
AKADEMİK PERSPEKTİFTEN MÜHENDİSLİK

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Gökhan KUTLUANA



yaz
yayınları

Akademik Perspektiften Mühendislik

Editör

Dr.Öğr.Üyesi Gökhan KUTLUANA

yaz
yayınları

2025

Akademik Perspektiften Mühendislik

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Gökhan KUTLUANA

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-5838-15-5

Haziran 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

İÇİNDEKİLER

Mühendislik Çalışmalarında Yaygın Kullanılan DeneySEL Tasarım Yöntemleri.....	1
<i>Zehra YILDIZ</i>	
Gaz Pedalı Tepkimesini Değıştiren Cihaz Prototipi Tasarımı	20
<i>Sururi YÜKSEL, Zafer ORTATEPE</i>	
The Fusion of LiDAR and Photogrammetry for High- Fidelity Digital Twins: An Application on Wooden Motorboats.....	37
<i>Burak GÖKSU, Can ATALAY, Ersin AÇIKGÖZ, Serdar METE</i>	
Application and Comparison of Adsorption Process Among The Dye Removal Methods From Wastewater Effluents	59
<i>Adnan ALDEMİR, Ali Rıza KUL</i>	
Kamu Kurumlarında Güneş Enerjisi Kullanımının Verimliliğı ve Sürdürülebilirlik Üzerindeki Etkileri	88
<i>Bülent KARAKUŞ, Harun YAKA</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

MÜHENDİSLİK ÇALIŞMALARINDA YAYGIN KULLANILAN DENEYSEL TASARIM YÖNTEMLERİ

Zehra YILDIZ¹

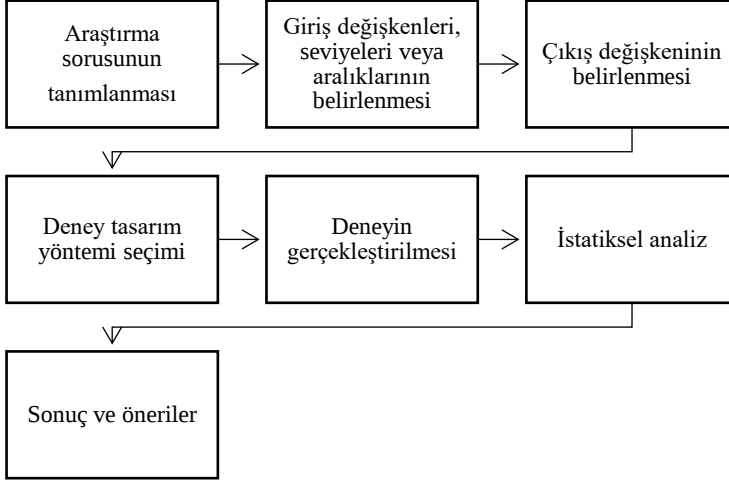
1. GİRİŞ

Deney tasarımı, proses, sistem ya da araştırma sorusu ile ilgili maksimum bilgiye en az deney sayısı ile ulaşmak için gerekli deney planını elde etmemizi sağlayan sistematik bir istatistiksel yöntemdir. Uygun deney tasarımları ile daha kısa sürede daha az maliyet ve kaynak harcanarak deneyler gerçekleştirilebilir. Deney tasarımı, deney koşulları ile deney sonucu arasındaki ilişkiyi, deney sonucuna en fazla etki eden deney koşullarını bulmak için en etkili araçlardan biri olup, fen bilimleri, mühendislik, hizmet ve imalat gibi birçok farklı alanda çalışma koşullarının optimizasyonu, parametre kestirimi ve modelleme için kullanılır (Hasgöl, 2011; Oğuz, 2022). Deney tasarımında deney hataları minimize edilecek şekilde deneyler tasarlanır. Deneysel hata ise deneysel tasarımda önemli olan değişkenlerin etkisiz olanlardan ayrılması ve önemli değişkenlerin optimum değerlerinin belirlenmesi ile azaltılır. Bu nedenle deneysel tasarımda istatistiksel analiz önemlidir (Şişman ve Demirtaş, 2016). Deneysel tasarım, istatistiksel yöntemlerin kullanıldığı bir dizi yöntem olarak bilinir.

¹ Prof. Dr., Tarsus Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Temel Bilimleri, zyildiz@tarsus.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1304-4857

2. DENEYSEL TASARIM YÖNTEMLERİ

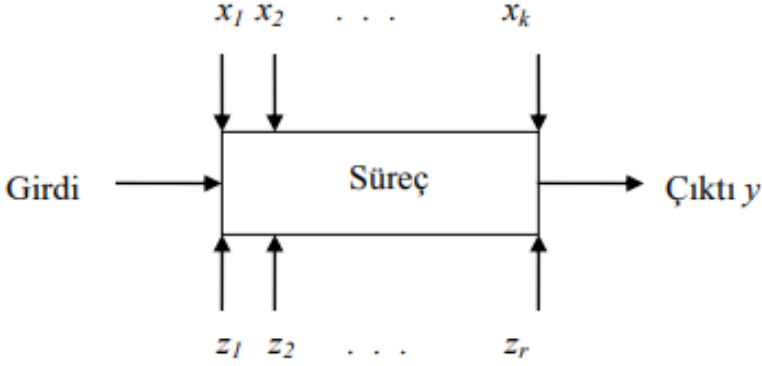
Deneyisel tasarımda bir gereksinim veya ihtiyaçtan doğan bir problem vardır ve o problem çözülmeye çalışılır. Deneyisel tasarım yönteminin aşamaları Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Deneyisel Tasarım Yönteminin Aşamaları

Deney tasarımında ilk adımda problemin çözümünü sağlayacak kriterler, deney koşulları ortaya koyan giriş değişkenlerin, bu değişkenlerin seviyelerinin ve çıkış değişkenlerinin belirlenmesidir. Bu aşama deney öncesi planlama olarak bilinir ve aşamaların sıralaması önemli değildir. Daha sonra uygun deney tasarım yöntemi seçilerek deneyler yapılır. Deney sonuçlarına göre yapılan istatistiksel analiz ile en uygun sonuç elde edilir. Deneyisel tasarımda en iyi deney sonucu veren çıkış değişkeninin elde edildiği giriş değişkenleri seviyelerinin belirlenmesi ile son bulur. Deneyisel çalışmalarda optimum sonuca ulaşabilmek için uygun bir deney tasarımının yapılması, parametreler ile seviyelerinin ve deney sonucunun doğru olarak belirlenmesi ile gerçekleşir. Gerçekleştirilen deneylerin sonucuna bağlı olarak performans ölçütü dikkate alınarak en uygun

optimum koşullar belirlenir (Erdil, 2020). Deney sonucunu etkileyen önemli değişkenler bulunduğundan sonra, genellikle, etkili giriş değişkenleri ile çıkış değişkenleri arasındaki ilişkiyi ortaya koyan bir matematiksel model elde edilebilir. Bu matematiksel model, proses kontrol, otomatik kontrol veya geri bildirim kontrolü için önemlidir (Sakallı, 2018). Deney tasarımı, süreç iyileştirilmesi, kalite kontrolü ve sistem performansının artırılmasında etkilidir. Şekil 2’de kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen giriş değişkenleri ve çıkış değişkenlerini kapsayan bir sistem süreci yer almaktadır. x_1 , x_2 ve x_3 kontrolü sağlanabilen, z_1 , z_2 ve z_3 ise kontrolü sağlanması mümkün olmayan değişkenlerdir. Kontrol edilemeyen değişkenler, sıcaklık, nem, rüzgar, gürültü, toz, titreşim, maddenin fiziksel ya da kimyasal özelliklerinde değişiklik olması gibi kontrolü zor, kontrol edilemeyen veya kontrol edilebilir olmasına rağmen maliyeti fazla olan faktörlerdir. Kontrol edilebilen faktörler ise üretim hızı, sıcaklık, derişim, basınç gibi faktörleri ifade etmektedir. Belirlenen deney koşullarında kontrol dışı-kontrol edilmeyen faktörler de göz önüne alınarak deneyler gerçekleşir ve bu değişkenlerden etkilenmeyen tasarıma, dayanıklı ya da sağlam tasarım denir. Kontrol edilemeyen değişkenin etkisini en aza indirgeyerek performans iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Başarılı deneysel tasarımda deney sonucu, kontrol edilemeyen değişkenlerden etkilenmez. Gerek ürün tasarımın gerek ise proses tasarımında, ürün ve proseste varyasyona sebep olan kontrol edilemeyen faktörlerin etkisine karşılık kontrol edilebilen faktörlerin değerleri en doğru şekilde belirlenmelidir (Gökçe ve Taşgetiren, 2009; Karşlıoğlu, 2013; Pınarbaşı, 2019; Ervural, 2020; Erdil, 2020).



Şekil 2. Süreç Tasarımı

Deney tasarımında rassallık, tekrarlama ve bloklama olmak üzere üç temel prensip vardır. Rassallık, deneylerin rasgele bir biçimde birbirinden bağımsız biçimde yapılmasını ifade eder ve deney hatalarının azaltılmasını sağlar. Tekrarlama, bir deneyin birden fazla sayıda yapılması ile deneyin tekrar edilmesidir. Deneyin tekrarlanması, deneysel hata oranını azaltır ve doğru deney sonucunun elde edilmesini sağlar. Bloklama ise her blokta yer alan deneylerin kendi içinde değerlendirilerek sürece etki eden başka faktörler varsa etkisinin azaltılması amaçlanır ve sadece ilgili değişkenin etkisi belirlenir. Böylece deney tasarımı homojen, doğru ve tutarlı biçimde oluşturulmalıdır (Ervural, 2020).

3. DENEYSEL TASARIM YÖNTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Deneyisel tasarımda istatistiksel yöntemler (Aktif Metodoloji) ve klasik yöntemler (Pasif Metodoloji) olmak üzere iki yöntem kullanılır. Klasik yöntemler, geleneksel deney çalışması olan her seferinde bir değişken yöntemidir. Bu yöntemde her deney setinde yalnızca bir deney koşulunun seviyesi belirli bir aralıkta değiştirilirken diğer deney koşulları

sabit alınarak deney sonucu üzerine değişkenin seviyesinin etkisi belirlenir. Bir sonraki deneylerde en uygun deney sonucunu veren değişken seviyesi sabit tutulur, diğer değişkenlerin optimum seviyesi aynı yöntem tekrarlanarak araştırılır. Bu deney tasarımında, sadece bir değişkenin seviyesi değiştirilip diğer değişkenlerin seviyesi sabit tutularak deney sonucu üzerindeki etkiler gözlemlenir ve en iyi yanıtı veren değişken seviyesi belirlenir. Belirlenen değişken seviyesi sonraki işlemde sabit tutulup, diğer değişkenin seviyesi değiştirilir. Bu işlem sırasıyla bütün değişkenler için tekrarlanarak tasarım gerçekleştirilir. Klasik deneysel tasarımda kontrol edilemeyen faktörler dikkate alınmaz. Ancak deneysel çalışmalarda kontrol edilemeyen, bağımlı veya fazla sayıda giriş değişkeni olabilir. Bu durum deneysel tasarımda bazı sorunlara sebep olabilir. Böyle bir durumda, deneysel modeller ve istatistiksel analiz önemlidir. Giriş değişkenleri ile çıkış değişkenleri arasındaki ilişki hakkında yeterli bilgi bulunmaması veya giriş değişkenlerini çıkış değişkenlerine bağlayacak uygun bir model oluşturulmadığı ya da kompleks bir model ortaya konması durumunda deneysel tasarıma dayalı istatistiksel yöntemlere başvurulur. Bu yöntemler, deneylerin verimliliği ve güvenilirliğini artırırken deney sonuçlarının daha doğru bir şekilde analiz edilmesine imkan verir (Gökçe ve Taşgetiren, 2009; Yıldız, 2011; Uray vd., 2023). Faktöriyel tasarımlar, Nelder-Mead Simplex yöntemi, yanıt yüzey yöntemi ve Taguchi metodu istatistik tabanlı deney tasarım yöntemleridir. Bu yöntemler içerisinde mühendislikte en yaygın kullanılanları tablo 1 de verildiği gibi Taguchi, Yanıt Yüzey Yöntemi ve Faktöriyel Tasarımdır (Oğuz, 2022). Taguchi metodu, daha çok makine, malzeme, imalat mühendisliği alanlarında çokça kullanılırken faktöriyel tasarım ve yanıt yüzey yöntemi kimya, çevre, gıda mühendisliği alanlarındaki çalışmalarda daha fazla tercih edilir. Bu tasarımlar Minitab ya da “Design Expert” uygulamaları üzerinden yapılır.

Tablo 1. Mühendislik Deneysel Tasarım Yöntemleri

Tasarım Türü	Avantajları	Çalışma Uzayı	3 Faktör İçin Deneme
Faktöriyel	Etkileşimleri dikkate alınır	Küp	8
Yanıt Yüzey	Sonuçları en iyi açıklayan tasarım denebilir	Küp	20
Taguchi	Faktörlerin etkileşimlerini göz ardı edilerek gürültü faktörünü dikkate alınır	Üçgen	4

3.1. Faktöriyel Deney Tasarımı

Deney tasarımı, deney sonucu üzerinde deney koşulları olan faktörlerin ve faktör seviyelerinin etkilerini belirlemek için kullanılır. Faktöriyel deney tasarımı, birden fazla faktör ve birden fazla seviyenin deney sonucu üzerine etkisinin dikkate alındığı deney tasarımı türüdür. Faktöriyel deney tasarımları, tüm faktörlerin deney sonucu üzerine etkisi ve faktörlerin birbirleriyle olan etkileşimlerin en kolay ortaya konduğu deney tasarım yöntemidir. Faktöriyel tasarım, her bir faktörün her bir seviyesini içeren tüm kombinasyonlarını kapsar. İlk kez Fisher ve Yates Faktöriyel tasarımı önermiş olup, her seferinde bir faktörün etkisinin belirlendiği klasik yöntemden deney sayısı daha az olduğundan deney maliyeti daha düşüktür. Faktöriyel tasarımda, iki ya da daha fazla faktörün ana etkilerini ve etkileşimleri aynı anda belirlenir. Faktöriyel tasarımlar, özellikle mühendislik alanlarında uygulanmaktadır (Karslıoğlu, 2013). Faktöriyel deney tasarımında toplam deney sayısı l^k ile belirlenir. Burada k değeri faktör sayısını ve l değeri her faktörün seviyesini gösterir. 2 seviyeli, 3 faktörlü tasarımda toplam $2^3=8$ adet deney yapılması gerekir. Faktöriyel deney tasarımlarında tüm kombinasyonlar denendiği için faktör ve seviye ile deney sayısı arttığından zaman alan ve maliyetli bir tasarım yöntemidir.

Faktör seviyelerini belirlenmek için birkaç yaklaşım vardır. Birinci yaklaşıma göre, faktör seviyeleri deneysel süreç ile ilgili sahip olunan bilgi ve tecrübeye dayalı olup, deney sonucuna etkisi dikkate alınarak seçilir. Endüstriyel uygulamalarda

kullanılan bir tasarımda, seçilen düzeylerden kaynaklanan sabit etkiler söz konusu olup, elde edilecek sonuçlar seçilen düzeyler için geçerlidir. İkinci yaklaşımda, faktörler için geçerli olan seviyeler, seviyelerin oluşturduğu örnek uzaydan rassal olarak seçilerek deneyler yapılır. Rassal etkilerin söz konusu olduğu bu tasarımda rassal olarak seçilen seviyeler temelinde elde edilen sonuçlar diğer seviyeler için de genelleştirilir. Üçüncü bir diğer yaklaşımda ise sabit ve rassal etkilerin birlikte göz önüne alındığı diğer iki yaklaşımı birlikte ele alır.

Faktörlerin etkilerinin değerlendirilmesi ve yorumlanmasında en etkili olan deney tasarımı Tam Faktöriyel Deney Tasarımı (TFDT) dir. Bu tür tasarımlarda her faktörün her seviyesinden eşit sayıda elde edilen deney sonuçları birbirleri ile karşılaştırılır. Tam faktöriyel deney tasarımı en az iki faktör ve faktör seviyesinin olduğu deneylerde tüm faktör ve seviyeleri çarpılarak elde edilen koşullar deneyenerek en uygun deney parametre seti araştırılır ve optimum deney koşulları belirlenir. Tam faktöriyel deney tasarımı, varyans analizi ve regresyon analizleriyle birlikte göz önüne alınarak değerlendirilir. Böylece hangi faktörün deney sonucu üzerinde daha çok etkisi olduğu ya da etkilemediği belirlenir (Ervural, 2020).

