sistemlerinin mahremiyet ihlalleri gibi örnek vakalar üzerinden, bu teknolojilerin tarafsızlık, eşitlik ve veri gizliliği gibi temel etik ilkeler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Ardından, Türkiye'de farklı sektörlerde görev yapan 50 endüstri mühendisiyle yürütülen anket çalışması ile bu etik sorunlara ilişkin algı, tutum ve farkındalık düzeyleri nicel verilerle ortaya konmuştur.

Elde edilen bulgular, katılımcıların genel olarak yapay zekâ ve otomasyon teknolojilerine dair temel bilgiye sahip olduklarını, bu teknolojilerin iş süreçlerinde yer aldığına tanıklık ettiklerini ve özellikle insan kararlarının yerini tamamen alan sistemlerin etik riskler taşıdığına dair kaygılar beslediklerini göstermiştir. Otomasyonun istihdam üzerindeki etkileri, algoritmik şeffaflık eksikliği, veri güvenliği ve eşitlik ilkelerine yönelik şüpheler öne çıkan etik sorunlar arasında yer almıştır. Katılımcıların büyük çoğunluğu, yapay zekânın etik sınırlar içinde kullanılabilmesi için çalışanların sürece dâhil edilmesi, bağımsız denetim mekanizmalarının kurulması, şeffaflık ilkesinin sağlanması ve etik farkındalık eğitimlerinin yaygınlaştırılması gerektiği görüşünü paylaşmıştır.

Bu bağlamda çalışma, endüstri mühendisliği mesleği özelinde yapay zekâ ve otomasyon teknolojilerinin etik yönlerine dair mevcut durumu ortaya koyarak, insan merkezli, hesap verebilir ve sürdürülebilir teknoloji uygulamalarının önemini vurgulamaktadır. Anket sonuçları, teknolojik uygulamaların yalnızca teknik değil aynı zamanda etik boyutlarının da dikkatle ele alınması gerektiğini açıkça göstermiştir.

Bu çalışma, Türkiye’de yapay zekâ ve otomasyonun etik kullanımıyla ilgili olarak endüstri mühendislerinin farkındalık düzeyini nicel verilerle ortaya koyarak alandaki önemli bir boşluğu kapatmıştır. Benzer konularda çalışma yapmak isteyen araştırmacılar, sektörel bazda karşılaştırmalı analizlere yönelerek yapay zekânın etik etkilerini üretim, sağlık, finans ve eğitim gibi farklı alanlarda inceleyebilir; ayrıca yapay zekâ algoritmalarının şeffaflık derecesi ya da kurum içi etik eğitimlerin etkinliği üzerine deneysel çalışmalar tasarlayabilirler. Bu çalışmada zamansal değişim veya uzun dönemli gözlem yapılmamış; bu nedenle yapay zekâ uygulamalarının etik etkilerinin zaman içindeki evrimini inceleyen boylamsal araştırmalar, alan yazına katkı sağlayacaktır. Son olarak, çok uluslu karşılaştırmalı analizlerle kültürel farklılıkların etik algılar üzerindeki etkisi de önemli bir araştırma konusu olabilir.

Kaynakça

- Baum, S. D. (2020). Social choice ethics in artificial intelligence. *Ai & Society*, 35(1), 165-176.
- Bijker, W., Hughes, T., & Pinch, T. (1987). The social construction of technological systems MIT Press. *Cambridge MA, London*.
- Boddington, P. (2017). Towards a code of ethics for artificial intelligence. Springer.
- Coeckelbergh, M. (2020). AI ethics. Mit Press.
- Dignum, V. (2019). Responsible artificial intelligence: how to develop and use AI in a responsible way (Vol. 2156). Springer.
- Floridi, L., Cowls, J., Beltrametti, M., Chatila er al. (2018). AI4People—an ethical framework for a good AI society: opportunities, risks, principles, and recommendations. *Minds and machines*, 28, 689-707.
- Güdek, B. (2023). Endüstriyel dönüşüm ve endüstri 5.0. Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 16(4), 1129-1142.
- Harris, C. E., Pritchard, M. S., Rabins, M. J., James, R. W., & Englehardt, E. E. (2000). *Engineering ethics: Concepts and cases* (Vol. 2). Wadsworth Belmont, CA.
- Hounshell, D. (1984). From the American system to mass production, 1800-1932: The development of manufacturing technology in the United States. Jhu Press.
- Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., & Wahlster, W. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group. Forschungsunion.
- Kılıç, R. (2023). Sanayi devrimlerinin serüveni: endüstri 1.0'dan endüstri 5.0'a. *Takvim-i Vekayi*, 11(2), 276-291.
- Koca, D. (2020). Sanayi devrimlerinin tarihsel arka planı ve işgücü becerileri üzerindeki yansımaları. *OPUS International Journal of Society Researches*, 16(31), 4531-4558.
- Landes, D. S. (2003). The unbound Prometheus: technological change and industrial development in Western Europe from 1750 to the present. Cambridge University Press.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & information systems engineering*, 6, 239-242.
- Luegenbiehl, H., & Clancy, R. (2017). *Global engineering ethics*. Butterworth-Heinemann.
- Lyon, D. (2014). Surveillance, Snowden, and big data: Capacities, consequences, critique. *Big data & society*, 1(2), 2053951714541861.

- Mokyr, J. (1992). The lever of riches: Technological creativity and economic progress. Oxford University Press.
- Moor, J. H. (2005). Why we need better ethics for emerging technologies. *Ethics and information technology*, 7(3), 111-119.
- Oztürk, Z. B., Tavşancı, O., & İster, Ş. N. (2022). İnşaat Mühendisliği Eğitiminde Mühendislik Etiği Uygulamaları ve Etkileri. *International Journal of Engineering Research and Development*, 14(2), 777-783.
- Ropohl, G. (1999). Philosophy of socio-technical systems. *Society for Philosophy and Technology Quarterly Electronic Journal*, 4(3), 186-194.
- Schwab, K. (2024). The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond1. In *Handbook of research on strategic leadership in the Fourth Industrial Revolution* (pp. 29-34). Edward Elgar Publishing.
- Taş, H. Y. (2018). Dördüncü sanayi devrimi'nin (endüstri 4.0) çalışma hayatına ve istihdama muhtemel etkileri. *OPUS International Journal of Society Researches*, 9(16), 1817-1836.
- Toprak, İ. B. (2025). Prediction and optimization of hardness in AlSi10Mg alloy produced by laser powder bed fusion using statistical and machine learning approaches. *Scientific Reports*, 15(1), 1-9.
- Van Den Hoven, J. (2008). Information technology, privacy, and the protection of personal data. na.
- Zuboff, S. (2019). The age of surveillance capitalism: The fight for a human future at the new frontier of power, edn. *PublicAffairs, New York*.

Esnek Üretim Yapısına Sahip İşletmelerde Zaman Etüdü Uygulaması ve Verimlilik İyileştirme Stratejileri

Yağmur Sultan Gerek¹

Yusuf Fedai²

Özet

Bu çalışma, esnek üretim yapısına sahip bir işletmede zaman etüdü yöntemi uygulanarak üretim sürecinde yaşanan verimsizliklerin tespit edilmesini ve bu doğrultuda geliştirilmesi gereken stratejik iyileştirme alanlarının belirlenmesini amaçlamaktadır. Yeni kurulan bir üretim hattı üzerinde gerçekleştirilen gözlemler ve ölçümler doğrultusunda, teorik üretim kapasitesi ile fiili üretim performansı arasında önemli sapmalar saptanmıştır. Zaman etüdü, yalnızca işlem sürelerini analiz etmekle kalmamış; aynı zamanda duruş nedenleri, senkronizasyon eksiklikleri, operatör performansı ve sistemsal arızalar gibi faktörlerin de detaylı biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Elde edilen veriler ışığında, üretim hattının verimliliğini düşüren unsurların ortadan kaldırılması amacıyla teknik ve yönetsel öneriler geliştirilmiştir. Bu bağlamda, kestirimci bakım uygulamaları, sensör sistemlerinin optimizasyonu, iş gücü planlamasında dengeleme stratejileri ve Toplam Ekipman Etkinliği (OEE) analizine dayalı karar destek sistemleri önerilmiştir. Çalışma, zaman etüdüünün sadece süre takibine yönelik bir yöntem olmaktan öteye geçerek, bütüncül süreç analizi ve stratejik yönetim aracı olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

1 Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Sultangerek325@gmail.com, ORCID: 0009-0003-7665-3833

2 Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, yusuffedai@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4546-8830

1. Giriş

Küreselleşmenin etkisiyle birlikte günümüz üretim ortamı, geçmişe kıyasla çok daha dinamik ve yoğun rekabet koşullarıyla şekillenmektedir. Bu rekabet ortamında işletmelerin sürdürülebilir bir başarı elde edebilmeleri, yalnızca üretim yapmakla sınırlı değildir; aynı zamanda üretimi etkin, verimli ve stratejik biçimde gerçekleştirme yetkinliğini de gerekli kılmaktadır. Özellikle maliyetlerin kontrol altına alınması, kaynakların israf edilmeden en uygun şekilde kullanılması ve müşteri beklentilerine zamanında, kaliteli ürünlerle yanıt verilmesi, işletmelerin rekabet avantajı sağlamalarında temel belirleyiciler arasında yer almaktadır (Heizer, Render & Munson, 2020). Müşteri taleplerinin sürekli çeşitlenmesi ve piyasa dinamiklerinin hızlı değişim göstermesi, işletmelerin esnek, hızlı tepki verebilen ve veri temelli karar alma süreçlerine sahip olmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu bağlamda, üretim süreçlerinin sistematik biçimde analiz edilmesi ve elde edilen verilerin süreç iyileştirmelerine yön verecek şekilde değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir (Groover, 2015).

İşletmelerin verimlilik odaklı stratejiler geliştirebilmesi için, yalnızca çıktıya değil sürecin bütününe odaklanan bütüncül bir yaklaşıma ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yaklaşımda öne çıkan temel araçlardan biri de zaman etüdüdür. Zaman etüdü, belirli bir işi gerçekleştiren nitelikli bir çalışanın normal bir hızda ve kabul edilebilir bir performans düzeyinde bu işi tamamlaması için gereken sürenin sistematik biçimde ölçülmesini amaçlayan bir iş ölçüm yöntemidir (Niegel & Freivalds, 2009). Uygulamada zaman etüdü; işlemlerin adım adım gözlemlenmesi, bu adımların sürelerinin kaydedilmesi ve ardından analiz edilerek işin gerçekleştirilmesi için gerekli olan standart sürenin belirlenmesiyle yürütülmektedir. Bu süreç yalnızca iş süresinin değil, aynı zamanda işlemin yapılış biçiminin, iş gücünün etkin kullanım düzeyinin ve potansiyel kayıpların da değerlendirilmesine olanak tanımaktadır (Shtub & Rosenwein, 2017).

Zaman etüdü çalışmaları sayesinde, üretim süreçlerinde zaman kaybına neden olan faaliyetler tespit edilerek ortadan kaldırılabilir, operasyonel darboğazlar belirlenebilir ve iş gücü planlaması daha isabetli şekilde yapılabilir. Bunun yanı sıra, üretim planlaması, maliyet hesaplamaları, fiyatlandırma stratejileri ve kapasite yönetimi gibi kritik karar alanlarında daha sağlıklı ve gerçekçi verilere dayalı bir yaklaşım benimsenebilir (Stevenson, 2020). Böylece yalnızca mevcut verimlilik düzeyi artırılmakla kalmaz, aynı zamanda geleceğe yönelik stratejik planlama süreçleri de daha sağlam temellere oturtulmuş olur.

Özetle, üretim sistemlerinde başarının anahtarı, yalnızca kaliteli ürün üretmek değil; aynı zamanda bu ürünleri en uygun sürede, en düşük maliyetle ve en az kaynakla üretmeyi mümkün kılan süreç yönetimi anlayışını benimsemekten geçmektedir. Bu nedenle zaman etüdü, modern üretim sistemlerinin vazgeçilmez analiz araçlarından biri haline gelmiş ve işletmelerin rekabetçiliklerini koruyabilmeleri için önemli bir stratejik enstrüman olarak literatürdeki yerini almıştır (Maynard et al., 2001).

İşletmelerin üretim süreçlerini daha verimli, etkin ve sürdürülebilir hale getirebilmesi için iş gücünün nasıl kullanıldığını anlamaya yönelik sistematik analizlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu doğrultuda öne çıkan temel yöntemlerden biri olan iş ölçümü, belirli bir işi yürüten nitelikli bir çalışanın, tanımlanmış bir performans seviyesinde işi tamamlaması için gereken süreyi objektif biçimde belirlemeye yarayan teknikler bütünüdür (Niebel & Freivalds, 2009). İş ölçümü yalnızca işin süresel boyutunu değil; aynı zamanda işin gerekliliği, yapılma biçimi ve kaynak kullanımı gibi unsurları da değerlendirme fırsatı sunar. Bu yönüyle iş ölçümü hem nicel hem de nitel analizlere olanak tanıyan kapsamlı bir süreç iyileştirme aracıdır.

İş ölçüm tekniklerinin temel amacı, bir işin tamamlanabilmesi için gereken ideal süreyi tespit ederek, bu süre doğrultusunda iş akışlarının yeniden yapılandırılmasını sağlamaktır. Sürecin standart süreye göre modellenmesi sayesinde, işletmeler üretim dışı ya da katma değer yaratmayan faaliyetleri daha kolay tespit edebilir ve bu faaliyetleri ortadan kaldırarak verimlilik düzeyini artırabilir (Heizer, Render & Munson, 2020). Aynı zamanda, çalışanlar arası iş yükü dengesi sağlanabilir, fazla mesai gibi maliyet artırıcı unsurlar minimize edilebilir ve zaman yönetimi daha etkin bir zemine oturtulabilir. Nitekim Yıldız (2013), iş ölçümünün yalnızca sürenin belirlenmesine değil; aynı zamanda işin gerekliliğini ve etkinliğini sorgulayan stratejik bir yaklaşım sunduğunu vurgulamaktadır.

İş ölçümüne dayalı olarak belirlenen standart zamanlar, üretim planlaması, maliyet hesaplama, kapasite belirleme ve personel ihtiyacının öngörülmesi gibi çok sayıda operasyonel süreçte temel veri işlevi görmektedir (Groover, 2015). Bu standartların doğru biçimde oluşturulması, işletmenin genel performansının değerlendirilmesinde de kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca iş ölçümü, toplam kalite yönetimi, yalın üretim ve sürekli iyileştirme gibi çağdaş üretim yaklaşımlarının da temelini oluşturmaktadır (Shtub & Rosenwein, 2017). Çünkü bu yaklaşımlarda israfın azaltılması, süreçlerin yalınlaştırılması ve iş gücünün etkin kullanımı esas alınmakta; bu hedeflere ulaşmanın yolu ise doğru ve güvenilir iş ölçüm verilerinden geçmektedir.

Bu çalışma, esnek üretim yapısına sahip KOBİ ölçeğindeki bir işletmede zaman etüdü yönteminin uygulanabilirliğini değerlendirmeyi ve üretim sürecine yönelik iyileştirme önerileri geliştirmeyi amaçlamaktadır. Saha verilerine dayalı analizlerle, üretim aşamasındaki verimlilik artırma potansiyeli somut biçimde ortaya konmuştur.

Bu kapsamda hazırlanan kitap bölümünde, ilk olarak çalışmanın yöntemi açıklanmış ve Materyal ve Metot başlığı altında, zaman etüdünün kuramsal temelleri ile uygulama alanlarına yer verilmiştir. İlgili kısımda, alt başlıklar halinde 2.1. Zaman Etüdü ve İş Etüdü: Kavramsal Çerçeve ve Uygulama Alanları ile 2.2. Zaman Etüdü başlıkları altında kuramsal bilgiler sunulmuş; ardından uygulama aşamasına geçilmiştir. Bölümün sonunda ise yapılan analizler sonucunda elde edilen bulgular doğrultusunda genel bir değerlendirme yapılarak Sonuç kısmına yer verilmiştir. Bu yapı, çalışmanın hem teorik çerçevesini hem de saha verilerine dayalı pratik yönünü bütüncül biçimde ele almayı amaçlamaktadır.

2. Materyal Metot

Bu çalışma, bir üretim hattında zaman etüdü yöntemi kullanılarak yürütülmüş olup, amaç verimliliği etkileyen unsurların belirlenmesi ve bu doğrultuda sürecin iyileştirilmesidir. İncelenen üretim hattı, yakın zamanda faaliyete geçmiş olup, gerçek üretim performansı ile kurulumu sırasında öngörülen değerler arasında farklar gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, mevcut durumun sistematik biçimde analiz edilmesi için zaman etüdü çalışması tercih edilmiştir.

Çalışma kapsamında öncelikle üretim hattındaki işlemler adım adım tanımlanmış ve standart iş döngüleri belirlenmiştir. Ardından bu döngülerdeki operasyonlar doğrudan gözlemler yoluyla izlenmiş; faaliyet süreleri kronometre ile kaydedilmiştir. Her işlem, birden fazla tekrar üzerinden izlenerek ortalama süreler elde edilmiş ve sapmaları analiz edilmiştir. Bu süreçte özellikle gecikmelere, beklemelere, gereksiz hareketlere ve iş akışında yaşanan aksamaların nedenlerine odaklanılmıştır.

Toplanan veriler tablolastırılmış ve iş adımlarındaki süreler ile bu sürelerin iş akışına etkileri yorumlanmıştır. Ayrıca zaman kaybına yol açan unsurlar kategorilere ayrılarak analiz edilmiştir. Gözlemler süresince edinilen bulgular, sürecin nerelerde tıklandığını ve verimliliğin hangi unsurlar nedeniyle düştüğünü ortaya koymak açısından kritik rol oynamıştır.

Bu yöntem, üretim hattının iyileştirilmesine yönelik önerilerin geliştirilmesine temel oluşturmakla birlikte, aynı zamanda zaman etüdünün uygulamalı geçerliliğini göstermesi bakımından literatürle de örtüşmektedir.

Benzer çalışmalar, zaman etüdünün hem endüstriyel süreçlerde hem de hizmet sektöründe sistem verimliliğini artırmak için etkili bir araç olduğunu ortaya koymaktadır (Niebel, 1982; Chousein & Aslan, 2020).

2.1. Zaman Etüdü ve İş Etüdü: Kavramsal Çerçeve ve Uygulama Alanları

İşletmelerin üretim süreçlerinde verimlilik artışını sürdürülebilir kılabilimleri, yalnızca teknoloji yatırımlarına değil, aynı zamanda mevcut iş sistemlerinin analizi ve sürekli iyileştirilmesine de bağlıdır. Bu bağlamda, iş etüdü; iş süreçlerinin, çalışanların fiziksel ve zihinsel özellikleri göz önünde bulundurularak sistematik biçimde analiz edilmesi ve iyileştirilmesini amaçlayan kapsamlı bir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Bezen, 2007). İş etüdü, yalnızca iş akışlarını değil, aynı zamanda çalışma ortamını, iş gücünün potansiyelini ve kaynak kullanımını da değerlendirme fırsatı sunar. Böylelikle, işletmenin hem operasyonel hem de stratejik düzeyde daha etkin bir yapıya kavuşması hedeflenir.

İş etüdünün iki temel bileşeninden biri olan zaman etüdü, iş ölçüm teknikleri içerisinde en yaygın ve sistematik biçimde uygulanan yöntemdir. Zaman etüdü, belirli bir işin en verimli biçimde gerçekleştirilmesi için gereken sürenin, önceden tanımlanmış koşullar altında, doğrudan gözlem ve ölçüm yoluyla belirlenmesini esas alır (Niebel & Freivalds, 2009). Bu süreçte iş, çeşitli elemanlara ayrılır ve her bir iş elemanının gerçekleştirilme süresi kronometre ya da video analiz teknikleriyle kayıt altına alınır. Elde edilen veriler yalnızca nicel değil; aynı zamanda işin yapılış şekli, operatörün performansı ve iş ortamı gibi nitel parametrelerle birlikte değerlendirilir (Groover, 2015). Böylece zaman etüdü, yalnızca standart sürelerin belirlenmesini değil, aynı zamanda iş sistemlerinin bütünsel bir bakış açısıyla iyileştirilmesini mümkün kılar.

Zaman etüdü uygulamalarının birçok sektörde yaygınlık kazandığı görülmektedir. Literatürde yapılan çeşitli ampirik çalışmalar, zaman etüdünün özellikle üretim, montaj ve hizmet sektörlerinde standart zamanların belirlenmesi amacıyla sıklıkla tercih edildiğini göstermektedir (Timur, 1984; Heizer et al., 2020). Bazı araştırmalarda, üretim odaklı sektörlerde zaman etüdü kullanım oranlarının %90'ı aşığına dair bulgulara rastlanmaktadır. Bunun temel nedenlerinden biri, zaman etüdünün karar verme süreçlerinde yüksek düzeyde kullanılabilir ve güvenilir veri sunmasıdır. Bu veriler, üretim planlaması, iş gücü dağılımı, kapasite analizi ve maliyet kontrolü gibi pek çok alanda kritik rol oynamaktadır (Shtub & Rosenwein, 2017).

Zaman etüdü uygulamalarının üretim süreçlerinde sağladığı çok boyutlu katkılar, yalnızca teorik yaklaşımlarla sınırlı kalmayıp, saha çalışmalarıyla da açık biçimde ortaya konmuştur. Örneğin, ahşap kent mobilyaları üreten bir işletmede gerçekleştirilen uygulamalı çalışmada, piknik masası ve bank üretiminin montaj aşamaları ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Üç farklı makine ve bir manuel işlem basamağını kapsayan bu süreçlerde, her bir işlem için onar gözlemden oluşan zaman etütleri yapılmış ve veriler %95 güven düzeyi ile %5 hata payı çerçevesinde değerlendirilmiştir (Yücel & Dilik, 2021). Elde edilen bulgular, yalnızca işlem sürelerinin hesaplanmasıyla sınırlı kalmamış; aynı zamanda mevcut üretim yapısının verimlilik düzeyine ilişkin anlamlı çıkarımlar yapılmasına olanak tanımıştır.

Araştırmada, piknik masası montaj süreci için standart zaman 11,58 dakika, bank montajı için ise 7,26 dakika olarak belirlenmiştir. Bu süreler, işletmenin tam kapasite ile çalışmadığını ve mevcut üretim sisteminin yeniden yapılandırılmasının gerekli olduğunu ortaya koymuştur. Dolayısıyla söz konusu uygulama, zaman etüdünün yalnızca operasyonel düzeydeki kararlar için değil; aynı zamanda üretim stratejisinin gözden geçirilmesi, uzun vadeli maliyet yönetimi ve yatırım planlaması gibi stratejik alanlar için de önemli bir araç olduğunu göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, zaman etüdünün çok boyutlu analiz kabiliyetini ortaya koymakta ve benzer üretim alanlarında gerçekleştirilecek uygulamalara güçlü bir referans sunmaktadır.

Zaman etüdünün yalnızca üretim sektöründe değil, hizmet sektöründe de etkin biçimde uygulanabildiğini gösteren örneklerden biri de sağlık alanındaki uygulamalardır. Cumhuriyet Üniversitesi Araştırma Hastanesi'nin Genel Cerrahi bölümünde gerçekleştirilen kapsamlı bir çalışmada, endoskopi işlemlerinin fiili süreleri ile standart süreleri karşılaştırılarak süreçteki verimsizlik düzeyleri ortaya konmuştur (Bircan & İskender, 2005). İncelenen işlem sürelerinde tespit edilen sapmalar, özellikle süreç içi aksaklıkların ve darboğazların önemli göstergeleri olarak değerlendirilmiştir. Araştırmada yalnızca sayısal analizlere değil, aynı zamanda bu verimsizliklerin temel nedenlerine de odaklanılmış ve sürece özel iyileştirme önerileri geliştirilmiştir. Bu yönüyle çalışma, zaman etüdü verilerinin yalnızca performans ölçümü amacıyla değil, aynı zamanda süreç iyileştirme ve hizmet kalitesini artırma doğrultusunda nasıl stratejik araçlara dönüştürülebileceğini göstermektedir. Özellikle sağlık sektöründeki karmaşık ve zaman duyarlı işlemlerin yönetiminde, bu tür ölçüm tekniklerinin karar destek sistemi olarak işlev görmesi, zaman etüdü uygulamalarının sektörel çeşitliliğini ve esnekliğini ortaya koymaktadır.

Zaman etüdünün yalın üretim sistemleriyle entegrasyonu, üretim süreçlerinin yeniden yapılandırılmasında kritik bir rol üstlenmektedir. Hazır giyim sektörüne odaklanan bir çalışmada, değer akış haritası tekniğiyle mevcut üretim akışı analiz edilerek zaman etüdü verileriyle desteklenen yeni bir üretim hattı tasarımı gerçekleştirilmiştir (Güzel, 2011). Bu kapsamda, üretim hattında yer alan her bir iş adımı ayrıntılı biçimde incelenmiş, standart zamanlar belirlenmiş ve darboğaz noktaları net bir şekilde tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, israf kaynaklarının ortadan kaldırılması ve hat verimliliğinin artırılması hedeflenmiş; önerilen düzenleme ile önemli ölçüde verimlilik artışı sağlanabileceği ortaya konmuştur. Bu örnek, zaman etüdünün yalnızca operasyonel süreçlerin ölçümünde değil, aynı zamanda yalın üretim felsefesine uygun biçimde süreç tasarımında da stratejik bir araç olarak işlev gördüğünü göstermektedir. Böylece zaman etüdü, hem üretim kaynaklarının daha etkin kullanımını mümkün kılmakta hem de yalınlaşma sürecinde sürekli iyileştirme anlayışına katkı sunmaktadır.

Hizmet sektöründe zaman etüdünün uygulanabilirliğini gösteren bir diğer örnekte, bir devlet hastanesinde dört farklı klinikte görev yapan hemşirelerin günlük iş akışları sistematik biçimde analiz edilmiştir. Her biri üçer kez gözlemlenen toplam 30 hemşirenin faaliyetleri; doğrudan hasta bakımı, dolaylı hizmetler ve kişisel işler şeklinde sınıflandırılmış ve özel kayıt formlarına işlenmiştir. Toplamda 3.659 faaliyetin analiz edildiği bu çalışmada, faaliyetlerin %55,1'inin doğrudan hasta bakımı ile ilişkili olduğu saptanmış; dolaylı hizmetler %16, kişisel faaliyetler ise %27,9 oranında yer almıştır (Chousein & Aslan, 2020). Elde edilen bulgular, hemşirelerin görev dağılımının büyük ölçüde hasta yoğunluğu ve bakım ihtiyaçlarına bağlı olarak şekillendiğini göstermektedir. Bu durum, zaman etüdü verilerinin yalnızca süreçlerin sayısal değerlendirilmesini değil, aynı zamanda iş gücü planlamasında stratejik kararlar alınmasını da mümkün kıldığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda çalışma, sağlık alanındaki operasyonel etkinliğin artırılmasında zaman etüdünün önemli bir araç olduğunu bir kez daha gözler önüne sermektedir.

Üretim verimliliğinin artırılmasına yönelik bir diğer örnek çalışmada, Temsa fabrikasında yürütülen detaylı analizler sonucu üretim süreçlerinde iyileştirme potansiyeli taşıyan unsurlar tespit edilmiştir. Zaman etüdü yöntemiyle desteklenen bu çalışmada, üretime doğrudan katkı sağlamayan faaliyetlerin ayıklanması, kalite seviyesinin yükseltilmesi ve süreçlerdeki darboğazların ortadan kaldırılması hedeflenmiştir. Elde edilen veriler ışığında geliştirilen Montaj Akış Hatları (ADS) Projesi ile üretim hattındaki akışın daha dengeli ve verimli hale getirilmesi amaçlanmış; proje çıktıları, işletme yönetimi tarafından üretim sisteminin yeniden yapılandırılmasında referans

olarak değerlendirilmiştir (Dündar & Gökçen, 2005). Bu yaklaşım, zaman etüdü uygulamalarının sadece süre ölçümlerinden ibaret olmadığını, aynı zamanda stratejik karar destek aracı olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Tüm bu literatür incelemeleri, zaman etüdü yönteminin farklı sektörlerde etkin biçimde uygulandığını ve operasyonel verimliliği artırmada önemli çıktılar sağladığını ortaya koymaktadır. Ancak mevcut çalışmalar genellikle büyük ölçekli üretim tesisleri ya da sağlık gibi spesifik hizmet alanlarına odaklanmıştır. Küçük ve orta ölçekli işletmelere (KOBİ) yönelik zaman etüdü uygulamalarının sınırlı sayıda incelendiği görülmektedir. Bu durum, özellikle esnek üretim yapısına sahip işletmelerin süreç analizlerinin detaylandırılması açısından önemli bir boşluğu işaret etmektedir. Bu bağlamda, bu çalışmada ele alınan uygulama, söz konusu literatür boşluğunu doldurmayı hedeflemekte ve özgün katkı sunmayı amaçlamaktadır. Saha verilerine dayalı olarak yürütülecek analiz süreci sayesinde, zaman etüdü yönteminin uygulanabilirliği değerlendirilecek; aynı zamanda elde edilen bulgular aracılığıyla üretim sürecinin iyileştirilmesine yönelik öneriler geliştirilecektir.

Bu çalışmada, yeni kurulan bir üretim hattında zaman etüdü yöntemi uygulanarak sürecin mevcut durumu analiz edilmiş ve hat verimliliğini olumsuz etkileyen unsurlar sistematik biçimde belirlenmiştir. Yapılan gözlemler sonucunda, üretim akışında gecikmelere yol açan, duruş sürelerini artıran ve genel performansı düşüren çeşitli yapısal ve operasyonel sorunlar tespit edilmiştir. Çalışmanın temel amacı, bu sorunların detaylı biçimde ortaya konulmasıdır. Sonuç olarak, belirlenen problemlerin giderilmesi durumunda üretim hattının hedeflenen kapasitede ve daha verimli şekilde çalışabileceği öngörülmektedir.