Tablo 2’ de 3 faktör ve iki seviyeli tam faktöriyel deney tasarım tablosu verilmiştir. P_1 , P_2 ve P_3 ile gösterilen parametrelerin, 1-2 parametrelere ait seviyelerin kod değeridir. S_n deney sonucunu göstermektedir (Gökçe ve Taşgetiren, 2009).

Tablo 2. Tam Faktöriyel Deney Tasarım Tablosu

Deney Sayısı	Parametre ve seviyeleri			Sonuç
	P_1	P_2	P_3	
1	1	1	1	S_1
2	1	1	2	S_2
3	1	2	2	S_3
4	1	2	1	S_4
5	2	1	1	S_5
6	2	1	2	S_6
7	2	2	1	S_7
8	2	2	2	S_8

TFDT de deney sayısı faktör ve seviyelerin artmasıyla büyük bir artış göstermektedir. Bu sebeple tam faktöriyel deneyler, deney sonucuna etki eden faktör sayısı ≤ 5 olduğu durumlarda daha avantajlıdır. Deney sonucuna etki eden faktör sayısı 5 in üzerinde ise ana faktörler ile bazı faktörleri arasındaki etkileşimlerin dikkate alındığı kesirli faktöriyel tasarımlar kullanılmaktadır (Şişman ve Demirtaş, 2016). Kesirli faktöriyel deney tasarımı, deney sonucuna katkısı olmayan ya da çok az olan faktörün deneye katılarak deney sayısının artmasına neden olacak etkileşimlere izin verilmez. Faktörler arasındaki etkileşimlerin sayısı azaltıldığında deney sayısı düşer. Kesirli faktöriyel deney tasarımı, deney sayısı daha az olduğundan tam faktöriyel tasarıma göre zaman ve maliyet açısından daha avantajlıdır. Bu yüzden kesirli faktöriyel deney tasarımının işletmelerde ve mühendislikte geniş bir uygulama alanı vardır (Karşlıoğlu, 2013; Kasap, 2016; Hasgül, 2011).

3.2. Yüzey Yanıt Yöntemi

Yanıt yüzey yöntemi kimya alanında ilk uygulanmış olup, daha sonra ilaç sanayi, tıp, gıda sektörü, bilgisayar ve otomotiv sektörü gibi alanlara uygulanmıştır. Yanıt yüzey yönteminde, bağımlı değişken olan yanıt olarak ifade edilen deney sonucu ile bağımsız değişken olan deney koşullarının arasındaki ilişkinin modellenmesinde matematiksel ve istatistiksel yöntemler birlikte kullanılarak optimum sonuç elde edilmeye çalışılır. Yanıt yüzey yöntemi (YYY), optimizasyon için sıkça başvurulanan deneysel tasarım yöntemlerindendir. YYY de öncelikle yanıtlar ve yanıt üzerinde etkili olabilecek değişkenler belirlenir. Birçok proseste değişken sayısı fazladır. Bu durumda ön denemeler yapılarak, değişkenler arasından istatistiksel olarak en önemli olanları seçilerek değişken sayısı dolayısıyla deney sayısı azaldığı için zaman ve maliyet yönünden önemli bir avantaj elde edilmiş olur. Daha sonra bağımsız değişkenlerin deneme bölgesinde belirlenen seviyelerin, yanıtta oluşturdıkları değere bakılarak

optimum noktaya yaklaşıp yaklaşmadığı belirlenir. YYY'nin son aşaması optimum noktaya yaklaşıldığında başlar, üç boyutlu yüzey grafikleri ya da kontur haritası elde edilir ve ANOVA gibi analizlerle optimum noktalar belirlenir. Gerçek yanıt fonksiyonunun doğru ve hassas bir şekilde tahminine çalışılır. ANOVA, YYY giriş parametreleri bağımlı değişkenlerle olan ilişkilerinin belirlenmesinde ve yorumunda kullanılabilir (Neşeli vd., 2012). Gerçek yanıt fonksiyonu için en uygun bir model belirlendikten sonra optimum nokta araştırılır (Uğur, 2019; Yıldız ve Gökayaz, 2020). Kurulan matematiksel model ile deney sonuçları örtüşmesi gerekir. Bunun için yanıt değişkenleri ile girdi değişkenleri arasındaki ilişkiyi tanımlayacak uygun bir matematiksel denklem belirlenmelidir. Yanıt ve değişkenler arasındaki bağıntı için uygun bir yaklaşım bulunmalıdır. Sistemin yanıt yüzeyinde, bağımsız değişkenin doğrusal bir fonksiyonu olarak iyi bir sonuç veriyorsa, Eşitlik 1 de verilen birinci dereceden lineer bir model uygundur (Uğur, 2019).

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (1)$$

Eğer sistemin yanıt yüzeyinde bağımsız değişken doğrusal değilse, bir eğrilik var ise Eşitlik 2 ile verilen ikinci dereceden bir model uygundur.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j X_j + \sum_{j,k=1}^k \beta_{jk} X_j^2 X_k^2 + \sum_{j,k=1}^k \sum_{i=1}^{k-1} \beta_{ijk} X_i X_j X_k + \varepsilon \quad (2)$$

Eşitlik 2 de; y çıkış değişkenini, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ bilinmeyen regresyon parametrelerini, X_i, X_j giriş değişkenlerini ((i=1, 2, ..., k) ve (j=1, 2, ..., k)) ve ε hata terimini göstermektedir (Uğur, 2019). Seçilen modelin deney sonuçları ile uygunluğu R^2

katsayısı ile ifade edilir. R^2 değerinin yüksek olması, elde edilen ve hesaplanan sonuçlar arasında uyumun da yüksek olduğunu gösterir. Uyumlu bir modelin R^2 değeri 0,80 altına düşmemelidir. Modelin istatistiksel analizi, varyans analizi (ANOVA) tablosu ile verilir. Modelin istatistiksel anlamlılığı ve yeterliliğini F değeri, olasılık değeri ($\text{Prob}>F$) ve uygun kesinlik (Adequate Precision) terimleri gösterir. Sapmaya karşı verilen cevabın oranını gösteren uygun kesinlik değeri ≤ 4 olmalıdır. Uyum eksikliğinin (The lack of fit) olasılık değeri $<0,0500$ ya da $<0,0010$ olması uyum eksikliğinin anlamlı olduğunu belirtir. Modelin uygunluğu, studentleştirilmiş artıkların normal bir dağılım izleyip izlemediğini gösteren normal olasılık grafiği ile gerçek ve tahmin edilen değerlerin diagnostik grafiklerin karşılaştırılmasıyla anlaşılabilir. Eğer artıklar normal bir dağılım izliyorlarsa noktalar düz bir çizgi oluşturur. Bu durumda modelin uygun olduğunu gösterir (Bilen vd. 2018).

YYY en yaygın kullanılan tasarım yöntemleri, tam faktöriyel tasarım, kısmi faktöriyel tasarım, merkez kompozit tasarımı (MKT) ve Box-Behnken yöntemleridir. MKT yönteminde eksenel nokta (α) ve merkez nokta olmak üzere iki faktöriyel nokta mevcuttur. Her bir faktör için merkez noktadan uzak faktöriyel noktalar için kod değerleri ± 1 birim, eksen noktaları ise $\pm \alpha$ birimdir. Yöntemin iki faktöriyel noktası, bir faktörün + (en yüksek) veya - (en düşük) düzeyleridir. Eksenel noktalar, deney sistemine göre belirlenen iki düzey noktasının $+\alpha$ ve $-\alpha$ değerleri kadar ötesindedir. Kod değeri türünden -1, X değişkeninin minimum değeri, 0, X değişkeninin ortalama değeri, +1, X değişkeninin maksimum değeridir. $-\alpha$, X değişkeninin minimum değerinin α kadar altındaki ve $+\alpha$, X değişkeninin maksimum değerinin α kadar üzerindeki kod değerleridir. α eksenel noktalarının değeri, 2^k faktöriyel noktalarının sayısı olmak üzere $\alpha = \sqrt[4]{2^k}$ eşitliği ile hesaplanır (Yıldız ve Gökayaz, 2020). MKT tasarımına göre, k bağımsız değişkenleri ve n_0 sayısı

merkez noktasındaki deneylerin tekrar sayısını göstermek üzere toplam deney sayısı, $2k+2k+n_0$ 'dır (Bilen vd., 2018). Tablo 3 de 3 faktör için merkez kompozit tasarımı verilmiştir.

Tablo 3. Deney Veri Seti

Deney Sayısı	Parametreler			Yanıtlar
	X_1	X_2	X_3	Y
1	-1.00	-1.00	-1.00	Y_1
2	1.00	-1.00	-1.00	Y_2
3	-1.00	1.00	-1.00	Y_3
4	1.00	1.00	-1.00	Y_4
5	-1.00	-1.00	1.00	Y_5
6	1.00	-1.00	1.00	Y_6
7	-1.00	1.00	1.00	Y_7
8	1.00	1.00	1.00	Y_8
9	$-\alpha$	0.00	0.00	Y_9
10	α	0.00	0.00	Y_{10}
11	0.00	$-\alpha$	0.00	Y_{11}
12	0.00	α	0.00	Y_{12}
13	0.00	0.00	$-\alpha$	Y_{13}
14	0.00	0.00	α	Y_{14}
15	0.00	0.00	0.00	Y_{15}
16	0.00	0.00	0.00	Y_{16}
17	0.00	0.00	0.00	Y_{17}
18	0.00	0.00	0.00	Y_{18}
19	0.00	0.00	0.00	Y_{19}
20	0.00	0.00	0.00	Y_{20}

YYY'de Box-Behnken tasarımları da yaygın kullanılan deneysel tasarımlardandır. Box-Behnken tasarımının, merkezi bileşik tasarımlara göre deney sayısının daha az olduğu bir deneysel tasarım yöntemidir (Özcan ve Samanlı, 2017; Serin vd., 2019). Box-Behnken tasarımları, ikinci derece modellerin tahmininde, sıralı modellerin oluşturulmasında, güvenilirlik analizinde, blokların etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanıyan bir yanıt yüzey yöntemidir. Box-Behnken, ikinci derece model parametrelerinin tahmininde kullanılan üç seviyeli 3^k faktöriyel tasarımlara bir alternatif olup, 2^k faktöriyel ve

tamamlanmamış blok tasarımlarının kombinasyonundan elde edilen bir tür rotasyonel tasarım yapmaktadır (Uğur, 2019). Box-Behnken tasarımları, küresel bir tasarım olmasından dolayı her faktörün minimum, orta ve maksimum değerinde olduğu 3 düzeyi inceler (Özden, 2020). Box-Behnken tasarımının en önemli avantajı, deneyin sayısının diğer deneysel tasarımlara göre daha az olması, faktör ve seviye limitlerinin kolayca ayarlanabilmesidir (Deveci vd., 2019).

3.3. Taguchi Metodu

Sanayi, gıda, tarım, malzeme, üretim ve imalat gibi birçok alanda parametre tasarımı, sistem tasarımı ve tolerans tasarımında kullanılan Taguchi Metodu, Japon bilim insanı Prof. Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiştir. Deneme yanılma yöntemine bağlı klasik deney tasarımı yerine maliyet, zaman ve enerjiden tasarruf edilen kaliteyi arttırmayı hedefleyen alternatif bir deneysel tasarım yöntemidir. Taguchi yöntemi, farklı parametre ve seviye dizinleri arasından optimum kombinasyonun belirlemek için kullanılan önemli bir yöntemdir. Taguchi yönteminde, Latin kareler serisine dayalı olan ortogonal diziler ile deney sayısı azaltılabilmektedir. Bu yöntemde parametre ve parametre seviyesine göre uygun ortogonal dizi seçildikten sonra deney tasarım tabloları elde edilir. Taguchi tarafından parametre (P) ve seviyelere (S) göre önerilen çeşitli ortogonal diziler Tablo 4 de verilmiştir. Tablo 4 dışında kalan parametre ve seviyeler için deney şartları daha kompleks olduğu için parametre ya da seviyeler düşürülerek uygun dizi haline dönüştürülür (Gökçe ve Taşgetiren, 2009; Pınarbaşı, 2019; Uray, 2023). Her bir parametrenin, her bir seviyesini içeren tüm kombinasyonlar Taguchi Yöntemi kullanılarak Tablo 4 de görüldüğü gibi Taguchi yönteminde diğer deneysel tasarım yöntemlerinden daha az sayıda deney ile sonuca ulaşılır (Gökçe ve Taşgetiren, 2009). Tablo 1 de gösterildiği gibi üç faktör için Taguchi yöntemi (L4) ortogonal dizine göre 4 deney ve üç tekrarlı olduğu zaman 12

deney yapılırken, YYM de MKT için 20 ve Box-Behken tasarımı için 17 deney yapılması gerekir. Tam faktöriyel tasarım için tekrarsız toplam sekiz ve üç tekrarlı 24 deney yapılması gerekir.

Tablo 4. Taguchi Ortogonal Dizi Seçim Tablosu

Parametre Sayısı	Seviye Sayısı							
	2		3		4		5	
	P=2,S=2	L4	P=2,S=3	L9	P=2,S=4	L'16	P=2,S=5	L25
	P=3,S=2		P=3,S=3		P=3,S=4		P=3,S=5	
	P=4,S=2		P=4,S=3		P=4,S=4		P=4,S=5	
	P=5,S=2		P=5,S=3		P=5,S=4		P=5,S=5	
	P=6,S=2	L8	P=6,S=3	L18	P=6,S=4		P=6,S=5	
	P=7,S=2		P=7,S=3		P=7,S=4		P=7,S=5	
	P=8,S=2		P=8,S=3		P=8,S=4	L'32	P=8,S=5	
	P=9,S=2		P=9,S=3		P=9,S=4		P=9,S=5	
	P=10,S=2	L11	P=10,S=3		P=10,S=4		P=10,S=5	L50
	P=11,S=2		P=11,S=3	L27			P=11,S=5	
	P=12,S=2		P=12,S=3				P=12,S=5	
	P=13,S=2		P=13,S=3					
	P=14,S=2	L16	P=14,S=3					
	P=15,S=2		P=15,S=3					
	P=16,S=2		P=16,S=3					
	P=17,S=2		P=17,S=3					
	P=18,S=2		P=18,S=3					
	P=19,S=2		P=19,S=3	L36				
	P=20,S=2		P=20,S=3					
	P=21,S=2		P=21,S=3					
	P=22,S=2	L32	P=22,S=3					
	P=23,S=2		P=23,S=3					
	P=24,S=2							
	P=25,S=2							
	P=26,S=2							
	P=27,S=2							
	P=28,S=2							
	P=29,S=2							
	P=30,S=2							
	P=31,S=2							

Taguchi metodu, faktör ve seviyelerin tekrarlanmadığı, farklı faktör ve seviyeleri dikkate alındığı tasarım matrisleri kullanarak deney sayısının azaltıldığı ve deney sonuçlarının daha kolay yorumlanabildiği bir yöntemdir. Ayrıca Taguchi metodu, faktörler arasındaki etkileşimi grafiklerle gösteren ve optimum parametreleri hedef değer ile tahmin eden güçlü ve güvenilir bir

deneyssel tasarım yöntemidir (Uray, 2023). Aynı zamanda Taguchi metodu bir optimizasyon yöntemi olup, optimum değerler istatistiksel olarak belirlenmektedir. Taguchi yöntemi birçok parametre ve parametre seviyesinin bulunduğu tasarımlarında parametrelerin hedef değer üzerine etkisinin ve parametrelerin etkileşiminin daha az deney ile belirlendiği bir tasarım yöntemidir. Taguchi yönteminde deney sonuçlarından elde edilen Sinyal/Gürültü (S/N) oranları kullanılmaktadır. Burada S sinyal faktörü olup, sistemin kalite değerini ifade eder. N değeri ise gürültüyü ifade etmektedir. N değeri, sistemin sonucunu olumsuz etkileyen ve deney tasarımına katılmayan faktörlerdir. Deneylerde istenilen hedef durum için S/N değerleri; en küçük-en iyi, hedef değer en iyi veya en büyük-en iyi durumuna göre belirlenir. Eşitlik 3, 4 ve 5’de n, deney tekrarı sayısını, Y_i , i. deneyin performans değerini, Y_{ort} ve σ ise sırasıyla deney sonuçlarının aritmetik ortalaması ve standart sapmasını gösterir (Uray, 2023).

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (3)$$

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Y_{ort}}{\sigma^2} \right) \quad (4)$$

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (5)$$

Taguchi yönteminde parametre etkilerini daha net belirlemek ve deney hatasını azaltmak için mümkün olduğunca deney tekrarlanmalıdır. Genellikle deney sonuçları 3 tekrarlı olarak yapılmaktadır. Deney sonucu, 3 deney tekrarının ortalaması alınarak belirlenir (Pınarbaşı, 2019). L4 Ortogonal dizine göre üç faktörlü, iki seviyeli ve üç tekrarlı deneye ait tasarım Tablo 5 de verilmiştir.

Tablo 5. L4 Ortogonal Dizi ve Parametre Yerleşimi

Deney Sayısı	Parametreler			Sonuçlar (3 Tekrar)				
	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y _{ort}	S/N
1	1	2	2	*	*	*	*	*
2	2	2	1	*	*	*	*	*
3	2	1	2	*	*	*	*	*
4	1	1	1	*	*	*	*	*

Taguchi yönteminde optimizasyon sonucunda önerilen optimum parametre seviyelerinde doğrulama deneyleri yapılarak yöntemin güvenirliliği test edilir. Taguchi yönteminde optimum seviyedeki çoklu S/N oranının tahmin edilen değeri (η_0) eşitlik 6 ile hesaplanır. Burada j faktör sayısı, η_m tüm deneysel çalışmalarda çoklu S/N oranlarının ortalama değeri ve i optimum faktör seviyelerindeki çoklu S/N oranlarıdır (Yıldız, 2019).

$$\eta = \eta_m + \sum_{i=1}^j (\eta_j - \eta_m) \quad (6)$$

Eşitlik 7 ile hesaplanan S/N oranının optimum parametre seviyeleri elde edilir. Burada η_0 optimum S/N oranıdır (Yıldız, 2019). Optimum koşullarda doğrulama deney yapılarak yöntem test edilir.

$$\eta_0 = \eta_m + (\eta_{X_1} - \eta_m) + (\eta_{X_2} - \eta_m) + (\eta_{X_3} - \eta_m) \quad (7)$$

Doğrulama deneylerinin sonuçları beklenen güven aralığının içinde ise bulunan faktör-seviye kombinasyonu optimum koşulları sağlamıştır ve deney tasarımı başarılıdır. Fakat doğrulama deneyi sonuçları güven aralığında yer almıyorsa deney tasarımı başarısızdır. Bu durumda proses tekrar gözden geçirilerek hatalar bulunup giderilirse deney tasarımı tekrar

edildiğinde optimum faktör-seviye kombinasyonu belirlenebilir (Pınarbaşı, 2019).

KAYNAKÇA

- Bilen, M., Ates, C., & Bayraktar, B. (2018). Determination of optimal conditions in boron factory wastewater chemical treatment process via response surface methodology. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(1).
- Deveci, E. Ü. , Gönen, Ç., Çetin, G. (2019). Mısır koçanında sülfürik asit, hidrojen peroksit ve ultrasound ön işlemleri ile çözünmüş şeker üretiminin optimizasyonu. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22 (4), 183-198. DOI: 10.17780/ksujes.645375
- Erdil, A. (2020). Deney Tasarımının Ürün ve Süreçlerin Geliştirilmesinde Önemi: Otomobil Endüstrisindeki Bir Fabrikada Uygulaması. *Iğdır Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (24), 527-558.
- Ervural, B. Ç. (2020). Varyans Analizi (ANOVA) ve Kovaryans Analizi (ANCOVA) İle Deney Tasarımı: Bir Gıda İşletmesinin Tedarik Süresine Etki Eden Faktörlerin Belirlenmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 923-941.
- Gökçe, B., & Taşgetiren, S. (2009). Kalite İçin Deney Tasarımı. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(1), 71-83.
- Hasgöl, Ö. (2011). Ürün ve Süreçlerin Geliştirilmesinde Deney Tasarımı: Gıda Sektöründe Bir Uygulama. *Journal of Management and Economics Research*, 9(15), 42-67.
- Karşlıoğlu, 2013, Fire Analizinde Deney Tasarımı. İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı Üretim Bilim Dalı, Doktora Tezi

- Kasap, Ş. (2006). F-4 Uçaklarında Yakıt Tüketimini Etkileyen Faktörlerin 2k Deneyleri Ve Taguchi Yöntemiyle Belirlenmesi (Master's thesis, Anadolu University (Turkey)).
- Neşeli, S., Asiltürk, İ., Yaldız, S., & Sağlam, H. (2012). Tornalama İşleminde Cevap Yüzey Metodu ile Kesme Kuvvetlerinin Kesme Parametrelerine Bağlı Olarak Modellenmesi. 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, Ankara.
- Oğuz, B., (2022), Deney Tasarım Nedenlerini Biliyorsanız Sonucu Değiştirebilirsiniz!, Mühendis ve Makina Güncel, 28-32
- Özcan, Ö., Samanlı, S. (2017). Kütahya/Altıntaş Grafitlerinin Kaba Flotasyon Parametrelerinin Box-Behnken Deney Tasarımı Kullanılarak Optimizasyonu ve Modellenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 19(56), 532-542.
- Özden, E. (2020). Elektrostatik toz boya proses parametrelerinin deney tasarımı yöntemleri ile optimizasyonu ve endüstriyel uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- Pınarbaşı, A. (2019). Al 7075'in CNC frezelenmesinde işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne ve kesme enerjisine etkisinin taguchi yöntemi ile optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Tarsus Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İmalat Mühendisliği ABD
- Sakallı, N. (2018). Al 365 Alaşımının Vickers Sertlik Değerine Etki Eden Parametrelerinin Optimizasyonu, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bitirme Projesi II
- Serin, G., Kahya, M., Özbayoğlu, M., Ünver, H. Ö. (2019). Tı6al4v Malzemesinin Tornalama İşleminde Özgül

Kesme Enerjisi ve Yüzey Pürüzlüğünün İncelenmesi ve Yapay Sinir Ağları Temelli Tahmin Modeli Geliştirilmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24(2), 517-536.

Şişman, Y., Demirtaş, H. (2016). Tam faktöriyel deney tasarımı ile kadastro haritalarının sayısallaştırılması. Electronic Journal of Map Technologies, 8(2), 87-98.

Uğur, L., 2019, 7075 Alüminyum Malzemesinin Frezelenmesinde Yüzey Pürüzlülüğünün Yanıt Yüzey Yöntemi ile İyileştirilmesi ,Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2019, 12(1), 326-335

Uray, K., Koçer, M., Uray, E., & Açikel, H. (2023). İnşaat Mühendisliği Deneysel ve Analitik Tasarımlarında Taguchi Yönteminin Kullanılabilirliğinin Araştırılması. International Journal of Engineering Research and Development, 15(2), 429-445.

Yapay Sinir Ağları Temelli Tahmin Modeli Geliştirilmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24(2), 517-536.

Yıldız, Z. (2011). Endüstriyel sıvılardan elektromanyetik filtrasyon yöntemiyle demir uzaklaştırılması ve proses parametrelerinin optimizasyonu, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya

Yıldız, Z. (2019). Analysis of magnetic performance for magnetized packed and unpacked bed. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 37(4), 1074-1086.

GAZ PEDALI TEPKİMESİNİ DEĞİŞTİREN CİHAZ PROTOTİPİ TASARIMI¹

Sururi YÜKSEL²

Zafer ORTATEPE³

1. GİRİŞ

Bu çalışma, içten yanmalı benzinli bir motora sahip aracın gaz pedalı tepkimesini değiştirerek farklı oranlarda ivmelenme karakteristiği elde etmektedir. Otomobillerde elektronik bileşenlerin kullanılmaya başlanmasına kadar birçok alanda mekanik sistemler kullanılmaktaydı. Mekanik bir sisteme örnek olarak, gaz pedalı ile gaz kelebeğinin birbirine gaz teli ile bağlantı kurulması verilebilir. Bu sistem, genellikle karbüratörlü motorlarda yakıt enjeksiyonu yapılması amacıyla, karbüratörde bulunan gaz kelebeğinin gaz pedalıyla doğrudan mekanik bir bağlantıyla kontrol edilmesi esasına dayanır. Kullanışlılık ve basitliğinin yanı sıra; gaz teli aşınması, kopması, gevşemesi, ani ivmelenmelerde uygun hava-yakıt karışımının yapılamaması, karbüratörden yanma odasına kadar sis formundaki yakıt hüzmelerinin emme manifoldu kıvrımlarında yakıt damlacıklarına dönüşmesi ve bu damlacıkların adezyon kuvvetiyle yüzeylere

¹ Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından yönetilen ve Ulusal Destek Programları kapsamında yer alan 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir.

² Lisans Öğrencisi, Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, syuksel21@posta.pau.edu.tr, ORCID: 0009-0007-7487-6127.

³ Doç. Dr., Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, zortatepe@pau.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7771-1677.

yapışması, hava-yakıt karışımının stokiyometrik oranda oluşmaması gibi önemli dezavantajlara sahiptir [1].

Günümüz içten yanmalı otomobillerinde, elektronik kartların kullanılmaya başlanmasıyla birlikte sistem dinamiği ve hata oranları iyileştirilmiştir. Otomobil karakteristiği kontrolünün bir denetleyici ile yapılması; motor dinamiği parametreleri (motor devri, krank mili ve kam mili konumu) ile motor termodinamiği parametrelerinin (sıcaklık, hava-yakıt karışımı ve yanma) sürekli takibi sayesinde, otomobil motorunun güvenli aralıklarda çalışması sağlanmakta ve aynı zamanda güvenlik ve konfor sistemlerinin de kontrolü gerçekleştirilerek sürüş kabiliyeti önemli ölçüde artırılmaktadır [2].

Mekanik bir sistem olan gaz teli yerine, elektronik bileşenli gaz pedalı ve bu pedaldan gelen sinyallerin değerlendirildiği elektronik kontrol ünitesi (ECU- electronics control unit) kullanılmaktadır. Otomobillerde elektronik bileşenler arasında haberleşme, genellikle CANBUS veri yolu üzerinden sağlanır [3]. ECU, değerlendirdiği veriyi gaz kelebeğine gönderir ve gaz kelebeği uygun açıklığa gelerek emme manifolduna hava girişi sağlar. Benzinli araçlarda motor, stokiyometrik hava-yakıt karışımı oranında çalışmaktadır [4]. Bu oran 14,7:1'dir. Bir aracın ivmelenmesi ve motorunun devirlenmesi, motor yüküne bağlıdır. Motor yükü iki sensör aracılığı ile ölçülebilir: emme manifoldu basıncı sensörü ve APPS (Accelerator Pedal Position Sensor) yani gaz pedalı konum sensörü.

Bu çalışmada, gaz pedalı konum sensöründen gelen sinyal değiştirilerek farklı sürüş modları elde edilmiştir. Otomobillerde hava-yakıt oranı AFR (Air Fuel Ratio) sistemi ile kontrol edilir [5]. Motora gelen hava miktarına karşılık olarak, enjektörlerden yakıt püskürtülür; homojen bir hava-yakıt karışımı (benzinli araçlar için ön karışım) oluşturulup yanma odasına alınır ve

yanma olayı gerçekleşir. Otomobillerin elektronik kontrol ünitelerinde, motor devri, motor yükü ve motor basıncına ait hava-yakıt oranlarının topografik haritaları ve tabloları mevcuttur [6]. Çeşitli sensörlerden gelen veriler, ECU tarafından bu tablolarda değerlendirilir ve motora gelen havaya karşılık gerekli yakıt miktarı püskürtülerek hava-yakıt dolgusu oluşturulur.

Bu çalışmada, gaz pedalı tepkimesini değiştiren cihaz prototipi projesinde OEM parça olan elektronik gaz pedalı (78110-02211) kullanılmıştır. Bu gaz pedalında iki adet potansiyometre bulunur ve otomobil ECU'suna iki ayrı sinyal iletilir. Her bir potansiyometrenin kendine ait güç kaynağı mevcuttur. İki adet potansiyometre bulunmasının temel amacı, otomobillerde doğru kontrol ve yüksek güvenilirlik sağlamaktır [7]. Gaz pedalında bulunan potansiyometreler analog sinyaller üretir ve bu sinyaller, elektronik kontrol ünitesine gitmeden önce bir elektronik kart olan Arduino'ya gönderilir. Arduino'ya gelen analog sinyal, analog dijital dönüştürücü (ADC - Analog Digital Converter) ile dijital sinyale dönüştürülür.

Çalışma kapsamında, içten yanmalı dört zamanlı bir motorun emme, sıkıştırma, ateşleme ve egzoz zamanlarının gerçekleşme süresi ile mekanik parçaların hareket karakteristiğine uygun olarak altı adet hızlı ivmelenme, altı adet yavaş ivmelenme ve bir adet normal mod olmak üzere toplamda 13 adet sürüş modu oluşturulmuş ve bu modların grafiksel gösterimleri Geogebra programı ile elde edilmiştir. Arduino'da oluşturulan dijital sinyal, belirlenen grafiklere uygun olarak darbe genişlik modülasyonu (PWM – Pulse Width Modulation) yöntemi ile çıkış sinyaline dönüştürülmüştür. PWM kullanımı, araçta emisyonlara olan etkiyi ve enerji kullanımını minimize etmek; aynı zamanda performans ve konforu iyileştirmek amacıyla tercih edilmiştir. Bu yaklaşım, sistem verimliliğini artırmaktadır [8].

Bu proje aracılığıyla, düşük sürüş modlarında içten yanmalı motorun yüksek devirlere çıkış süresi artırılmış; bu da aracın ilk hareketinde yanma odasına alınan yakıt miktarında azalmaya neden olmuştur. Yakıt tüketimindeki düşüşle birlikte egzoz emisyonlarında da azalma sağlanacağı öngörülmektedir. Bunun yanında, düşük sürüş modlarında pedal tepkime duyarlılığı azaltılarak aracın ivmelenme karakteristiği yumuşatılmış ve daha konforlu bir sürüş sağlanmıştır. Yüksek sürüş modları ile gaz pedalı tepkime duyarlılığı artırılmış, pedal desteklenmiş ve otomobil dinamik bir sürüşe hazır hale getirilmiştir. Elektronik gaz pedalı kullanan ve pedal tepkimesinde gecikme yaşayan otomobillerde, bu cihaz prototipi tepkime gecikmesini ortadan kaldırarak gaz pedalında ve motorda oluşan duyarsızlığa önemli bir çözüm sunmaktadır.