2.2. Zaman Etüdü

Zaman etüdü, belirli bir işin standart yöntemle, normal bir performans düzeyinde ne kadar sürede yapılabileceğini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen sistematik bir gözlem ve ölçüm sürecidir. Bu yöntem, iş etüdünün alt disiplinlerinden biri olarak, üretim süreçlerindeki zaman kullanımını analiz etmeyi ve mevcut kaynakların daha etkin kullanılmasını sağlamayı hedefler (Niebel, 1982). Zaman etüdü çalışmaları genellikle kronometre kullanılarak yapılan doğrudan gözlemleri içerir ve bu gözlemler doğrultusunda süreçler arasındaki zaman kayıpları, darboğazlar ve verimsizlik unsurları tespit edilir (Meyers & Stewart, 2002).

Zaman etüdü, yalnızca sanayi üretiminde değil, hizmet sektöründe de yaygın biçimde kullanılmaktadır. Özellikle rekabetin yoğun olduğu sektörlerde,

iş gücü ve zamanın etkin yönetimi, işletmelerin sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle zaman etüdü, süreç iyileştirme, iş dengesi sağlama, iş gücü planlaması ve kaynak kullanımında verimlilik artırımı gibi pek çok alanda karar destek aracı olarak değerlendirilmektedir (Öztürk, 2013).

Literatürde yapılan araştırmalar, zaman etüdünün operasyonel verimliliği artırmada etkili bir araç olduğunu göstermektedir. Örneğin, sanayi sektöründe yapılan uygulamalarda, zaman etüdü sayesinde üretim hatlarında önemli ölçüde iyileştirmeler sağlandığı, hizmet sektöründeki örneklerde ise çalışan görev dağılımının daha dengeli hale getirilebildiği rapor edilmiştir (Güzel, 2011; Chousein & Aslan, 2020).

Sonuç olarak, zaman etüdü yöntemi, süreçlerin daha derinlemesine anlaşılmasını sağlayarak işletmelerin hem performansını artırmakta hem de kaynaklarını daha stratejik biçimde yönetmesine olanak tanımaktadır. Bu yönüyle zaman etüdü, yalnızca teknik bir analiz yöntemi olmanın ötesinde, yönetsel kararların da temelini oluşturan önemli bir uygulama alanıdır.

3. Uygulama

Bu çalışmada, yeni kurulan bir üretim hattında zaman etüdü yöntemiyle kapsamlı bir saha çalışması gerçekleştirilmiştir. Uygulama alanı, farklı iş istasyonlarından oluşan çok aşamalı bir üretim sürecini içermektedir. Bu süreç; doğrultma hattı besleme alanı, doğrultma makinesi, pah kırma ve frezeleme istasyonları, iç hata ve yüzey hata kontrol alanları, taşıma bölümü ve paketlenme gibi ardışık işlem adımlarını kapsamaktadır. Hattın her bir bölümü, üretim sürecinin akışı ve nihai ürün kalitesi açısından kritik öneme sahiptir. Çalışmanın temel amacı, üretim sürecinin her aşamasında geçen işlem sürelerini ölçmek, kayıpları belirlemek ve üretim verimliliğini artırmaya yönelik iyileştirme alanlarını tespit etmektir.

Zaman etüdü çalışması kapsamında, üretim hattının tüm bu istasyonlarında sistematik gözlemler yapılarak işlem süreleri kaydedilmiş, iş döngüleri ayrıntılı şekilde analiz edilmiştir. Her bir işlem adımı, iş elemanlarına ayrılmış ve bu elemanlara ait süreler tekrar eden ölçümlerle elde edilmiştir. Bu sayede, iş süreçlerinde yaşanan gecikmeler, bekleme süreleri, gereksiz hareketler ve kaynak kullanımındaki verimsizlikler belirlenmiştir. Elde edilen veriler, üretim hattının genel verimliliğinin değerlendirilmesi ve darboğazların tespit edilmesi açısından önemli girdiler sunmuştur.

Bu kapsamlı uygulama sayesinde, yalnızca işlem sürelerinin hesaplanması değil, aynı zamanda iş istasyonları arasındaki senkronizasyon sorunları,

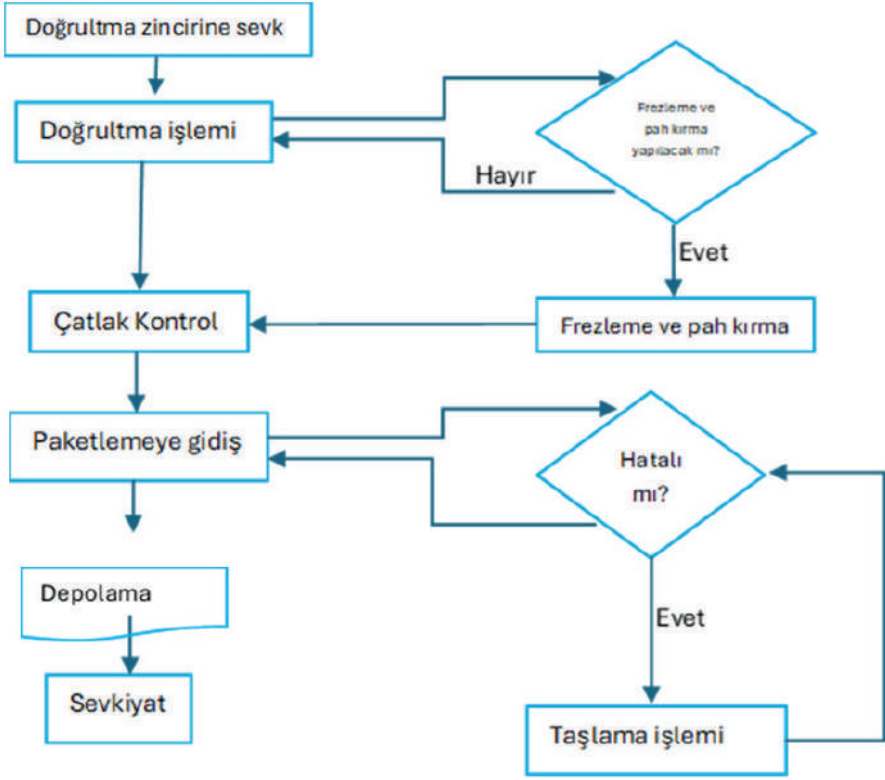
iş gücü kullanımı ve makine etkinliği gibi parametreler de analiz edilerek iyileştirme potansiyelleri ortaya çıkarılmıştır.

Çalışma kapsamında ele alınan üretim hattı, yaklaşık 16mm ile 120 mm çap aralığında ve 4000 mm ile 6000 mm uzunluklarında değişen çelik çubukların işlenmesini kapsamaktadır. Süreç, hammadde olarak gelen çubukların besleme alanına aktarılmasıyla başlamakta, ardından doğrultma makinesinden geçirilerek geometrik düzgünlüğü sağlanmaktadır. Bu aşamada çubukların yüzeyinde bulunan tufal kalıntıları temizlenmekte ve çubuk uçlarında pah kırma ile frezeleme işlemleri gerçekleştirilmektedir.

İlk işlemleri tamamlanan ürünler, kalite kontrol sürecine alınmaktadır. Yüzey çatlakları için manyetik alan temelli kontrol cihazları (örneğin, Foerster) kullanılarak tarama yapılmakta, ardından ultrasonik test cihazları (örneğin, GE sistemi) ile iç yapısal kusurlar tespit edilmektedir. Bu aşamada belirlenen hata düzeyleri, müşteri spesifikasyonlarına göre değerlendirilmekte ve ürünlerin uygunluk durumu belirlenmektedir.

Kalite kontrol sürecinde belirlenen toleransın üzerinde hata içeren ürünler, yüzey işlemi yapılmak üzere taşlama alanına yönlendirilmektedir. Taşlama işleminden geçirilen ürünler yeniden hata kontrol alanına alınmakta ve tekrar incelenmektedir. Eğer ürün, belirlenen kalite kriterlerini sağlıyorsa nihai paketleme sürecine aktarılır. Ancak hata düzeyi hala kabul edilebilir sınırların üzerindeyse ürün, ikinci kalite olarak ayrılarak değerlendirme dışı bırakılmaktadır.

Üretim hattının yukarıda açıklanan akışına ilişkin detaylı süreç, aşağıda iş akış şemasıyla görselleştirilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. İş Akış Şeması

3.1. Zaman Etüdü ile Üretim Hattı Performansının Değerlendirilmesi ve Verimlilik Artırma Stratejileri

Üretim hatlarında hedeflenen verimliliğe ulaşmak, yalnızca modern ekipmanların kullanılmasıyla değil, aynı zamanda bu ekipmanların etkin çalışıp çalışmadığının sistematik olarak analiz edilmesiyle mümkündür. Bu doğrultuda gerçekleştirilen zaman etüdü çalışmaları, üretim süreçlerinde karşılaşılan darboğazların ve kayıp zamanların belirlenmesinde kritik rol oynamaktadır. İlgili çalışmada, yeni kurulan üretim hattının performansı, başlangıçta üretici firmalar ve tedarikçiler tarafından sunulan teorik veriler ışığında değerlendirilmiştir. Ancak yapılan gözlemler, teorik olarak belirlenen üretim kapasiteleri ile fiili üretim verileri arasında anlamlı bir farklılık olduğunu ortaya koymuştur. Bu farkın sebeplerinin tespit edilmesi ve giderilmesi amacıyla detaylı bir zaman etüdü çalışması yürütülmüştür.

Zaman etüdünün temel amacı, üretim hattında gerçekleşen faaliyetlerin her birinin sürelerini kaydederek, sürece dair gecikmelerin, verimlilik

düşüklüklerinin ve üretim duruşlarının nedenlerini ortaya koymaktır. Bu kapsamda; üretim sürecinin başlangıç noktası olan doğrultma makinesine ürünlerin hangi sıklıkla ve kaç saniyede giriş yaptığı, bu makinelerdeki işlem süreleri, sonrasında gerçekleştirilen pah kırma ve frezeleme işlemleriyle bu işlemlerden çıkış süreleri gibi kritik zaman aralıkları detaylı şekilde ölçülmüştür. Ayrıca, ürünün çatlak kontrol alanına geçişi, hata tespit süreçleri, paketleme aşamasına kadar olan ilerleyişi ve hatta üretim hattının taşıma gibi yeniden işleme süreçlerine girip çıkış süreleri de ayrı ayrı analiz edilmiştir.

Etüt süresince yalnızca işlem süreleri değil, aynı zamanda üretim hattında meydana gelen beklemeler, duruşlar, operatör müdahaleleri ve makina kaynaklı aksaklıklar da kapsamlı olarak kayıt altına alınmıştır. Bu süreçte, her bir ürünün hattı ne kadar sürede tamamladığı, üretim hattından kaç dakikada bir ürün çıktığı ve saatlik üretim miktarları detaylı biçimde gözlemlenmiştir. Bu veriler doğrultusunda; üretim performansının beklenen düzeyin altında kalmasının olası nedenleri değerlendirilmiş, iyileştirme yapılması gereken alanlar belirlenmiş ve hattın genel verimliliğini artırmaya yönelik stratejiler geliştirilmiştir.

Zaman etüdü sonucunda; makine kullanım oranlarının düşüklüğü, ürün akışında meydana gelen gecikmeler, operatörlerin işlem sürelerindeki sapmalar ve planlanmamış duruşlar gibi faktörlerin üretim kapasitesini olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, hat içindeki süreçlerin yeniden yapılandırılması, üretim planlamasının optimize edilmesi ve kayıp zamanların azaltılması hedeflenmiştir. Böylece, hattın teorik üretim kapasitesine ulaşması ve kaynakların daha verimli kullanılması yönünde somut adımlar atılmıştır.

Tablo 1 içerisinde sunulan veriler, farklı çap ve boy aralıklarına sahip malzemelerle yapılan zaman etüdü çalışmasına aittir. İncelenen malzemelerin çapları 24 mm ile 57 mm arasında değişmekte olup, boy uzunlukları 5913 mm ile 7598 mm aralığındadır. Ayrıca, bu malzemelerin ağırlıkları 20,98 kg ile 141,58 kg arasında farklılık göstermektedir. Bu çeşitlilik, doğrultma makinesinin performansını farklı yük ve boyut koşullarında değerlendirebilmek amacıyla özellikle tercih edilmiştir.

Çalışma kapsamında, farklı özellikteki malzemeler için doğrultma makinesinin çalışma hızı çeşitli seviyelere ayarlanarak gözlemler yapılmıştır. Bu uygulama ile iki temel amaç hedeflenmiştir: İlk olarak, makinenin farklı hızlarda çalışırken herhangi bir performans problemi yaşayıp yaşamadığı analiz edilmiştir. İkinci olarak ise, makine hızı ile işlem süreleri arasındaki ilişki incelenerek, hız değişiminin işlem süresi üzerindeki etkileri belirlenmeye

çalışılmıştır. Bu analizler sayesinde, üretim hattının optimize edilmesi ve olası darboğazların önceden tespit edilmesi amaçlanmaktadır.

Zaman etüdü kapsamında süre ölçümleri dört ayrı noktada gerçekleştirilmiştir: (1) Doğrultma makinesine giriş zamanı, (2) Doğrultma makinesinden geçiş süresi, (3) Pah kırma işleminden sonraki süre ve (4) Paketlemeye geliş süresi. Bu ölçümler, sürecin her bir aşamasındaki zaman kullanımını ayrıntılı şekilde ortaya koymakta ve toplam çevrim süresi içinde hangi aşamaların ne kadar zaman aldığına dair kapsamlı bir bakış sunmaktadır. Tablo 1, hem farklı malzeme türlerinin hem de ayarlanan makine hızlarının süreler üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirme imkânı sağlamaktadır. Böylece üretim süreçlerinin daha verimli hale getirilmesi yönünde somut verilere dayalı analizler yapılabilir.

Çapı 24 mm olan, 41Cr4Mod-11 kodlu ve boyu 5913 mm, ağırlığı ise 21,30 kg olan bir malzeme üzerinden yapılan zaman etüdü çalışması, sürecin çeşitli aşamalarına ait sürelerin ayrıntılı biçimde analiz edilmesine olanak sağlamıştır. Doğrultma makinesi 120 m/dk hızla çalışacak şekilde ayarlandığında, ilgili malzemenin doğrultma makinesine giriş süresi 9,6 saniye olarak ölçülmüştür. Doğrultma işlemi boyunca geçen süre 6 saniye, pah kırma işleminden sonraki süre 10,5 saniye ve paketleme istasyonuna geliş süresi ise 11 saniye olarak kaydedilmiştir. Bu veriler, söz konusu malzemenin üretim süreci boyunca geçtiği her aşamada harcanan zamanı ayrıntılı biçimde ortaya koymakta ve çevrim süresi içindeki zaman dağılımını somut biçimde gözler önüne sermektedir.

Tablo 1. Zaman Etüdü Çalışması Verileri

ÇAP(mm)	MALZEME	BOY(mm)	AĞIRLIK	HIZ(m/s)	Doğrultma Mak. Giriş	Doğrultma Geçem Süre	Pah Kurma Sonrası	Paketleme geliş
24	41Cr4Mod-11	5913	21,30	120	9,6	6	10,5	11
24	C50	6160	21,857	110	10	-	6	10,3
24	41Cr4Mod-11	5913	20,98	120	9,42	2,84	5,44	10,42
24	41Cr4Mod-11	5913	20,98	120	9,6	6	10,2	10,47
30	41Cr4	6064	33,619	90	11	7,3	11,5	12
32	41Cr4	6070	38,289	90	11,1	7	11,3	11,5
32	41Cr4	6092	38,427	100	10,5	7	17	17
35	16MnCrS5	6051	46,415	90	12	5,5	12,5	12,5-13
35	16MnCrS5	6051	46,415	100	10,35	5	11,3	12
35	16MnCrS5	6051	46,415	120	9,50-10,10	4,3	10,2	11
36	C40	6061	48,387	100	10,45	6,5	11	12,3
37	C40	6000	50,598	90	13	6,3	13,2	13,2
42	16MnCrS5	5948	64,632	90	11	6	12	12
45	42CrMo4	6098	76,066	80	11,5	7	12	12,2
47	C45E	6235	84,842	80	12,5	7,3	13	13,2
48	42CrMo4	6158	87,398	90	11,5	7-7,20	11,5	12
48	42CrMo4	6113	86,76	70	12,3	7	12,5	12,30-12,50
55	28Mn6	7598	141,58	80	13	9	13	13,20-13,30
57	16MnCr+HH	5944	118,96	80	11,3	7	12	12

Üretim süreçlerinde verimliliğin artırılması, yalnızca yeni yatırımlar yapmakla değil, mevcut kaynakların daha etkin kullanımıyla da mümkündür. Özellikle otomasyonun yoğun olarak kullanıldığı sıcak hadde fabrikalarında, ürün özelliklerine bağlı olarak geçiş sürelerinde önemli farklılıklar meydana gelebilmektedir. Ürünlerin çaplarına göre veya uygulanan ek işlemler—örneğin pah kırma ve frezeleme—geçiş süresinin uzamasına neden olabilmektedir. Bu durum, üretim hattındaki genel akışı doğrudan etkilemekte ve verimlilik üzerinde önemli bir baskı oluşturmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, farklı çap ve kalitelerdeki çelik çubukların hattı tamamlama süreleri ölçülmüş ve sistemde yer alan tam otomasyon hattında ortaya çıkan eksiklikler ve darboğazlar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu tür bir analiz, sadece sorunların tespiti açısından değil, aynı zamanda geliştirilecek çözüm önerilerinin etkili olabilmesi adına da büyük önem taşımaktadır.

Elde edilen gözlemler doğrultusunda, hattın belirli bölümlerinde performans kayıplarına yol açan bazı etkenler olduğu tespit edilmiştir. Özellikle doğrultma ünitesine besleme sırasında yaşanan gecikmeler, sonraki ürünün geçiş süresini dengelemek amacıyla sistemin kendi içinde bir telafi mekanizması oluşturmaya neden olmaktadır. Bu durum, ürün geçiş hızını 25 saniyede bir ürüne çıkaracak şekilde etkileyerek üretim verimliliğini düşürmektedir.

Bu noktada, herhangi bir maliyet oluşturmada verimliliğin artırılabilmesi için ilk yapılması gereken, sistemdeki kayıpların tespit edilmesidir. Bu kayıpların sistematik bir şekilde belirlenmesi ve analiz edilmesi amacıyla Toplam Ekipman Etkinliği (OEE - Overall Equipment Effectiveness) yöntemi kullanılmalıdır. OEE, makinelerin kullanılabilirliğini, performansını ve kalite oranlarını dikkate alarak tek bir değer ile sistemin genel etkinliğini ortaya koyar. Bu sayede %100 verimlilikten ne oranda sapıldığı ve bu sapmanın hangi kayıplardan kaynaklandığı net bir şekilde görülebilir.

Saatlik üretim kapasitesi aşağıdaki formül ile hesaplanabilir:

$$\text{Saatlik Üretim (ton)} = (3600 / \text{DGS}) \times \text{AĞIRLIK}$$

Burada DGS, bir ürünün hatta geçiş süresini ifade ederken; AĞIRLIK, ürünün tonajını temsil etmektedir. Eğer mevcut durumda sistem %70 verimlilikle çalışıyorsa, reel üretim miktarı:

$$((3600 / \text{DGS}) \times \text{AĞIRLIK}) \times 0,7$$

şeklinde hesaplanabilir. Bu değer, teorik üretim kapasitesi ile karşılaştırılarak üretim hattının etkinliği daha sağlıklı biçimde değerlendirilebilir.

Ayrıca üretici firmanın iddia ettiği üretim süresi, yani “mair süresi”, ile gerçek üretim süresi karşılaştırılarak performans sapmaları tespit edilir. Bu sapmalar, sistemin iyileştirilmesi gereken alanlarını belirlemede kritik rol oynar. Grafiksel olarak ifade edilen bu veriler, karar alma süreçlerinde yol gösterici olacaktır.

3.2. Zaman Etüdü Kapsamında Üretim Hattında Tespit Edilen Sistemsel Arızalar

Yürütülen zaman etüdü çalışması kapsamında, üretim hattında sıklıkla meydana gelen arızalar ve sistemsel aksamalar detaylı olarak gözlemlenmiş ve bu durumların üretim verimliliği üzerinde önemli ölçüde olumsuz etkiler yarattığı belirlenmiştir. Aşağıda, üretim sürecinde karşılaşılan temel sorunlar ve bu sorunların üretim hattında neden olduğu kesintilere dair bulgular yer almaktadır:

➤ Vinç Gecikmeleri:

Fabrika içerisinde faaliyet gösteren vinç sayısının yetersiz olması, malzeme akışında ciddi gecikmelere yol açmaktadır. Özellikle yoğun üretim saatlerinde vinç bekleme süresi 40 ila 45 dakikaya kadar çıkmakta, bu durum üretim hattında akışkanlığı bozarak genel çevrim süresini artırmaktadır.

➤ Doğrultma Makinesinde Sistemsel ve Bakımsal Aksaklıklar:

Doğrultma makinesinde gözlemlenen sistem hataları ve yetersiz bakım uygulamaları, ekipmanın sık sık duruşa geçmesine neden olmaktadır. Bu tür arızalar, üretim sürecinin sürekliliğini bozmakta ve genel verimliliği olumsuz yönde etkilemektedir. Aynı zamanda bu durum, makine kullanım oranını düşürerek hem zaman kaybına hem de üretim maliyetlerinin artmasına yol açmaktadır.

Yapılan çalışmalar sırasında, doğrultma makinesinin farklı hız değerlerinde gösterdiği performans da analiz edilmiştir. Özellikle 80, 90 ve 100 birimlik hız seviyelerinde makine stabil bir şekilde çalışmakta, herhangi bir teknik sorun yaşanmamaktadır. Ancak, hız 110 ve 120 birim seviyelerine çıkarıldığında, makinede sistemsel problemler ve arıza eğilimleri gözlemlenmiştir. Bu durum, makinenin belirli bir hız eşliğinin üzerinde sağlıklı çalışmadığını ve mevcut sistemin bu hızlara uygun bir bakım ve yapılandırma gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Bu gözlemler, makinenin ideal çalışma aralığını belirlemek ve bakım planlamasını optimize etmek açısından önemli veriler sunmaktadır.

➤ **Hat Üzerindeki Röle Yolu Arızası:**

Üretim hattında yaşanan röle yolu arızası, otomasyon sistemi içerisindeki kontrol devrelerinin işlevini yerine getirememesine yol açmakta, bu da üretim akışında plansız duruşlara sebebiyet vermektedir

➤ **Sensör Arızaları:**

Üretim hattının farklı noktalarında görev yapan sensörlerin zaman zaman işlevini yitirmesi, ürün takibi ve otomatik yönlendirme işlemlerinde aksamalara yol açmaktadır. Bu durum, üretim hattının güvenilirliğini zayıflatmaktadır.

➤ **Doğrultma Makinesinde Pinch Rölesi Arızası:**

Malzemenin ilerletilmesini sağlayan pinch rölesinin işlevini yerine getirememesi, ürünün sonraki işlem istasyonlarına iletilmesini engellemekte ve hattın durmasına neden olmaktadır.

➤ **Çıkış Kapan Arızası:**

Ürün çıkış noktasında meydana gelen kapan arızası, paketleme ve sevkiyat sürecinde beklemelere yol açmakta, bu da üretim hattının genel çevrim süresini uzatmaktadır.

➤ **Paketleme Tramvayı Arızası:**

Paketleme bölümünde kullanılan tramvayın arızalanması, nihai ürünlerin sevkiyata hazır hale getirilmesinde gecikmelere neden olmakta ve üretim hattı üzerinde birikmelere yol açmaktadır.

➤ **Foerster Ölçüm Cihazında Çap Arızası:**

Ürünlerin kalite kontrol sürecinde kullanılan Foerster cihazında tespit edilen çap okuma arızaları, ürün geçişlerini durdurmakta ve hat boyunca kalite kontrol kesintilerine neden olmaktadır.

3.3. Üretim Hattında Tespit Edilen Sorunlara Yönelik Çözüm Önerileri

Vinç Gecikmeleri:

Üretim hattında yaşanan vinç kaynaklı gecikmeleri minimize etmek için, vinç sayısının artırılması veya mevcut vincin görev döngüsünün yeniden düzenlenmesi gerekmektedir. Alternatif olarak, belirli saatlerde yoğunluk analizine dayalı vinç kullanım planlaması yapılmalı; önceliklendirme algoritması ile taşıma sırası sistematikleştirilmelidir. Ayrıca, otomatik yönlendirme sistemleri ile vinçlerin kullanım verimliliği artırılabilir.

✓ **Doğrultma Makinesinde Sistemsel ve Bakımsal Aksaklıklar:**

Doğrultma makinesinde yaşanan sistem ve bakım kaynaklı duruşların önüne geçmek adına, makineye özel bir önleyici bakım programı uygulanmalıdır. Bakım periyotlarının sistemsel izleme ve arıza kayıtları doğrultusunda belirlenmesi, oluşabilecek problemleri önceden öngörerek üretim sürekliliğini artıracaktır. Bunun yanı sıra, yazılım güncellemeleri düzenli olarak yapılmalı ve operatörlerin eğitimiyle kullanıcı hataları en aza indirilmelidir. Ayrıca, hız artışına bağlı olarak ortaya çıkan sistemsel sorunların çözümü için yurt dışındaki makine üreticisi firma ile iletişime geçilmiş ve teknik bir değerlendirme toplantısı gerçekleştirilmiştir. Bu toplantı sonucunda, mevcut problemin kaynağına yönelik teknik destek alınması kararlaştırılmıştır. Böylece makinenin yüksek hızlarda da sorunsuz çalışabilmesi için gerekli sistemsel iyileştirmelerin yapılması hedeflenmektedir.

✓ **Hat Üzerindeki Röle Yolu Arızası:**

Röle yolunda oluşan arızaların giderilmesi için, elektriksel sistemlerde termal kamera kontrolleri ve periyodik izolasyon testleri uygulanmalıdır. Aynı zamanda, hat üzerindeki kablolama sisteminin yeniden gözden geçirilmesi ve yedek devre sistemlerinin kurulmasıyla bu tür arızaların üretimi durdurmasının önüne geçilebilir.

✓ **Sensör Arızaları:**

Sensör sistemlerinde meydana gelen arızaların önüne geçmek için, üretim hattındaki tüm sensörlerin kalibrasyon periyotları sıklaştırılmalı ve sensörler için çiftli yedekleme sistemleri oluşturulmalıdır. Ayrıca, sensör arızalarının erken tespiti için sistemin yapay zekâ tabanlı hata tanıma modülleriyle desteklenmesi önerilir.

✓ **Doğrultma Makinesinde Pinch Rölesi Arızası:**

Pinch rölesi gibi hareketli parçaların arıza riskini azaltmak adına, bu bileşenlerin yağlama ve temizlik döngüleri otomatikleştirilmeli, görev çevrimlerine ilişkin mekanik stres analizleri yapılmalıdır. Gerekirse daha dayanıklı ve yeni nesil röle teknolojilerine geçiş yapılabilir.

✓ **Çıkış Kapan Arızası:**

Çıkış kapanında meydana gelen arızaların çözümüne yönelik olarak, mekanik hassasiyet ölçümleri artırılmalı ve sistem üzerine durum izleme sensörleri yerleştirilmelidir. Böylece kapanın konum ve tepki süresi anlık olarak izlenebilir ve olası sapsmalar erkenden tespit edilebilir.

✓ **Paketleme Tramvayı Arızası:**

Paketleme tramvayında gözlemlenen arızalar için sistematik bir kestirimci bakım modeli geliştirilmelidir. Bu model, tramvayın hareket düzenini, hızını ve titreşim düzeylerini sürekli izleyerek arıza riski olan durumları önceden belirler. Ek olarak, tramvay raylarının ve sürücü motorlarının ömrü düzenli testlerle analiz edilmelidir.

✓ **Foerster Ölçüm Cihazında Çap Arızası:**

Kalite kontrol sürecinde yaşanan çap arızalarının önüne geçebilmek için, Foerster cihazının kalibrasyon işlemleri üretim başı değil, vardiya bazında yapılmalıdır. Ayrıca, cihaz üzerinde kullanılan sensörlerin marka-model uyumu kontrol edilmeli ve gerekirse üretici firma ile teknik destek anlaşması sağlanmalıdır. Yazılımsal güncellemeler ve algoritmik düzeltmelerle ölçüm hassasiyeti artırılabilir.

4. Sonuç

Bu çalışma, yeni kurulan bir üretim hattında zaman etüdü yönteminin uygulanabilirliğini ve verimlilik iyileştirme potansiyelini incelemiştir. Saha gözlemleri ve sistematik ölçümlerle, teorik ve fiili üretim performansı arasındaki farklar analiz edilmiştir. Zaman etüdü, işlem sürelerini belirlemenin yanı sıra, gecikmeler, duruşlar ve iş gücü verimsizlikleri gibi sorunları da somutlaştırmıştır. Elde edilen veriler, üretim hattındaki vinç gecikmeleri, doğrultma makinesi arızaları, sensör ve röle sistemi hataları gibi sistemsel aksaklıkların zaman ve maliyet kayıplarına neden olduğunu ortaya koymuştur. Operatör müdahaleleri, plansız bakımlar ve senkronizasyon eksiklikleri gibi insan ve süreç kaynaklı etkenler de genel verimliliği olumsuz etkilemektedir. Bu unsurların etkileri sadece nicel değil, aynı zamanda kalite, teslim süresi ve müşteri memnuniyeti gibi kritik performans göstergeleri açısından da değerlendirilmiştir.