2. SÜRÜŞ GRAFİKLERİNİN OLUŞTURULMASI VE MATEMATİKSEL ANALİZİ

Normal bir içten yanmalı benzinli motorda, gaz kelebeği, gaz pedalı konum sensörüne orantılı olarak değişim göstermekte ve bu şekilde çalışmaktadır. Örneğin, gaz pedalına %40 oranında basılması durumunda, gaz kelebeği de %40 oranında açılacaktır. Gaz pedalı konum sensöründeki artış, lineer bir fonksiyonel ilişki sergilemektedir. Bu çalışma kapsamında uygulanacak modların incelenmesi, iki ana kısımda ele alınmıştır:

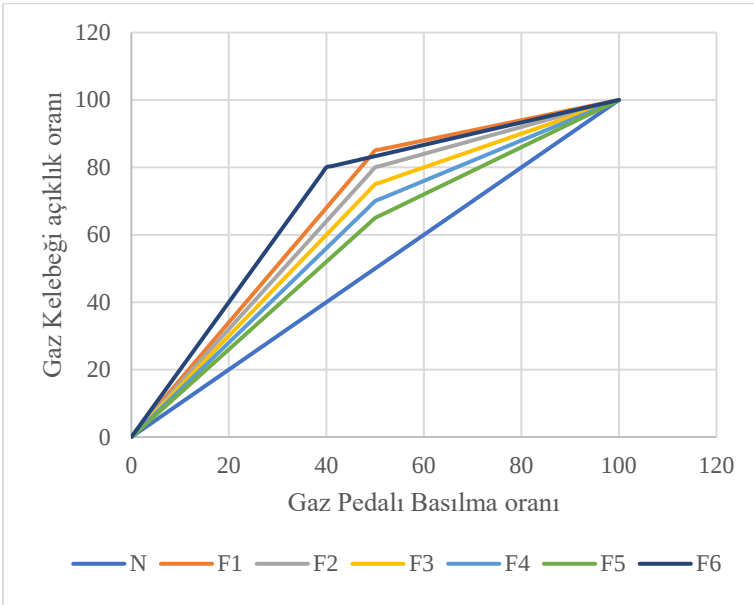
2.1. Sürüş Modlarının Elde Edilmesi

Yüksek ivmelenme sürüş modları, içten yanmalı motorun hava-yakıt karışımının yanma odasına alınarak yanma olayının gerçekleşmesi ve egzoz gazlarının atılması sürecine, yani motorun dört zamanlı çevrimine uygun şekilde tasarlanmıştır. Gaz tepkisinin aşırı artışı, ani ivmelenmelere yol açarak motor performansını olumsuz yönde etkileyebilir. Ayrıca, yanma olayının tam olarak gerçekleşmemesi durumunda egzoz

gazlarında yüksek emisyon seviyeleri gözlemlenmektedir. Bu sebeple, grafikler, içten yanmalı motor için optimum faydayı sağlayacak şekilde hazırlanmıştır.

Yüksek ivmelenme sürüş modları için şehir modu (F1, F2, F3 grafiklerine karşılık gelen) üç adet ve agresif mod için (F4, F5, F6 grafiklerine karşılık gelen) üç adet olmak üzere toplamda altı adet grafik oluşturulmuştur. Bu sürüş modları, aracın mevcut lineer fonksiyonlu artışına kıyasla parçalı fonksiyon özelliği göstermektedir. Tepkime duyarlılığını artırmak amacıyla tasarlanan grafiklerin eğimi, normal mod grafiği (N grafiği) ile karşılaştırıldığında daha yüksek olacak şekilde düzenlenmiştir. F6 grafiği hariç, diğer grafiklerde gaz pedalı konumu %0-50 aralığında gaz kelebeği açılma doğrusu daha yüksek eğime sahipken, %50-100 aralığında gaz kelebeği açılma doğrusu daha düşük eğime sahiptir. Yüksek ivmelenme sürüş modlarına ait oluşturulan grafik Şekil 1’de verilmektedir.

Şekil 1. Yüksek ivmelenme sürüş modları



Fonksiyonun ikinci parçasının eğiminin daha düşük olmasının nedeni, gaz kelebeği açılma oranının maksimum %100 ile sınırlı olmasıdır. Ayrıca, F6 grafiğinde %0-40 gaz pedalına basılma oranında gaz kelebeği açıklığı en fazla eğime sahip grafiklerdir.

Elde edilen çıkış sinyallerinin matematiksel değeri alınarak trigonometrik değerleri ile grafiklerin eğimleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Yüksek sürüş modu grafikleri eğim açıları

	Giriş Sinyali Eğimi	
	0-50 Bası Oranı	50-100 Bası Oranı
N Modu	$\tan 45^\circ$	$\tan 45^\circ$
	Çıkış Sinyal Eğimleri	
	0-50 Bası Oranı	50-100 Bası Oranı
F1 Modu	$\tan 59.5^\circ$	$\tan 16.7^\circ$
F2 Modu	$\tan 58^\circ$	$\tan 21.8^\circ$
F3 Modu	$\tan 56.3^\circ$	$\tan 26.6^\circ$
F4 Modu	$\tan 54.5^\circ$	$\tan 31^\circ$
F5 Modu	$\tan 52.4^\circ$	$\tan 35^\circ$
F6 Modu	$\tan 63.4^\circ$	$\tan 18.4^\circ$

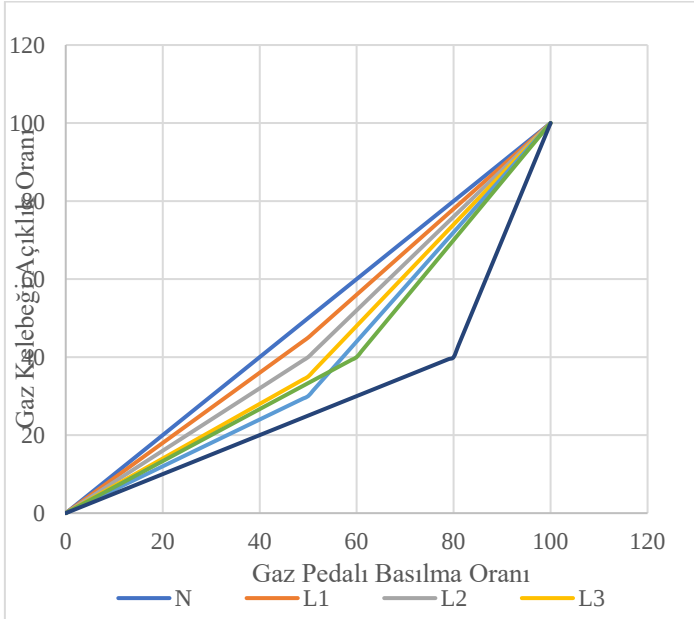
Düşük ivmelenme sürüş modları için belirlenen grafiklerden üç tanesi konfor modu (L1, L2, L3 grafiklerine karşılık gelen), üç tanesi ise ekonomi modu (L4, L5, L6 grafiklerine karşılık gelen) olmak üzere altı farklı grafikten oluşmaktadır. Konfor ve ekonomi modlarının başlıca özellikleri, taşıtın yakıt tüketimine olumlu yönde katkı sağlamaları ve egzoz emisyonları üzerinde iyileştirici etkiler yaratmalarıdır. Düşük ivmelenme sürüş modlarına ait oluşturulmuş grafik Şekil 2’de verilmektedir.

Düşük ivmelenme sürüş modu grafiklerinin eğimi, normal sürüş modu grafiği (N grafiği) ile karşılaştırıldığında daha düşük bir eğime sahiptir. Düşük ivmelenme sürüş modu grafikleri incelendiğinde gaz pedalından gelen sinyal Arduino’da

değerlendirilip istenilen mod grafiklerinin fonksiyonu oluşturulup bu fonksiyonlardan çıkış sinyalleri oluşturulmuştur.

Konfor modunda, gaz pedalına basılma oranı %0 ile %50 arasında değiştiğinde, tepkime duyarlılığı düşürülmüştür; bu durum, ivmelenmenin daha yavaş olmasına neden olur. Ekonomi sürüş modları ise, tepkime duyarlılığının en düşük olduğu grafiklerdir. Bu modlar, acemi kullanıcılar için otomobilin trafik ve otomobil davranışları adaptasyon sürecinde veya yakıt tüketimini minimuma indirmek isteyen kullanıcılar için uygundur. Düşük sürüş modlarında, grafiklerin lineer bir yapıya sahip olan normal modun aksine, parçalı fonksiyon özelliği gösterdiği gözlemlenmektedir. Grafiklerin eğim analizi aşağıda sunulmuştur. Düşük sürüş modu grafiklerinde grafiğin kırıldığı noktadan sonra gaz pedalı %100 bası oranına kadar yüksek eğimlidir ve maksimum bası oranında maksimum sinyal gitmektedir çünkü maksimum basılma oranında otomobilin bütün dinamik gücü sürücü tarafından talep edilmektedir.

Şekil 2. Düşük ivmelenme sürüş modları



Elde edilen çıkış sinyallerinin matematiksel değeri alınarak trigonometrik değerleri ile grafiklerin eğimleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Düşük sürüş modu grafikleri eğim açıları

	Giriş Sinyali Eğimi	
	0-50 Bası Oranı	50-100 Bası Oranı
N Modu	$\tan 45^\circ$	$\tan 45^\circ$
	Çıkış Sinyal Eğimleri	
	0-50 Bası Oranı	50-100 Bası Oranı
L1 Modu	$\tan 42^\circ$	$\tan 47.7^\circ$
L2 Modu	$\tan 38.6^\circ$	$\tan 50^\circ$
L3 Modu	$\tan 35^\circ$	$\tan 52.4^\circ$
L4 Modu	$\tan 31^\circ$	$\tan 54.5^\circ$
L5 Modu	$\tan 33.6^\circ$	$\tan 56.3^\circ$
L6 Modu	$\tan 26.6^\circ$	$\tan 71.6^\circ$

3. DENEYSEL SONUÇLAR

3.1. Deney Düzenekinin Oluşturulması

Bu çalışmada, OEM bir parça olan 78110-02211 model gaz pedalı kullanılmıştır. Bu gaz pedalında, iki adet potansiyometre işlevi gören konum sensörü bulunmaktadır. Her iki sensör, birbirinden bağımsız olarak çalışmaktadır. Birçok otomobil, genellikle birinci sensörden gelen veriyi kullanarak gaz kelebeği kontrolünü sağlar. Sensör 1, 0.8V ile 3.6V arasındaki voltaj aralığında çalışırken, sensör 2’den gelen veri denetim mekanizması ve sistem güvenliğini sağlamak amacıyla 1.6V ile 4.4V arasındaki voltaj aralığında işlemektedir. Bu iki sensör arasında her zaman 0.8V’lik bir fark bulunmaktadır bu miktar referans olarak kullanılarak elektronik sistem güvenliği sağlanmış olur. Eğer ki farkta bir değişim meydana gelirse, elektronik kontrol ünitesi (ECU – electronics control unit) durumu algılar ve sensör 1’in arızalandığını tespit eder. Bu durumda, gaz kelebeği kontrolü için yalnızca sensör 2’den gelen veri kullanılmaya başlanır.

Kullanılan gaz pedalında toplamda altı adet pin çıkışı bulunmaktadır. Bu pinlerden ikisi +5V pini, ikisi GND (toprak) pini, geri kalan ikisi ise sinyal pini olarak kullanılmaktadır. Potansiyometrelerin kendine ait besleme uçları bulunmaktadır.

Şekil 3. Gaz pedalı pin çıkışları

Pinout and Signal Description				
Sensor	Pin No	Cable Color (for Prius)	Signal Name	Signal Information
1	1	L	VPA	Signal Output
	2	B	EPA	GND
	3	Y	VCPA	+5V Supply
2	4	W	VPA2	Signal Output
	5	R	EPA2	GND
	6	G	VCP2	+5V Supply

Gaz pedal tepkimesini değiştiren cihaz prototipi çalışmasında, bir adet Arduino Uno elektronik kartı kullanılmıştır. Gaz pedalından gelen sinyaller, Arduino üzerinde giriş pini olarak kullanılmış ve Arduino'dan çıkış pinleri belirlenmiştir. Elektronik bileşenlerin entegrasyonu tamamlanarak, tüm sistem bir cihaz olarak yapılandırılmış ve işlevsel hale getirilmiştir.

3.2. Arduino Kodların Yazılması

Çalışma boyunca, elektronik kontrol birimi olarak yeterlilik gösteren ve maksimum verim elde edilebilecek bir platform olan Arduino UNO tercih edilmiştir. Yapılacak işlemlerin yazılıma dönüştürülmesi, Arduino'nun programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Yazılım sürecinde, bölüm 2.1'de oluşturulan grafiklerin fonksiyonları türetilmiştir. Bu fonksiyonlar, her %1'lik artış için sayısal değerler belirlenerek, bu değerlere dayalı olarak her bir

grafik için tablolar oluşturulmuştur. Şekil 4 örnek bir F6 sürüş moduna ait verileri göstermektedir.

Şekil 4. F6 sürüş modu grafik değerleri

0	1.9988	3.9988	5.9989	7.9989	9.9989	11.999	13.999	15.999	17.9991
19.9991	21.9991	23.9991	25.9992	27.9992	29.9992	31.9993	33.9993	35.9993	37.9994
39.9994	41.9994	43.9994	45.9995	47.9995	49.9995	51.9996	53.9996	55.9996	57.9997
59.9997	61.9997	63.9998	65.9998	67.9998	69.9998	71.9999	73.9999	75.9999	78
80	80.3333	80.6667	81	81.3333	81.6667	82	82.3333	82.6667	83
83.3333	83.6667	84	84.3333	84.6667	85	85.3333	85.6667	86	86.3333
86.6667	87	87.3333	87.6667	88	88.3333	88.6667	89	89.3333	89.6667
90	90.3333	90.6667	91	91.3333	91.6667	92	92.3333	92.6667	93
93.3333	93.6667	94	94.3333	94.6667	95	95.3333	95.6667	96	96.3333
96.6667	97	97.3333	97.6667	98	98.3333	98.6667	99	99.3333	99.6667
100									

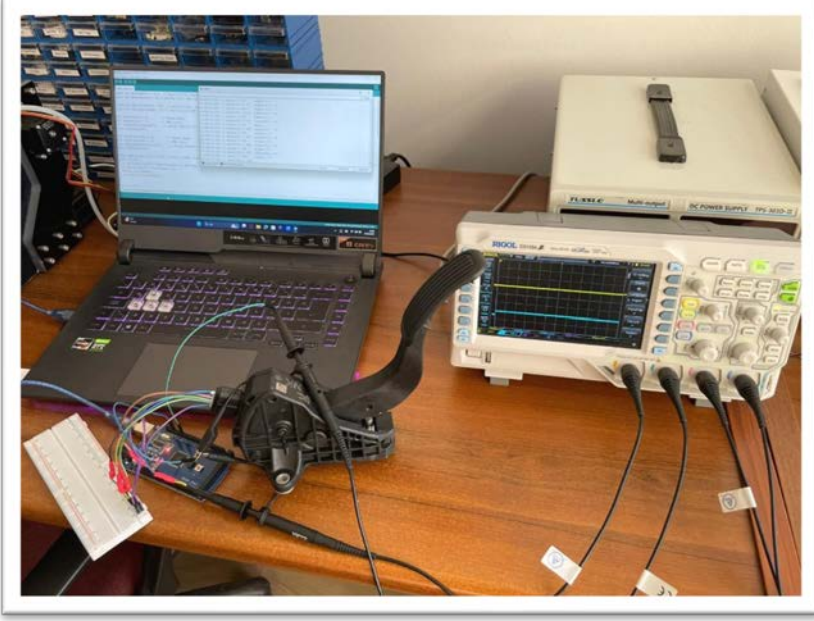
3.3. Sonuçlar

İlk aşamada, mevcut gaz pedalının tepkimesi değerlendirilmiş ve istenilen sürüş modlarının belirlenmesinde önemli bir rol oynanmıştır. Elektronik gaz pedalının avantajları ele alınarak, sürüş konforunun artırılması, yakıt tüketiminin ve egzoz emisyonlarının azaltılması ile motor performansının optimize edilmesine yönelik önemli iyileştirmeler sağlanmıştır. Bu iyileştirmeler hem çevresel hem de ekonomik açıdan faydalar sunan verimli bir sürüş deneyimi elde edilmesine olanak tanımaktadır.

Bu çalışma kapsamında değerlendirilen sürüş modları, gaz pedalı konum sensöründen gelen analog sinyallerin Arduino mikrodenetleyici kart üzerindeki ADC birimi ile işlenmesi neticesinde PWM sinyallerinin üretilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu sayede sürüş modlarına göre farklı pedal tepkileri elde edilmiştir. Gaz pedalındaki tepkinin ayarlanabilmesiyle sürücülere esneklik sağlamakta araç kullanımını daha verimli hale getirmektedir. Şekil 5'te gaz pedalı

tepkisini değiştiren cihaz prototipi ve deney düzeneęi gösterilmektedir.