Zaman etüdü sayesinde performans düşüklüğüne yol açan faktörler tespit edilmiş ve iyileştirme alanları belirlenmiştir. Önerilen çözüm stratejileri arasında kestirimci ve önleyici bakım, operatör eğitimlerinin güçlendirilmesi ve otomasyon sistemlerinin kalibrasyon ve yedekleme sistemleriyle desteklenmesi bulunmaktadır. Ayrıca, Toplam Ekipman Etkinliği (OEE) gibi nicel yöntemlerle üretim planlamasının desteklenmesi, kayıpların izlenmesini ve sürekli iyileştirme döngüsünü kolaylaştıracaktır.

Sonuç olarak, bu çalışma zaman etüdünün yalnızca bir süre ölçüm aracı olmadığını, aynı zamanda üretim sistemlerinin bütünsel performansını değerlendirme ve geliştirme potansiyeli taşıyan stratejik bir analiz yöntemi

olduğunu göstermiştir. Kayıpların azaltılması, darboğazların giderilmesi ve iş gücünün etkin kullanımıyla, mevcut sistemin düşük maliyetle daha yüksek verimle çalışması mümkün hale gelebilecektir. Bu bağlamda, zaman etüdü hem operasyonel hem de yönetsel düzeyde değer yaratan bir karar destek mekanizması olarak değerlendirilmelidir.

Bu çalışma, zaman etüdünün sadece işlem sürelerinin ölçülmesiyle sınırlı kalmayıp, üretim süreçlerindeki sistemsel ve yapısal problemlerin görünür kılınmasında da etkili bir analiz yöntemi olduğunu ortaya koyarak alandaki önemli bir boşluğu doldurmuştur. Gelecekteki çalışmalar için, üretim hattındaki enerji tüketimi, çevresel etkiler veya çalışan ergonomisi gibi ek performans göstergelerinin çok kriterli karar verme (MCDM) teknikleri ile ele alınması önerilmektedir. Ayrıca, zaman etüdü verilerinin gerçek zamanlı izlenmesi ve analizine yönelik yapay zekâ tabanlı sistemlerin entegrasyonu da önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Bu tür uygulamalar, kestirimci bakım stratejilerinin daha etkin bir biçimde kurgulanmasına zemin hazırlayacaktır. Gelecekte, farklı sektörlerdeki üretim sistemleri üzerinde dijitalleşme, Endüstri 4.0 bileşenleri ve yapay zekâ destekli analizlerle yapılacak çalışmaların, alana daha derinlemesine katkı sağlayacağı ve literatürdeki boşlukları kapatacağı öngörülmektedir.

Kaynakça

- Bezen, M. (2007). İş etüdü ve verimlilik ilişkisi üzerine bir değerlendirme. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 18(2), 55–62.
- Timur, S. (1984). İş ölçüm tekniklerinin üretim verimliliğine etkisi. *İstanbul Üniversitesi İktisat Fakültesi Mecmuası*, 39(1), 113–124.
- Groover, M. P. (2015). *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing* (4th ed.). Pearson Education.
- Heizer, J., Render, B., & Munson, C. (2020). *Operations management* (13th ed.). Pearson.
- Maynard, H. B., Stegemerten, G. J., & Schwab, J. L. (2001). *Methods-time measurement (MTM): Industrial engineering handbook*. McGraw-Hill.
- Niebel, B. W., & Freivalds, A. (2009). *Methods, standards, and work design* (12th ed.). McGraw-Hill Education.
- Stevenson, W. J. (2020). *Operations management* (14th ed.). McGraw-Hill Education.
- Shtub, A., & Rosenwein, M. (2017). *Production and operations management*. Springer.
- Yıldız, C. (2013). İş ölçümü ve verimlilik ilişkisi üzerine bir değerlendirme. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 24(3), 179–188.
- Yücel, M., & Dilik, T. (2021). Zaman etüdü uygulaması ile üretim sürecinin değerlendirilmesi: Ahşap kent mobilyası üretimi yapan bir işletme örneği. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 23(4), 1275–1290.
- Güzel, M. S. (2011). *Hazır giyim sektöründe yalın üretim uygulamaları: Zaman etüdü ve hat dengeleme yaklaşımlarıyla bir model önerisi* (Yayımlanmamış doktora tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Chousein, A., & Aslan, Ş. (2020). Hemşirelerin iş akışlarının zaman etüdü yöntemiyle analizi: Bir devlet hastanesinde uygulama. *Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi*, 23(1), 103–118.
- Dündar, M., & Gökçen, H. (2005). *Zaman etüdü uygulaması ile üretim hattının iyileştirilmesi: TEMSA örneği*. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 16(1), 2–10.
- Güzel, E. (2011). *Hazır giyim sektöründe yalın üretime geçiş süreci ve bir uygulama* (Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Meyers, F. E., & Stewart, J. R. (2002). *Motion and Time Study for Lean Manufacturing*. Prentice Hall.
- Öztürk, O. (2013). *İş Etüdü Uygulamalarının İşletme Performansına Etkisi*. İşletme Fakültesi Dergisi, 12(2), 245–258.

Natural and Biosorbent Adsorbents for Decolorization of Azo Dyes: A Bibliometric Analysis of Global Research Trends

Sevtap Tırınk¹

Ahmet Sercan Kulakcı²

Abstract

Natural and biosorbent adsorbents, sourced from agricultural and industrial by-products, have emerged as promising alternatives for the removal of azo dyes from wastewater. These materials, characterized by their abundance, cost-effectiveness, and environmental sustainability, offer significant advantages over conventional treatment methods. This bibliometric analysis investigates 489 publications from 1998 to 2025 indexed in the Web of Science, employing the Bibliometrix package in R for data extraction, analysis, and visualization. The prevailing research focus is on the synthesis, characterization, and performance evaluation of natural and biosorbent materials (e.g., agricultural waste, biomass, mineral clays) for the removal of conventional contaminants such as azo dyes. These materials have been studied for their adsorption mechanisms, including isotherms and kinetics, and their integration into hybrid treatment strategies combining physical, chemical, and biological processes. Moreover, recent studies highlight the exploration of modified adsorbents and nanocomposites to enhance adsorption capacity and efficiency. Despite considerable advancements, challenges remain regarding adsorbent regeneration, scalability, and techno-economic viability. This study provides a comprehensive synthesis of global research trends on natural and biosorbent adsorbents for azo dye removal, offering valuable insights into current progress, thematic evolution, and future directions in sustainable wastewater treatment technologies.

1 Dr. Öğr. Üyesi, Iğdır University, sevtap.tirink@igdir.edu.tr,
ORCID ID: 0000-0003-0123-0054

2 Student, Iğdır University, as.kulakci@hotmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0919-4561

1. Introduction

1.1. Background

Azo dyes, containing one or more azo ($-N=N-$) bonds, are widely used in industries such as textiles, leather, paper, and food. Their vivid color palette and cost-effectiveness make them particularly attractive (Benkhaya et al., 2020; Slama et al., 2021). However, the discharge of azo dye-laden effluents into aquatic systems poses significant environmental and public health risks, including genotoxicity, mutagenicity, and carcinogenicity (Malik et al., 2018; Keshava et al., 2023). The recalcitrant nature of these dyes, coupled with their resistance to conventional wastewater treatment processes, necessitates the development and deployment of advanced and sustainable remediation technologies (El-Sayed et al., 2024).

Among the diverse treatment methodologies explored for azo dye removal, adsorption using natural and biosorbent materials has gained prominence due to its simplicity, cost-effectiveness, and eco-friendly characteristics (Hardyanti et al., 2023; Mohan et al., 2014). Biosorbents derived from agricultural and industrial by-products, such as tea waste, rice husk, biochar, and various biomass materials, offer promising prospects for efficient dye removal while supporting the principles of circular economy and waste valorization (Irawan et al., 2020; Wang et al., 2018). Recent research has also highlighted the synergistic potential of integrating adsorption with biological and advanced oxidation processes, further enhancing the efficacy of azo dye remediation (Sarkar et al., 2017; Wang et al., 2021). Integrated treatment strategies, which synergistically combine physical, chemical, and biological processes, have been demonstrated to enhance the decolorization efficiency of azo dye-containing wastewaters (Argun et al., 2023).

1.2. The Significance of Azo Dye Pollution

Azo dyes, characterized by their vivid hues and durability, are extensively utilized in textile and leather industries across the globe (Mahmood et al., 2016; Goswami et al., 2024). However, the improper disposal and inadequate treatment of these synthetic dyes have precipitated severe environmental and health concerns. These issues are particularly acute in developing countries, where industrial wastewater management systems often lack the sophistication required to mitigate the release of such pollutants into natural ecosystems (Islam & Mostafa, 2019; Dutta et al., 2024).

The environmental ramifications of azo dye pollution are multifaceted. In aquatic ecosystems, these dyes contribute to significant water pollution,

reducing light penetration and disrupting photosynthesis, which in turn diminishes oxygen availability and threatens aquatic biodiversity (Goswami et al., 2024; Sornaly et al., 2024). Moreover, the persistence of azo dyes in water bodies exacerbates contamination, as many of these compounds are resistant to natural biodegradation processes (Mahmood et al., 2016). Soil contamination is also a critical issue, as improper disposal of dye-laden sludge can degrade soil quality, disrupt microbial activity, and facilitate the bioaccumulation of toxic compounds in the food chain (Hoque et al., 2024; Dutta et al., 2024).

The human health implications of azo dye pollution are equally alarming. Communities residing near industrial zones are exposed through various pathways, including contaminated water and crops, as well as direct skin contact (Goswami et al., 2024; Dutta et al., 2024). Azo dyes and their metabolic byproducts, such as aromatic amines, are recognized for their carcinogenic and mutagenic potential, capable of inducing genetic mutations and increasing cancer risk (Goswami et al., 2024; Dutta et al., 2024). Additionally, these compounds can trigger allergic reactions and skin irritation, particularly among workers in dye-intensive industries (Goswami et al., 2024; Dutta et al., 2024). Table 1 summarizes the primary environmental and health impacts of azo dye contamination, encapsulating key treatment strategies explored to address this global issue.

Table 1. Environmental and Health Impacts of Azo Dyes

Impact/Effect	Description	Citation
Water Pollution	Contamination of rivers, lakes, and groundwater, leading to long-term environmental damage	(Mahmood et al., 2016; Goswami et al., 2024)
Soil Pollution	Degradation of soil quality, affecting plant growth and microbial activities	(Hoque et al., 2024; Dutta et al., 2024)
Impact on Aquatic Life	Reduction of light penetration, inhibition of photosynthesis, and death of aquatic organisms	(Goswami et al., 2024; Sornaly et al., 2024)
Human Health Risks	Exposure through contaminated water, food, or direct contact, leading to various health issues	(Goswami et al., 2024; Dutta et al., 2024)
Carcinogenic and Mutagenic Effects	Increased risk of cancer and genetic mutations due to harmful intermediates	(Goswami et al., 2024; Dutta et al., 2024)
Allergenic and Irritant Effects	Skin inflammation, hypersensitivity, and other dermatological issues	(Goswami et al., 2024; Dutta et al., 2024)
Biological Treatment Methods	Use of microorganisms like bacteria, fungi, and algae for dye degradation	(Mahmood et al., 2016; Sornaly et al., 2024)

Enzymatic Degradation	Role of azoreductase, laccases, and peroxidases in dye breakdown	(Mahmood et al., 2016; Sornaly et al., 2024)
Advanced Bioremediation Strategies	Use of microbial consortia, genetically modified microorganisms, and nanotechnology	(Ali et al., 2023; Tripathi et al., 2023)
Physical and Chemical Treatment Methods	Methods like adsorption, ozonation, and electrochemical combustion	(Global Scenario and Technologies for the Treatment of Textile Wastewater, 2023; Patel et al., 2024)
Hybrid Treatment Systems	Integration of biological and physicochemical methods for higher removal efficiencies	(Patel et al., 2024; Tripathi et al., 2023)

Efforts to mitigate the adverse impacts of azo dye pollution have led to the development of diverse treatment strategies. Biological treatment methods leveraging bacteria, fungi, and algae have demonstrated promising results in degrading azo dyes into less harmful compounds (Mahmood et al., 2016; Sornaly et al., 2024). Enzymatic degradation, facilitated by enzymes such as azoreductases, laccases, and peroxidases, is a key mechanism underlying these biological processes (Mahmood et al., 2016; Sornaly et al., 2024). Advanced bioremediation approaches—including the use of microbial consortia, genetically modified organisms, and nanotechnology—have further enhanced degradation efficiency and treatment efficacy (Ali et al., 2023; Tripathi et al., 2023).

In contrast, traditional physical and chemical methods such as adsorption, ozonation, and electrochemical oxidation have been employed but often fall short due to high operational costs, generation of secondary pollutants, and incomplete dye mineralization (Global Scenario and Technologies for the Treatment of Textile Wastewater, 2023; Patel et al., 2024). Hybrid treatment systems integrating biological and physicochemical approaches represent a promising avenue to overcome these limitations and achieve comprehensive pollutant removal (Patel et al., 2024; Tripathi et al., 2023).

In summary, azo dye pollution constitutes a pressing global challenge with significant ecological and public health ramifications. Its disproportionate impact on developing regions underscores the urgent need for comprehensive regulatory frameworks, investment in sustainable treatment technologies, and the promotion of environmentally conscious industrial practices.

1.3. Objectives of the Study

In light of the environmental and health significance of azo dye pollution and the growing interest in sustainable remediation technologies,

bibliometric analyses provide a robust framework to systematically assess the evolution of scientific research in this field, identify leading contributors, track thematic trends, and highlight emerging frontiers. While several studies have conducted bibliometric evaluations on adsorption technologies and wastewater treatment in general (Hardyanti et al., 2023), a focused bibliometric review specifically targeting the use of natural and biosorbent adsorbents for azo dye decolorization remains limited. This gap necessitates a comprehensive assessment that elucidates research dynamics, international collaboration networks, and key thematic clusters in the context of azo dye remediation using sustainable adsorbents.

Therefore, the present study aims to conduct a detailed bibliometric analysis of global research trends on natural and biosorbent adsorbents for azo dye decolorization. Drawing upon 489 academic publications archived in the Web of Science (WoS) between 1998 and 2025, the analysis explores publication patterns, citation metrics, geographical distributions, international collaborations, and thematic keyword clusters. The selection of the WoS database ensures the inclusion of high-quality, multidisciplinary literature, supported by robust indexing and citation analysis tools (Rinanda et al., 2023). Data analysis and visualization were performed using the *bibliometrix* package in R (Aria & Cuccurullo, 2017). The findings of this study are expected to provide valuable insights into the scientific landscape of azo dye remediation, identify critical research gaps, and inform future directions for sustainable wastewater treatment technologies.

2. Material and Methods

2.1. Data Source and Search Strategy

This bibliometric analysis was conducted using the WoS Core Collection as the primary data source. The WoS was selected for its comprehensive coverage of multidisciplinary research areas, including natural sciences, social sciences, and engineering, as well as its robust citation analysis capabilities and data quality (Rinanda et al., 2023). Alternative databases such as Scopus and PubMed were considered, but WoS was ultimately chosen for its transparency, extensive citation metrics, and reliability in bibliometric research.

The literature search was performed on June 1, 2025, employing a targeted search strategy to retrieve publications relevant to azo dye decolorization using natural and biosorbent adsorbents. The search query was constructed using the following Topic Search (TS) keywords:

TS=((“azo dye*” OR “azo dyes” OR “textile dye*” OR “wastewater dye*”) AND (decolorization OR “color removal” OR “colour removal” OR “dye removal”) AND (biosorbent* OR “natural adsorbent*” OR “sustainable adsorbent*” OR “biological adsorbent*” OR “biobased adsorbent*” OR “low-cost adsorbent*”) AND (adsorption OR bioremediation OR “wastewater treatment” OR “textile wastewater” OR “water treatment” OR “water pollution”))

The search was limited to publications in the English language and restricted to articles and reviews to ensure the inclusion of peer-reviewed and high-quality sources. As a result, a total of 489 publications were identified covering the period from 1998 to 2025.

2.2. Data Analysis and Visualization

The extracted bibliographic data were exported from WoS in plain text format and analyzed using the bibliometrix package (Aria & Cuccurullo, 2017) within the R statistical software environment. Bibliometrix offers a comprehensive suite of tools for conducting science mapping analyses, including performance analysis, collaboration analysis, and conceptual structure analysis. The analysis followed the technical workflow depicted in Figure 1.

Key bibliometric indicators assessed included:

- Publication trends over time (number of publications per year),
- Citation metrics (total citations, average citations per publication),
- Geographical distribution of publications (countries and regions contributing to the research),
- International collaboration networks (co-authorship analysis),
- Keyword co-occurrence networks to identify thematic clusters and research trends.

Visualization outputs such as network maps, histograms, and trend graphs were generated using bibliometrix and further refined for clarity. The analysis was designed to provide a comprehensive overview of global research dynamics and highlight key contributors, thematic foci, and gaps in the literature.

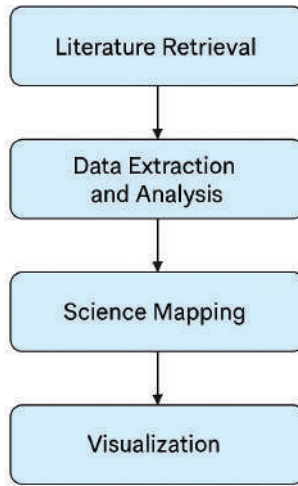


Figure 1. Bibliometric Analysis Workflow

3. Results and Discussion

3.1. General Characteristics of the Literature

The bibliometric analysis conducted in this study revealed a total of 489 publications indexed in the WoS between 1998 and 2025 focusing on natural and biosorbent adsorbents for azo dye decolorization. These publications are distributed across 191 distinct sources, including journals, book chapters, and conference proceedings. The analysis highlights an annual growth rate of 11.3%, reflecting a consistent and accelerating interest in sustainable dye removal technologies over the past decades. The average age of the documents was 8.55 years, indicating that both foundational and contemporary research efforts have significantly contributed to the field.

The document types include 458 research articles. The average citations per document was 78.74, underlining the relevance and impact of these studies within the scientific community.

A total of 1,747 authors contributed to this body of literature, with an average of 4.31 co-authors per document, demonstrating the collaborative nature of research in this area. The international co-authorship rate was 22.7%, highlighting the global interest and cooperation in developing sustainable solutions for azo dye remediation. The occurrence of 15 single-authored documents and 14 single authors suggests that while collaboration predominates, individual contributions also play a role in advancing the field.

The thematic breadth of the literature is evident from the 1,165 author keywords and 836 Keywords Plus, indicating a diverse range of topics and research directions. These bibliometric indicators are visually summarized in Figure 2, providing a clear and comprehensive overview of the dataset characteristics.

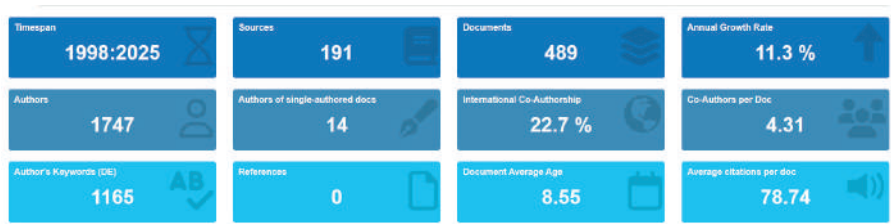


Figure 2. Summary of Key Bibliometric Indicators for the Analyzed Publications

These results reveal a robust and dynamic research landscape characterized by a growing scholarly interest, high-impact publications, and diverse international collaborations. The substantial number of citations per document reflects the recognition of this field's significance in addressing the pressing issue of azo dye contamination in wastewater. Furthermore, the diversity of sources and the range of thematic keywords underscore the interdisciplinary and evolving nature of this research area.

3.2. Country-Level Contributions and Collaborations

The bibliometric analysis highlights the global nature of research on natural and biosorbent adsorbents for azo dye removal. A comprehensive visualization of country-level contributions (Figure 3) reveals that India, China, Iran, Türkiye, and Brazil are among the most productive countries in this field. The scientific production map indicates that Asian countries, particularly India and China, have made significant contributions, while European, African, and South American countries show varying degrees of participation. The geographical distribution of research activity underscores both regional priorities and global collaborative efforts aimed at addressing the challenges of azo dye contamination in wastewater.

Country Scientific Production

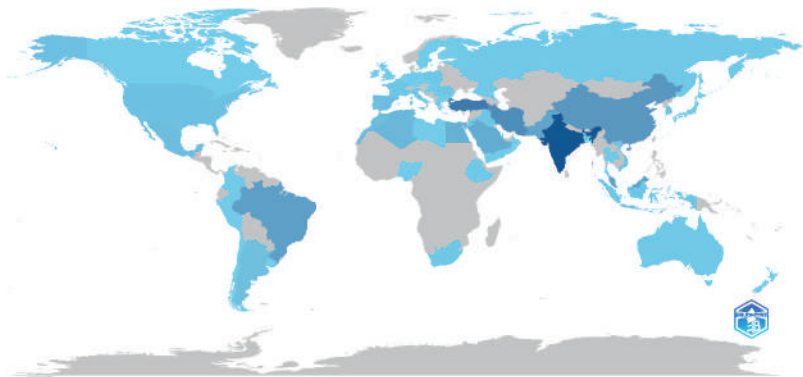


Figure 3. Global Distribution of Scientific Publications

The publication trends over time (Figure 4) reveal that India and China have exhibited the most rapid growth in research output since 2010, with Türkiye and Iran following closely. The continuous upward trajectory of these countries indicates sustained interest and investment in sustainable dye removal technologies. Notably, India has maintained a consistently high publication rate, while other countries such as Türkiye and Iran have demonstrated remarkable growth in recent years. This trend reflects increasing global recognition of the environmental hazards posed by azo dyes and the need for innovative treatment solutions.

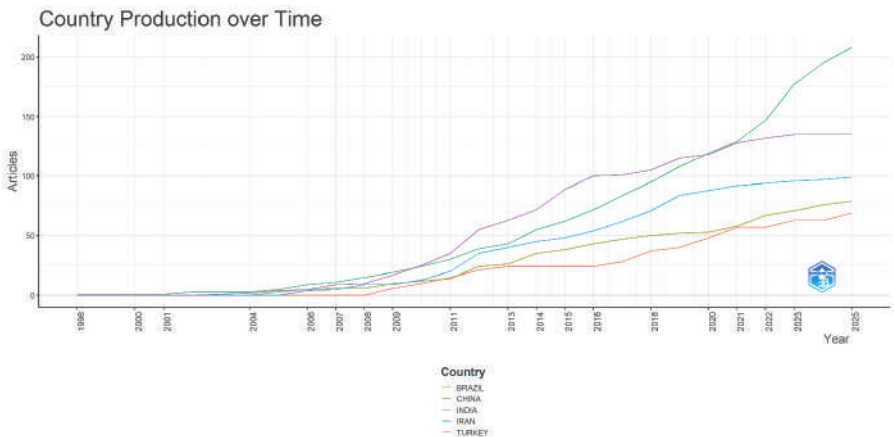


Figure 4. Temporal Trends in Publication Output by Country (1998–2025)

In terms of citation impact, Figure 5 illustrates that India leads in total citations, indicating a high level of academic influence and recognition for its contributions to this field. Malaysia, Ireland, Iran, and Türkiye also rank highly, suggesting that research originating from these countries has garnered substantial attention within the scientific community. The high citation rates for these countries highlight the global relevance and applicability of their findings in addressing azo dye pollution challenges.

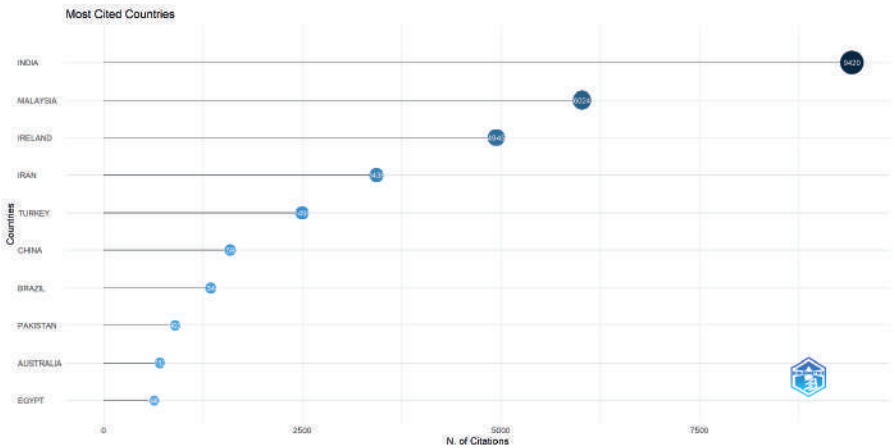


Figure 5. Most Cited Countries Based on Total Citation Counts

The analysis of corresponding author’s countries (Figure 6) reveals that India, Türkiye, Iran, and China dominate both single-country publications (SCP) and multiple-country collaborations (MCP). This demonstrates the prominent role of these countries in leading research initiatives and fostering international partnerships. Countries like Brazil, Malaysia, and Pakistan also show significant contributions, indicating the diverse and international character of research collaborations in this domain.

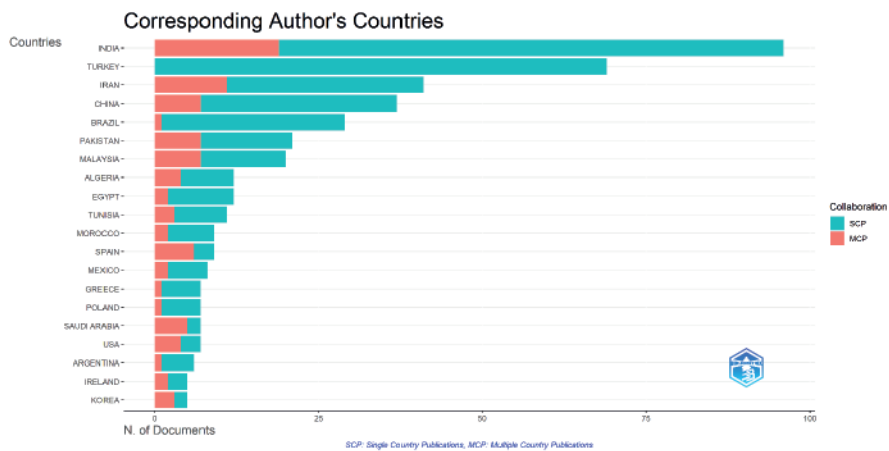


Figure 6. Distribution of Corresponding Author's Countries and Collaborative Patterns

The co-authorship network visualization (Figure 7) further emphasizes the interconnectedness of global research efforts. India emerges as a central node with extensive collaborations spanning across Asia, Europe, and Africa. Countries such as Iran, Türkiye, and China are also deeply embedded within this network, indicating their active participation in cross-national research partnerships. These collaborative patterns underscore the importance of cooperative research strategies to tackle complex environmental issues like azo dye pollution.

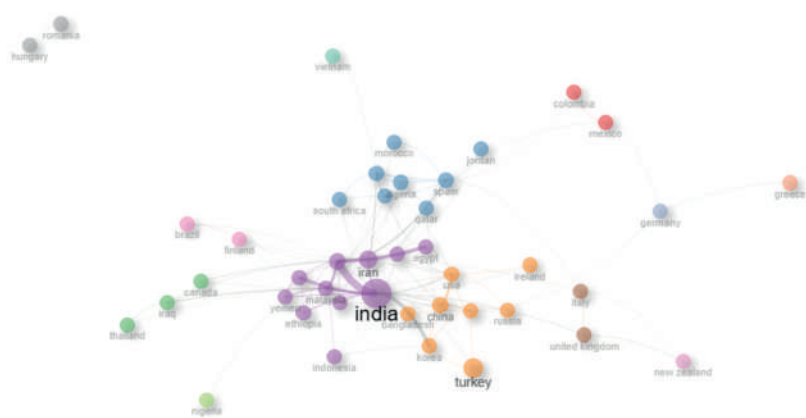


Figure 7. Map for Azo Dye Decolorization Studies

3.3. Institutional Contributions and Collaborations

The institutional-level analysis highlights key contributors to global research on natural and biosorbent adsorbents for azo dye decolorization. As shown in Figure 8, the Egyptian Knowledge Bank (EKB) and Eskisehir Osmangazi University emerge as the most prolific institutions, with 37 and 31 publications, respectively. Indian Institute of Technology (IIT System), University Sains Malaysia, and National Institute of Technology (NIT System) are also notable contributors, underscoring the active engagement of academic and research institutions from both developing and developed regions.

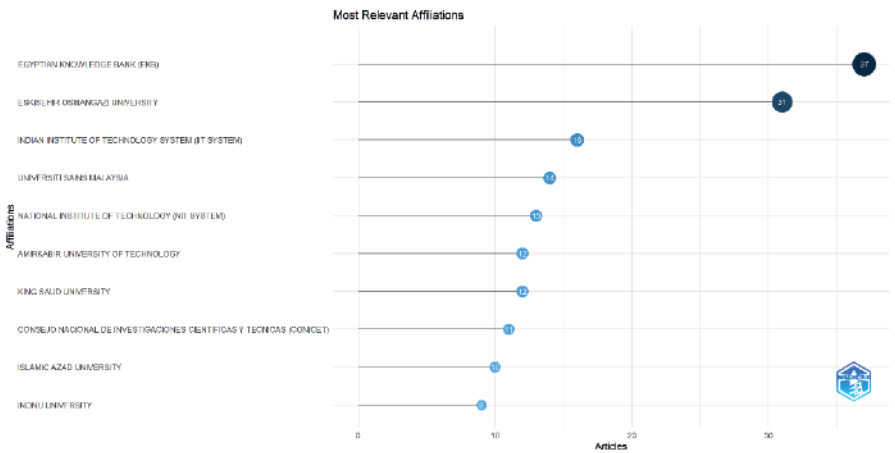


Figure 8. Most Prolific Research Institutions

The institutional collaboration network (Figure 9) further illustrates the interconnected nature of global research efforts. The IIT System (India) serves as a central hub, establishing extensive partnerships with institutions such as the Egyptian Knowledge Bank, Eskisehir Osmangazi University, and King Saud University. These collaborative networks indicate a strong commitment to addressing the global challenge of azo dye pollution through joint research initiatives and knowledge sharing.