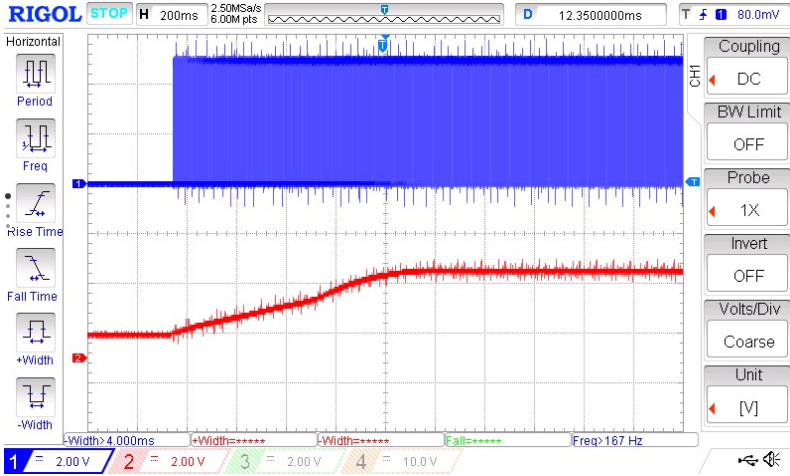
şekil 5. Gaz pedalı tepkisini değiştiren cihaz prototipi deney düzeneęi



Sürüş modlarını test etmek amacıyla, deney düzeneği osiloskop ile gözlemlenmiştir. Bu sayede, gelen analog sinyaller ile çıkış dijital sinyalleri arasındaki grafiksel veriler elde edilmiştir. Elde edilen veriler, çalışmanın belirlenen hedeflere uygun bir şekilde çalıştığını ve istenilen şartları başarıyla sağladığını doğrulamıştır.

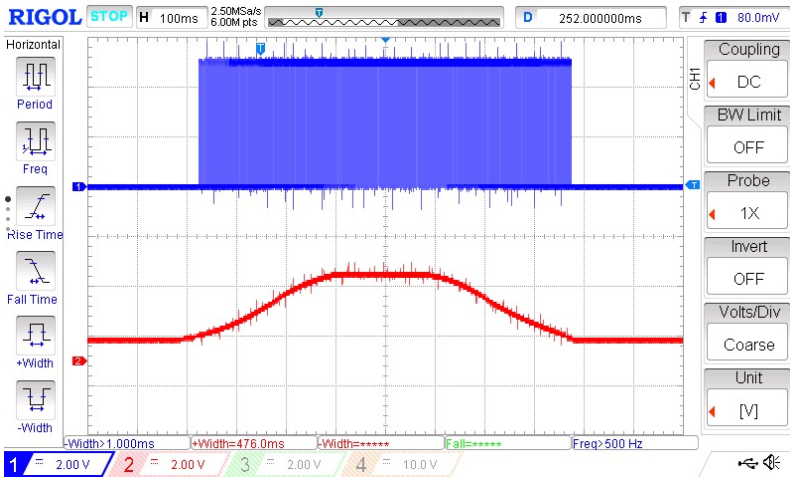
Osiloskop cihazına deney düzeneği bağlanıp F6 grafiği çalıştırıldığında şekil 6'da verilen grafik elde edilmiştir. Gaz pedalı konum sensörü sıfır konumunda iken %100 konumuna getirildiğinde gelen analog sinyal dijital sinyale dönüşmüş ve %40 bası oranında % 80 sinyal gönderebilmiştir. Bu sebeple gaz tepkisi duyarlılığı iki kat artırılabilmiştir.

Şekil 6. F6 modu osiloskop grafiği (mavi: PWM sinyali, kırmızı: gaz pedalından gelen analog veri)



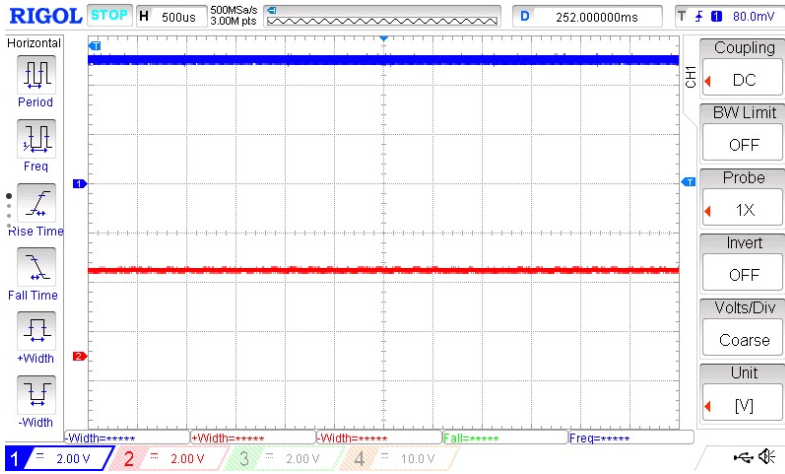
Gaz pedalı konum sensörünün sıfır noktasındaki durumu göz önünde bulundurulduğunda, gaz pedalına tam basıldığında ve ardından tekrar sıfır konumuna geri döndüğünde, PWM çıkış sinyalinin, giriş sinyaline kıyasla daha yüksek değerlere ulaştığı Şekil 7’de gözlemlenmektedir.

Şekil 7. F6 modu osiloskop grafiği(mavi: PWM sinyali, kırmızı: gaz pedalından gelen analog veri)



Ancak yalnızca %100 pedal konumunda, her iki sinyal arasında benzer tepki profilleri izlenmiştir. Tam gaz konumundan sıfır konumuna kadar olan aralıkta ise, PWM çıkış sinyali, giriş sinyaline oranla yine daha yüksek değerler göstermekte olup, yalnızca sıfır konumunda her iki sinyal arasında benzer bir tepki gözlemlenmektedir.

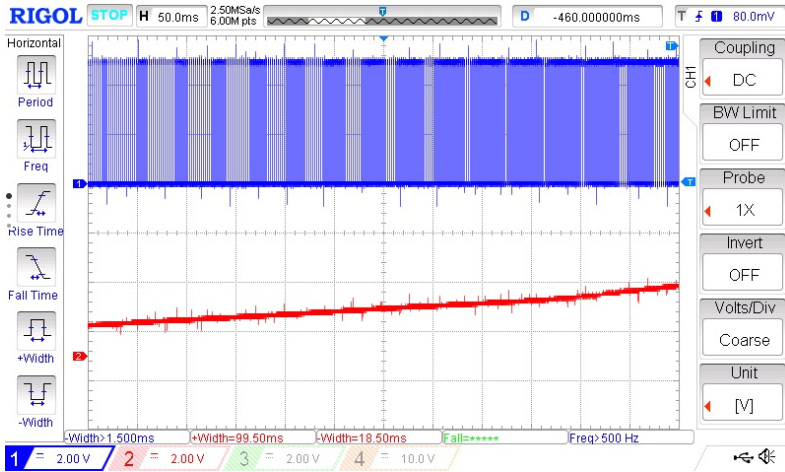
Şekil 8. F6 modu osiloskop grafiği (mavi: PWM sinyali, kırmızı: gaz pedalından gelen analog veri)



Gaz pedalına tam basıldığında (%100) sürücü otomobilin bütün gücünü talep ettiği için Arduino'dan %100 PWM sinyal çıkışı Şekil 8'deki gibi olmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere tam bası oranında analog sinyal ve dijital sinyal maksimum seviyede olmaktadır.

Sürücü gaz pedalına sıfır konumundan maksimum konuma kadar bastığında elektronik gaz pedal potansiyometresinden gelen analog sinyal F6 modu grafiği ve değerlerine göre Arduino'da değerlendirilip PWM çıkış sinyali oluşturulup otomobil ECU'suna gönderildiğinde elde edilen sinyaller Şekil 9'da verilmektedir.

Şekil 9. F6 modu osiloskop grafi(mavi: PWM sinyali, kırmızı: gaz pedalından gelen analog veri)



4. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, içten yanmalı motorlara sahip araçların gaz pedal tepkimesini elektronik olarak değiştiren, sürücü tercihinine göre farklı ivmelenme karakteristikleri sunabilen bir cihaz prototipi geliştirilmiştir. Projede, OEM elektronik gaz pedalı kullanılarak analog sinyaller elde edilmiş; bu sinyaller Arduino platformu üzerinde dijital olarak işlenmiş ve farklı sürüş modlarına göre PWM sinyalleri oluşturularak çıkışa aktarılmıştır. Oluşturulan 13 farklı sürüş modu, Geogebra ile tanımlanan grafik fonksiyonlarına göre tasarlanmış ve cihazın çıkış karakteristikleri bu modlara uygun şekilde ayarlanmıştır.

Elde edilen deneysel bulgular, sistemin beklenen şekilde çalıştığını ve sürüş modları arasında fark yaratabildiğini göstermektedir. Özellikle düşük sürüş modlarında pedal tepkimesinin yumuşatılması ile daha konforlu ve yakıt verimliliği yüksek bir sürüş sağlanırken; yüksek sürüş modlarında ise dinamik ve tepkisel bir ivmelenme karakteristiği elde edilmiştir.

Bu durum, aracın hem çevresel hem de ekonomik performansına olumlu katkılar sunmaktadır.

Geliştirilen bu sistem, mevcut araçlara retrofit olarak entegre edilebilecek potansiyele sahiptir ve özellikle sürücü alışkanlıklarına göre özelleştirilebilen araç kontrol sistemleri için önemli bir örnek oluşturmaktadır. Ayrıca bu prototip, otomotiv elektroniği, motor kontrol sistemleri ve araç konfor optimizasyonu gibi alanlarda lisans seviyesindeki mühendislik öğrencileri için öğretici bir uygulama niteliği taşımaktadır.

Gelecek çalışmalarda, sistemin farklı motor tipleri ve sürücü profilleri ile test edilerek yapay zekâ tabanlı adaptif sürüş modlarına entegrasyonu, gerçek yol koşullarında doğrulama testleri ve araç içi kullanıcı arayüzü geliştirme gibi yönlerde genişletilmesi mümkündür.

REFERANSLAR

- A. K. Yadav and P. Gaur, "Robust Adaptive Speed Control of Uncertain Hybrid Electric Vehicle Using Electronic Throttle Control with Varying Road Grade," *Nonlinear Dynamics*, vol. 76, no. 3, pp. 305–321, Nov. 2014, doi: 10.1007/s11071-013-1128-9.
- C. Rossi, A. Tilli, and A. Tonielli, "Robust Control of a Throttle Body for Drive-by-Wire Opening of Automotive Engines," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 993–100, 2000.
- D. Pavković, J. Deur, M. Jansz, and N. Perić, "Adaptive Control of Automotive Electronic Throttle," *Control Engineering Practice*, vol. 14, no. 2, pp. 121–136, 2006.
- E. Hashimoto, T. Ishiguro, Y. Yasui, and S. Akazaki, "High Reliability Electronic Throttle System Design," *SAE Technical Paper*, 2003, doi: 10.4271/2003-01-0708.
- H. Mauser and E. Thurner, "Electronic Throttle Control – A Dependability Case Study," *Journal of Universal Computer Science*, vol. 5, no. 10, pp. 730–741, 1999.
- H. Qi, C. Mayhew, Y. Zhai, S. Wang, D. Yu, J. B. Gomm, and Q. Zhang, "Fault Tolerant Control of Electronic Throttles with Friction Changes," *Electronics*, vol. 8, no. 9, pp. 918, 2019, doi: 10.3390/electronics8090918.
- H. Streib and H. Bischof, "Electronic Throttle Control (ETC): A Cost Effective System for Improved Emissions, Fuel Economy, and Drivability," *SAE Technical Paper*, 1996, doi: 10.4271/960338.
- M. Reichhartinger, M. Horn, and A. Hofer, "Control of an Electronic Throttle Valve for Drive-by-Wire Applications," *Mechanics and Model-Based Control of*

Smart Materials and Structures, Austria: Springer, 2010,
pp. 135–144, doi: 10.1007/978-3-211-99484-9_15.

THE FUSION OF LIDAR AND PHOTOGRAMMETRY FOR HIGH-FIDELITY DIGITAL TWINS: AN APPLICATION ON WOODEN MOTORBOATS

Burak GÖKSU¹

Can ATALAY²

Ersin AÇIKGÖZ³

Serdar METE⁴

1. INTRODUCTION

The concept of the digital twin has emerged as a transformative paradigm for bridging the physical and digital worlds, offering dynamic, data-rich virtual models of real-world assets, systems, and environments (Gao, Li, & Guo, 2024). The fidelity of any digital twin is fundamentally dependent on the quality of its underlying spatial data. Two remote sensing technologies form the cornerstone of this data acquisition:

¹ Department of Marine Engineering, Maritime Faculty, Zonguldak Bulent Ecevit University, Zonguldak, Turkey. burakgoksu@beun.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6152-0208.

² Department of Geomatics Engineering, Engineering Faculty, Zonguldak Bulent Ecevit University, Zonguldak, Turkey. canatalay@beun.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6499-8071.

³ Department of Maritime Business Administration, Maritime Faculty, Zonguldak Bulent Ecevit University, Zonguldak, Turkey. acikgozersin@beun.edu.tr, ORCID: 0000-0002-9672-5385.

⁴ Department of Marine Engineering, Maritime Faculty, Zonguldak Bulent Ecevit University, Zonguldak, Turkey. serdarmete@beun.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1199-0364.

- LiDAR (Light Detection and Ranging), an active sensing method, provides geometrically precise three-dimensional point clouds by emitting laser pulses. Its principal advantages are high accuracy and the ability to penetrate vegetation and operate in varied lighting conditions, making it ideal for generating foundational Digital Elevation Models (DEMs) and capturing complex structural geometries (Aguilar & Mills, 2008; Haring, 2021).
- Photogrammetry, an optical method, reconstructs 3D models from overlapping images using techniques like Structure-from-Motion (SfM). It excels at capturing high-resolution colour and texture, which provides crucial visual realism to the digital model (Janiszewski, Prittinen, Torkan, & Uotinen, 2023; McNicol et al., 2021).

By combining LiDAR's geometric accuracy with photogrammetry's rich visual information, practitioners can create models that are both metrically precise and visually compelling, mitigating the inherent limitations of each method (Jost, Sary, & Heining, 2022; Konstantakis et al., 2024).

The deployment of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Mobile Mapping Systems (MMS) has revolutionized data acquisition, enabling rapid, cost-effective surveys over vast and often inaccessible areas (McNicol et al., 2021; Themistocleous, Evagorou, Mettas, & Hadjimitsis, 2022).

Consequently, multi-temporal monitoring is an integral component, allowing for continuous tracking of environmental and structural changes over time through periodically repeated surveys (Borgogno Mondino, 2015; Lee, Song, Kim, & Won, 2020). Furthermore, modern digital twins are designed with a multi-scalar architecture, allowing analysis to occur seamlessly at scales ranging from individual building components to entire

urban districts, providing a truly holistic perspective (Agbossou, 2023; Jost et al., 2022).

In addition to established applications in urban planning and forestry, the integration of LiDAR and photogrammetry is revolutionizing the management of coastal and riverine environments. Within the maritime sector, these digital twin methodologies are essential for monitoring the complex dynamics of coastlines (Garcin, Desmazes, Lerma, Gouguet, & Météreau, 2020; Pinton, Canestrelli, Wilkinson, Ifju, & Ortega, 2021). The ability to generate high-resolution models of coastal geomorphology—including features like dunes, sediment patterns, and erosion scars—provides an unprecedented understanding of processes such as beach erosion and dune migration. By accurately reconstructing river morphologies and coastal landscapes, these techniques form the backbone of modern environmental management and risk assessment in the vulnerable coastal zone (Garcin et al., 2020; Pinton et al., 2021).

2. METHODOLOGICAL FRAMEWORK: FROM DATA ACQUISITION TO FUSION

UAV-based systems have revolutionized data acquisition for both LiDAR and photogrammetry, enabling rapid surveys over large or inaccessible areas like forests and urban centres with minimal cost and risk (Lato, Bevan, & Fergusson, 2012; McNicol et al., 2021). Mobile Mapping Systems (MMS), often vehicle-mounted, are highly efficient for capturing extensive linear infrastructure like road networks and urban corridors, integrating LiDAR with cameras and inertial sensors for continuous data collection (Themistocleous et al., 2022; Yadav, Kushwaha, Mokros, Chudá, & Pondelík, 2023). For indoor or highly detailed applications, terrestrial and handheld scanners are employed (Chio & Hou, 2021). Methodological innovations such as cross-

polarized imaging to reduce glare on reflective surfaces and gigapixel photogrammetry for capturing fine-scale textures further enhance data quality (Bartoš, Pukanská, Kseňak, Gašinec, & Bella, 2023; Lato et al., 2012).