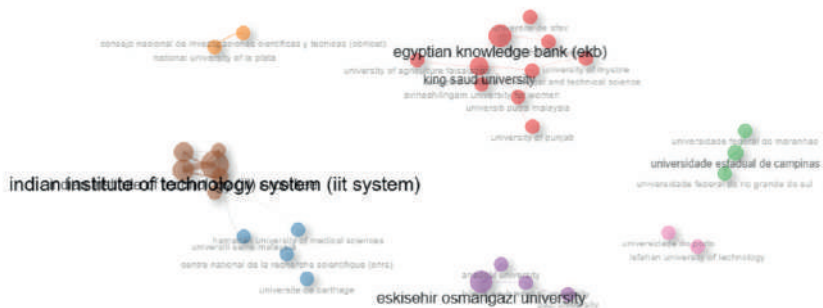


Figure 9. Institutional Collaboration Network for Azo Dye Decolorization Studies

3.4. Author-Level Contributions and Collaborations

The author-level analysis provides a detailed understanding of individual contributions, scholarly impact, and collaboration networks within the field of natural and biosorbent adsorbents for azo dye decolorization.

Figure 10 presents the Most Relevant Authors, highlighting the leading contributors based on the number of publications. Notably, Akar T, Arami M, and Mahmoodi NM emerge as the most prolific authors, reflecting their significant and sustained engagement in this research area. Other notable contributors include Agarwal S, Gupta VK, and Akar ST, underscoring the presence of both experienced and emerging researchers in the field. This distribution illustrates the diverse academic landscape contributing to advancements in azo dye remediation.

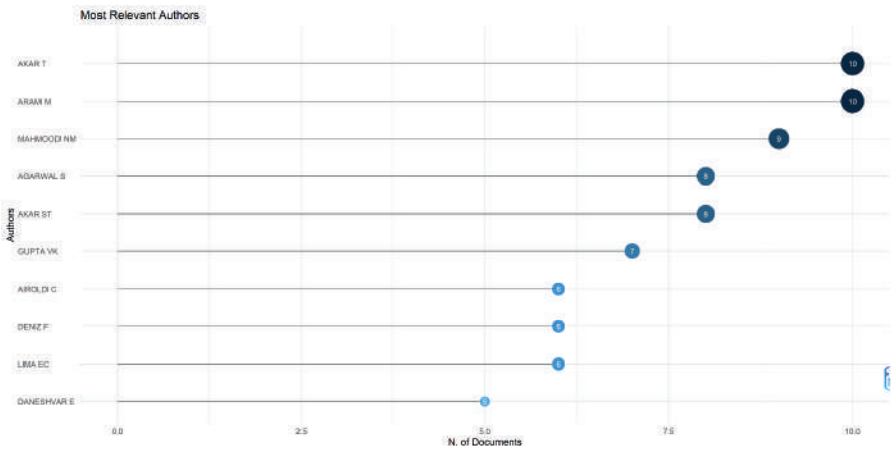


Figure 10. Most Relevant Authors

The Authors' Production Over Time (Figure 11) illustrates the publication trajectories of key researchers. Akar T, Arami M, and Mahmoodi NM demonstrate consistent publication activity since 2010, indicating long-term engagement with the field. Gupta VK shows a broad publication span with notable peaks, while other authors such as Agarwal S and Aioldi C contribute steadily. This trend analysis emphasizes both the longevity and consistency of contributions from leading researchers.

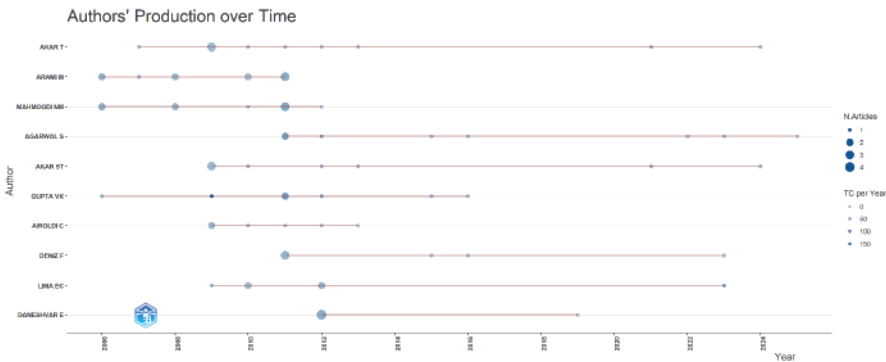


Figure 11. Temporal Trends in Publications of Leading Authors

3.5. Source-Level Analysis

The source-level analysis provides insights into the dissemination platforms that have played a pivotal role in advancing research on natural and biosorbent adsorbents for azo dye decolorization.

Figure 12 presents the Most Relevant Sources, identifying the top journals contributing to the field based on the number of publications. Desalination and Water Treatment emerges as the most prolific source with 41 publications, followed by Journal of Hazardous Materials (20 publications) and Chemical Engineering Journal (14 publications). Other notable sources include Bioresource Technology and Environmental Science and Pollution Research, reflecting a diverse array of journals covering environmental science, engineering, and sustainability domains. This distribution highlights the multidisciplinary nature of the research field and its alignment with global environmental priorities.

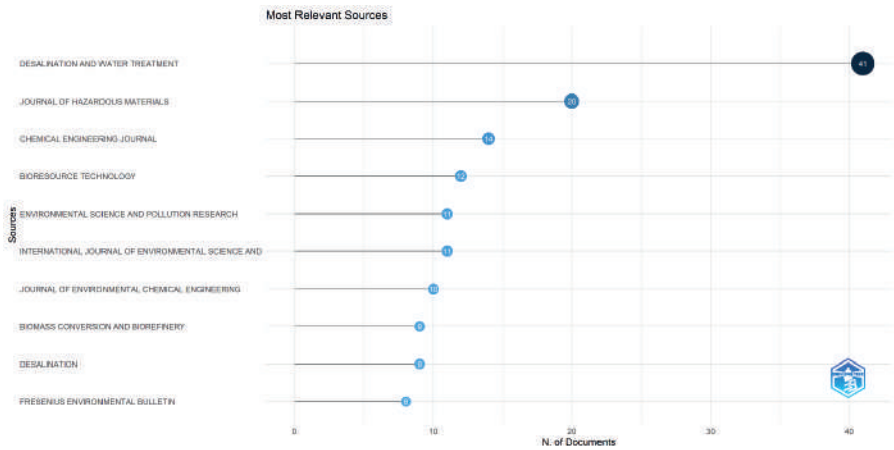


Figure 12. Most Relevant Journals

3.6. Citation Analysis

Citation metrics offer valuable insights into the scholarly influence and recognition of research on natural and biosorbent adsorbents for azo dye decolorization.

Figure 13 depicts the Average Citations per Year, illustrating the temporal trends of citation performance from 1998 to 2025. A striking peak is observed in 2001, where the average citation per publication exceeded 150, likely reflecting seminal works that laid the foundation for subsequent research in the field. However, a gradual decline in average citations is noted in later years, with modest fluctuations observed post-2010. This pattern suggests a maturation of the field, with foundational studies continuing to receive citations while more recent publications are gradually accumulating

impact. The overall trend underscores the importance of early pioneering research and highlights the ongoing relevance of contemporary studies.

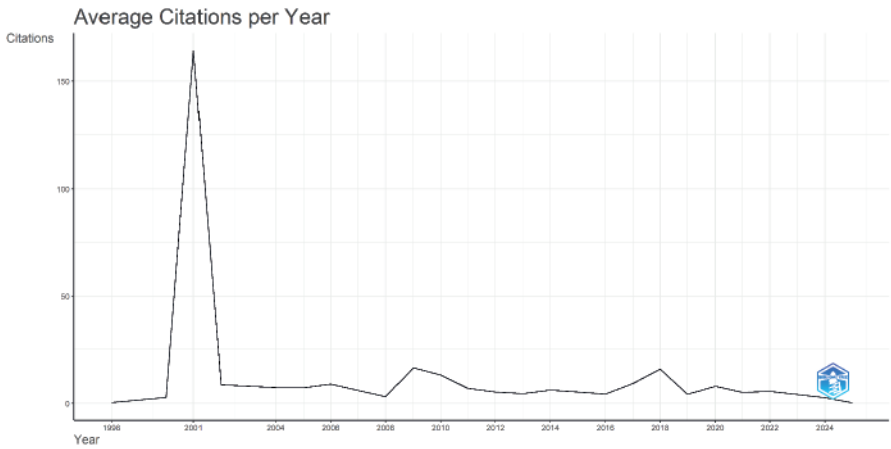


Figure 13. Average Citations per Year for Publications

3.7. Keyword Analysis and Thematic Trends

Keyword analysis provides critical insights into the thematic focus and conceptual evolution of research on natural and biosorbent adsorbents for azo dye decolorization.

Figure 14 presents the Co-occurrence Network of keywords, illustrating the relationships and thematic clusters within the field. Central keywords such as “adsorption,” “aqueous solution,” “removal,” “biosorption,” and “equilibrium” dominate the network, indicating their pivotal role in the literature. The clustering of terms into distinct thematic groups—one focused on adsorption and equilibrium dynamics, and another on dye-specific and material-related terms like “methylene blue” and “low-cost adsorbents”—reveals the interdisciplinary nature of this research field.

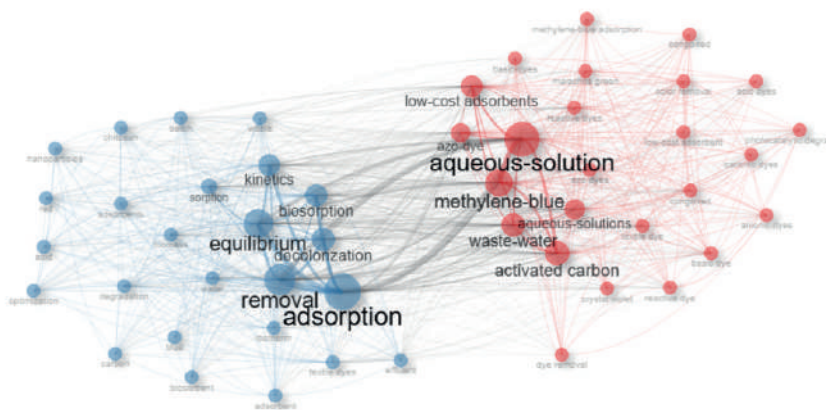


Figure 14. Keyword Co-occurrence Network

Thematic mapping (Figure 15) offers a nuanced perspective on the intellectual structure of the field. Thematic clusters such as “adsorption-removal-equilibrium” and “aqueous solution-methylene blue-activated carbon” appear in the lower-right quadrant, indicating well-developed and central themes. Clusters such as “natural adsorbents” and “reactive azo dyes” occupy less central positions, suggesting niche or emerging themes. This map not only categorizes existing research foci but also identifies areas for potential future exploration.

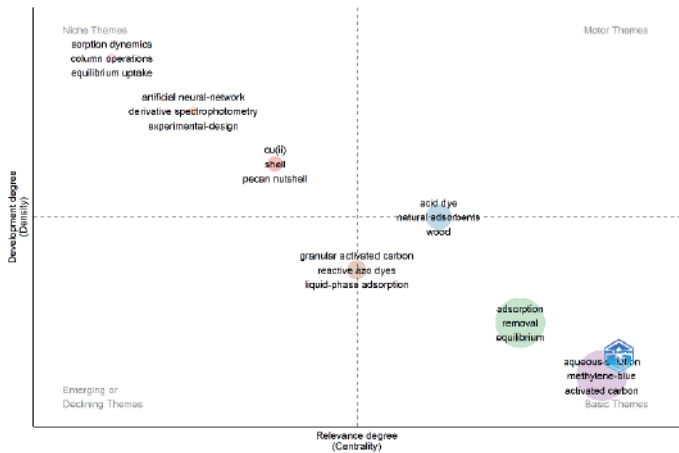


Figure 15. Thematic Map of Research Themes in Azo Dye Decolorization

The Three-Field Plot (Figure 16) visualizes the interconnections between keywords, journals, and countries. It reveals a strong linkage between key terms such as “adsorption” and “aqueous solution”, high-impact journals like Desalination and Water Treatment and Environmental Science and Pollution Research, and leading contributing countries including India, Türkiye, and China. This visualization underscores the global and multidisciplinary character of the field.

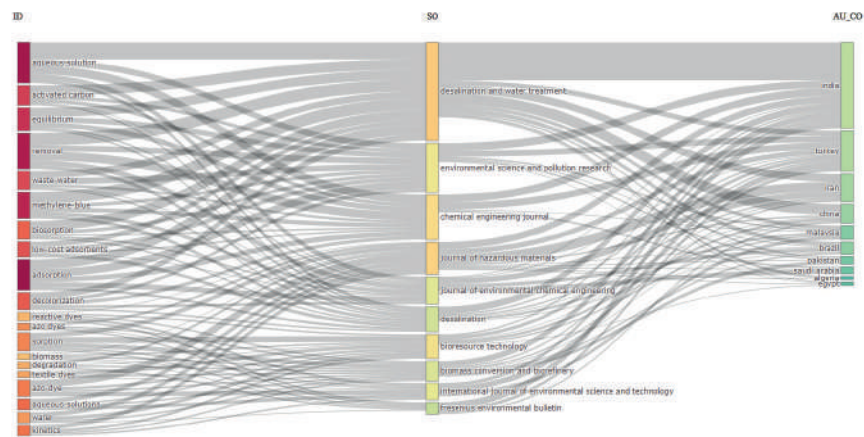


Figure 16. Three-Field Plot of Keywords, Journals, and Countries

The Trend Topics graph (Figure 17) depicts the temporal dynamics of research themes. Terms like “methylene-blue dye,” “adsorption,” “low-cost adsorbents,” and “decolorization” show consistent growth in frequency over time, highlighting evolving research interests and the sustained importance of innovative treatment strategies. This trend analysis reflects the dynamic and expanding nature of the field.

effects (Mihai et al., 2024; Haoufazane et al., 2024). Recent advancements have focused on the utilization of plant-based natural adsorbents and mineral clay biosorbents as sustainable, cost-effective solutions for dye decolorization. These approaches leverage the inherent advantages of naturally abundant, low-cost materials with environmentally friendly characteristics, addressing both ecological concerns and circular economy principles (Qamar et al., 2024; Keshmiri-Naqab & Taghavijeloudar, 2024).

Plant-based natural adsorbents have garnered significant attention, with studies demonstrating the potential of agricultural waste products such as orange peel, sawdust, corncob, and peanut shells (Mihai et al., 2024; Keshmiri-Naqab & Taghavijeloudar, 2024). Notably, *Zygophyllum gaetulum* stems have shown removal efficiencies exceeding 97% for textile azo dyes like C.I. Direct Black 80 (Haoufazane et al., 2024), while sour cherry leaves achieved high adsorption capacities for methylene blue and crystal violet (Mosoarca et al., 2023). These adsorbents operate through mechanisms involving hydroxyl, carboxyl, and amino functional groups, enabling electrostatic interactions, hydrogen bonding, and π - π stacking with dye molecules (Qamar et al., 2024; Vialkova et al., 2024).

Mineral clay biosorbents—including kaolin, bentonite, and montmorillonite—are characterized by high surface area, porosity, and chemical stability, making them effective for dye removal (Reghioua et al., 2024; Khan et al., 2023). Innovations such as kaolin-cellulose composites and bentonite-based granular biosorbents have significantly enhanced adsorption capacities (Reghioua et al., 2024; Keshmiri-Naqab & Taghavijeloudar, 2024). Moreover, the development of clay nanocomposites and modified clays has improved adsorptive performance due to increased surface reactivity and porosity (Ciğeroğlu et al., 2024; Bosu et al., 2023). Despite these advancements, challenges related to regeneration, disposal, and cost-effectiveness remain areas for future research (El-Habacha et al., 2023).

The bibliometric analysis of the current literature indicates a global and collaborative effort in this field. Research themes have evolved from basic adsorption studies to more sophisticated developments involving nanocomposites and hybrid materials (Ciğeroğlu et al., 2024; Khan et al., 2023). Regional contributions, particularly from Asia, the Middle East, and Europe, reflect both the availability of plant and clay resources and the pressing need for sustainable wastewater treatment solutions (Mihai et al., 2024; Haoufazane et al., 2024). Future research directions include optimizing synthesis methods for biosorbents, improving long-term stability and recyclability, and integrating machine learning models for performance prediction and system optimization (Bosu et al., 2023; Khan et al., 2023).

To further illustrate these findings, Table 2 provides a comparative summary of various plant-based and clay biosorbents, highlighting their maximum adsorption capacities and the target dyes. This table consolidates key performance data from recent studies and serves as a reference point for evaluating the effectiveness of different adsorbent materials in azo dye removal.

Table 2. Comparative Analysis of Adsorbent Materials for Azo Dye Removal

Adsorbent Material	Maximum Adsorption Capacity (mg/g)	Target Dye	Citation
Orange Peel Waste and Biochar	15.72–74.62	Alizarin Yellow R	(Mihai et al., 2024)
Bentonite-Sawdust-Corncob Granular	135.22	Acid Orange 7	(Keshmiri-Naqab & Taghavijeloudar, 2024)
Zygophyllum gaetulum Stems	97.08%	C.I. Direct Black 80	(Haoufazane et al., 2024)
Kaolin-Cellulose (KA/CEL)	291.5 (MB), 130.7 (CR)	Methylene Blue, Congo Red	(Reghioua et al., 2024)
Sour Cherry Leaves	168.6 (MB), 524.1 (CV)	Methylene Blue, Crystal Violet	(Mosoarca et al., 2023)
Bentonite Clay Nanocomposites	909.09	Synthetic Dyes	(Çigeroğlu et al., 2024)
Modified Bentonite	179	Heavy Metals and Dyes	(El-Habacha et al., 2023)

In summary, plant-based and mineral clay biosorbents present promising avenues for the sustainable removal of azo dyes from wastewater. Their application not only addresses environmental challenges but also promotes resource valorization and circular economy principles. The continued evolution of this research field is essential for advancing effective, scalable, and eco-friendly solutions to global water pollution challenges (Qamar et al., 2024; Mihai et al., 2024).

4. Conclusion

This study represents the first comprehensive assessment of natural and biosorbent adsorbents for azo dye removal. Indeed, this work constitutes the first systematic application of bibliometric methods to evaluate research progress and thematic evolution in this area. The analysis encompasses 489 publications indexed in the WoS between 1998 and 2025. The findings reveal a steady annual increase in publication output (11.3% growth rate)

and a robust average citation impact (78.74 citations per document), highlighting the sustained and growing interest in sustainable wastewater treatment technologies.

Notably, India, China, Iran, Türkiye, and Brazil are the leading contributors in terms of publication volume. In terms of institutions, key contributors include the Egyptian Knowledge Bank, Eskisehir Osmangazi University, Indian Institute of Technology (IIT System), Universiti Sains Malaysia, and National Institute of Technology (NIT System), which are recognized for their prolific research efforts and extensive collaborations. Among the researchers, Akar T, Arami M, and Mahmoodi NM have the highest number of publications and citations, underscoring their central role in advancing this field. The primary publications have appeared in journals such as *Desalination and Water Treatment*, *Journal of Hazardous Materials*, and *Chemical Engineering Journal*, reflecting an interdisciplinary trend that spans Environmental Science, Chemical Engineering, Materials Science, and Sustainability Research.

The analysis of keywords indicates the main areas of research focus: (1) synthesis, characterization, and performance evaluation of natural and biosorbent materials for dye adsorption, (2) investigation of adsorption mechanisms including isotherms and kinetics, and (3) the development of hybrid treatment strategies that combine physical, chemical, and biological processes for enhanced dye removal efficiency. The research predominantly revolves around the application of plant-based adsorbents (e.g., agricultural waste, biomass) and mineral clays (e.g., kaolin, bentonite) for the decolorization of azo dyes, with a growing emphasis on nanocomposites and modified adsorbents to improve performance.

Despite significant advancements in the field of natural and biosorbent adsorbents for azo dye removal, several challenges remain unresolved. These include issues related to adsorbent regeneration and reusability, scalability for industrial applications, and the need for techno-economic assessments to ensure cost-effectiveness. Additionally, the integration of advanced technologies such as machine learning for performance modeling and the standardization of adsorption process evaluation are key areas for future research.

The findings of this study provide valuable insights for material scientists, environmental engineers, policymakers, and industries engaged in sustainable wastewater treatment, offering a solid foundation for further innovation and interdisciplinary collaboration in addressing one of the most pressing environmental challenges of our time.

References

- Ali, A. E., Chowdhury, Z. Z., Devnath, R., Ahmed, Md. M., Rahman, Md. M., Khalid, K., Wahab, Y. A., Badruddin, I. A., Kamangar, S., Husien, M., Pallan, K. H., & Mitra, A. (2023). Removal of Azo Dyes from Aqueous Effluent Using Bio-Based Activated Carbons: Toxicity Aspects and Environmental Impact. *Separations*. <https://doi.org/10.3390/separations10090506>
- Argun, Y. A., Tırnık, S., & Çakmakcı, Ö. (2023). Treatment of Wastewater Containing Azo Dyes By Combined Processes. *Engineering Sciences: Issues, Opportunities and Researches*, 65–96.
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Benkhaya, S., M'Rabet, S., & El Harfi, A. (2020). Classifications, properties, and environmental impacts of textile dyes: A critical review. *Heliyon*, 6(11), e04565. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04565>
- Bosu, S., Rajamohan, N., Lam, S. S., & Vasseghian, Y. (2023). Environmental Remediation of Agrochemicals and Dyes Using Clay Nanocomposites: Review on Operating Conditions, Performance Evaluation, and Machine Learning Applications. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. <https://doi.org/10.1007/s44169-023-00043-z>
- Ciğeroğlu, Z., Messaoudi, N. E., Şenol, Z. M., Başkan, G., Georgin, J., & Gubernat, S. (2024). Clay-based nanomaterials and their adsorptive removal efficiency for dyes and antibiotics: A review. *Materials Today Sustainability*. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100735>
- Dutta, S., Adhikary, S., Bhattacharya, S., Roy, D., Chatterjee, S., Chakraborty, A., Banerjee, D., Ganguly, A., Nanda, S., & Rajak, P. (2024). Contamination of textile dyes in aquatic environment: Adverse impacts on aquatic ecosystem and human health, and its management using bioremediation. *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120103>
- El-Habacha, M., Miyah, Y., SalekLagdali, S., Mahmoudy, G., Dabagh, A., Chiban, M., Sinan, F., Iaich, S., & Zerbet, M. (2023). General overview to understand the adsorption mechanism of textile dyes and heavy metals on the surface of different clay materials. *Arabian Journal of Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105248>
- El-Sayed, M. A., El-Ramady, H., Alshaal, T., & Rashwan, M. (2024). Toxicity of azo dyes and associated health risks: A comprehensive review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 274, 115359. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.115359>

- Global scenario and technologies for the treatment of textile wastewater.* (2023). <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91235-8.00018-8>
- Goswami, D. C., Mukherjee, J., Mondal, C., & Bhunia, B. (2024). Bioremediation of azo dye: A review on strategies, toxicity assessment, mechanisms, bottlenecks and prospects. *Science of The Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176426>
- Haoufazane, C., Zaaboul, F., Monfalouti, H. E., Sebbar, N. K., Hefnawy, M., Hourch, A. E., & Kartah, B. E. (2024). A Sustainable Solution for the Adsorption of C.I. Direct Black 80, an Azoic Textile Dye with Plant Stems: *Zygophyllum gaetulum* in an Aqueous Solution. *Molecules*. <https://doi.org/10.3390/molecules29204806>
- Hardyanti, N., Susanto, H., & Kusuma, F. A. (2023). A bibliometric review of adsorption treatment with an adsorbent for wastewater. *Polish Journal of Environmental Studies*, 32(2), 981–989. <https://doi.org/10.15244/pjoes/156472>
- Hoque, M. B., Oyshi, T. H., Hannan, Md. A., Haque, P., Rahman, Md. M., Shahid, Md. A., & Sheikh, S. (2024). Unraveling the ecological footprint of textile dyes: A growing environmental concern. *Pollution Study*. <https://doi.org/10.54517/ps.v5i2.3014>
- Irawan, C., Yuniar, S., Khotimah, H., & Nata, I. F. (2020). High adsorption capacity of activated carbon from rubber seed shells on tofu (soybean whey) wastewater. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 499(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/499/1/012009>
- Islam, I., & Mostafa, M. (2019). Textile Dyeing Effluents and Environment Concerns - A Review. *Journal of Environmental Science and Natural Resources*. <https://doi.org/10.3329/JESNR.V11I1-2.43380>
- Keshava, N., Suman, K. H., & Venkatrayalu, G. (2023). Adverse health effects of azo dyes: A systematic review of mechanistic insights. *Toxicology Reports*, 10, 1582–1597. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2023.11.018>
- Keshmiri-Naqab, R., & Taghavijeloudar, M. (2024). Efficient adsorption of acid orange 7 from wastewater using novel bio-natural granular bentonite-sawdust-corn cob (GBSC): Mixture optimization, adsorption kinetic and regeneration. *Environmental Research*. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119966>
- Khan, S., Ajmal, S., Hussain, T., & Rahman, M. U. (2023). Clay-based materials for enhanced water treatment: adsorption mechanisms, challenges, and future directions. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s43994-023-00083-0>
- Mahmood, S., Khalid, A., Arshad, M., Mahmood, T., & Crowley, D. E. (2016). Detoxification of azo dyes by bacterial oxidoreductase enzymes. *Critical*

- Reviews in Biotechnology*. <https://doi.org/10.3109/07388551.2015.1004518>
- Malik, A., Jaiswal, R., Jaiswal, R., & Srivastava, S. (2018). Toxicity of azo dyes and their bioremediation: A comprehensive review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 17(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s11157-017-9454-3>
- Mihai, S., Bondarev, A. G., Călin, C., & Sîrbu, E.-E. (2024). Adsorbent Biomaterials Based on Natural Clays and Orange Peel Waste for the Removal of Anionic Dyes from Water. *Processes*. <https://doi.org/10.3390/pr12051032>
- Mohan, D., Pittman Jr., C. U., & Ok, Y. S. (2014). Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low-cost and sustainable adsorbent: A critical review. *Bioresource Technology*, 160, 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.120>
- Mosoarca, G., Vancea, C., Popa, S., Dan, M. L., & Boran, S. (2023). A Novel High-Efficiency Natural Biosorbent Material Obtained from Sour Cherry (*Prunus cerasus*) Leaf Biomass for Cationic Dyes Adsorption. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma16124252>
- Patel, D. K., Singh, A., Rao, A. S., Singh, R. S., & Sonwani, R. K. (2024). An overview of recent advances in treatment of complex dye-containing wastewater and its techno-economic assessment. *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122804>
- Qamar, M. A., Al-Gethami, W. M., Alaghaz, A. M., Shariq, M., Mohammed, A., Areshi, A. A., Khan, Z., & Qayyum, W. (2024). Progress in the development of Phyto-based materials for adsorption of dyes from wastewater. A review. *Materials Today Communications*. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108385>
- Reghioua, A., Atia, D., Hamidi, A., Jawad, A. H., Abdulhameed, A. S., & Mbuvi, H. M. (2024). Production of eco-friendly adsorbent of kaolin clay and cellulose extracted from peanut shells for removal of methylene blue and congo red removal dyes. *International Journal of Biological Macromolecules*. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130304>
- Rinanda, F. S., Khusnurridlo, A., & Budiarto, R. (2023). Bibliometric analysis of Web of Science for multidisciplinary research. *Procedia Computer Science*, 213, 528–535. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.11.268>
- Sarkar, S., Banerjee, A., Halder, U., Biswas, R., & Bandopadhyay, R. (2017). Degradation of azo dyes using bacterial strains: An overview. *Environmental Research*, 159, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.07.013>
- Shi, Y., Yang, Z., Xing, L., Zhang, X., Li, X., & Zhang, D. (2021). Recent advances in the biodegradation of azo dyes. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/S11274-021-03110-6>

- Slama, H. B., Chenari Bouket, A., Pourhassan Zadeh, M., & Triki, M. A. (2021). Microbial-mediated decolorization and degradation of azo dyes: Current status and perspectives. *Bioresource Technology Reports*, 15, 100722. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100722>
- Sornaly, H. H., Ahmed, S., Titin, K. F., Islam, M. N., Parvin, A., Islam, M. A., Faruquee, H. Md., Biswas, K. K., Islam, R., Paul, D. K., & Biswas, S. K. (2024). The utility of bioremediation approach over physicochemical methods to detoxify dyes discharges from textile effluents: A comprehensive review study. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101538>
- Tripathi, M., Singh, S., Pathak, S., Kasaudhan, J., Mishra, A., Bala, S., Garg, D., Singh, R., Singh, P., Singh, P. K., Shukla, A. K., & Pathak, N. (2023). Recent Strategies for the Remediation of Textile Dyes from Wastewater: A Systematic Review. *Toxics*. <https://doi.org/10.3390/toxics11110940>
- Vialkova, E., Korshikova, E. S., & Fugaeva, A. (2024). Phytosorbents in Wastewater Treatment Technologies: Review. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w16182626>
- Wang, Z., Zhang, J. H., Jiang, J. J., Wang, H. P., Wei, Z. W., Zhu, X., & Su, C. Y. (2021). A stable metal cluster-metalloporphyrin MOF with high capacity for cationic dye removal. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(36), 17698–17706. <https://doi.org/10.1039/C8TA06793H>

Enerji Hasadında Piezoelektrik Yaklaşımlar: Malzeme Özellikleri ve Sensör Teknolojileri

Sibel Akkaya Oy¹

Ali ekber Özdemir²

Özet

Piezoelektrik etki, bazı kristal ve polimer yapıdaki malzemelerin mekanik gerilme altında elektriksel yük üretmesi prensibine dayanmakta olup, enerji toplama sistemlerinde pasif, güvenilir ve sürdürülebilir bir enerji dönüşüm yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda piezoelektrik sensörler, çevreden gelen titreşim, darbe ve basınç gibi mekanik uyarımları elektrik enerjisine dönüştürerek mikro enerji hasadı uygulamalarında kritik rol oynamaktadır. Enerji hasatlayıcı sistemlerde kullanılan piezosensörler; yapısal tasarımlarına göre çeşitlilik göstermektedir. Tek katmanlı (unimorph) ve iki katmanlı (bimorph) sensörler, bir veya iki piezoelektrik tabakanın metal ya da esnek bir taşıyıcı üzerine yerleştirilmesiyle elde edilmekte ve yüksek hassasiyetle eğilme modunda çalışmaktadır. İnce film (thin film) piezoelektrikler, mikroeletro mekanik sistemlerde (MEMS) kullanıma uygun olup, düşük profilli yapıları sayesinde entegre sistemlerde avantaj sağlamaktadır. Yığın (stacked) piezoelektrik sensörler, yüksek enerji yoğunluğu sağlayan çok katmanlı yapılarıyla dikkat çekmektedir. Eğilme (flexural) ve tek uçlu kiriş (cantilever) piezoelektrik sensörler, özellikle titreşimli ortamlarda maksimum yer değiştirme elde edilerek enerji dönüşüm verimliliğini artırmaktadır. Son olarak, küresel (spherical) piezoelektrik yapılar, çok yönlü mekanik uyarılara duyarlı olmaları nedeniyle özellikle düzensiz titreşim kaynaklarından enerji toplama uygulamalarında tercih edilmektedir. Bu bölümde söz konusu piezoelektrik sensör tipleri yapısal özellikleri, malzeme türleri ve enerji hasadı verimlilikleri açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

- 1 Doç. Dr., Ordu Üniversitesi, Deniz Bilimleri Fakültesi, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Mühendisliği, sibelakkaya@odu.edu.tr, 0000-0002-1209-920X
- 2 Doç. Dr., Ordu Üniversitesi, Deniz Bilimleri Fakültesi, Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Mühendisliği, a.ekber@odu.edu.tr, 0000-0002-4186-6244

1. Piezoelektrik Malzemeler ve Sensör Teknolojilerindeki Uygulama Prensipleri

Piezoelektrik materyaller, mekanik stres altında elektriksel yük üretebilen özel malzemeler olup, bu özellikleri sayesinde geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. Elektriksel ve mekanik özelliklerinin etkileşimi, bu materyallerin sensör teknolojileri ve diğer algılama sistemlerinde etkin bir şekilde kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Bu bölümde, piezoelektrik materyallerin yapısal özellikleri ve fiziksel davranışları detaylı bir şekilde incelenecek; ayrıca piezoelektrik sensörlerin çalışma durumları, bu sensörlerin çevresel faktörlere ve mekanik etkilerle nasıl tepki verdiklerini açıklamak amacıyla ele alınacaktır.

1.1. Piezoelektrik materyaller ve özellikleri

Bazı malzemeler üzerlerine uygulanan mekanik zorlanmanın sonucu yüzeylerinde elektrik yükleri üretirler. Oluşan bu yüklerin miktarı uygulanan mekanik zorlanma ile orantılıdır [1,2]. Bu etkiye doğrudan veya direkt Piezoelektrik etki denir. Piezoelektrik etki, ilk olarak Jacques ve Pierre Curie kardeşler tarafından kristal fiziği araştırma alanı kapsamında incelenmeye başlanmıştır. Aslında ilk keşfedilen etki, doğrudan piezoelektrik etki olmuştur. Doğrudan etkinin keşfedilmesinden bir yıl sonra, Gabriel Lippmann temel termodinamik ilkeleri temel alarak ters (konvers) etkinin varlığını öngörmüştür. 1881 yılı sona ermeden önce, Curie kardeşler ters etkinin varlığını deneysel olarak doğrulamışlardır [3]. Bu tersinir etki, ters piezoelektrik etki (konvers piezoelektrik etki) olarak adlandırılır [4].

Piezoelektrik malzemelerin değerlendirilmesinde 5 önemli sayısal değer (figure of merit) vardır. Bunlar aşağıdaki tablo ile gösterilmiştir.

Tablo 1. Piezoelektrik malzeme sayısal değerler

Büyükliğin ismi	Sembolü
Piezoelektrik gerilme sabiti	d
Piezoelektrik gerilim sabiti	g
Elektromekanik bağlantı faktörü	k ve ya k^2
Mekanik kalite faktörü	Q_M
Akustik empedans	Z

1- Piezoelektrik gerilme sabiti: Harici bir elektrik alan (E) tarafından uyarılmış gerginliğin/zorlanmanın (x) genliği olarak tanımlanabilen bu büyüklük özellikle aktüatör uygulamaları için önemli bir büyüklüktür [5].

$$d = \frac{x}{E} \quad (1)$$

2- Piezoelektrik gerilim (Voltaj) sabiti: Özellikle algılayıcı uygulamaları için önemli olan bu büyüklük, Harici bir gerginlik/zorlanma tarafından uyarılan elektrik alanın genliği olarak tanımlanabilir [6].

$$g = \frac{E}{X} \quad (2)$$

Piezoelektrik gerilme sabiti ve Piezoelektrik gerilim sabiti arasındaki ilişki aşağıda verilen eşitlik ile gösterilmiştir.

$$g = \frac{d}{\epsilon_0 \epsilon} \quad (3)$$

(ϵ_0 mutlak dielektrik sabiti, ϵ bağlı dielektrik sabiti)

3- Elektromekanik bağlantı faktörü: Elektromekanik bağlantı faktörü (k^2), Enerji iletim katsayısı (λ_{max}) ve verimlilik (η) bazen karıştırılır. Bunun nedeni, bu terimlerin hepsinin, elektrik enerjisi ile mekanik enerji arasındaki dönüşüm oranı ile ilgili olmasına rağmen tanımlarının farklı olmasıdır. Bu nedenle bu alt bölüm başlığı altında bu terimlerin tamamı açıklanacaktır. Bununla birlikte yapılan tanımlamalar söz konusu Piezoelektrik etkinin doğrudan veya ters Piezoelektrik etki olmasına göre değişir [7,8,9]. Örneğin söz konusu etki doğrudan Piezoelektrik etki ise elektromekanik bağlantı faktörü;

$$k^2 = \frac{\text{Biriktirilen elektrik enerjisi}}{\text{Mekanik enerji girişi}} \quad (4)$$

İken, söz konusu ters Piezoelektrik etki ise

$$k^2 = \frac{\text{Biriktirilen mekanik enerji}}{\text{Elektrik enerji girişi}} \quad (5)$$

olarak tanımlanır.

(a) Elektromekanik bağlantı faktörü (k^2):

Söz konusu etkinin ters Piezoelektrik etki olduğu düşünüldüğünde (eşitlik 5 referans alındığında) yani Piezoelektrik malzemeye bir E elektrik alanı uygulandığında, birim hacim başına uygulanan giriş elektrik enerjisi [10, 11];

$$J_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon E^2 \quad (6)$$

Formülü ile ifade edilir. Bu durumda, Piezoelektrik malzemeye dışarıdan harici bir gerilim uygulanmıyorsa, malzeme üzerinde biriktirilen mekanik enerji;

$$J_M = \frac{1}{2} x^2 \quad (7)$$

Eşitlik 1 deki x değeri eşitlik 7 de yerine konulursa,

$$J_M = \frac{1}{2s} (Ed)^2 \quad (8)$$

Sonuç olarak;

$$k^2 = \frac{\frac{1}{2s} (Ed)^2}{\frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon E^2} \quad (9)$$

Eşitlik 9 düzenlenirse;

$$k^2 = \frac{d^2}{\epsilon_0 \epsilon s} \quad (10)$$

Olarak hesaplanır. (formüldeki s Piezoelektrik uyum olarak tanımlanan bir büyüklüktür).

(b) Enerji iletim katsayısı (λ_{max}):

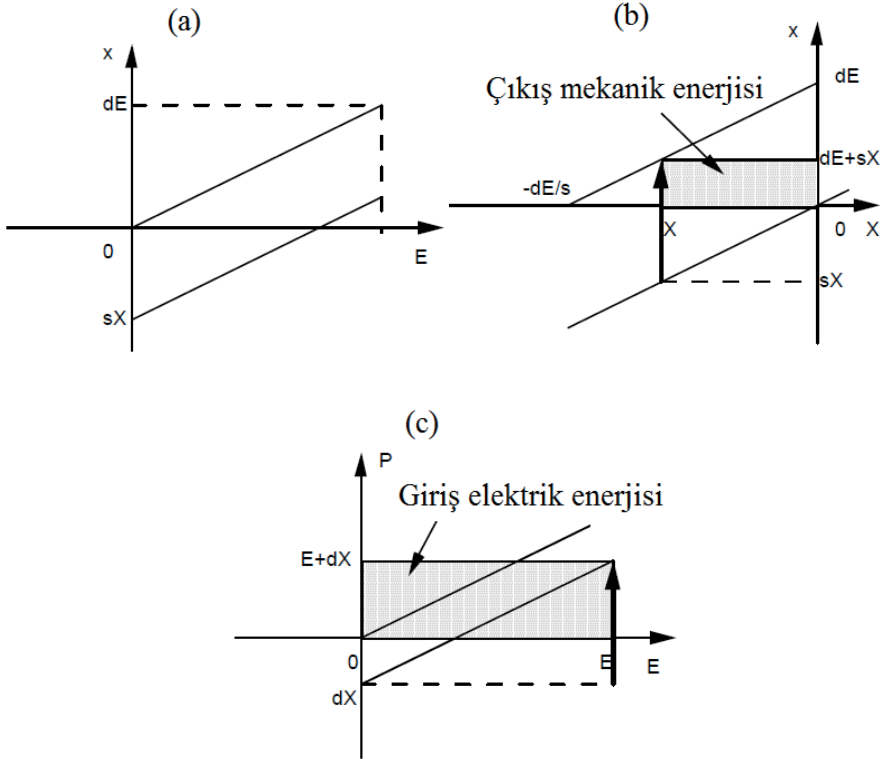
Aslında depolanan enerjinin tamamı kullanılmaz ve yapılan iş de mekanik yüke bağlıdır. Bu katsayı biriktirilen değil, giriş ve çıkış enerjileri ile ilgilidir. Elektromekanik bağlantı faktöründe olduğu gibi direkt Piezoelektrik etkide enerji iletim katsayısı aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir [12].

$$\lambda_{max} = \frac{\text{Çıkış elektrik enerjisi}}{\text{Giriş mekanik enerjisi}} \quad (11)$$

Ters Piezoelektrik etki için ise,

$$\lambda_{max} = \frac{\text{Çıkış mekanik enerjisi}}{\text{Giriş elektrik enerjisi}} \quad (12)$$

Enerji iletim katsayısı için aşağıda verilen grafik önemlidir.



Şekil -1 Giriş elektrik enerjisi ve çıkış mekanik enerjisinin hesabı

(a) Elektrik alana karşı biçim bozulması (b) Gerilmeye karşı biçim bozulması (c) Elektrik alana karşı polarizasyon

Sonuç olarak $\frac{k^2}{4} < \lambda_{max} < \frac{k^2}{2}$ olduğu görülecektir.

(c) Verimlilik (η):

Direkt veya ters Piezoelektrik etkiye bağlı olarak, çıkış mekanik ve ya elektrik enerjisinin tüketilen mekanik ve ya elektrik enerjisine oranı olarak ifade edilir.

1- Mekanik kalite faktörü:

Mekanik kalite faktörü Q_M elektromekanik rezonans spektrumunu karakterize eden bir parametredir (w_0 frekansı) [13].

$$Q_M = \frac{w_0}{2\Delta w} \quad (13)$$

Bununla birlikte Q_M^{-1} mekanik kayba eşittir.

2- Akustik empedans

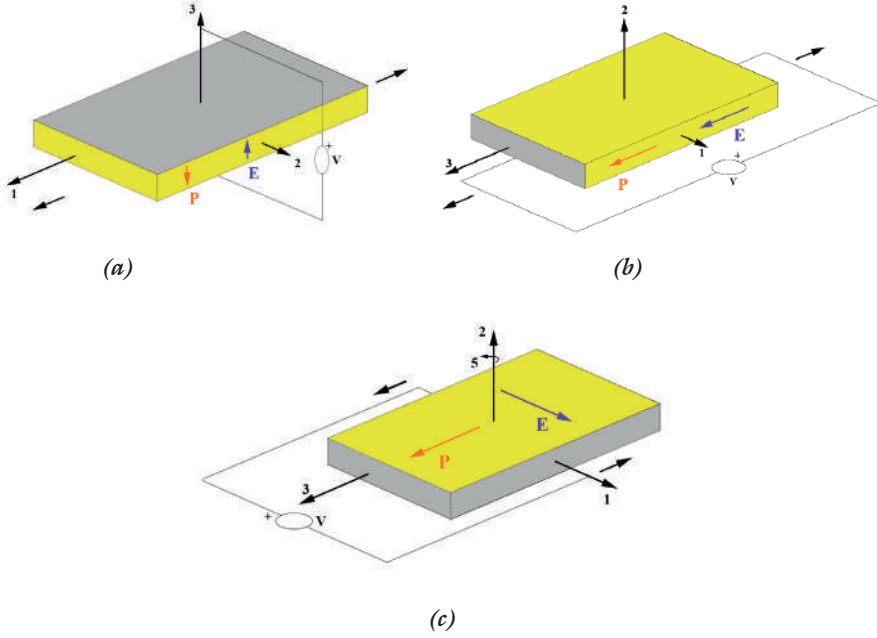
Akustik empedans iki malzeme arasındaki akustik enerji aktarımını karakterize eden bir parametredir [14].

$$Z = \sqrt{\rho c} \quad (14)$$

Verilen ifadede ρ değeri yoğunluğu, c ise malzemenin elastik sertliğini temsil etmektedir.

1.2. Piezoelektrik Sensörün Çalışma Durumları

Piezoelektrik sensörler, uygulanan mekanik gerilime bağlı olarak elektrik yükü üreten malzemelerdir ve bu dönüşüm süreci çeşitli çalışma modlarında gerçekleşebilir. Bu durum doğrudan Piezoelektrik etki altında d_{ij} terimi ile ifade edilir (dolaylı Piezoelektrik etki için ise s_{ij} terimi terimi kullanılır). Bu d_{ij} terimindeki i alt simgesi uyarılma yönünü, j ise ve sistem yanıtını göstermektedir. Bu çalışma modları, piezoelektrik sensörlerin tasarımında belirleyici olup, kullanılacak uygulamaya göre sensör malzemesinin yönlendirilmesi ve yerleşimi bu doğrultuda optimize edilir.



Şekil-2 Çalışma durumları

Şekil 2, PZT seramikleri durumunda farklı birincil elektromekanik kuplajı gösterir [15]. Deformasyon modları uzunlamasına (boyuna) mod (“33”), enine mod (“31”) ve kayma (kesme) modu (“15”) olarak adlandırılır [16,17].

Şekil 2 (a) daki boyuna moddaki mekanik gerilme ve elektriksel kutuplaşma (polarizasyon) aynı yöndedir. Piezoelektrik malzeme, polarizasyon yönünde (genellikle z-ekseni) sıkıştırılır ya da çekilir. Bu mod yüksek çıkış sinyali üretme kapasitesi nedeniyle enerji hasatlama sistemlerinde sıklıkla tercih edilir.

Şekil 2 (b) deki enine moddaki mekanik kuvvet, polarizasyon yönüne dik olarak uygulanır. Malzemenin deformasyonu polarizasyon eksenine dik bir düzlemde gerçekleşir. Cantilever kirişler gibi eğilme yapıları bu modla çalışır. Üretilen elektrik alan, genellikle uygulanan kuvvet eksenine dik yönde olur.

Şekil 2 (c) deki kayma modu ise piezoelektrik malzemenin yüzeyine paralel uygulanan kuvvetlerle çalışır. Malzeme, kristal düzlemleri arasında kayma hareketi gösterir. Bu mod daha karmaşık uygulamalarda kullanılır ve özellikle döner hareketlerin veya kayma kuvvetlerinin algılanmasında tercih edilir.

2. Piezoelektrik etki ve enerji toplayıcılarda kullanılan piezosensör tipleri

Piezoelektrik etki, mekanik stres veya titreşimlerin elektriksel enerjiye dönüştürülmesini sağlayan bir fenomendir. Bu etki, piezoelektrik malzemelerin özelliklerinden faydalanarak çevresel enerji kaynaklarını toplayan sistemlerde kritik bir rol oynar. Enerji toplayıcılar (energy harvesters), çevreden gelen düşük seviyedeki titreşim veya kuvvetleri elektrik enerjisine çevirerek sürdürülebilir enerji üretimi sağlar. Piezoelektrik sensörler, bu sistemlerin kalbinde yer almakta olup, farklı tip ve yapılarla enerji toplama verimliliğini artırmaya yönelik çözümler sunmaktadır. Bu sensörlerin çeşitliliği, kullanılan malzemelere, geometrik tasarımlara ve uygulama alanlarına göre şekillenmektedir.

2.1. Piezoelektrik etki

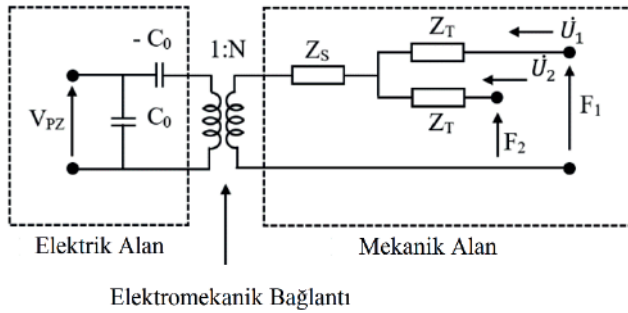
Belirli kristal yapıdaki malzemelere mekanik basınç uygulandığında, malzeme içerisindeki elektrik alan dağılımı ve buna bağlı olarak elektrik potansiyeli değişikliğe uğramaktadır. Bu değişim, doğrudan kristal içindeki kutuplanma yoğunluğunda meydana gelen farklılıklara bağlıdır. Piezoelektrik özellik gösteren bu tür kristaller, uygulanan mekanik gerilmeye karşılık elektriksel bir gerilim üretme kapasitesine sahiptir. Öte yandan, piezoelektrik malzemeler yalnızca doğrudan piezoelektrik etkiyi değil, aynı zamanda ters piezoelektrik etkiyi de sergiler; bu kapsamda, uygulanan bir elektrik alan sonucunda malzeme üzerinde mekanik deformasyon ve iç gerilme oluşumu gözlemlenmektedir [18]. Piezoelektrik malzemelerin elektriksel ve mekanik yanıtları, sistematik olarak aşağıda verilen iki temel eşitlik aracılığıyla modellenebilmektedir [19].

$$\begin{cases} [T] = [c^E][S] - [e][E] \\ [D] = [e][S] + [\epsilon^S][E] \end{cases} \quad (15)$$

burada, $[T]$, $[S]$, $[E]$ ve $[D]$ sırasıyla gerilim vektörü, gerinim vektörü, elektrik alanı vektörü ve elektriksel indüksiyon vektörüdür. $[c^E]$, $[e]$ ve $[\epsilon^S]$ piezoelektrik malzemenin fiziksel özellikleri olup, sabit elektrik alanında belirlenen elastik sertlik matrisi, piezoelektrik gerilim matrisi ve sabit gerinimdeki geçirgenlik matrisidir.

Piezoelektrik bir enerji toplayıcının elektriksel ve mekanik davranışları, Eşitlik 15 ile matematiksel olarak ifade edilebilmekte olup, bu yapıların eşdeğer elektriksel devre modeli Şekil 3'te ayrıntılı bir biçimde sunulmaktadır [20]. Söz konusu eşdeğer devre, piezoelektrik malzemenin mekanik

deformasyona karşı oluşturduğu elektriksel yanıtı temsil etmek amacıyla bir akım kaynağı (mekanik kuvveti simgeleyen) ve bu akıma karşılık gelen elektriksel özellikleri modelleyen paralel bağlı bir kapasitör ile bir içsel dirençten oluşmaktadır. Kapasitör, piezoelektrik malzemenin elektriksel yük depolama kapasitesini (dielektrik özelliklerini) temsil ederken; direnç, malzemedeki enerji kayıplarını ve içsel sönümlmeyi ifade etmektedir. Bu tür bir modelleme yaklaşımı, piezoelektrik enerji dönüştürücülerin dinamik karakteristiklerinin analiz edilmesine, performanslarının değerlendirilmesine ve çeşitli uygulamalar için optimizasyon çalışmalarının gerçekleştirilmesine önemli katkılar sunmaktadır.



Şekil 3. Piezoelektrik enerji toplayıcısının eşdeğer devre modeli

Burada C_0 , piezoelektrik elemanın blokaj (yük akışı olmadan) altında ölçülen eşdeğer elektriksel kapasitansını temsil etmektedir. N parametresi, malzemenin elektromekanik kuplaj katsayısını ifade etmekte olup, elektriksel ve mekanik enerjiler arasındaki etkileşim düzeyini belirlemektedir. Devrede tanımlanan Z_s ve Z_T empedans bileşenleri ise piezoelektrik elemanın mekanik özelliklerini modellemektedir. Mason eşdeğer devre modelinin sağ tarafında bulunan iki port, mekanik giriş ve çıkış noktalarını temsil etmektedir. Bu portlar üzerinden tanımlanan $\dot{U}_1$ ve F_1 büyüklükleri sırasıyla üst yüzeydeki titreşim hızını ve uygulanan toplam mekanik kuvveti; $\dot{U}_2$ ve F_2 ise alt yüzey için karşılık gelen büyüklükleri ifade etmektedir. Şekilde gösterildiği üzere, portlar arasındaki bu çift yönlü ilişki, piezoelektrik elemanın hem mekanik girişlere hem de elektriksel çıktılara duyarlı bir enerji dönüşüm mekanizması sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu kapsamlı modelleme yaklaşımı, piezoelektrik elemanların hem elektriksel hem de mekanik sınır koşullarını eşzamanlı olarak göz önünde bulundurarak sistem performansının daha doğru bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Eşdeğer devre için çeşitli parametreler Eşitlik 16-20'de tanımlanmıştır:

$$Z_s = \frac{z}{isin \frac{wl}{V_b^D}} \quad (16)$$

$$Z_T = iZtan \frac{wl}{2V_b^D} \quad (17)$$

$$C_0 = \frac{wt}{l} \varepsilon_{33}^T (1 - k_{33}^2) \quad (18)$$

$$V_b^D = \sqrt{\frac{C_{33}^D}{\rho}} \quad (19)$$

$$N = \frac{wt}{l} \frac{g_{\infty}}{s_{\infty}^E \beta_{\infty}^T} = \frac{wt}{l} \frac{d_{\infty}}{s_{\infty}^E} = \frac{wt}{l} \sqrt{\frac{\varepsilon_{\infty}^T}{s_{\infty}^E}} k_{\infty}, Z = \rho wt V_t^D \quad (20)$$

Denklem 20 ,deki geometrik parametreler:

w= Piezoelektrik malzemenin genişliği (width)

t=Kalınlığı (thickness)

l=Uzunluk (lenght)

V_{Dt} =Piezoelemanın sürtünmeden dolayı uyarladığı hacim

ρ =Yoğunluk (denisty)

Elektromekanik sabitler:

g_{∞} = Piezoelektrik gerilim sabiti (V.m/N)

d_{∞} = Piezoelektrik deformasyon katsayısı (C/N)

$s_{E\infty}$ =Elektrik alan altında elastikiyet katsayısı (m2/N)

$B_{T\infty}$ = Sabit sıcaklıkta elektrik geçirgenliği (elektriksel uyum katsayısı)

$\varepsilon_{T\infty}$ = Dielektrik geçirgenlik sabiti (at constant stress)

k_{∞} = elektromekanik bağ katsayısı (coupling factor), boyutsuz

2.2. Enerji Hasatlayıcı Sistemlerinde Kullanılan Piezoelektrik Sensör Tipleri

Enerji Hasatlayıcı (Energy harvester) sistemlerinde, çevresel enerji kaynaklarını elektriksel enerjiye dönüştürmek amacıyla farklı piezoelektrik

sensor tipleri kullanılmaktadır. Bu sensörler, çevredeki titreşim, basınç ve mekanik stres gibi enerjileri piezoelektrik etki sayesinde elektriksel enerjiye dönüştürerek, özellikle düşük güçlü uygulamalarda sürdürülebilir enerji üretimi sağlar. Farklı piezoelektrik malzemeler ve yapılar, enerji verimliliğini artırmak ve uygulama alanlarına uygun çözüm sağlamak için çeşitlendirilmiştir.

2.2.1. Tek katmanlı (unimorph) Piezoelektrik Sensörler

Tek katmanlı diyafram piezoelektrik transdüserler, iki katmandan oluşan bir yapı prensibine dayanmaktadır. Bu yapılarda, aktif piezoelektrik katman bir pasif elastik tabaka ile birleştirilmiştir. Piezoelektrik katmana bir elektrik alan uygulandığında, piezoelektrik etki nedeniyle bu katman boyutsal bir değişim geçirirken, pasif tabaka bu değişime direnç gösterir. Bu iki katman arasındaki mekanik uyumsuzluk, genel yapının bükülmesine veya eğilmesine (deformasyonuna) yol açar. Özellikle diyafram yapı, kenarlarından sabitlenmiş ince bir plaka formunda tasarlanarak merkezde maksimum deformasyonun elde edilmesi sağlanır [21,22,23].

Tek katmanlı sistemlerde piezoelektrik katman çoğunlukla kurşun zirkonat titanat (PZT) gibi yüksek piezoelektrik katsayılarına sahip seramik malzemelerden üretilirken, pasif tabaka ise genellikle metal (örneğin paslanmaz çelik) veya polimer esaslı esnek bir malzeme olabilir.

Bu tür bir transdüser hem aktüatör (hareket üretici) hem de sensör (algılayıcı) işlevi görebilir:

- Sensör modunda, uygulanan mekanik kuvvet veya titreşim piezoelektrik katmanda elektriksel bir yük (volta) üretilmesine neden olur.
- Aktüatör modunda ise uygulanan bir elektriksel sinyal, yapının mekanik hareket üretmesine neden olur.

Diyafram tipi tek katmanlı piezo transdüserler, yüksek hassasiyetli basınç algılama, titreşim enerjisi toplama, akustik dalga üretimi ve mikropompalama sistemleri gibi uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca kompakt yapıları sayesinde MEMS (Mikro Elektro Mekanik Sistemler) tabanlı uygulamalarda da önemli bir yere sahiptirler.

Yapısal olarak diyaframın kenarları sabitlenmiş olduğundan, piezoelektrik deformasyon diyafram merkezinde en büyük yer değiştirmeyi üretir. Bu da özellikle düşük frekanslı mekanik titreşimlerin veya basınç değişimlerinin algılanmasında yüksek verimlilik sağlar.

Tek katmanlı transdüserlerde üretilen elektrik sinyali, diyaframın mekanik rezonans frekansı ile doğrudan ilişkilidir. Dolayısıyla, sistem tasarımı sırasında diyafram geometrisi (kalınlık, yarıçap, malzeme özellikleri) rezonans frekansı ve sensör performansı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Bir tek katmanlı piezoelektrik transdüserin çalışma prensibi, piezoelektrik malzemenin elektriksel özellikleri ile mekanik davranışları arasındaki ilişkiye dayanır. Bu tür bir transdüser, genellikle şu fiziksel parametrelerle modellenir:

1. Piezoelektrik Etki (Elektriksel Yanıt) Piezoelektrik malzeme, üzerine uygulanan mekanik kuvvetle orantılı olarak elektriksel bir gerilim üretir. Bu ilişki, piezoelektrik eşitlik ile ifade edilebilir:

$$V = \frac{d_{33} \cdot F}{C_0} \quad (21)$$

Burada, V , piezoelektrik elemanın uçları arasındaki gerilimi (voltaj) temsil eder, d_{33} piezoelektrik malzemenin piezoelektrik katsayısıdır (santimetre başına volt-coulomb). F , piezoelektrik katmana uygulanan mekanik kuvveti (newton) ifade eder. C_0 , piezoelektrik malzemenin blokaj altında ölçülen kapasitansdır (farad).

2. Mekanik deformasyon ve titreşim tek katmanlı transdüserde piezoelektrik malzemenin mekanik deformasyonu, pasif tabakanın direnç gösterdiği bir ortamda meydana gelir. Bu deformasyon, diyaframın merkezinde maksimuma ulaşır. Diyaframın merkezindeki yer değiştirme, aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir:

$$\Delta x = \frac{F \cdot L^3}{E \cdot I} \quad (22)$$

Burada; Δx , diyaframın merkezindeki yer değiştirmeyi (m) gösterir. F , uygulanan mekanik kuvveti (N) ifade eder. L , diyaframın kenar uzunluğudur (m). E , malzemenin elastik modülüsüdür (Pa). I , diyaframın ikinci momenti (m⁴) olup, diyaframın şekline ve boyutlarına bağlıdır.

3. Rezonans Frekansı tek katmanlı piezoelektrik transdüserlerin mekanik rezonans frekansı, diyaframın boyutlarına ve malzeme özelliklerine bağlıdır. Rezonans frekansı f_0 , aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir:

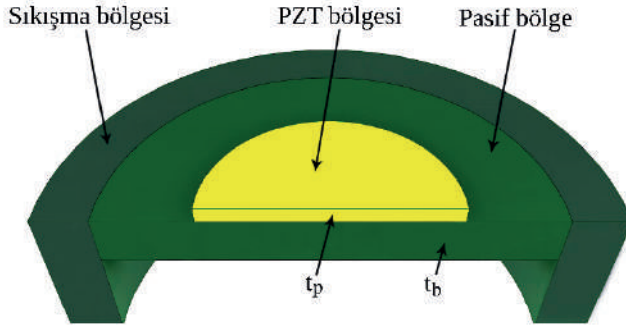
$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (23)$$

Burada; f_0 , rezonans frekansdır (Hz). K , diyaframın rijitlik katsayısını temsil eder (N/m). m , diyaframın kütlesini (kg) gösterir.