The core challenge lies in data fusion: harmonizing the heterogeneous datasets from LiDAR and photogrammetry into a unified coordinate system. This process requires precise spatial registration and sophisticated algorithms to minimize errors and ensure coherence between the geometric point cloud and the photographic textures (Hu et al., 2012; Jost et al., 2022).

Machine learning and AI are increasingly integral to automating and scaling the digital twin workflow. Deep learning algorithms are used for automated segmentation and classification of complex point clouds, for instance, distinguishing between different types of vegetation or identifying road markings (Deng, Liu, & Cheng, 2024; Suleymanoglu, Soykan, & Toth, 2024). AI is also used to optimize data capture itself, for instance, by autonomously planning the most efficient flight paths for UAVs to ensure complete coverage (Zhan, Zhang, Wang, Diao, & Qi, 2024).

3. GENERAL APPLICATION DOMAINS

In urban environments, digital twins provide a multi-scalar platform for planning, simulation, and management (Agbossou, 2023). They are used for structural health monitoring, where repeated scans can detect deformations and damage in critical infrastructure like bridges and buildings (Gardner, Dal Borgo, Ruffini, Zhu, & Hughes, 2020; von Benzon & Chen, 2024). For transportation, these models provide the high-definition maps essential for autonomous vehicle navigation and traffic flow analysis (Suleymanoglu et al., 2024).

In forestry, the fusion of LiDAR's canopy penetration with photogrammetry's textural detail allows for precise estimation of biomass, canopy height, and forest health (Lisein, Pierrot-Deseilligny, Bonnet, & Lejeune, 2013; Niță, 2021). In agriculture, UAV-based surveys support precision farming by monitoring crop health and yield variation (Zhang, Wan, Cao, Zhang, & Wang, 2021). In geohazard management, digital twins are used for early warning systems by detecting minute surface deformations on landslide-prone slopes or in mining areas (Ardizzone, Cardinali, Galli, Guzzetti, & Reichenbach, 2007; Zhan et al., 2024).

These high-fidelity models serve as a permanent digital archive, facilitate restoration planning, and enable virtual access for research and public engagement (Konstantakis et al., 2024; Themistocleous et al., 2022), and also general application samples are shown in Figure 1.

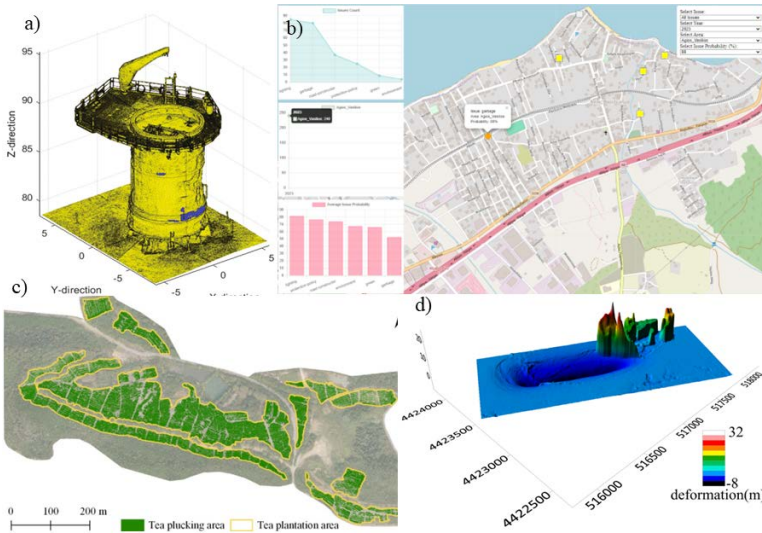


Figure 1. General application samples (a: Mapping of damaged points (von Benzon & Chen, 2024), b: Digital twin of a map (Gkontzis, Kotsiantis, Feretzakis, & Verykios, 2024), c: Planted area detection (Zhang et al., 2021), d: Modelling of basin subsidence (Zhan et al., 2024))

4. APPLICATION OPPORTUNITIES AND TRENDS IN THE MARITIME SECTOR

Shipbuilders and shipyards are increasingly utilizing these methodologies to create precise digital replicas of vessel components early in the design process, thereby allowing integrative virtual testing, aerodynamic optimization, and structural simulations prior to physical fabrication (Giering & Dyck, 2021; Zhou et al., 2024). In addition to improving operational efficiencies, digital twin technology plays a transformative role in reimagining the design (see Figure 2) and construction phases of new maritime assets, enabling early identification of design challenges and reducing the risk of costly modifications.



Figure 2. Rebuilding of a historical boat model (Martorelli, Pensa, & Speranza, 2014)

By capturing detailed scanned data of existing ships, maintenance teams can conduct non-destructive inspections that detect anomalies such as corrosion, cracks, or structural deformations with exceptional precision (Madusanka, Fan, Yang, & Xiang, 2023).

Advanced LiDAR mapping techniques facilitate the generation of detailed terrain models of quaysides, container storage areas, and navigational channels, while photogrammetry contributes precise visual documentation of infrastructure conditions (see Figure 3) (Peña-Molina et al., 2024; K. Wang, Hu, Zhou, Zun, & Qian, 2021). These digital representations enable port authorities to monitor structural health, optimize logistics,

and manage capacity effectively by integrating real-time sensor data with historical mapping records (Peña-Molina et al., 2024).



Figure 3. Digital twin application for a container port (K. Wang et al., 2021)

By continuously scanning these structures, digital twins can detect subtle shifts in geometry or unexpected deformations that may signal impending failures (Madusanka et al., 2023).



Figure 4. Planned route tracking and obstacle detecting application by LiDAR mapping (Raza, Prokopova, Huseynzade, Azimi, & Lafond, 2022)

Digital twins generated through LiDAR mapping and photogrammetry now serve as critical inputs into autonomous navigation and control systems, essential for safe manoeuvring in congested port environments and for collision avoidance in open waters (Zhou et al., 2024). Calibrated digital twins allow vehicle control systems to access real-time environmental and structural information, thus increasing the reliability and safety of autonomous navigation algorithms (Madusanka et al., 2023).

When integrated with meteorological and oceanographic data, these models enhance the accuracy of route planning systems, improving transit times while contributing to fuel efficiency and reduced emissions (Peña-Molina et al., 2024).

High-density LiDAR and photogrammetric data, captured repeatedly over time, facilitate the development of multi-temporal digital twins that can track gradual changes in coastal erosion, sediment deposition, and structural deformations in port installations (Peña-Molina et al., 2024).

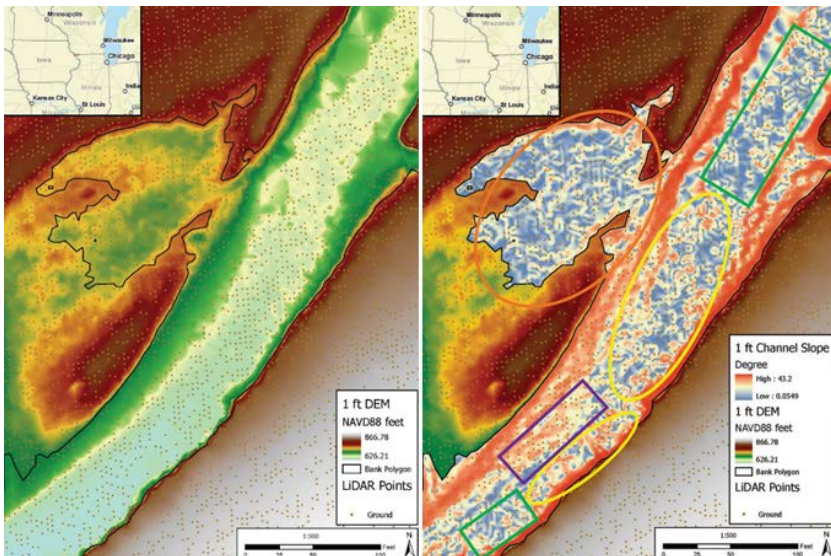


Figure 5. Surface elevation illustration and water depth detection by LiDAR mapping (Haring, 2021)

Figure 5 compares a river's digital elevation model (left) with a derived map of its channel slope (right) to reveal fine-scale details of the riverbed topography.

Detailed geometric models from LiDAR, combined with the rich visual context from photogrammetry, allow for sophisticated simulations of accidents, collisions, and structural failures, enabling decision-makers to develop robust contingency plans (Giering & Dyck, 2021). By simulating the effects of natural disasters such as tsunamis or hurricanes, operators can identify vulnerabilities and improve emergency response protocols (Madusanka et al., 2023).



Figure 6. Wharf monitoring process sample of a port implementation (K. Wang et al., 2021)

5. CHALLENGES AND FUTURE DIRECTIONS

Maintaining geospatial accuracy across large, multi-sensor datasets requires robust error correction and uncertainty quantification (Themistocleous et al., 2022).

The future of digital twins is geared towards creating more dynamic, interconnected, and predictive systems. Key development areas include:

- **Real-time Integration:** Convergence with 5G connectivity and edge computing will enable near-instantaneous updating of digital twins from live sensor feeds, moving from static snapshots to truly dynamic representations (Gao et al., 2024).
- **Enhanced Automation:** AI and deep learning will continue to automate data processing and feature extraction, reducing manual intervention and improving scalability (L. Wang et al., 2024).
- **Interoperability and Security:** The integration of technologies like blockchain is being explored to ensure data integrity, provenance, and secure sharing among multiple stakeholders in applications like asset lifecycle management (Götz, Karlsson, & Yitmen, 2022).

6. CASE APPLICATION ON SMALL TRADITIONAL MOTORBOATS

6.1. Digital Preservation of Small Traditional Motorboats Using LiDAR and Photogrammetry

By integrating these remote sensing techniques, researchers can develop high-fidelity digital twins—virtual replicas that capture the precise geometry and visual characteristics of these culturally significant vessels (Raza et al., 2022; Tomczak et al., 2024). This approach supports everything from operational efficiency and predictive maintenance to heritage conservation and advanced performance simulation (Legaz & Gaspar, 2024; Tomczak et al., 2025).

6.2. Core Methodologies and Digital Twin Integration

LiDAR provides highly accurate 3D point clouds that define a vessel's geometric structure, performing reliably even in the variable lighting conditions of maritime environments (Grau et al., 2021; Raza et al., 2022). Photogrammetry supplements this by generating photorealistic textures and colour, capturing the aesthetic qualities of the boat (Tomczak et al., 2025).

This virtual model can be continuously updated to reflect the boat's current physical state, enabling real-time monitoring and analysis (Tomczak et al., 2025). For traditional boats, which often lack original blueprints, this digital replica is invaluable for simulating structural stress, hydrodynamic performance, and the effects of potential retrofits without physically altering the vessel (Raza et al., 2022).

6.3. Key Applications: Heritage, Maintenance, and Simulation

Small traditional motorboats are often handcrafted artefacts whose design and craftsmanship are at risk of being lost. Digital twins serve as a permanent, non-invasive record, supporting documentation, virtual exhibits, and faithful restoration efforts (Raza et al., 2022). Key applications include:

- **Non-Invasive Inspection and Predictive Maintenance:** By capturing fine-scale details, LiDAR and photogrammetry allow for detailed analysis of hull integrity, corrosion, and surface wear without physical contact. This data enables a shift from reactive repairs to predictive maintenance, extending the vessel's lifespan and reducing costs (Raza et al., 2022; Tomczak et al., 2025).
- **Reverse Engineering and Restoration:** Digital models allow for the accurate reconstruction of a vessel's design, which is particularly useful when original plans are

unavailable. This facilitates the faithful reproduction of damaged or missing parts and guides complex restoration work (Raza et al., 2022).

- **Performance Simulation and Optimization:** High-fidelity digital twins enable dynamic simulations to predict a boat's hydrodynamic behaviour, test design modifications, and optimize performance metrics like fuel efficiency in a risk-free virtual environment (Tomczak et al., 2025).

6.4. Scanned Motorboats within the Scope of the Study

Traditional methods of documenting history, particularly marine boats, may struggle to effectively retain and assess necessary intricate geometry and details. These limits are particularly evident when examining the distinctive attributes of wooden motorboats, which frequently exhibit original designs and a history of modifications. This study examines the collaborative application of LiDAR scanning and photogrammetry to generate very precise and detailed reproductions of these vessels. Figure 7 illustrates that the research encompasses various motorboats (ranging from 5 to 12 meters), thereby emphasizing the versatility and efficacy of this integrated methodology in generating detailed 3D models that accurately represent both the overall shape and surface textures, essential for historical documentation, conservation initiatives, and engineering assessments.

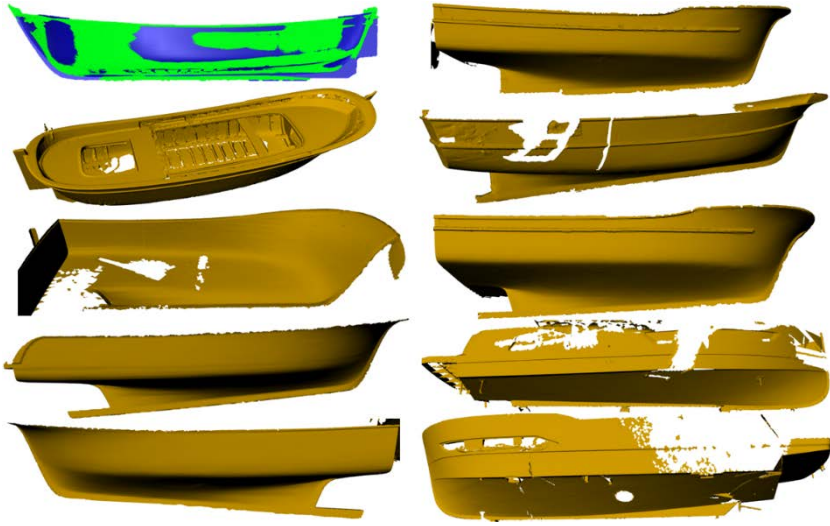


Figure 7. Samples from the scanned motorboat hulls

6.5. Technical Solutions and Emerging Trends

Overcoming the challenges of data acquisition in maritime environments—such as salt spray and dynamic conditions—has been a key focus. Advanced calibration, adaptive filtering algorithms, and robust data fusion techniques are essential for creating accurate and reliable models (Danchenkov & Belov, 2023; Raza et al., 2022). The use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for both photogrammetry and LiDAR surveys has also become instrumental, offering a flexible and cost-effective way to map vessels and their surrounding coastal environments (Grau et al., 2021).

Future trends point towards greater integration and automation. The incorporation of Artificial Intelligence (AI) can automate anomaly detection, while the addition of multiple sensors allows for dynamic, real-time updates to the digital twin (Tomczak et al., 2025). Furthermore, the use of Augmented Reality (AR) to overlay digital information onto the physical vessel promises to revolutionize on-site maintenance and training (Raza et al., 2022). As these technologies become more accessible

and scalable, they will play a crucial role in ensuring the sustainable management and cultural preservation of traditional motorboats.

7. CONCLUSION

Utilizing LiDAR's geometric accuracy and photogrammetry's textural depth enables the creation of intricate, precise, and visually striking models for several applications. This comprehensive technique encourages substantial innovation in various domains, such as urban planning, infrastructure management, environmental monitoring, and cultural heritage conservation.

In urban systems, digital twins provide a multi-scalar framework for planning, simulation, and administration. They are utilized for structural health monitoring, where frequent scans can identify deformations and damage in essential infrastructure such as bridges and buildings. These models furnish high-definition maps crucial for autonomous vehicle navigation and traffic flow analysis. When combined with sensors and GIS, they form the foundation of Smart City programs, facilitating real-time surveillance of energy consumption, environmental conditions, and public services.