Bir tek katmanlı diyafram piezoelektrik transdüseri şematik olarak aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

- **Aktif Piezoelektrik Katman (PZT bölgesi):** Bu katman, piezoelektrik malzemenin elektriksel özelliklerini barındırır ve üzerine uygulanan mekanik kuvvetle elektriksel yük üretir.
- **Pasif Katman (Elastik Malzeme):** Piezoelektrik katman ile birleşen bu malzeme, piezoelektrik deformasyona karşı direnç gösterir ve sistemin mekanik davranışını kontrol eder.
- **Diyafram (Sıkışma bölgesi):** Kenarları sabitlenmiş ince bir plaka olarak şekillenen diyafram, merkezde maksimum yer değiştirme üretir. Bu yapı, piezoelektrik elemanın titreşim algılama ve aktüatör işlevi görmesini sağlar.

Şekil 4'te Tek katmanlı diyafram piezoelektrik dönüştürücünün şekli verilmiştir.



Şekil 4. Tek katmanlı diyafram piezoelektrik dönüştürücü yapısı

Şekil 4'te görüldüğü gibi piezoelektrik transdüser, iki katmandan oluşmaktadır: PZT (Kurşun Zirkonat Titanyum) malzemesi ve piringç (brass). PZT katmanı, transdüserin piezoelektrik özelliklerini sağlayan aktif katmandır ve kalınlığı t_p olarak belirlenmiştir. Diğer yandan, piringç katmanı ise mekanik dayanım ve iletkenlik sağlamak için kullanılır ve kalınlığı t_b olarak tanımlanmıştır. Şekil 4'te görüldüğü gibi, bu iki katman birlikte çalışarak piezoelektrik etkiyi ortaya çıkarır; PZT katmanı, uygulanan mekanik gerilme ile elektriksel enerji üretirken, piringç katmanı da yapının mekanik özelliklerini destekler ve elektriksel iletkenliği sağlar [24].

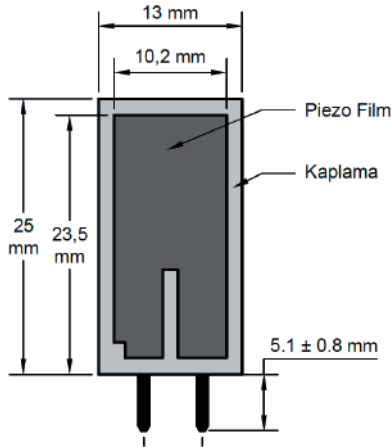
2.2.2. İki katmanlı (bimorph) Piezoelektrik Sensörler

İki katmanlı piezoelektrik sensörler, iki adet piezoelektrik malzemenin birbirine paralel olarak yerleştirilmesinden oluşur. Bu sensörler, her iki piezoelektrik katmanın elektriksel özelliklerinden faydalanır ve birlikte çalışarak daha yüksek çıkış gücü üretirler. Bu yapı, piezoelektrik malzemelerin mekanik stres altında deformasyona uğramasıyla birlikte elektriksel gerilim üretir. İki katmanlı yapılar özellikle bükülme hareketlerinden faydalanan sistemlerde tercih edilir [25,26,27,28].

- **Yapı:** Her iki piezoelektrik katman farklı yönlerde yerleştirilir ve genellikle bir metal ya da elastik malzeme, katmanlar arasında bağlayıcı olarak kullanılır.
- **Çalışma Prensibi:** Her iki piezoelektrik katman, uygulanan mekanik kuvvetle deformasyona uğrar ve bu deformasyon sonucu her iki katman üzerinde elektriksel yük birikir. Bu katmanlar arasındaki gerilim farkı, daha yüksek elektriksel çıkış sağlar.
- **Kullanım Alanları:** Düşük frekanslı titreşimler, otomatik kontrol sistemleri, mikro-hareket dedektörleri ve ses algılama gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

2.2.3. İnce (thin film) Piezoelektrik Sensörler

İnce film piezoelektrik sensörler, piezoelektrik malzemenin çok ince bir katman halinde kullanıldığı sensörlerdir. Bu sensörler, genellikle MEMS (Mikro Elektro Mekanik Sistemler) tabanlı sistemlerde kullanılır [29,30,31,32]. Şekil 5'te ticari olarak üretilen bu tip bir piezosensör yapısı verilmiştir.



Şekil 5. Film tip piezoelektrik dönüştürücü yapısı

- **Yapı:** Piezoelektrik malzeme, çok ince bir film formunda, genellikle birkaç mikrometre kalınlığında, yüzey üzerine uygulanır. İnce film yapıları, yüksek hassasiyetli ve mikro düzeyde enerji toplama için uygundur.
- **Çalışma Prensibi:** İnce film piezoelektrik sensörlerde, piezoelektrik malzeme üzerine uygulanan mekanik gerilim, çok küçük bir elektriksel yük üretir. Bu yük, mikro enerjilerin toplanmasında kullanılır.
- **Kullanım Alanları:** MEMS tabanlı sistemler, mikro-elektronik cihazlar ve çok küçük enerji toplama sistemlerinde kullanılır. Ayrıca biyomedikal sensörlerde de bu sensörler kullanılarak düşük güçlü enerjiler toplanabilir

2.2.4. Yığın (stacked) Piezoelektrik Sensörler

Yığın piezoelektrik sensörler, birkaç piezoelektrik katmanın üst üste yerleştirilmesiyle oluşturulur. Bu yapı, her katmanın piezoelektrik etkisini birleştirerek daha büyük bir elektriksel çıkış üretir. Yığın yapı, piezoelektrik sensörün elektriksel kapasitesini artıran bir yöntemdir [33,34,35,36].

- **Yapı:** Birkaç piezoelektrik katman, birbirine paralel olarak ve bir yapıştırıcı ile birleştirilir. Katmanlar arasında bir elektriksel bağlantı sağlanarak her katmanın ürettiği gerilim birleştirilir.
- **Çalışma Prensibi:** Bu sensörler, mekanik kuvvetlerin veya titreşimlerin her katmana etki etmesi sonucu her bir katman üzerinde elektriksel yük birikimi yapar. Bu yükler, tüm katmanlar bir araya geldiğinde daha yüksek bir voltaj üretir.
- **Kullanım Alanları:** Yüksek güç çıkışı gereken uygulamalarda kullanılır. Örneğin, mikro jeneratörler, otomotiv endüstrisi ve enerji toplama sistemlerinde tercih edilir.

2.2.5. Eğilme (flexural) Piezoelektrik Sensörler

Eğilme piezoelektrik sensörler, piezoelektrik malzemenin eğilme hareketlerine duyarlı olduğu sensörlerdir. Bu sensörler genellikle ince şeritler veya diyaframlar şeklinde tasarlanır. Uygulanan mekanik gerilme, piezoelektrik malzeme üzerinde bükülme hareketi yaratır ve bu hareket elektriksel enerjiye dönüşür [37,38,39,40].

- **Yapı:** Piezoelektrik malzeme, bir yüzeyde yer alan mekanik kuvvetler nedeniyle eğilir ve genellikle esnek bir temel üzerine yerleştirilir. Diyafram veya şerit yapılar, mekanik titreşimleri algılamak için idealdir.

- **Çalışma Prensibi:** Piezoelektrik malzeme, mekanik bir kuvvetle büküldüğünde, malzeme içinde elektriksel yük birikimi oluşur. Bu yük, piezoelektrik malzemenin elektriksel özellikleri sayesinde ölçülebilir ve enerjiye dönüştürülür.
- **Kullanım Alanları:** Düşük frekanslı titreşimlerin algılanmasında, mikro ölçüm sistemlerinde ve tıbbi cihazlarda kullanılır. Ayrıca, rüzgar enerjisi toplama sistemlerinde de bu tür sensörler kullanılabilir.

2.2.6. Tek uçlu kiriş (cantilever) Piezoelektrik Sensörler

Tek uçlu kiriş piezoelektrik sensörler, bir ucundan sabitlenmiş ve diğer ucu serbest bırakılmış piezoelektrik malzemeden oluşan sensörlerdir. Bu sensörler, genellikle çevresel titreşimler veya dışsal mekanik kuvvetler tarafından tetiklenen hareketlere duyarlıdır [41,42,43].

- **Yapı:** Tek uçlu kiriş sensör, sabit uç ve serbest uç arasında bir çubuk veya diyafram şeklinde tasarlanır. Piezoelektrik malzeme, bu yapının üzerine yerleştirilir ve titreşimler, çubuğun hareketine neden olur.
- **Çalışma Prensibi:** Sabit uca uygulanan bir kuvvet veya çevresel titreşimler, cantilever yapısının serbest ucunda bir yatay hareket veya eğilme yaratır. Bu hareket, piezoelektrik malzeme üzerinde elektriksel yük birikmesine yol açar.
- **Kullanım Alanları:** Enerji toplama sistemlerinde, düşük frekanslı titreşimlerin algılandığı sistemlerde ve mikro ölçüm cihazlarında kullanılır. Ayrıca, otomotiv ve uçak endüstrisinde de yaygın olarak tercih edilir.

2.2.7. Küresel (spherical) Piezoelektrik Sensörler

Küresel piezoelektrik sensörler, genellikle 3D enerji toplama sistemlerinde kullanılır. Bu sensörler, piezoelektrik malzemenin küresel bir formda yerleştirildiği sistemlerdir. Bu yapı, titreşimleri çok yönlü olarak toplayabilir [44,45,46].

- **Yapı:** Piezoelektrik malzeme, küresel bir şekil altında tasarlanır. Küresel yapı, titreşimlerin her yönden eşit bir şekilde algılanmasını sağlar.
- **Çalışma Prensibi:** Küresel sensör, çevresel titreşimleri tüm yüzeyi üzerinden toplar. Piezoelektrik malzeme, her yönden gelen mekanik enerjiyi elektriksel enerjiye dönüştürür.
- **Kullanım Alanları:** Çok yönlü titreşimlerin bulunduğu ortamlarda, özellikle büyük yapılar ve endüstriyel makinelerde kullanılır.

Kaynakça

- Uchino, K. (2017). The development of piezoelectric materials and the new perspective. In K. Uchino (Ed.), *Advanced Piezoelectric Materials (Second Edition)* (pp. 1-92). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102135-4.00001-1>
- Gupta, M. N., Suman, & Yadav, S. K. (2014). Electricity generation due to vibration of moving vehicles using piezoelectric effect. *Advances in Electronic and Electric Engineering*, 4(3), 313-318.
- Dineva, P. S., Gross, D., Müller, R., et al. (2014). Dynamic fracture of piezoelectric materials. In *Solid Mechanics and Its Applications* (Vol. 212, pp. 1-21). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03961-9_2
- Safari, A., & Akdoğan, E. K. (2023). *Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-23235-1>
- Hasegawa, K., & Sato, S. (2013). Perfectly matched layers for elastic waves in piezoelectric solids. *Japanese Journal of Applied Physics*, 52(7), 07HE01. <http://ci.nii.ac.jp/naid/40019756508>
- Lee, G.-J. (2022). Piezoelectric voltage constant and sensitivity enhancements through phase boundary structure control of lead-free (K,Na)NbO₃-based ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 42(12), 4898-4906. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.05.025>
- Bharti, V., Xu, T. B., Cheng, Z., Mai, T., Zhang, Q., Ramotowski, T., & Wright, K. A. (2001). High electromechanical coupling factor and electrostrictive strain over broad frequency range in electrostrictive poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) copolymer films. *Japanese Journal of Applied Physics*, 40(2), 672-675. <https://doi.org/10.1143/JJAP.40.672>
- Yan, Y., Geng, L. D., Liu, H., Leng, H., Li, X., Wang, Y. U., & Priya, S. (2022). Near-ideal electromechanical coupling in textured piezoelectric ceramics. *Nature Communications*, 13(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31165-y>
- Xu, T. B., Cheng, Z., Mai, T., Lu, Y., & Zhang, Q. M. (2000). Electromechanical coupling factor of electrostrictive P(VDF-TrFE) copolymer. In *International Ultrasonics Symposium* (Vol. 2, pp. 997-1000). <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2000.921492>
- Lu, R., Li, M.-H., Yang, Y., Manzanque, T., & Gong, S. (2019). Accurate extraction of large electromechanical coupling in piezoelectric MEMS resonators. *IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems*, 28(2), 209-218. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2019.2892708>
- Smyth, K., Sodini, C. G., & Kim, S.-G. (2017). High electromechanical coupling piezoelectric micro-machined ultrasonic transducer (PMUT) ele-

- ments for medical imaging. In *International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems* (pp. 966–969). <https://doi.org/10.1109/TRANSDUCERS.2017.7994211>
- Uchino, K. (2018). Piezoelectric energy harvesting systems with metal oxides. In Y. Wu (Ed.), *Metal Oxides in Energy Technologies* (pp. 91-126). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811167-3.00005-5>
- Wang, G., Yang, Y., Zhou, Z., Ren, X., Ji, Y. (2025). High mechanical quality factor and high piezoelectric coefficient achieved via acceptor-modified invisible boundary. *Journal of the European Ceramic Society*, 45(5), 117100. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.117100>
- Tang, D., Rao, S., Ding, C., & Qin, C. (2025). Ultrasonic dry-coupling detection with gradient acoustic impedance match layer. *Applied Acoustics*, 228, 110355. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2024.110355>
- Akkaya, S. O. (2020). A piezoelectric energy harvesting from the vibration of the airflow around a moving vehicle. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 30, e12655. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12655>
- Sienkiewicz, M. L. K. (2016). Concept, implementation and analysis of the piezoelectric resonant sensor/actuator for measuring the aging process of human skin (PhD thesis). Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse).
- Tian, W., Ling, Z., Yu, W., & Shi, J. (2018). A review of MEMS scale piezoelectric energy harvester. *Applied Sciences*, 8(645). <https://doi.org/10.3390/app8040645>
- Yang, Y., & Tang, L. (2009). Equivalent circuit modeling of piezoelectric energy harvesters. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20(18), 2223-2235. <https://doi.org/10.1177/1045389X09351757>
- Lefevre, E., Badel, A., Richard, C., et al. (2006). A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems. *Sensors and Actuators A: Physical*, 126(2), 405–416. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.08.001>
- Sherrit, S., Leary, S. P., & Dolgin, B. P. (1999). Comparison of the Mason and KLM equivalent circuits for piezoelectric resonators in the thickness mode. *1999 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings*, 921-926. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.1999.1181784>
- Thacker, E. J. (2022). Simulation studies on bimorph and unimorph PZT piezoelectric transducer for energy harvesting application. In *Lecture Notes in Electrical Engineering* (pp. 299–308). https://doi.org/10.1007/978-981-19-2095-0_26
- Zarog, M. (2024). Design and analysis of unimorph double-clamped energy harvester. *Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on*

- Materials and Energy Engineering*, 341–344. <https://doi.org/10.1109/icom61675.2024.10652567>
- Jeong, S.-S., & Park, T.-G. (2014). Generating the characteristics of a modified unimorph-type piezoelectric harvester. *Journal of the Korean Physical Society*, 65(2), 205–210. <https://doi.org/10.3938/JKPS.65.205>
- Akkaya Oy, S. (2021). A design of mass-spring type piezoelectric energy harvesting. *Scientia Iranica D*, 28(6), 3504–3511.
- Aloui, R., Larbi, W., & Chouchane, M. (2017). Finite element modeling and analysis of a bimorph piezoelectric energy harvester. In *Springer Advances in Mechanics and Materials* (pp. 1205–1214). https://doi.org/10.1007/978-3-319-66697-6_118
- Dong, X., Yi, Z., Kong, L., Tian, Y., Liu, J., & Yang, B. (2019). Design, fabrication, and characterization of bimorph micromachined harvester with asymmetrical PZT films. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 28(4), 700–706. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2019.2920213>
- Li, J., Jang, S., & Tang, J. (2012). Design of a bimorph piezoelectric energy harvester for railway monitoring. *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 32(6), 661–668. <https://doi.org/10.7779/JKSNT.2012.32.6.661>
- Mallouli, M., & Chouchane, M. (2017). Analytical modeling and analysis of a bimorph piezoelectric energy harvester. In *Springer Advances in Mechanics and Materials* (pp. 1179–1189). https://doi.org/10.1007/978-3-319-66697-6_116
- Varadha, E., Kumar, S. R., & Jain, X. S. A. (2021). Wind-driven leaf-like thin-film piezoelectric harvester for low wind applications. *Journal of Vibration Engineering & Technology*, 9, 1005–1022. <https://doi.org/10.1007/s42417-020->
- Tao, K., Yi, H., Tang, L., Wu, J., Wang, P., Wang, N., Hu, L., Fu, Y., Miao, J., & Chang, H. (2019). Piezoelectric ZnO thin films for 2DOF MEMS vibrational energy harvesting. *Surface and Coatings Technology*, 359, 289–295. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.11.102>
- Wang, B., Lan, D., Zeng, F., & Li, W. (2022). Vibration energy conversion power supply based on the piezoelectric thin film planar array. *Sensors*, 22(21), 8506. <https://doi.org/10.3390/s22218506>
- Liu, Y., Cai, Y., Zang, Y., Tovstopyat, A., & Liu, S. (2020). Properties of aluminum nitride thin films for piezoelectric transducers and microwave filter applications. *Applied Physics Letters*, 99(12), 123456.
- Dipon, W., Gamboa, B., Guo, R., & Bhalla, A. (2022). Energy harvesting using a stacked PZT transducer for self-sustainable remote multi-sensing and data logging system. *Journal of Composites Science*, 6(2), 49. <https://doi.org/10.3390/jcs6020049>

- Min, Z., Hou, C., Sui, G., Shan, X., & Xie, T. (2023). Simulation and experimental study of a piezoelectric stack energy harvester for railway track vibrations. *Micromachines*, 14(4), 892. <https://doi.org/10.3390/mi14040892>
- Akhlaq, M., Wasim, M. F., Ashraf, M. W., & Tayyaba, S. (2023). Parametric estimation of stacked piezoelectric energy harvester. In V. E. Balas, L. C. Jain, M. M. Balas, & D. Baleanu (Eds.), *Soft Computing Applications* (Vol. 1438, pp. 541–550). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-23636-5_43
- Shan, G., & Zhu, M. (2022). A piezo stack energy harvester with frequency up-conversion for rail track vibration. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 168, 109268. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109268>
- Fu, X., Cao, Y., Song, X., Sun, R., Jiang, H., Du, P., Peng, D., & Luo, L. (2024). Flexible piezoelectric energy harvesters with mechanoluminescence for mechanical energy harvesting and stress visualization sensing. *Advanced Functional Materials*, 35(2), 2412507. <https://doi.org/10.1002/adfm.202412507>
- Choudhry, I., Khalid, H. R., & Lee, H.-K. (2020). Flexible piezoelectric transducers for energy harvesting and sensing from human kinematics. *ACS Applied Electronic Materials*, 2(10), 3346–3357. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.0c00636>
- Kim, Y., & Cha, Y. (2022). Energy harvesting from flexion motion using a flexible piezoelectric ring. *Sensors and Actuators A: Physical*, 343, 113664. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113664>
- Zhou, Y., Li, M., Zhang, Y., Wang, Y., & Wang, Z. L. (2023). 3D printed auxetic structure-assisted piezoelectric energy harvesting and sensing. *Advanced Energy Materials*, 13(27), 2301159. <https://doi.org/10.1002/aenm.202301159>
- Kurt, P., & Orhan, S. (2024). Improving energy harvesting from cantilever-like structures based on beam geometry. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 12, 7781–7797. <https://doi.org/10.1007/s42417-024-01326-y>
- Ren, Q., Liu, Y., & Wang, D. (2025). Research on low-frequency multi-directional piezoelectric energy harvester with combined cantilever beam. *Chinese Journal of Electronics*, 34(5), 805–813.
- Dewanjee, J., & Islam, M. S. (2023). Piezoelectric based V-shape cantilever beam design of energy harvester for biomedical applications. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 15(1), 73–81. <https://doi.org/10.1556/1848.2023.00652>
- Gantasala, S., Thomas, T., & Rajagopal, P. (2023). Enhanced piezoelectric energy harvesting based on sandwiched phononic crystal with embedded sphe-

res. *Physica Scripta*, 98(3), 035029. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/acb9c5>

- Shi, G., Zeng, W., Xia, Y., Xu, J., Jia, S., Li, Q., Wang, X., Xia, H., & Ye, Y. (2023). A floating piezoelectric electromagnetic hybrid wave vibration energy harvester actuated by a rotating wobble ball. *Energy*, 270, 126808. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126808>
- Li, R., Zhang, H., Li, W., & Liu, G. (2021). Piezoelectric impact energy harvester based on the composite spherical particle chain for self-powered sensors. *Sensors*, 21(9), 3151. <https://doi.org/10.3390/s21093151>

Elektrikli Araçlarda Tahrik İnverteri için Yarı-İletken Seçim Optimizasyonu

Gülsüm Yıldırım¹

Özet

Elektrikli araçlar, temiz enerji kullanımı ve çevre dostu yönü dikkate alındığında günümüz dünyası için içten yanmalı motorlara göre çok daha iyi bir ulaşım seçeneğidir. Teknolojik gelişmeler ışığında elektrikli araçların maliyetleri düşerken menzili artmakta ve bunlarla beraber çevreye verdiği zararlar azalmaktadır. Elektrikli araçların yaygınlaşması için hükümetlerin verdikleri destekler artarken, şarj istasyon sayısı gün be gün çoğalmaktadır. Özellikle iklim değişikliği üzerine yapılan çalışmalar neticesinde karbon salınımında ciddi azalma sağlayacak bu araçlara destek büyüktür. Elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlara göre daha verimli enerji kullanımı sağlamaktadır. Ancak, batarya enerji yoğunluğunun düşük olması ve kapasitesinin sınırlılığı nedeniyle düşük menzil problemleri kullanıcı için hala büyük bir sorundur. Bu noktada elektrikli araçlarda enerji verimliliği çok daha önemli hale gelmektedir. Enerji verimliliğini etkileyen sistem faktörlerinden biri de motorla batarya arasında elektrik iletimini sağlayan tahrik inverterinde kullanılacak yarı-iletkenin göstereceği anahtarlama performansdır. Yarı-iletken kontrol anahtarları teknolojik gelişmeler ışığında sürekli gelişme ve iyileşme halindedir. Güç Elektronik sistemlerinde son zamanlarda en yaygın kullanılmakta olan yarı-iletkenler arasında Si-MOSFET, Si-IGBT ve SiC-MOSFET’ler sayılabilir. Özellikle SiC-MOSFET’ler düşük anahtarlama kayıpları, yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmaları ve hızlı anahtarlama özellikleriyle ön plana çıkmaktadırlar. Bu çalışmada, elektrikli araç tahrik inverterlerinde kullanılacak en uygun yarı-iletken anahtarın belirlenmesi amacıyla MOORA (Oran Analizine Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon) yöntemi kullanılmıştır. Alternatifler olarak IGBT, SiC-MOSFET-2G, SiC-MOSFET-3G ve SiC-MOSFET-4G; kriterler olarak ise tahrik enerjisi, motor kayıpları ve inverter kayıpları değerlendirilmiştir. Bu çalışma, inverter performansını artırarak araç menzilinın gelişmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

1 Öğr. Gör. Dr., Düzce Üniversitesi, gulsuymyildirim@duzce.edu.tr, Orcid: 0000-0001-6075-7310

1. Giriş

Fosil yakıtların kaynaklarının sınırlılığı ve neden olduğu çevre kirliliği sebebiyle, elektrikli araçlar ulaşım için önemli bir seçenek haline gelmiştir. Çağın teknolojik gelişmelerinin getirileri sayesinde elektrikli araçların menzili artarken maliyetleri azalmakta ve çevresel etkileri daha iyi hale gelmektedir. Böylece elektrikli araçların uluslararası pazardaki yeri git gide büyümektedir [1]. Dönemsel hükümet politikaları, üretim ve edinim destekleri, şarj destek ünitelerinin gelişimi ve ulaşılabilir hale gelmesi gibi etmenler elektrikli araçların yaygınlaşması üzerinde etkilidir. Bilhassa Avrupa Birliği ülkeler olmak üzere dünya genelinde kara taşımacılığında kaynaklı hava kirliliği nedenlerinin azaltılması amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda elektrikli araçlar iyi bir çözüm öneri haline gelmiştir. Yenilenemez enerji kaynaklarının tükenmekte olması ve çevreye verdiği olumsuz etkileri elektrikli araçlara yapılacak yatırımlar için olumlu bir motivasyondur [2]. Elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlara göre enerjiyi daha verimli kullanabilir. Ancak bataryanın enerji yoğunluğu, içten yanmalı motor yakıtlarına oranla daha düşük olduğu için elektrikli araçların menzili daha düşüktür [3]. Bu nedenle elektrikli araç menzilini artırmak için bataryadaki enerjiyi motora aktaracak sistemin verimliliğini artırmak gerekir. Yani elektrikli araçlar için geliştirilmiş inverter ve kontrol sistemlerinin daha verimli hale gelmesi, enerji dönüşümünü doğrudan etkiler [4].

Elektrikli araçların güç aktarım sistemi bir motor, bir çekiş inverteri, bir DC-DC dönüştürücü ve pil şarj cihazından oluşmaktadır [5]. Elektrikli araçlarda kullanılan güç dönüştürme devrelerinde en yaygın kullanılan yarı-iletkenler Si-MOSFET'ler, Si-IGBT'ler ve SiC-MOSFET'lerdir [6]. Yüksek gerilime dayanıklılığı, düşük anahtarlama kaybı ve gündün güne performansını iyileştirmesi sayesinde elektrikli araçların tahrik inverterlerinde sıklıkla Si-IGBT'ler tercih edilmektedir [7]. Ancak son yıllarda SiC-MOSFET'ler performans açısından Si-IGBT'ler ile yarışır hale geldikçe elektrikli araçların tahrik inverterlerinde de yaygın hale gelmeye başlamıştır. SiC-MOSFET'ler düşük anahtarlama ve iletim kayıpları, yüksek hızlı çalışma performansı ve yüksek çalışma sıcaklıkları gibi özellikleriyle öne çıkmaktadır. Bu özellikleri, sistem tasarımlarında boyut ve ağırlık açısından avantaj sağladığı gibi enerji tasarrufu da sağlar [8]. Elektrikli araçların tahrik inverterlerinde kullanılacak yarı-iletken anahtarın özellikleri tahrik inverterin performansını etkilemekte doğrudan ilgilidir. Bu nedenle elektrikli araçlar tahrik inverteri için en uygun anahtar seçimi elektrikli araç performansını artıracaktır [9].

Bu çalışmada elektrikli araçların tahrik inverterleri için çok kriterli karar verme yöntemlerinden MOORA (Oran Analizine Dayalı Çok Amaçlı

Optimizasyon) yöntemi ile yarı-iletken anahtar seçimi yapılmıştır. MOORA yöntemi birden fazla kriteri dikkate alarak en uygun seçeneği belirlemek amacı ile kullanılır. Yarı-iletken anahtar seçenekleri “IGBT”, “SiC-MOSFET-2G”, “SiC-MOSFET-3G” ve “SiC-MOSFET-4G”, seçim kriterleri olarak “Enerji Tüketimi”, Motor Kayıpları” ve “İnverter Kayıpları” olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışma elektrikli araçların inverter performansına sağlayacağı katkı dolayısı ile elektrikli araç menzilinın artmasına imkân sağlayacaktır.

2. MOORA Metodu

Brauers ve Zavadskas tarafından geliştirilmiş MOORA yöntemi “Çok Ölçütlü Karar Verme” yöntemlerinden biridir [10]. Yöntem nesnel değerlendirmeye dayalıdır. Karar seçenekleri için tüm ölçütler dikkate alınır ve bir bütün olarak değerlendirme yapılır. Bu sayede seçenekler arasındaki optimum seçenek ve seçeneklerin uygunluk sırası belirlenmiş olur. Yöntemde kullanılacak ölçütler tamamen sayısal değerlerden oluşur.

MOORA uygulaması için başlangıçta Denklem (1)’de verilen karar matrisi oluşturulur.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2n} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \dots & x_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Denklem (1)’deki x_{ij} , değerinde satırlar karar seçeneklerini sütunlar ölçütleri göstermektedir. Oluşturulan karar matrisine elemanları Denklem (2) normalize edilerek normalize edilmiş karar matrisi oluşturulur.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n x_{kj}^2}} \quad (2)$$

Normalize edilmiş karar matrisinde ölçütlerin minimize ya da maksimize edilmek istenmesine göre tasniflenir. Denklem 3’te gösterildiği gibi maksimize edilecek ölçüt değerleri toplanıp minimize edilecek ölçüt değerleri çıkarılarak her bir karar seçeneği için tüm ölçütlerin dikkate alınmış olduğu birer uygunluk değeri bulunur.

$$y_i^* = \sum_{j=1}^k x_{ij}^* - \sum_{j=k+1}^n x_{ij}^*, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

Böylece y_i^* , $i=1,2,\dots,n$ uygunluk değeri büyükten küçüğe sıralamaya sokulur. En büyük y_i^* değeri karar seçenekleri arasındaki optimum seçenektir.

3. Uygulama

Elektrikli araçlarda tahrik inverteri performansı araç performansı ile doğrudan ilişkilidir. Tahrik inverter performansını artırmak için kullanılacak anahtarın doğru seçilmesi önemlidir. Çalışmada 4 farklı araç modeli tahrik inverterinde kullanılmak üzere değerlendirilmiş 4 farklı yarı-iletken için yapılmış deneysel sonuçlar kullanılmıştır. Deneysel sonuç değerleri Tablo 1'de verilmiştir [11].