Notwithstanding the considerable advancements achieved, some obstacles endure, especially in preserving geographic precision within extensive, multi-sensor datasets, necessitating effective error rectification and uncertainty assessment. The efficient management, processing, and real-time updating of extensive databases pose considerable computational hurdles. The future of digital twins is oriented towards developing more dynamic, linked, and predictive systems. Critical development domains encompass real-time integration, where the amalgamation of internet connection with edge computing

facilitates near-instantaneous updates from live sensor data, transitioning from static snapshots to dynamic representations. Augmented automation using AI and deep learning will persist in streamlining data processing and feature extraction, minimizing manual involvement and enhancing scalability. The exploration of technologies such as blockchain is underway to guarantee data integrity, provenance, and secure sharing among various stakeholders in applications like asset lifecycle management, while addressing interoperability and security issues. Continuous progress in AI, sensor technology, and networking is facilitating the emergence of advanced predictive and autonomous digital twins, which are expected to improve decision-making and sustainable management in a progressively data-centric environment.

This research has been granted by Zonguldak Bulent Ecevit University (project number: 2024-16545131-01) and TUBITAK (project number: 223M509).

REFERENCES

- Agbossou, I. (2023). Multi-Scalar Urban Digital Twin Design: Architecture and OpenUSD Standards Based Methodology. *PriMera Scientific Engineering*, 4(1). <https://doi.org/10.56831/psen-04-100>
- Aguilar, F. J., & Mills, J. P. (2008). Accuracy assessment of lidar-derived digital elevation models. *The Photogrammetric Record*, 23(122), 148–169. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2008.00476.x>
- Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2007). Identification and mapping of recent rainfall-induced landslides using elevation data collected by airborne Lidar. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(6), 637–650. <https://doi.org/10.1177/216507990405201108>
- Bartoš, K., Pukanská, K., Kseňak, Ľ., Gašinec, J., & Bella, P. (2023). Cross-Polarized SfM Photogrammetry for the Spatial Reconstruction of Challenging Surfaces, the Case Study of Dobšiná Ice Cave (Slovakia). *Remote Sensing*, 15(18), 4481. <https://doi.org/10.3390/rs15184481>
- Borgogno Mondino, E. (2015). Multi-temporal image co-registration improvement for a better representation and quantification of risky situations: the Belvedere Glacier case study. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(5–7), 362–378. <https://doi.org/10.1080/19475705.2014.927804>
- Chio, S. H., & Hou, K. W. (2021). Application of a hand-held lidar scanner for the urban cadastral detail survey in digitized cadastral area of taiwan urban city. *Remote Sensing*, 13(24), 4981. <https://doi.org/10.3390/rs13244981>
- Danchenkov, A., & Belov, N. (2023). Comparative Analysis of

- the Unmanned Aerial Vehicles and Terrestrial Laser Scanning Application for Coastal Zone Monitoring. *Russian Journal of Earth Sciences*, 1–15. <https://doi.org/10.2205/2023es000854>
- Deng, X., Liu, Y., & Cheng, X. (2024). Forest canopy height modelling based on photogrammetric data and machine learning methods. *Photogrammetric Record*, 39(187), 615–640. <https://doi.org/10.1111/phor.12507>
- Gao, L., Li, S., & Guo, H. (2024). Visualization and Analysis of Research Areas and Hot Topics in the Field of Digital Twins. *IEEE Access*, 12, 26897–26904. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3365291>
- Garcin, M., Desmazes, F., Lerma, A. N., Gouguet, L., & Météreau, V. (2020). Contribution of Lightweight Revolving Laser Scanner, HiRes UAV LiDARs and Photogrammetry for Characterization of Coastal Aeolian Morphologies. *Journal of Coastal Research*, 95(SI), 1094–1100. <https://doi.org/10.2112/SI95-213.1>
- Gardner, P., Dal Borgo, M., Ruffini, V., Zhu, Y., & Hughes, A. (2020). Towards the Development of a Digital Twin for Structural Dynamics Applications. *Model Validation and Uncertainty Quantification, Volume 3: Proceedings of the 38th IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics 2020*, 165–179. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47638-0_18
- Giering, J. E., & Dyck, A. (2021). Maritime Digital Twin architecture A concept for holistic Digital Twin application for shipbuilding and shipping. *At-Automatisierungstechnik*, 69(12), 1081–1095. <https://doi.org/10.1515/auto-2021-0082>
- Gkontzis, A. F., Kotsiantis, S., Feretzakis, G., & Verykios, V. S.

- (2024). Enhancing Urban Resilience: Smart City Data Analyses, Forecasts, and Digital Twin Techniques at the Neighborhood Level. *Future Internet*, 16(2), 47. <https://doi.org/10.3390/fi16020047>
- Götz, C. S., Karlsson, P., & Yitmen, I. (2022). Exploring applicability, interoperability and integrability of Blockchain-based digital twins for asset life cycle management. *Smart and Sustainable Built Environment*, 11(3), 532–558. <https://doi.org/10.1108/SASBE-08-2020-0115>
- Grau, J., Liang, K., Ogilvie, J., Arp, P., Li, S., Robertson, B., & Meng, F. R. (2021). Using unmanned aerial vehicle and lidar-derived DEMs to estimate channels of small tributary streams. *Remote Sensing*, 13(17), 3380. <https://doi.org/10.3390/rs13173380>
- Haring, C. (2021). *Data Collection Tools for River Geomorphology Studies: LiDAR and Traditional Methods*. Retrieved from <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GPO-STYLEMANUAL-2016/pdf/GPO->
- Hu, X., Zhang, Z., Duan, Y., Zhang, Y., Zhu, J., & Long, H. (2012). Lidar Photogrammetry and Its Data Organization. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 181–184. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xxxviii-5-w12-181-2011>
- Janiszewski, M., Prittinen, M., Torkan, M., & Uotinen, L. (2023). Rapid tunnel scanning using a 360-degree camera and SfM photogrammetry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1124(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1124/1/012010>

- Jost, T. E., Stary, C., & Heininger, R. (2022). Geo-Spatial Context Provision for Digital Twin Generation. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(21), 10988. <https://doi.org/10.3390/app122110988>
- Konstantakis, M., Trichopoulos, G., Aliprantis, J., Gavogiannis, N., Karagianni, A., Parthenios, P., ... Caridakis, G. (2024). An Improved Approach for Generating Digital Twins of Cultural Spaces through the Integration of Photogrammetry and Laser Scanning Technologies. *Digital*, 4(1), 215–231. <https://doi.org/10.3390/digital4010011>
- Lato, M. J., Bevan, G., & Fergusson, M. (2012). Gigapixel imaging and photogrammetry: Development of a new long range remote imaging technique. *Remote Sensing*, 4(10), 3006–3021. <https://doi.org/10.3390/rs4103006>
- Lee, S. B., Song, M., Kim, S., & Won, J. H. (2020). Change monitoring at expressway infrastructure construction sites using drone. *Sensors and Materials*, 32(11), 3923–3933. <https://doi.org/10.18494/SAM.2020.2971>
- Legaz, M. J., & Gaspar, H. M. (2024). Computer Vision for Reverse Engineering in the Design, Simulation and Operation of Maritime Systems. *Proceedings - European Council for Modelling and Simulation, ECMS*, 38(1), 234–241. <https://doi.org/10.7148/2024-0234>
- Lisein, J., Pierrot-Deseilligny, M., Bonnet, S., & Lejeune, P. (2013). A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery. *Forests*, 4(4), 922–944. <https://doi.org/10.3390/f4040922>
- Madusanka, N. S., Fan, Y., Yang, S., & Xiang, X. (2023). Digital Twin in the Maritime Domain: A Review and Emerging

- Trends. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(5), 1021. <https://doi.org/10.3390/jmse11051021>
- Martorelli, M., Pensa, C., & Speranza, D. (2014). Digital Photogrammetry for Documentation of Maritime Heritage. *Journal of Maritime Archaeology*, 9(1), 81–93. <https://doi.org/10.1007/s11457-014-9124-x>
- McNicol, I. M., Mitchard, E. T. A., Aquino, C., Burt, A., Carstairs, H., Dassi, C., ... Disney, M. I. (2021). To What Extent Can UAV Photogrammetry Replicate UAV LiDAR to Determine Forest Structure? A Test in Two Contrasting Tropical Forests. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(12), e2021JG006586. <https://doi.org/10.1029/2021JG006586>
- Niță, M. D. (2021). Testing forestry digital twinning workflow based on mobile lidar scanner and AI platform. *Forests*, 12(11), 1576. <https://doi.org/10.3390/f12111576>
- Peña-Molina, E., Moya, D., Tomé, J. L., Marino, E., Fajardo-Cantos, Á., González-Romero, J., ... de las Heras, J. (2024). Postfire damage zoning with open low-density LiDAR data sources in semi-arid forests of the Iberian Peninsula. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 33, 101114. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101114>
- Pinton, D., Canestrelli, A., Wilkinson, B., Ifju, P., & Ortega, A. (2021). Estimating ground elevation and vegetation characteristics in coastal salt marshes using uav-based lidar and digital aerial photogrammetry. *Remote Sensing*, 13(22), 4506. <https://doi.org/10.3390/rs13224506>
- Raza, M., Prokopova, H., Huseynzade, S., Azimi, S., & Lafond, S. (2022). Towards Integrated Digital-Twins: An Application Framework for Autonomous Maritime

- Surface Vessel Development. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), 1469.
<https://doi.org/10.3390/jmse10101469>
- Suleymanoglu, B., Soycan, M., & Toth, C. (2024). 3D Road Boundary Extraction Based on Machine Learning Strategy Using LiDAR and Image-Derived MMS Point Clouds. *Sensors*, 24(2), 503.
<https://doi.org/10.3390/s24020503>
- Themistocleous, K., Evagorou, E., Mettas, C., & Hadjimitsis, D. G. (2022). The use of digital twin models to document cultural heritage monuments. *Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications XIII*, 12268, 55–64. <https://doi.org/10.1117/12.2636332>
- Tomczak, A., Stępień, G., Kogut, T., Jedynak, Ł., Zaniewicz, G., Łacka, M., & Bodus-Olkowska, I. (2025). Development of a Digital Twin of the Harbour Waters and Surrounding Infrastructure Based on Spatial Data Acquired with Multimodal and Multi-Sensor Mapping Systems. *Applied Sciences*, 15(1), 315.
<https://doi.org/10.3390/app15010315>
- von Benzon, H. H., & Chen, X. (2024). Mapping damages from inspection images to 3D digital twins of large-scale structures. *Engineering Reports*, 1–16.
<https://doi.org/10.1002/eng2.12837>
- Wang, K., Hu, Q., Zhou, M., Zun, Z., & Qian, X. (2021). Multi-aspect applications and development challenges of digital twin-driven management in global smart ports. *Case Studies on Transport Policy*, 9(3), 1298–1312.
<https://doi.org/10.1016/j.cstp.2021.06.014>
- Wang, L., Wang, Z., Kendall, P., Gumma, K., Turner, A., & Ratchev, S. (2024). Deep Dynamic Layout Optimization

- of Photogrammetry Camera Position Based on Digital Twin. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 21(1), 6176–6189. <https://doi.org/10.1109/TASE.2023.3323088>
- Yadav, Y., Kushwaha, S. K. P., Mokros, M., Chudá, J., & Pondelík, M. (2023). Integration of iphone lidar with quadcopter and fixed wing uav photogrammetry for the forestry applications. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, 213–218. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W3-2023-213-2023>
- Zhan, X., Zhang, X., Wang, X., Diao, X., & Qi, L. (2024). Comparative analysis of surface deformation monitoring in a mining area based on UAV-lidar and UAV photogrammetry. *The Photogrammetric Record*, 39(186), 373–391. <https://doi.org/10.1111/phor.12490>
- Zhang, Q., Wan, B., Cao, Z., Zhang, Q., & Wang, D. (2021). Exploring the potential of unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing for mapping plucking area of tea plantations. *Forests*, 12(9), 1214. <https://doi.org/10.3390/f12091214>
- Zhou, F., Yu, K., Xie, W., Lyu, J., Zheng, Z., & Zhou, S. (2024). Digital Twin-Enabled Smart Maritime Logistics Management in the Context of Industry 5.0. *IEEE Access*, 12, 10920–10931. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3354838>

APPLICATION AND COMPARISON OF ADSORPTION PROCESS AMONG THE DYE REMOVAL METHODS FROM WASTEWATER EFFLUENTS

Adnan ALDEMİR¹

Ali Rıza KUL²

1. INTRODUCTION

Dyes are typically incorporated into aqueous solutions to improve their binding affinity to various materials (Tanasa et al., 2021). While early colorants were extracted from plants and insects, modern industrial practices predominantly rely on synthetic dyes designed for superior performance (Berradi et al., 2019). Dyes absorb visible light due to their molecular structure, which includes chromophores that provide color and auxochromes that increase solubility and fiber adherence. Dyes represent a wide array of structures and they are generally grouped either by their chemical composition or by their application method. Soluble dye categories include acid, basic, reactive, and direct dyes, while insoluble varieties encompass sulfur, vat, and disperse dyes (Yaseen & Scholz, 2020; Salleh et al., 2011). Acid dyes are used for nylon, wool, silk, modified acrylics, leather, ink-jet printing, food, and cosmetics. The chemical classes of acid dyes are azo, anthraquinone,

¹ Doç. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 65080, Van, Türkiye, adnanaldemir@yyu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9884-0961.

² Dr. Öğr. Üyesi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, 65080, Van, Türkiye, alirizakul@yyu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9331-775X.

triphenylmethane, azine, xanthene, nitro and nitroso. Basic dyes are used for paper, polyacrylonitrile, modified nylons and polyesters and in medicine. The chemical classes of basic dyes are diazahemicyanine, triarylmethane, cyanine, hemicyanine, thiazine, oxazine and acridine. Reactive dyes are generally used for cotton and other cellulose, and they are used to a small extent on wool and nylon. These dyes form a covalent bond with the fiber and contain chromophoric groups such as azo, anthraquinone, triarylmethane, phthalocyanine, formazan, oxazine. Direct dyes are used in the dyeing of cotton and rayon, paper, leather, and, nylon. These dyes are contain polyazo compounds, along with some stilbenes, phthalocyanines and oxazines. Sulfur dyes are used for cotton and rayon which have limited use with polyamide fibers, silk, leather, paper, and wood. They have intermediate structures and though they form a relatively small group of dyes the low cost and good wash fastness properties. Vat dyes which are containing anthraquinone and indigoids used for cotton mainly to cellulosic fibers as soluble leuco salts and for rayon and wool too. Other classes of dyes like azo dyes fluorescent brighteners having stilbene, pyrazoles, coumarin and naphthalimides used for soaps and detergents, fibers, oils, paints, and plastics and mordant having azo and anthraquinone used for wool, leather, natural fibers after pretreating with metals and anodized aluminium. Among these azo dyes stand out for their widespread use accounting for nearly 70% of global production attributed to their vivid hues and affordability (Li et al., 2019; Holkar et al., 2016). From a practical perspective, classification based on fiber compatibility, as endorsed by the Colour Index (C.I.), is widely applied in textile operations (Yagub et al., 2014). Each dye type is preferred for specific substrates such as acid dyes suit protein fibers like wool and silk, basic dyes are used for synthetic materials and papers, disperse dyes target hydrophobic polymers, reactive dyes form covalent bonds with cellulose, and solvent dyes are suited for

nonpolar materials like plastics and fuels (Benkhaya et al., 2020). Other dye classes such as fluorescent brighteners and mordant dyes are formulated for niche applications across detergents, food packaging, and high-tech industries (Saratale et al., 2011). However, their extensive utilization presents environmental challenges. Effluents rich in synthetic dyes are resistant to degradation, visibly discolored, and often toxic to aquatic organisms (Lellis et al., 2019). Contaminated water bodies affected by dye discharges pose risks to ecological and public health (Srinivasan & Sadasivam, 2021). With growing concern over water resource scarcity, recent research has emphasized the recovery and recycling of dye contain wastewater to reduce freshwater demand (Kumar et al., 2023). Various methods of dye wastewater treatment are received the limelight recently as clean water sources might soon begin to deplete rapidly if no dependable solution is found.

The aim and outlines of this chapter the latest advancements in dye classification and pollution impact, setting the stage for a comprehensive review of treatment technologies, their principles, and comparative effectiveness for sustainable wastewater management. Application and comparison of adsorption process among the dye removal methods from wastewater effluents were explained with effects of process conditions, isotherm and kinetic modeling with thermodynamic behaviours.