Tablo 1. Deneysel sonuçlarla belirlenmiş Enerji Kayıpları (kWh/100km) [11]

Araç modeli	IPMSM Nissan			IM Nissan		
Ölçütler / Seçenekler	Tahrik Enerjisi	Motor Kayıpları	İnverter Kayıpları	Tahrik Enerjisi	Motor Kayıpları	İnverter Kayıpları
IGBT	11,72	2,15	1,25	11,25	4,22	2,42
SiC-2G	11,51	2,24	0,6	11,63	3,38	0,93
SiC-3G	11,84	2,13	0,96	11,25	4,01	1,52
SiC-4G	11,62	2,11	0,5	11,34	4,13	0,91

Araç modeli	IPMSM BMW			IM BMW		
Ölçütler / Seçenekler	Tahrik Enerjisi	Motor Kayıpları	İnverter Kayıpları	Tahrik Enerjisi	Motor Kayıpları	İnverter Kayıpları
IGBT	14,52	2,21	1,49	14,19	4,23	2,6
SiC-2G	14,46	2,37	0,67	14,31	3,62	1,01
SiC-3G	14,74	2,27	1,04	13,99	4,18	1,62
SiC-4G	14,42	2,41	0,56	14,21	4,19	0,98

Öncelikle MOORA metodu için Tablo 1'de verilmiş olan değerler kullanılarak Tablo 2'de verilen karar matrisi oluşturulur. Tablo 2'de Ö1, Ö2,... sırasıyla her bir araç için ölçümlenmiş kriterlerin, K1, K2, K3 ve K4 değerleri sırasıyla karar seçeneklerinin yerine kullanılmıştır.

Tablo 2. Karar Matrisi

	Ö1	Ö2	Ö3	Ö4	Ö5	Ö6	Ö7	Ö8	Ö9	Ö10	Ö11	Ö12
K1	11,72	2,15	1,25	11,25	4,22	2,42	14,52	2,21	1,49	14,19	4,23	2,6
K2	11,51	2,24	0,6	11,63	3,38	0,93	14,46	2,37	0,67	14,31	3,62	1,01
K3	11,84	2,13	0,96	11,25	4,01	1,52	14,74	2,27	1,04	13,99	4,18	1,62
K4	11,62	2,11	0,5	11,34	4,13	0,91	14,42	2,41	0,56	14,21	4,19	0,98

Tablo 2’de oluşturulmuş karar matrisi değerlerine Denklem (2) uygulanarak Tablo 3’te verilen Normalize karar matrisi oluşturulur.

Tablo 3. Normalize Karar Matrisi

	Ö1	Ö2	Ö3	Ö4	Ö5	Ö6	Ö7	Ö8	Ö9	Ö10	Ö11	Ö12
K1	0,50	0,50	0,71	0,49	0,53	0,77	0,50	0,48	0,74	0,50	0,52	0,77
K2	0,49	0,52	0,34	0,51	0,43	0,30	0,50	0,51	0,33	0,50	0,45	0,30
K3	0,51	0,49	0,55	0,49	0,51	0,48	0,51	0,49	0,52	0,49	0,51	0,48
K4	0,50	0,49	0,28	0,50	0,52	0,29	0,50	0,52	0,28	0,50	0,52	0,29

Son olarak Denklem (3) uygulanarak her seçeneğin tüm kriterlere göre normalize değerleri hesaplanır. Çalışmada değerlendirilen ölçütlerin hepsi farklı ölçeklerde enerji tüketim değerlerinden tuğu için, tüm ölçütler minimize edilmek istenmektedir. Bu nedenle Denklem 4’te tüm ölçüt değerleri çıkartma işlemine tabi tutularak y_i^* değeri bulunur.

$$y_i^* = -x_{i_{Tahrik_enerjisi}} - x_{i_{motor_kayıpları}} - x_{i_{inverter_kayıpları}} \quad (4)$$

Son olarak bulunan değerler Tablo 4’te verilen uygunluk sırasına konur. Yöntem sonucunda bulunan uygunluk sırasına göre en iyi performansı toplamda en düşük enerji tüketim değerine sahip olan SiC-2G anahtarı göstermiştir. SiC-4G anahtarı 2. Sıradaki en uygun anahtar olma performansı gösterirken en düşük performansı IGBT anahtarı vermiştir.

Tablo 4. Karar Seçeneklerinin Uygunluk Sırası

Karar Seçenekleri	y_i^*	Uygunluk Sırası
IGBT	-7,0185	4
SiC-2G	-5,1799	1
SiC-3G	-6,0343	3
SiC-4G	-5,1839	2

4. Sonuç

Bu çalışmada, elektrikli araçlarda tahrik inverterlerinde kullanılacak en uygun yarı-iletken anahtarın belirlenmesi amacıyla MOORA (Oran Analizine Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon) yöntemi kullanılmıştır. Elektrikli araçların menzil performansı, enerji verimliliği yüksek güç elektroniği bileşenlerinin seçimi ile doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda inverter sisteminde kullanılan yarı-iletken anahtarların enerji tüketimi, motor kayıpları ve inverter kayıpları açısından performansları değerlendirilmiştir.

Çalışmada IGBT, SiC-MOSFET-2G, SiC-MOSFET-3G ve SiC-MOSFET-4G olmak üzere dört farklı yarı-iletken seçeneği analiz edilmiştir. Uygulanan MOORA yöntemi sonucunda, tüm araç modellerinde elde edilen ölçümler doğrultusunda en düşük toplam enerji tüketim değerini SiC-MOSFET-2G vermiştir ve en uygun seçenek olarak belirlenmiştir. SiC-MOSFET-4G ikinci sırada yer alırken, geleneksel bir teknoloji olan IGBT en düşük performansı göstermiştir.

Bu sonuçlar, SiC tabanlı yarı-iletkenlerin tahrik inverter uygulamalarında sağladığı düşük kayıplar ve yüksek verimlilik ile elektrikli araçların menzilin artırılmasında önemli katkılar sunduğunu göstermektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalar ile farklı sürüş koşulları ve sıcaklık aralıklarında bu elemanların performans analizleri gerçekleştirilerek seçim sürecine daha fazla kriter dahil edilebilir. Böylece elektrikli araçlarda hem enerji tasarrufu sağlanabilir hem de daha sürdürülebilir bir ulaşım altyapısı oluşturulabilir.

Kaynakça

- [1] Ari, Y. O. (2020). *Küresel Elektrikli Otomobil Piyasasına Genel Bak. Krk-lareli niversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 4 (2), 193-203.
- [2] Kocabey, S. (2018). Elektrikli otomobillerin dn, bugünü ve gelece-
i. *Akll Ulam Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 1(1), 16-23.
- [3] Vijayagopal, R., Gallagher, K., Lee, D., & Rousseau, A. (2016). *Com-
paring the powertrain energy densities of electric and gasoline vehicles (SAE
Technical Paper 2016-01-0903)*.
- [4] Chandran, D., & Joshi, M. (2016). Electric vehicles and driving range
extension-a literature review. *Advances in Automobile Engineering*, 2(5),
1-10.
- [5] Kavi, A. (2022). A Review on Electric Vehicle Powertrain System Com-
ponents and the Challenges Involved in their Large-Scale Introduction.
- [6] Odion, N., & Jimu, H. Comparative Analysis of Silicon Carbide (SiC)
MOSFETs and Silicon IGBTs in Electric Vehicles.
- [7] Cai, W., Wu, X., Zhou, M., Liang, Y., & Wang, Y. (2021). *Review and
development of electric motor systems and electric powertrains for new energy
vehicles. Automot Innov* 4 (1): 3–22.
- [8] Alam, M., Kumar, K., & Dutta, V. (2019). Comparative efficiency analy-
sis for silicon, silicon carbide MOSFETs and IGBT device for DC–DC
boost converter. *SN Applied Sciences*, 1, 1-11.
- [9] Sambhavi, Y. V., & Ramachandran, V. (2023). A technical review of mo-
dern traction inverter systems used in electric vehicle application. *Energy
Reports*, 10, 3882-3907.
- [10] Brauers, W. K., & Zavadskas, E. K. (2006). The MOORA method and
its application to privatization in a transition economy. *Control and cyber-
netics*, 35(2), 445-469.
- [11] Umegami, H., Harada, T., & Nakahara, K. (2023). Performance Com-
parison of Si IGBT and SiC MOSFET Power Module Driving IPMSM
or IM under WLTC. *World Electric Vehicle Journal*, 14(4), 112.

Comparative Analysis of Conventional and Consequent-Pole External Rotor Brushless DC Motors for Electric Bicycle Applications

İbrahim Aydın¹

Onur Özdal Mengi²

Serdal Arslan³

Abstract

The use of brushless direct current motors in electric/hybrid vehicles is increasing due to several advantages, such as the absence of rotor copper losses, high efficiency, smaller volume compared to motors of the same power, silent operation, and low maintenance requirements. In this study, the parameters of a surface-mounted permanent magnet brushless DC motor with an external rotor, designed for use in electric bicycles, were taken as a reference. Based on these parameters, an improved motor design with low cost and high output torque was aimed for. Different slot-to-pole ratio ranges were considered for each of the four different slot/pole models. To obtain performance data for the motors, ANSYS Maxwell is used for analyzing both the conventional model and the consequent pole model, respectively. Parameters such as cogging torque, power, and efficiency were calculated using ANSYS/Maxwell 3D software to obtain results that closely resemble application performance. The analysis shows improvements in torque, output power, total mass, and cost parameters for the consequent pole brushless DC motor compared to the conventional external rotor brushless DC motor with the same power and speed. In both models, the increase in operating temperature caused a decrease in engine performance data. However, while

- 1 High Engineer, Giresun Governorship Information Processing Branch Directorate, ibrahimaydin2806@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1027-5230
- 2 Prof. Dr, Giresun University, Faculty of Engineering, Electrical and Electronics Engineering, onur.ozdal.mengi@giresun.edu.tr, ORCID: 0000-0001-5669-0766
- 3 Doç. Dr., Harran University, Organized Industrial Vocational Higher School, serdalarslan@harran.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1187-5633

there was no significant difference in terms of total motor mass between the models, the average efficiency of the conventional outer rotor BLDC motor was approximately 8,8% higher. Conversely, the consequent pole brushless DC motor was approximately 45% more affordable in terms of total cost. Thus, the 36-slot, 38-pole consequent pole outer rotor BLDC motor was determined to be more suitable than the different slot-pole combinations considered in this study. This design is expected to make a significant contribution to research on the cost-effective production of lightweight electric vehicles.

1. INTRODUCTION

Considering bicycles as a part of our daily life, it has a vital role in both health benefits and as a means of transportation. If the electric motor operates while the bicycle is moving with the mechanical energy created by the user in the pedal, there is no need for user-generated mechanical energy, and the bicycle has a hybrid structure where mechanical and electrical energy are combined. With a hybrid model, the main structure of the bicycle is preserved, and additional equipment such as a battery, electric motor, and other components are added to transform it into an electric bicycle. This allows the bicycle to travel longer distances thanks to the motor powered by the battery.

Brushless direct current motors (BLDC) are commonly used in electric bicycle applications where these motors stand out in terms of driver hardware, controllability, maintenance, speed-torque characteristics, and efficiency. From this perspective, external rotor BLDC motor studies have been focused on electric bicycles.

Motor powers can range from 250 W to 750 W, and the speed limit can range from 20 km/h to 32.2 km/h [1]. According to the EN 15194 European standard, the electrical part of these pedal-assist electric bicycles is designed [2]. In our country, studies on electric bicycle motors should take into account the 250 W power and 25 km/h speed limit according to the Traffic Law No. 2918 [3].

Different concentrated winding structures are used in the stator structure of BLDC motors. In Ref. [4], on the effect of the slot/pole ratio of BLDC motors has been studied, and it has been shown that motors with slot/pole configurations of 36/34 and 36/38 exhibit the desired cogging torque, lightweight design, and high efficiency characteristics. The motor performances were very close to each other. It was also shown that the double-layer concentrated winding is more efficient than the single-layer concentrated winding, and the 36/34 slot motor achieves the same

performance with fewer magnets than the open-slot motor. Although using open slots reduces the cost of stator winding production and allows it to be done more quickly, it has been shown that manufacturing costs and production speed increase due to difficulties in coil assembly in semi-closed slot structures. However, losses are less compared to open slot structures [5].

In a study comparing concentrated pole (CP) permanent magnet (CPPM) motors with different slot/pole numbers to traditional PM motors [6], it was shown that although both motors have the same output torque, the CPPM structure is 18.5% more efficient, and double-row harmonics causing large torque fluctuations can be eliminated with a new model in the 6/4 slot/pole CPPM motor.

In a simulation study on four different slot/pole combinations of outer rotor BLDC motor using ANSYS-Maxwell 3D software [7], it was shown that torque fluctuation was higher in the 36/16 slot/pole structure than the 24/16 slot/pole structure, and stator current density was higher than expected in the 48/22 and 72/32 slot/pole motors, indicating losses due to the high current density.

Finite element method (FEM) analyses were performed on evaluate the motor performance of various slot/pole models of outer rotor BLDC motors while ensuring that parameters such as power, voltage, rated speed, wheel diameter, permanent magnet, slot fill factor, etc., remained consistent. The effects of each motor model on copper and iron losses, as well as efficiency, were compared. As a result of this comparison, it has been shown that the efficiency of the model with a 24/20 slot/pole ratio is higher and the total loss is lower than the others [8].

As the volume of permanent magnets used in CPPM motors increases and the angular width of the used permanent magnets increases compared to traditional structures, the thickness of the permanent magnets required to achieve efficiency and nominal torque decreases. For this reason, if iron poles are used instead of permanent magnets in some of the poles of CPPM motors, the flux density distribution in the air gap can be improved, while the volume of the permanent magnet can be reduced when using the CP form compared to traditional methods [9].

In the study [10] on a new CPPM motor model with an image pole pair for each pole pair of N and S poles, it has been shown that the formation of image pole pairs in the iron core parts as well as the actual surface PM in the rotor allows the high-speed operating range to be expanded efficiently

without increasing copper loss. However, it was emphasized that more research should be done on this model due to the low amount of effective magnetic flux and lower torque in the low speed range.

In a study [11] conducted on CPPM and Surface-Mounted Permanent Magnet (SMPM) rotor models, it has been demonstrated that the CPPM rotor model uses 50% less magnets compared to the SMPM rotor model. Although the magnetization property is weaker in the CPPM rotor model, it can be overcome with appropriate design and magnet material selection. In terms of cost, it has been shown that the CPPM rotor structure can be designed to be 13% more cost-effective compared to the SMPM rotor structure. The study [12] conducted on the simple yet powerful analytical modeling technique developed to calculate the radial force on the rotor of the CPPM engine has shown that it may be possible to calculate the force in various scenarios, such as rotor dynamic eccentricity, static eccentricity, or vibrations in the rotor air gap.

In a study [13] comparing the outer rotor traditional SMPM brushless motor with the CPPM brushless motor; it has been found that the CPPM motor has a maximum tooth torque 10 times greater than that of the SMPM motor. This is despite the fact that in the CPPM motor, half of the magnets have been removed, leading to a 50% reduction in magnet cost. However, the efficiency of the CPPM motor decreased by 3% compared to the SMPM motor although, it has been shown that even though the inductances in SMPM motors do not vary significantly with rotor position, the CPPM brushless motor has a changing inductance, resulting in the emergence of a new component of magnetic torque.

Parameters such as cost, efficiency, power, torque and cogging torque are very important for SMPM and CPPM in the engines of small or large power electric vehicles. The study is divided into five sections:

In the first section; previous analyses related to electric bicycle motors from theses and articles have been reviewed. This section serves as a literature review to provide background information on the subject. The second section; focusing on the sizing quantities of outer rotor BLDC, information about reference engine label information, sizing quantities and analysis materials is given. The third section; discusses the results obtained with Ansys Maxwell. It examines selected slot/pole combinations, winding structures, winding factors, torque, and torque ripple while aiming to achieve an appropriate design. The goal here is to propose the use of consequent-pole outer rotor BLDC as an alternative for electric bicycle applications, comparing it to traditional models. For this purpose, it has

been suggested that the consequent-pole outer rotor BLDC can be used for electric bicycle applications compared to the traditional model. In the last section; conclusions regarding the findings that will support this suggestion are given.

2. BLDC MACHINE ANALYTICAL MODEL AND THEORETICAL CALCULATION

2.1 Basic Parameters of BLDC

The torque produced in an engine is calculated as in Equation 1:

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} - \frac{1}{2} \phi_g^2 \frac{dR}{d\theta} + Ni \frac{d\phi_g}{d\theta} \quad (1)$$

where, i is current passing through the coil (Ampere), L is coil inductance (H), θ is angular rotor position ($^\circ$), R is reluctance of the magnetic circuit and ϕ_g is air gap flux (Weber).

The back electromotive force per phase in a permanent magnet motor is calculated as shown in Equation 2, and the air gap flux is calculated as shown in Equation 3.

$$E_0 = \frac{P}{2} \omega_m N_{tf} \phi_g k_w k_{st} \quad (2)$$

$$\phi_g = \overline{B_g} A_k \quad (3)$$

where, E_0 is back electromotive force (V), P is number of poles, ω_m is mechanical speed of the rotor (rad/s), N_{tf} is number of turns per phase, k_w is winding factor, k_{st} is stacking factor, B_g is air gap flux density (Wb/m²), and A_k is pole cross-sectional area (mm²).

The EMF constant k_e is given in Equation 4 as follows:

$$k_e = \sqrt{3} \frac{P}{2} N_{tf} B_g k_w k_{st} \quad (4)$$

The back electromotive force is given by Equation 5 over the mechanical speed and Equation 4:

$$E_0 = \omega_m k_e \quad (5)$$

The electromagnetic output power is shown in Equation 6, and the torque is represented in Equation 7 as follows:

$$P_e = 3E_0 I_q \quad (6)$$

$$T_e = \frac{3E_0 I_q}{\omega_m} \quad (7)$$

Using Equation 4, Equation 5 and Equation 7, the torque equation in Equation 8 is derived.

$$T_e = \sqrt{3} \frac{P}{2} N_{tf} \bar{B}_g k_w k_{st} I_q \quad (8)$$

Since torque is linear with I_q , the torque becomes as shown in Equation 9:

$$T_e = k_{st} I_q \quad (9)$$

2.2 Radial Force

In a good motor design, it is expected that the net radial force is low. The primary reason for the radial force in the motor is the interaction between the stator steel and the permanent magnets in the rotor. The value of t ($t = N_s / 2p$), defined as the ratio of the number of stator slots (N_s) to the number of poles ($2p$), is an indicator of the radial force. If the t value is equal to 1 or an odd number, it indicates that the motor has a high net radial force, whereas if it is greater than 1 or an even number, it is a measure of the motor having a low net radial force. Therefore, the selected motor should have an even t value to minimize the net radial force [4].

2.3 Winding Factor

The winding factor k_{wn} , which is referred to as effective turns in phase windings, is expressed as shown in Equation 10 [14]:

$$k_{wn} = \frac{1}{N_{cph}} \sum_{k=1}^{N_{cph}} e^{-jn\theta_k} \quad (10)$$

where, N_{cph} is the number of slots per phase, n is harmonic index, and θ_k represents the relative angular displacement of coil number k [14].

The number of slots per phase is expressed as shown in Equation 11:

$$N_{ph} = \frac{N_s}{N_{ph}} = \frac{N_s}{3} \quad (11)$$

The electrical relative angle of all coils within slot number k is expressed as shown in Equation 12 [15]:

$$\theta_k(k) = (k-1) \frac{N_m}{N_s} 180^\circ E \quad (12)$$

2.4 Slot Fill Factor

The slot fill factor is a measure that indicates how much of the slots in an electric motor's stator are filled with coils. The slot fill factor is an important factor that affects the motor's design, efficiency, torque production, and heat generation. This ratio can vary depending on the motor winding structure (concentrated, distributed, etc.). Not only a higher slot fill factor can increase motor efficiency and torque production, but it also leads to the use of more materials and can complicate labor and production costs.

Selecting the slot fill factor correctly in motor design is essential. To design the motor, this ratio can be chosen between 40% and 65%. In this study, the slot fill factor has been chosen as 55%. Before calculating the slot fill factor, some data such as conductor diameter and conductor cross-sectional area need to be calculated, and the expressions related to this are shown below.

$$A_{wc} = \frac{\pi D_{wc}^2}{4} \quad (13)$$

where, D_{wc} is the conductor diameter (mm), and A_{wc} represents the conductor cross-sectional area (mm^2).

If there is not information about the conductor diameter in the software, the conductor cross-sectional area (A_{wc}) can be expressed as shown in Equation 14:

$$A_{wc} = \frac{A_s k_{wc}}{2N} \quad (14)$$

where, A_s is slot area (mm^2), k_{wc} is the slot fill factor, and N is the number of turns in a coil or winding.

The slot fill factor is expressed as shown in Equation 15 [16]:

$$k_{wc} = \frac{2NAk_{wc}}{2N} \quad (15)$$

2.5 Sizing study

In motor sizing studies, it is essential to know the desired torque or output power and speed for the motor. The sizing process typically begins with analytical calculations. Subsequently, various software tools (such as Ansys, MotorCad, Speed, etc.) are used to perform motor data calculations and analysis with the help of finite element analysis (FEA). In this study, an external rotor BLDC (Brushless DC) motor has been selected.

Figure 1-2 shows the common parameters of an internal rotor BLDC motor [17], while Figure 2 illustrates the stator and rotor parameters of an external rotor traditional BLDC motor, and Figure 3 displays the stator and rotor parameters of an external rotor segmented pole BLDC motor [18].

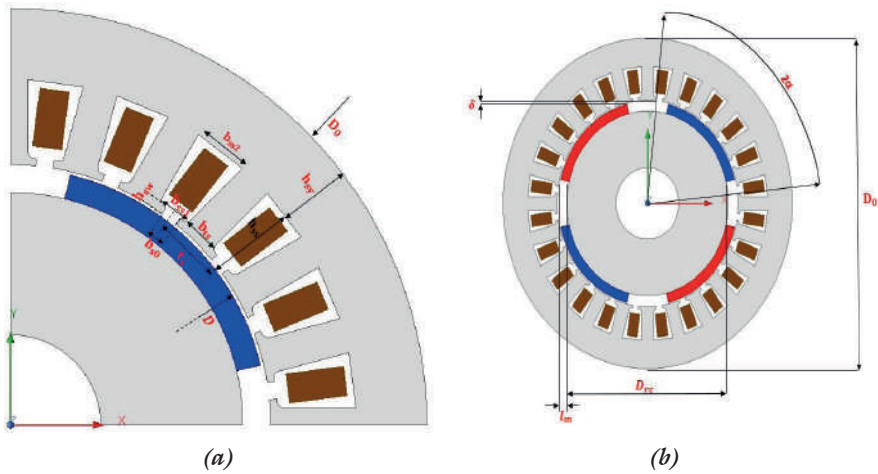


Figure 1

(a) Representation of geometric parameters of stator and rotor in a quarter section of an inner rotor BLDC motor; and (b) Full view of the BLDC motor with inner and outer diameter parameters

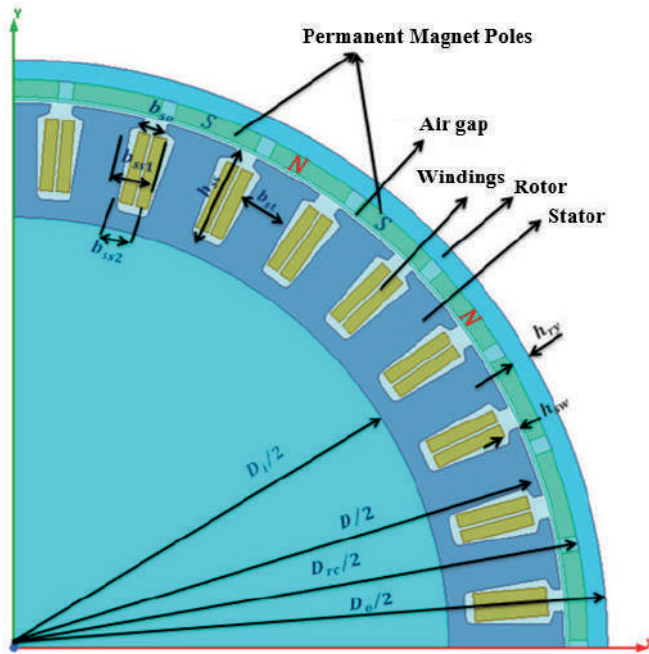


Figure 2 Representation of some geometric parameters for a 1/4 section of 36 slots and 34 poles the outer rotor traditional BLDC motor:

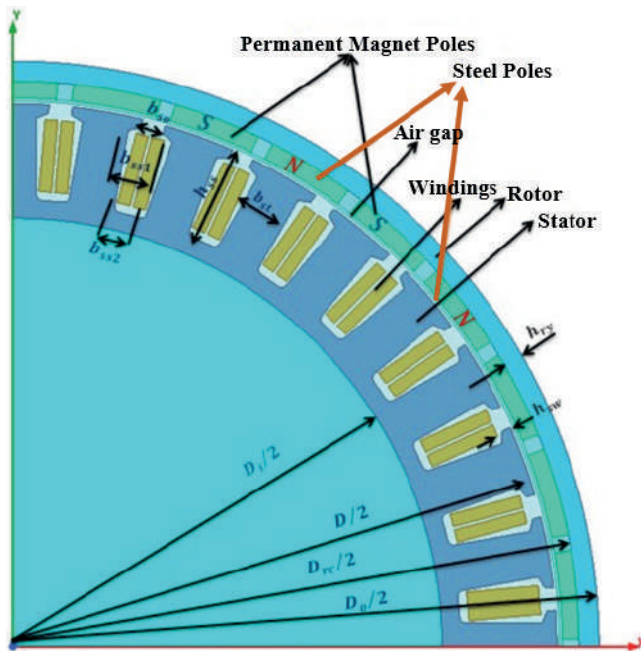


Figure 3 Representation of some geometric parameters for a 1/4 section of 36 slots and 34 poles the outer rotor consequent-pole BLDC motor:

In sizing studies, determining the stator and rotor diameter dimensions along with the motor length is of great importance. For an external rotor BLDC motor, find the stator's outer diameter using the equation in Equation 16:

$$D = D_{rc} - 2l_m - 2\delta \quad (16)$$

where, D is the stator's outer diameter, D_{rc} is the rotor's inner diameter, l_m is magnet thickness, and δ is the air gap length.

To achieve a uniform flux distribution in the stator and rotor cores as well as the air gap of a motor, it is necessary to design appropriate slots. In this context, Equation 17 provides the upper slot width value for the stator slot.

$$b_{ssl} = \pi \frac{D - 2h_{sw}}{N_s} - b_{st} \quad (17)$$

where, h_{sw} is stator tooth thickness, b_{ts} is the stator core tooth width, and N_s is number of stator slots.

Equation 18 provides the lower slot width value for the stator slot:

$$b_{ss2} = \pi \frac{D - 2h_{ss}}{N_s} - b_{st} \quad (18)$$

Equation 19 provides the effective core thickness value.

$$h_{sy} = \frac{1}{2}(D - D_i - 2h_{ss}) \quad (19)$$

where, h_{ss} is slot size, and D_i is stator's inner diameter. D_i is a parameter specific to an outer rotor BLDC motor only. Similarly, Equation 20 provides the thickness value of the core responsible for the flow of magnetic flux in the rotor.

$$h_{ry} = \frac{1}{2}(D_0 - D_{rc}) \quad (20)$$

where, h_{ry} is rotor's core thickness, representing the thickness of the core in the rotor. Equation 21 provides the total slot area on the stator.

$$A_{sl} = \frac{1}{2}(b_{ss1} + b_{ss2}) \times (h_{ss} + h_{sw}) \quad (21)$$

The ratio of the stator slot opening to the slot width is given in Equation 22:

$$k_{open} = \frac{b_{s0}}{b_{ss1}} \quad (22)$$

The parameters of the reference motor, which is a 250 W, 36-slot, 38-pole model designed for an electric bicycle, are shown in Table 1.

The slot characteristic are presented in Table 2, and the winding properties can be found in Table 3 [18].

Table 1 The fundamental and excitation circuit characteristics.

Parameters	Values	Parameters	Values
Motor Type	BLDC	Rated Voltage	48 V
Number of Slots	36	Number of phase (m)	3
Number of Poles	38	Circuit Type	Yıldız
Rotor Type	Outer Rotor	Control type	DC
Rated Speed	200 rpm	Magnet Thickness	3 mm
Motor Length	25 mm	Magnet Type	NdFeB35
Operating Temperature	75 °C	Embrace	0,84
Stator Inner Diameter	150 mm	Rotor Inner Diameter	192 mm
Stator Outer Diameter	190 mm	Rotor Outer Diameter	207 mm
Stator Steel Type	M19_26G	Stacking Factor	0,95

Table 2 Slot Design and Dimensions

Parameters	Values
Hs0	1,5 mm
Hs1	1 mm
Bs0	4 mm
Rs	1 mm

Table 3 The Stator Winding Properties

Parameters	Values
Winding Layers	2
Winding Type	Whole Coiled
Parallel Branches	1
Conductors per slot	25
Coil Pitch	1

3 NUMERICAL ANALYSIS RESULTS AND DISCUSSION

3.1 FEA with ANSYS-Maxwell 2D/3D

In the ANSYS Maxwell program, it is possible to obtain results closer to reality by conducting analyses initially performed in 2D in a three-dimensional (3D) manner [19]. However, 3D analyses depend on computer performance and can be time-consuming due to calculations based on electromagnetic equations through the 3D model structure. Therefore, 2D analysis is commonly used in various electric machine designs [19-23].

In this study, for the 3D analysis, the models were

first designed in three dimensions. Thereafter, consequent pole and conventional pole models are analyzed for the pole arc ratio with the smallest cogging torque. Parameters existing in 2D were recalculated using the finite Element Method (FEM) method. Subsequently, comparisons were made from various angles with the results of 2D analysis.

The 3D representation of the motor for the 36/38 slot/pole structure for both conventional and consequent pole structures are shown in Figure 4 (a) and (b), and the mesh representation on these models is depicted in Figure 5 (a) and (b) [24]. The mesh counts and analysis times for the models analyzed in 3D are shown in Table 4 below.

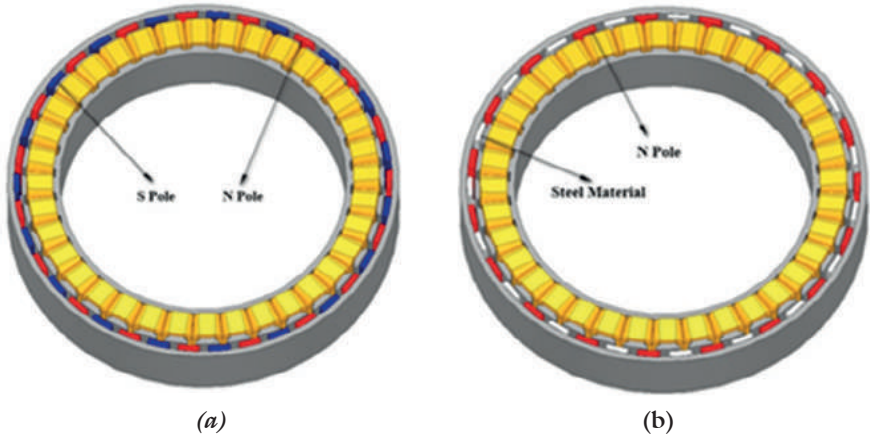


Figure 4 (a) 3D representation of the conventional model, and (b) 3D representation of the consequent-pole model

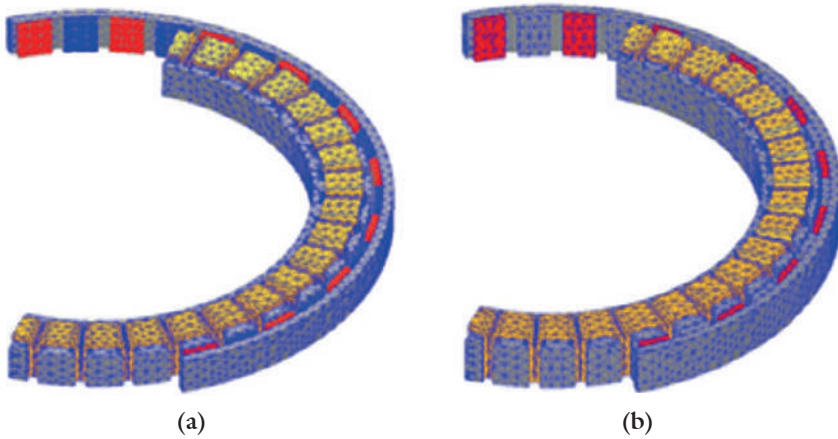


Figure 5 (a) Mesh representation of the conventional model, and (b) Mesh representation of the consequent-pole model

Table 4 The mesh counts and analysis times for the conventional and consequent-pole models.

Pole Number	Pole Embrace	Model	2D/3D Analysis	Mesh (Number)	Analysis Time (minute)
34	0,8	NS	2D	4092	4 minute 10 second
	0,8		3D	100228	420 minute
	0,8	N	2D	4092	4 minute 18 second
	0,8		3D	95907	520 minute
38	0,75	NS	2D	4206	4 minute 11 second
	0,75		3D	99801	444 minute
	0,7	N	2D	4206	4 minute 26 second
	0,7		3D	100248	540 minute
40	0,8	NS	2D	1862	2 minute
	0,8		3D	50172	180 minute
	0,775	N	2D	1862	3 minute
	0,775		3D	50407	355 minute
42	0,8	NS	2D	1300	2 minute 41 second
	0,8		3D	33352	230 minute
	0,85	N	2D	1300	2 minute 44 second
	0,85		3D	33652	147 minute

*Where, NS is given as the traditional model, while N is given as the consequent pole.

Table 4 reveals that as it break down the model into more elements to achieve results closer to reality, the analysis time tends to increase significantly. The data for the conducted analyses were obtained from a computer with an Intel i5 processor, 4 cores, and 8 GB of RAM. When using a more

powerful hardware configuration, it is expected that the analysis process will be completed in a shorter time.

3.2 3D Analysis Results

For the four slot/pole configuration, the 3D analysis results for the embrace corresponding to the minimum cogging torque for conventional and consequent-pole models are shown in Table 5.

Table 5 3D analysis results for each pole structure.

Pole Number	Model	Analysis Type	Pole Embrace	Phase Current (A)	Ld (μ H)	Lq (μ H)	Peore (W)	Pcu (W)	Torque (Nm)	Torque Increase/Decrease Ratio (%)	Pout (W)	Pout Increase/Decrease Ratio (%)	Efficiency (%)	Efficiency Increase/Decrease Ratio (%)
34	NS	3D	0,8	7,274	1.027,80	1.035,70	5,822	38,728	12,456	22,038	309,400	22,980	87,413	-9,433
	N	3D	0,8	11,328	1.336,600	1.395,000	6,192	93,931	15,201		380,499		79,168	
38	NS	3D	0,75	6,393	1.062,20	1.055,40	7,067	29,913	10,691	23,880	266,502	27,457	87,815	-10,178
	N	3D	0,7	10,811	1.340,700	1.374,000	5,402	85,561	13,244		339,676		78,877	
40	NS	3D	0,8	6,497	1.040,700	1.033,300	6,230	30,898	11,373	21,439	273,478	21,439	88,046	-6,661
	N	3D	0,775	9,546	1.359,000	1.409,000	5,304	66,704	13,811		332,110		82,181	
42	NS	3D	0,8	6,670	1.015,300	1.006,700	5,949	32,567	12,507	22,414	303,238	22,414	88,730	-7,510
	N	3D	0,85	10,149	1.321,000	1.337,000	5,720	75,398	15,310		371,207		82,066	

**Where, NS is given as the traditional model, while N is given as the consequent pole.*

In Table 5, it can be observed that in the results of the 3D analysis, traditional models have higher efficiency, while consequent-pole structures perform better in terms of output torque and output power.

In the 3D full-load analysis, the time-dependent variation of the output torque of 36 slot and 38 pole traditional and consequent-pole models are shown in Figure 6, and the change in a 3D phase current is shown in Figure 7.

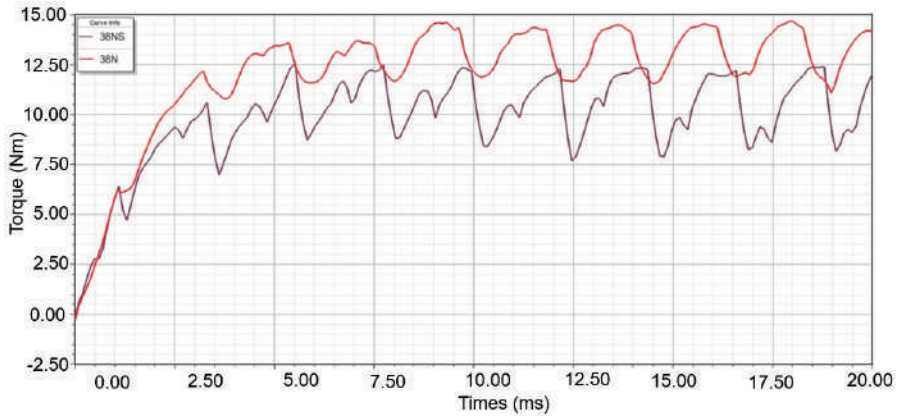


Figure 6 The change in output torque for both models in 3D

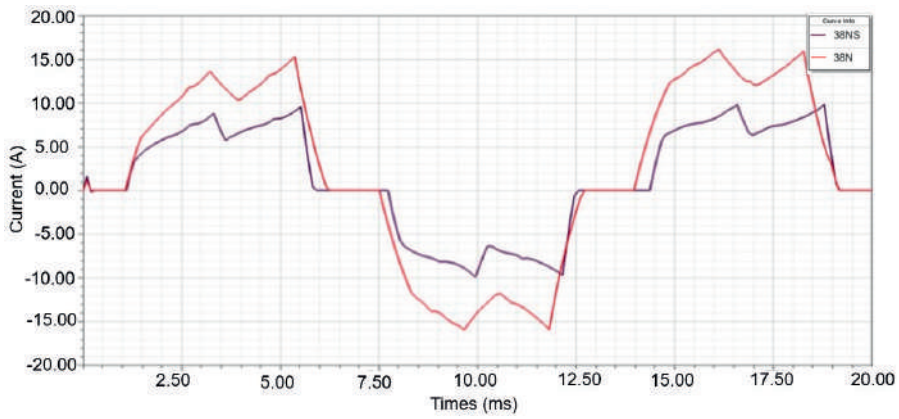


Figure 7 The change in phase current for both models in 3D

The difference between the calculations for 38-pole structure in RMxpvt, 2D, and 3D is shown in Table 6.

Table 6 RMaxprt, 2D, and 3D analysis results

Pole Number	Analysis Type	Model	Pole Embrace	Single Phase Current (A)	Single Phase Resistance	Peore (W)	Pcu (W)	Rated Torque (Nm)	Rated Speed (Rpm)	Pin (W)	Pout (W)	Efficiency (%)
38	Rmxprt	NS	0,75	5,328	0,244	10,8348	15,483	9,41472	253,657	302,713	249,95547	82,5717676
	2D		0,75	4,4126	0,244	5,0101	14,2528	7,9497	253,657	230,32293	211,06002	91,6365684
	3D		0,75	6,3926	0,244	4,4146	29,9134	7,957	253,657	245,58186	211,25384	86,0217587

In Table 6, it can be observed that the phase current is 5,32 A in the RMaxprt analysis, 4,41 A in the 2D analysis, and 6.39 A in the 3D analysis. The fact that the results in the 3D analysis are close to the results obtained in RMaxprt indicates the proximity of the analytical values in the analysis conducted. Furthermore, it is expected that the values obtained by calculating the final winding inductance value in 3D will be different from the results obtained in 2D. The reason for this is the possibility to calculate the end winding inductance value in 3D. In Ref. [19], application results for the asynchronous motor have shown similar results to Rmaxprt and Ansys Maxwell 2D. Additionally, even though the winding resistances are equal, the current magnitude affects copper losses, thus impacting efficiency.

Both the end winding inductance and the effects of non-linear behavior in steel materials, as well as leakage flux, are expected to cause variations in both motor output magnitudes in Rmxprt, Maxwell 2D, and 3D.

3.3 Comparison of 2D/3D Analysis Results for Models with Lower Cogging Torque.

In motor designs, while performing solutions in 2D analysis may provide convenience in terms of time, in order to trade-off the differences with more accurate comparison, all parameters obtained in 2D should also be calculated in 3D. Therefore, the 2D and 3D analysis results for these models are shown in Table 7.

Table 7 Comparison of 2D/3D Analysis Results

Pole Number	Model	Analysis Type	Pole Embrace	Phase Current (A)	I_d (μ H)	I_q (μ H)	P_{core} (W)	P_{cu} (W)	Torque (Nm)	No Load Speed (rpm)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	Efficiency (%)
34	NS	2D	0,8	6,842	847,915	855,699	4,491	34,269	12,157	237,327	304,715	343,430	88,727
		3D	0,8	7,274	1027,800	1035,700	5,822	38,728	12,456	237,327	309,400	353,950	87,413
	N	2D	0,8	10,869	1125,268	1177,704	3,906	86,490	15,429	237,327	383,270	473,666	80,916
		3D	0,8	11,328	1336,600	1395,000	6,192	93,931	15,201	237,327	380,499	480,623	79,168
38	NS	2D	0,75	7,042	865,307	865,199	4,560	36,299	12,875	229,994	309,943	350,802	88,353
		3D	0,75	6,393	1062,200	1055,400	7,067	29,913	10,691	229,994	257,361	294,341	87,436
	N	2D	0,7	11,584	1129,200	1167,400	4,014	98,220	15,985	229,994	384,812	487,045	79,009
		3D	0,7	10,811	1340,700	1374,000	5,402	85,561	13,244	229,994	318,819	409,782	77,802
40	NS	2D	0,8	6,509	851,426	850,572	4,773	31,023	11,961	229,741	287,627	323,422	88,932
		3D	0,8	6,497	1040,700	1033,300	6,230	30,898	11,373	229,741	273,478	310,606	88,046
	N	2D	0,775	10,817	1144,070	1204,757	4,308	85,670	15,154	229,741	364,392	454,371	80,197
		3D	0,775	9,546	1359,000	1409,000	5,304	66,704	13,811	229,741	332,110	404,117	82,181
42	NS	2D	0,8	6,452	832,647	832,486	4,847	30,480	11,700	231,650	283,686	319,012	88,926
		3D	0,8	6,670	1015,300	1006,700	5,949	32,567	12,507	231,650	303,238	341,754	88,730
	N	2D	0,85	10,712	1122,100	1143,700	4,256	83,807	15,288	231,650	370,681	458,743	80,803
		3D	0,85	10,149	1321,000	1337,000	5,720	75,398	15,310	231,650	371,207	452,324	82,066

3.4 Analysis of 36 slot 34 pole, 36 slot 38 pole, 36 slot 40 pole, and 36 slot 42 pole Models with in Terms of Cost

Untreated electrical silicon steel has been used as the stator and rotor steel. Arena Metal company was contacted for unit pricing, and the company provided a price per ton, which was used as the reference for unit cost [25].

N35 rare earth magnets have been used as permanent magnets. Since it was not possible to find a product with the exact volume and dimensions of the magnets used in our chosen model, the price could not be obtained. Therefore, for each known NdFeB magnet with known dimensions and price [26] on the Aliexpress website, the volume was calculated, and the mass in kilograms was determined by multiplying this volume by the density. With the known mass and price, the unit price of the magnets is calculated. The

wire wound around the stator slots is enamel-coated copper wire, and the unit price of enamel wire with a conductor diameter of 0,50-1,00 mm is obtained from Emtel Enamel Wire company’s website in Turkish Lira (TL) [27].It should be noted that, while getting the prices, the Turkish Lira/US Dollar exchange rate was 18,83.

The unit prices for the materials used in the selected model are shown in Table 8.

Table 8 The unit prices for the key materials used in BLDC.

Parameters	Material Unit Price (TL/ kg)	Material Unit Price (USD/kg)
NdFeB Magnet	6651,37	358,18
Stator Winding	226,3	12,08
Stator and Rotor Steel	18,57	1

For these 4 models selected based on the cogging torque, there have been no changes in rotor and magnet dimensions, and winding turns. The total approximate cost price for each motor structure, i.e., motor body, cover, bearings, all labor, and VAT excluded, for both traditional and consequent pole structures are shown in Table 9. Additionally, Table 9 provides a comparison between the output torque, total weight, and efficiency obtained from the 3D analysis and the profit and loss ratio in total cost.

Table 9 The total cost prices for the model.

Pole Number	Model	PM Mass (kg)	Rotor Steel Mass (kg)	Stator Steel Mass (kg)	Stator Copper Mass (kg)	Motor Mass (kg)	The total cost of PM excluding VAT (TL)	The total cost of Rotor and Stator Steel excluding VAT (TL)	The total cost of Copper excluding VAT (TL)	The total cost price excluding K.D.V (excluding labor))	The profit/loss percentage in total cost (excluding labor)
34	NS	0,324	0,451	1,384	0,507	2,665	2152,909	34,075	114,644	2300,970	46,65
	N	0,162	0,617	1,384	0,506	2,669	1076,454	37,159	114,508	1227,463	
38	NS	0,286	0,451	1,356	0,505	2,598	1899,625	33,548	114,384	2046,900	44,70
	N	0,148	0,598	1,356	0,505	2,607	981,875	36,289	114,386	1131,893	
40	NS	0,305	0,451	1,356	0,505	2,616	2026,267	33,544	114,381	2173,535	46,41
	N	0,153	0,603	1,356	0,505	2,617	1014,600	36,377	114,381	1164,701	
42	NS	0,314	0,451	1,352	0,505	2,623	2089,588	33,483	114,349	2236,763	43,53
	N	0,167	0,618	1,356	0,505	2,646	1112,822	36,651	114,381	1263,197	

**Where, NS is given as the traditional model, while N is given as the consequent pole.*

Table 10 Comparison of Models in Terms of Torque, Weight, Efficiency, and Total Cost.

Pole Number	Model	Output Torque (Nm)	Output Torque Increase/Decrease (%)	Efficiency (%)	Efficiency Increase/Decrease (%)	Motor Mass (kg)	Total Engine Mass Increase/Decrease (%)	The total cost price excluding VAT (excluding labor)	The profit/loss percentage in total cost (excluding labor)
34	NS	12,456	22,04	89,473	-7,67	2,665	0,135	2300,970	46,65
	N	15,201		82,607		2,669		1227,463	
38	NS	10,691	23,88	89,130	-10,69	2,598	0,371	2046,900	44,70
	N	13,244		79,602		2,607		1131,893	
40	NS	11,373	21,44	89,880	-8,20	2,616	0,017	2173,535	46,41
	N	13,811		82,509		2,617		1164,701	
42	NS	12,507	22,41	89,811	-7,27	2,623	0,912	2236,763	43,53
	N	15,310		83,281		2,646		1263,197	

**Where, NS is given as the traditional model, while N is given as the consequent pole.*

The impact of reducing the number of permanent magnets by half when using a consequent pole rotor structure, where one pole pair has permanent magnets and the other pole pair is made of steel, on the motor cost can be evaluated considering the data provided in Table 10. It is evident that the chosen values for this motor are suitable for production. When considering mass production in a factory, a substantial cost reduction and increased profit margin become apparent.

3.5 The Impact of Temperature on Motor Parameters

In order to observe the impact of different operating temperatures on output values, a more temperature-resistant magnet material, specifically the N45UH magnet material from Arnold Magnetics, defined in the ANSYS Maxwell library with the B-H curve.

The choice of the pole structure for analysis was made based on the efficiency and output torque of the 4 models selected according to the impact moment, and a 42-pole structure was chosen. 3D analyses of this model were conducted at temperatures of 80°C, 120°C, and 150°C. The output values obtained from the analysis results are shown in Table 11. Additionally, the percentage changes in iron loss, torque, output power, and efficiency due to temperature variation are presented in Table 11.

Table 11 Output Parameters at Different Magnet Temperatures

Pole Number	Magnet Type	Model	Analysis Type	Pole Embrace	Operating Temperature, °C	Single Phase Current (A)	Single Phase Resistance (Ω)	P _{core} (W)	P _{cu} (W)	Torque (Nm)	Rotor Speed (rpm)	P _{out} (W)	Efficiency (%)
42	N35UH	NS	3D	0,8	80	5,933	0,247	6,391	26,084	9,900	251,961	261,082	88,938
				0,8	120	5,839	0,278	6,071	28,434	9,275	260,782	253,163	88,005
				0,8	150	5,880	0,302	5,859	31,324	8,813	267,510	246,759	86,905
		N	3D	0,85	80	10,630	0,247	6,770	83,731	13,000	247,404	336,634	78,812
				0,85	120	10,410	0,278	5,667	90,379	12,030	256,072	322,430	77,049
				0,85	150	10,190	0,302	5,657	94,076	11,220	262,768	308,584	75,575

**Where, NS is given as the traditional model, while N is given as the consequent pole.*

The temperature causes the windings in the motor to heat up [28] and the magnetic flux strength of the magnets to decrease [29]. This situation affects the motor torque and efficiency [28-30]. At higher temperatures,

irreversible demagnetization of magnets [29] and insulation problems in windings may occur [30]. Choi et al. [28] experimentally demonstrated the decrease in efficiency with increasing temperature in the BLDC motor. In Table 11, it can be observed that as magnet temperature increases, in both traditional and consequent pole structures, resistance and copper losses increase, while output torque, output power, and efficiency decrease.

Table 12 Percentage Change in Output Parameters Due to Temperature Variation

Model	Operating Temperature, °C	Pcore (W)	Torque (Nm)	Pout (W)	Efficiency (%)	Temperature Change		Pcore Increase/Decrease Ratio(%)	Torque Increase/Decrease Ratio (%)	Pout Increase/Decrease Ratio (%)	Efficiency Increase/Decrease Ratio (%)
NS	80	6,39	9,90	261,08	88,94	80 °C	120 °C	-5,00	-6,31	-3,03	-1,05
	120	6,07	9,28	253,16	88,01	120 °C	150°C	-3,51	-4,98	-2,53	-1,25
	150	5,86	8,81	246,76	86,90	80 °C	150 °C	-8,33	-10,98	-5,49	-2,29
N	80	6,77	13,00	336,63	78,81	80 °C	120 °C	-16,30	-7,46	-4,22	-2,24
	120	5,67	12,03	322,43	77,05	120 °C	150°C	-0,17	-6,73	-4,29	-1,91
	150	5,66	11,22	308,58	75,57	80 °C	150 °C	-16,44	-13,69	-8,33	-4,11

In Table 12, it can be observed that when the operating temperature is increased from 80°C to 120°C:

- In the traditional structure, there is an expected decrease of 5% in iron loss, 6,31% in output torque, 3% in output power, and 1,05% in efficiency.
- In the consequent -pole structure, there is an expected decrease of 16,30% in iron loss, 7,46% in output torque, 4,22% in output power, and 2,24% in efficiency.
- It proves that an increase in temperature results in greater changes in output parameters in the consequent pole structure. The most significant change is observed when the temperature is increased from 80°C to 150°C.

4. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

In this study, parametric, 2D, and impact moment analyses were conducted for 4 different slot/pole models with varying winding numbers and pole arc ratios for both traditional and consequent pole structures. As

a result of these analyses, models with the lowest impact moment were identified for both traditional and consequent pole structures. The identified models were subjected to 2D and 3D analyses as well as cost analyses. The analysis revealed that the 36-slot, 38-pole consequent pole outer rotor BLDC motor exhibited a low cogging torque and significantly high output torque and power. Furthermore, the effect of operating temperature on both traditional and consequent pole motors was evaluated.

Based on the results of the 3D analysis;

- The traditional outer rotor BLDC motor had an average efficiency that was approximately 8,8% higher.
- There was not a significant difference in total motor mass between the two models, except for the pole structure.
- The consequent pole outer rotor BLDC had approximately 16% higher output torque and power.
- Due to the reduction in the number of permanent magnets in the consequent pole outer rotor BLDC (excluding motor body, cover, bearings, all labor, and VAT), the total production cost was approximately 45% more favorable.
- An increase in operating temperature resulted in a decrease in motor performance data.
- It was previously shown in a different study that using a consequent pole outer rotor BLDC instead of an 8-pole, 9-slot surface-mounted structure reduced costs by around 50% and resulted in nearly a 3% decrease in efficiency [13]. In this study, with different slot/pole structures, it is observed that when compared to the traditional model, using an outer rotor consequent pole structure reduces costs by around 45%, supporting the findings of the previous study.

Considering the increasing costs of magnets, it becomes inevitable to implement motor designs with less magnet usage. From this perspective, the motor parameters used in the design, winding fill factor, and other aspects are suitable for manufacturing. The efficiency decrease observed in the consequent-pole structure can be improved through various optimization methods. Taking all these factors into account, it is believed that the recent interest in consequent-pole outer rotor BLDC motors will contribute to reducing production costs in various applications, especially in electric bicycles, and lead to the development of motors with competitive efficiency for their price segments.

5 References

- [1] Hung, N. B., & Lim, O. (2020). A review of history, development, design and research of electric bicycles. *Applied Energy*, 260, 114323.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114323>
- [2] EN-15194. (2009). Cycles-Electrically power assisted cycles-EPAC Bicycles, European Committee For Standardization, Brussels. Retrieved from <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/39396/68ab6cb984ae44c69626f7cd-d050f238/SIST-EN-15194-2017.pdf>
- [3] Resmi Gazete (1983, October 18). 2918 Sayılı Karayolları Trafik Kanunu. Retrieved from <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=8182&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>
- [4] Tanç, G. (2014). Elektrikli bisikletler için fırçasız doğru akım motoru tasarımı ve üretimi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
<http://hdl.handle.net/11527/13192>
- [5] Lindh, P. M., Jussila, H. K., Niemela, M., Parviainen, A., & Pyrhonen, J. (2009). Comparison of concentrated winding permanent magnet motors with embedded and surface-mounted rotor magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(5), 2085-2089.
<https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.2011643>
- [6] Liu, D., Kan, G., & Mu, Y. (2020, November). Analysis of a consequent-pole permanent magnet machine for electric vehicle propulsion. In *2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* (pp. 1615-1618). IEEE.
<https://doi.org/10.23919/ICEMS50442.2020.9291005>
- [7] Dusane, P. M. (2016). Simulation of BLDC Hub Motor in ANSYS - Maxwell.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2601.1764>
- [8] Çabuk, A. S., Sağlam, Ş., Tosun, G., & Üstün, Ö. (2016, December). Investigation of different slot-pole combinations of an in-wheel BLDC motor for light electric vehicle propulsion. In *2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO)* (pp. 298-302). IEEE.
- [9] Sakamoto, S., Yokoi, Y., Higuchi, T., & Miyamoto, Y. (2020, November). A study on rotor design of consequent-pole permanent magnet machines. In *2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* (pp. 1600-1603). IEEE.
<https://doi.org/10.23919/ICEMS50442.2020.9291128>
- [10] Noguchi, T., Murakami, K., Hattori, A., & Kaneko, Y. (2019, November). Proposal and operation characteristics of novel consequentpole perma-

- nent magnet motor. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1367, No. 1, p. 012032). IOP Publishing.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1367/1/012032>
- [11] Bai, J., Liu, J., Wang, M., Zheng, P., Liu, Y., Gao, H., & Xiao, L. (2018). Investigation of a less rare-earth permanent-magnet machine with the consequent pole rotor. *AIP Advances*, 8(5).
<https://doi.org/10.1063/1.5006861>
- [12] Dorrell, D. G., Amemiya, J., Chiba, A., & Takenaga, T. (2003, November). Analytical modelling of a consequent-pole bearingless permanent magnet motor. In *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2003. PEDS 2003*. (Vol. 1, pp. 247-252). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/PEDS.2003.1282776>
- [13] Ghaffari, A., Rahideh, A., Moayed-Jahromi, H., Vahaj, A., Mahmoudi, A., & Soong, W. L. (2019). 2-D analytical model for outer-rotor consequent-pole brushless PM machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 34(4), 2226-2234.
<https://doi.org/10.1109/TEC.2019.2941935>
- [14] Çağışlar, A., Tiryaki, H., & Bayhan, N. (2020). Effects of number of turns of armature winding on outer rotor brushless direct current motor designed for an electric vehicle prototype. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 832-847.
<https://doi.org/10.28948/ngumuh.689396>
- [15] Hanselman, D. C. (2003). *Brushless permanent magnet motor design*. The Writers' Collective.
- [16] Nory, H. (2018). Fırçasız doğru akım motorun tasarımı ve denetimi. *Elazağ Fırat University*.
- [17] Aslan, N. (2020). *Elektrikli araçlar için fırçasız doğru akım motoru tasarımı* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [18] Tuncel, E. (2019). *Elektrikli bisikletler için sabit mıknatıslı doğru akım motoru tasarımı ve optimizasyonu* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [19] Arslan, S. (2016). Dalgıç Motorun Analitik, Sayısal, Performans Sonuçlarının Karşılaştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 403-415.
- [20] Mellah, H., Arslan, S., Sahraoui, H., & Hemsas, K. E. (2022). The effect of stator inter-turn short-circuit fault on dfig performance using fem. *Engineering, Technology & Applied Science Research*.
- [21] Tarimer, İ., Arslan, S., & Güven, M. E. (2012). Investigation for losses of M19 and amorphous core materials asynchronous motor by finite elements methods. *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 18(9), 15-18. <https://doi.org/10.5755/j01.cee.18.9.2797>

- [22] Balci, S., & Akkaya, M. (2022). Reduction of the core size and power losses by using soft magnetic material for a single-phase induction motor. *Measurement*, 198, 111421.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111421>
- [23] Özdil, A., & Uzun, Y. (2021). Design and analysis of a rotor for a 22 kW transversally laminated anisotropic synchronous reluctance motor.
<https://doi.org/10.5755/j02.eie.29046>
- [24] ANSYS Electronics Suite 19.2.(2019).
- [25] Tane Yönlendirilmemiş Silisli Sac.(2023, January 19). Retrieved from <http://www.arenametal.com.tr/celik/yassi-karbon-celik/silisli-sac/>.
- [26] Neodyum Miknatıs Fiyatı.(2023, January 19). Retrieved from [https://tr.aliexpress.com/w/wholesale-motor-neodyum magnets.html?catId=0&initiative_id=SB_20221224055719&SearchText=motor%2Bneodyum%2Bmagnets&spm=a2g0o.home.1000002.0&dida=y](https://tr.aliexpress.com/w/wholesale-motor-neodyum-magnets.html?catId=0&initiative_id=SB_20221224055719&SearchText=motor%2Bneodyum%2Bmagnets&spm=a2g0o.home.1000002.0&dida=y).
- [27] Emaye bobin fiyatı. (2023, January 19).Retrieved from <https://shop.em-tel.com.tr/emsold-180-hb-sinifi-emaye-bobin-teli-050-100>.
- [28] Choi, J., Lee, J. H., Jung, Y. G., & Park, H. (2020). Enhanced efficiency of the brushless direct current motor by introducing air flow for cooling. *Heat and Mass Transfer*, 56, 1825-1831. <https://doi.org/10.1007/s00231-020-02827-8>
- [29] Fernandez, D., Hyun, D., Park, Y., Reigosa, D. D., Lee, S. B., Lee, D. M., & Briz, F. (2017). Permanent magnet temperature estimation in PM synchronous motors using low-cost hall effect sensors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(5), 4515-4525. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2705580>
- [30] Kuria, J., & Hwang, P. (2012). Investigation of thermal performance of electric vehicle BLDC motor. *International journal of mechanical engineering*, 1(1), 1-17.

Mühendislik Alanında Multidisipliner Araştırma ve Değerlendirmeler

Editör:

Doç. Dr. Serdal Arslan