2. DYE TREATMENT METHODS FROM WASTEWATER

A wide range of dye remediation strategies has been explored in recent literature, with numerous studies reporting promising results. An optimal dye treatment approach should be capable of removing substantial dye concentrations in a brief

period while minimizing the risk of generating secondary pollutants (Zhou et al., 2025; Mehta & Patel, 2023). Environmentally responsible treatment options are increasingly favored, prioritizing technologies that avoid producing harmful by-products (Sathishkumar et al., 2021). Among the established dye remediation techniques are photocatalysis (Kumari et al., 2023), Fenton and photo-Fenton oxidation (Gupta & Suhas, 2020), electrochemical oxidation (Ghosh & Pal, 2022), electrocoagulation (Kalia et al., 2024), solvent extraction (Yaseen & Scholz, 2019), biological degradation (Saratale et al., 2011), membrane based ultrafiltration (Li et al., 2025), ion exchange (Zaharia & Suteu, 2020), persulfate mediated oxidation (Tan et al., 2024), and adsorption techniques (Kumar et al., 2025; Singh et al., 2025). Each of these technologies presents distinct operational mechanisms and advantages depending on the wastewater characteristics and target dye compounds.

2.1. Coagulation

Coagulation remains one of the most widely implemented and established methods for treating dye-laden wastewater. Despite its effectiveness, traditional chemical coagulation using agents such as aluminum (Al^{3+}) or iron (Fe^{3+}) salts can incur significant costs and generate large volumes of sludge, limiting its economic viability for large-scale applications (Aldemir et al., 2021; Holkar et al., 2016). Nonetheless, the process is operationally simple, scalable, and effective at high initial pollutant concentrations (Ghosh & Pal, 2022). Coagulants are typically divided into inorganic and organic categories. Common inorganic coagulants include aluminum sulfate, aluminum chloride, ferric chloride, ferric sulfate, calcium oxide, and magnesium oxide (Ayhan et al., 2024; Gupta & Suhas, 2020). These compounds neutralize the negative charges on dye molecules, promoting floc formation. Trivalent cations, in particular, are more effective than divalent ones in destabilizing

colloidal suspensions. However, the flocs generated from inorganic coagulants are often lightweight and slow to settle. Additionally, these salts rapidly dissociate in water to produce hydrated cationic species, initiating coagulation. While effective, some chemical coagulants have raised health concerns; prolonged exposure to residual aluminum has been associated with neurological disorders such as Alzheimer's disease and even potential carcinogenic effects (Lellis et al., 2019).

2.2. Electrocoagulation

Electrocoagulation (EC) has emerged as a viable electrochemical alternative to traditional chemical coagulation processes. Unlike conventional methods, EC leverages anodic oxidation to produce metal ions directly from sacrificial electrodes, typically composed of iron or aluminum. These ions undergo hydrolysis, forming hydroxide flocs that interact with pollutants through mechanisms such as surface complexation and electrostatic attraction (Parsa et al., 2023). A notable advantage of EC is its relatively low operational cost, as it eliminates the need for externally added coagulants and reduces the generation of chemical sludge (Ghosh & Pal, 2022). The process also minimizes total dissolved solids (TDS) and avoids secondary pollution, making it environmentally preferable (Holkar et al., 2016). The system's performance and cost-efficiency largely depend on operational parameters like current density, electrode material, and inter-electrode spacing. During EC, pollutants can be captured either by being adsorbed onto precipitated metal hydroxides or by binding to hydrous oxide surfaces through ligand-like interactions, which facilitates their removal via sedimentation or flotation. However, electrode passivation and consumption over time may affect long-term performance and maintenance requirements (Kalia et al., 2024).

2.3. Membrane treatment

Membrane technologies have gained widespread attention as a practical and efficient solution for dye removal, particularly due to their cost-effectiveness and scalability when compared to advanced oxidation processes (Li et al., 2025). Nanofiltration membranes are especially prominent, operating via size exclusion and electrostatic repulsion mechanisms to separate dye molecules from wastewater streams. The field of membrane engineering has experienced substantial innovation over the past two decades, driven largely by advancements in nanotechnology and material science. One of the primary challenges in membrane operations is fouling the accumulation of organic or biological matter on or within membrane surfaces which significantly reduces both selectivity and permeability (de Rosset et al., 2025). Fouling is influenced by three main factors: feed water quality, operational conditions, and membrane surface characteristics. Efforts to combat fouling have included the incorporation of antimicrobial agents such as silver and copper into membrane materials, enhancing their resistance to microbial colonization and extending their operational lifespan (Arora & Sharma, 2023). Membrane distillation (MD) which is a thermally driven separation process, has shown promising results in recent studies. MD utilizes hydrophobic porous membranes to separate a hot and cold stream, creating a transmembrane vapor pressure gradient that facilitates dye removal via vapor transport. This method benefits from mild operating conditions and the ability to recover dyes from concentrated residues. Compared to other pressure-driven techniques like ultrafiltration, nanofiltration, reverse osmosis, and forward osmosis, MD offers high rejection rates and lower energy input by utilizing residual heat in wastewater. However, membrane fouling remains a concern, necessitating frequent maintenance and replacement.

2.4. Advanced oxidation process (AOPs)

Advanced oxidation processes (AOPs) have become an essential class of technologies in the degradation of persistent organic contaminants in wastewater. These processes rely on the in-situ generation of highly reactive species primarily hydroxyl radicals ($\bullet\text{OH}$) which possess strong oxidative potentials ranging from 1.95 to 2.8 V relative to the saturated calomel electrode (SCE), enabling them to break down complex pollutants into harmless byproducts (Gupta & Suhas, 2020). Hydroxyl radicals initiate degradation via various mechanisms such as hydrogen abstraction, electron transfer, and radical addition, making AOPs effective for both organic and inorganic pollutant removal (Sathishkumar et al., 2021). Commonly employed AOPs include ozonation, Fenton reactions, UV/H₂O₂, and photocatalysis. Among these, ozone is particularly versatile and is frequently used in multiple stages of wastewater treatment including preliminary, secondary, and tertiary phases for color removal, pathogen disinfection, reduction of biochemical oxygen demand (BOD), and chemical oxygen demand (COD), as well as for minimizing sludge generation (Lellis et al., 2019; Ghosh & Pal, 2022). The performance of AOPs is effected by factors such as pH, oxidant concentration, presence of scavengers, and reaction time. Their non-selective and rapid degradation capacity makes them an attractive choice for treating dye effluents that are otherwise resistant to conventional treatment methods.

2.5. Electrochemical treatment

Electrochemical treatment methods have also garnered interest for their efficacy in color removal. Operational parameters such as pH, temperature, and applied voltage critically influence the treatment efficiency. Studies show that incorporating additives like NaCl or HCl can enhance the reduction of color and chemical oxygen demand (COD) in dye

effluents (Kalia et al., 2024). The effectiveness of anodic oxidation within electrochemical setups is heavily dependent on the anode material; graphite is often preferred for its cost-effectiveness. However, low overpotentials can lead to current loss due to oxygen evolution, affecting overall efficiency.

To further enhance treatment performance, electrochemical approaches are often integrated with AOPs, forming hybrid systems such as the electro-Fenton process. In this method, hydroxyl radicals are generated in situ and can effectively break down aromatic dye molecules. Despite its efficacy, this approach can produce intermediate byproducts some of which may be carcinogenic necessity further analysis using techniques like HPLC-MS, GC-MS, and UV-Vis spectrophotometry (Srinivasan & Sadasivam, 2021). Additionally, challenges such as sludge management in heterogeneous systems and the removal of secondary pollutants present operational limitations.

2.6. Photocatalytic process

Photocatalytic oxidation is a promising and emerging variant of AOPs that couples light energy typically UV or visible light with a semiconductor catalyst such as titanium dioxide (TiO₂). Upon irradiation, the semiconductor generates electron-hole pairs that facilitate the formation of hydroxyl radicals, which attack organic molecules non-selectively. These radicals convert pollutants into benign end-products like carbon dioxide, water, and mineral acids (Sharma et al., 2023). Photocatalysis is particularly attractive due to its potential to operate under ambient conditions and its compatibility with solar energy. The effectiveness of this process depends on factors such as the bandgap of the catalyst, intensity and wavelength of the light source, and reactor design. Notably, some studies suggest that photo-induced catalytic reactions may involve a transient

electronic phase, distinct from traditional solid, liquid, or gaseous states, influencing the degradation mechanism (Srinivasan & Sadasivam, 2021). Despite its advantages, photocatalysis may produce intermediate byproducts that require further assessment. Analytical techniques such as HPLC-MS, GC-MS, and UV-Vis spectrophotometry are often used to identify and monitor these compounds, ensuring that the process yields environmentally safe outcomes.

2.7. Ozonation

Another extensively applied oxidation process is ozonation, primarily used for decolorizing dye contaminated wastewater. The efficiency of ozone reactions depends significantly on pH, which determines whether molecular ozone (direct oxidation), hydroxyl radicals (indirect oxidation), or both are active concurrently during treatment. Ozone possesses a strong oxidation potential that allows it to effectively degrade a broad range of organic pollutants. Moderate reductions in COD and TOC are typically achieved, with the extent of degradation largely dictated by the ozone dosage and the rate of ozone mass transfer to the liquid phase. Studies have demonstrated that higher TOC removal occurs when more ozone is transferred into the aqueous solution over time. Ozonation disrupts the chromophoric structures in dye molecules by cleaving double bonds and unsaturated bonds within aromatic rings, resulting in significant decolorization. As ozone dissolves in water, it reacts with both organic and inorganic constituents, decomposing into reactive oxygen species such as hydroxyl radicals (OH), hydrotrioxy (HO₃), and superoxide (O₂). These species enhance oxidation efficacy while maintaining environmental safety. Key advantages of ozonation include low operational costs post-installation, effective pollutant degradation, and the absence of secondary sludge production. However, limitations include high capital investment, potential formation of by-products like bromates that

pose health risks, and the continuous energy input required for ozone generation and system operation (Tan et al., 2024).

2.8. Plasma treatment

In recent years, plasma based oxidation technologies have emerged as a promising avenue for the degradation of persistent organic pollutants in wastewater, owing to their high oxidation capacity and operational versatility. These systems utilize various discharge methods, including electrohydraulic, corona, dielectric barrier discharge (DBD), microwave, and radio frequency discharge. Among these, DBD stands out as one of the most efficient configurations due to its stable operation under ambient conditions and compatibility with a range of reactor designs. Operating at low temperatures and atmospheric pressure, DBD based systems produce reactive oxygen species, including hydroxyl radicals, without the need for additional chemical reagents. This enhances treatment safety while minimizing the formation of hazardous secondary by-products. Plasma treatment has demonstrated low to zero toxicity, making it suitable for applications where environmental and human health concerns are paramount (Sathishkumar et al., 2021). The efficiency of plasma treatment is further enhanced when integrated with complementary technologies such as ozonation or microwave irradiation. The process induces high energy interactions at the surface level cleaning, etching, or functionalizing materials without altering their bulk properties. Oxygen-assisted plasma treatment, in particular, has shown effectiveness in degrading complex dye molecules. Despite its advantages, the adoption of plasma based methods has been limited due to higher operational costs and management complexities compared to more conventional dye treatment techniques. Nonetheless, its unique characteristics make it a valuable addition to the portfolio of advanced wastewater treatment technologies.

2.9. Biological treatment

Biological treatment methods have gained increasing attention as cost-effective, sustainable, and environmentally friendly solutions for treating dye contaminated wastewater. Owing to their metabolic versatility and genetic diversity, microorganisms including bacteria, fungi, algae, and yeasts are capable of transforming or adsorbing dye molecules, ultimately converting them into non-toxic end-products such as carbon dioxide, water, and inorganic salts (Saratale et al., 2011; Yaseen & Scholz, 2019). These biological mechanisms typically proceed through either enzymatic degradation via metabolic pathways or biosorption onto living and dead biomass. Common techniques in this domain include fungal decolorization, microbial degradation, bioremediation, and biomass adsorption. However, certain technical constraints limit their widespread industrial application. Challenges include the need for large treatment areas, susceptibility to fluctuations in environmental conditions (e.g., temperature, pH), and sensitivity to chemical toxicity in effluents (Gupta & Suhas, 2020). Numerous microbial species have been explored for dye degradation, including *Shewanella*, *Bacillus*, *Scheffersomyces*, *Acinetobacter*, and various strains of cyanobacteria. Among these, algae especially marine varieties have attracted significant interest due to their abundant availability and surface bound functional groups such as hydroxyl, carboxyl, amino, and phosphate, which enhance their biosorption potential. Marine algae are typically classified into brown, red, and green types, each characterized by polysaccharide content like alginate, carrageenan, and polycolloids, which further aid in pollutant capture (Yaseen & Scholz, 2019). Recent researches have also focused on isolating and optimizing enzymes from microbial sources that facilitate dye breakdown. Understanding the biochemical pathways and regulatory mechanisms governing these transformations is crucial

for developing scalable and efficient biological wastewater treatment technologies.

2.10. Adsorption

Traditional wastewater treatment technologies often fall short when it comes to managing effluents containing synthetic dyes due to their chemical stability and complex structures. In contrast, adsorption has emerged as a widely accepted and efficient alternative for dye removal. This process involves the accumulation of substances from a liquid phase onto a solid surface and is especially valued for its versatility and simplicity (Nguyen et al., 2025). Historically, the concept of carbon based adsorption dates back to ancient civilizations, including its use in Egypt around 1550 B.C. and by figures such as Hippocrates and Pliny the Elder. Scientifically, adsorption phenomena were observed in the 18th century, and the term “adsorption” was formally introduced by Kayser in 1881 to distinguish surface accumulation from absorption.

Adsorption can be classified into physical adsorption (physisorption), governed by Van der Waals forces, and chemical adsorption (chemisorption), characterized by stronger chemical bonding. While physisorption is reversible, chemisorption often requires more effort for desorption. Both mechanisms may occur concurrently depending on the system conditions. A major advantage of adsorption is flexibility and minimal environmental impact. It is cost-effective, insensitive to toxic pollutants, and does not generate secondary waste. Adsorbents which are different sizes (granules, powders and pellets) are used to removal of dyes in adsorption processes (Dutta et al., 2021). Activated carbon (AC) remains the most widely used adsorbent and is derived from precursors such as coal, coconut shells, lignite, and wood through either physical or chemical activation processes. Physical activation generally requires high temperatures and

longer times, whereas chemical activation uses agents that necessitate post-treatment washing (Heidarinejad et al., 2020). AC is available in multiple forms including powdered (PAC), granular (GAC), pelletized, and fibrous (ACF). GAC is often favored in continuous systems due to ease of handling, while PAC is used in batch systems for its low capital cost and rapid contact time, despite challenges in solid-liquid separation. Pelletized AC is typically produced from coal for vapor-phase applications, while ACFs are synthesized from polymer precursors like polyacrylonitrile (PAN) and cellulose, yielding high surface area materials. Despite their efficacy, the high cost and regeneration needs of AC can limit its widespread application. Exhausted activated carbon must be regenerated most commonly via thermal methods, though chemical, oxidative, and electrochemical approaches are also used (Demiral et al., 2021). Ongoing research continues to seek cost-effective and sustainable alternatives for large-scale adsorption applications (Kumar et al., 2023; Kumar et al., 2025). The adsorption which is the efficient and low-cost wastewater treatment method has given rise with low-cost adsorbents (LCAs). The most of recent studies provides an overview of LCAs comprising natural, industrial as well as synthetic materials or wastes and their removal performance of dyes. From a comprehensive research, it was found that LCAs, in addition to having wide availability, have fast kinetics and appreciable removal capacities. Advantages and disadvantages of adsorbents used in processes, favourable removal conditions for adsorbate–adsorbent systems, and adsorption capacities of various LCAs and ACs which were prepared from different materials available in the literature.

3. EFFECT OF PROCESS CONDITIONS ON ADSORPTION PROCESS

Numerous factors influence the adsorption of dyes onto solid surfaces, including pH, temperature, dye concentration, adsorbent dosage, agitation speed, and ionic strength. Proper optimization of these variables is essential for enhancing dye removal performance and facilitating scale-up for industrial applications.

3.1. Effect of solution pH

Among the various factors influencing dye adsorption, pH of solution plays a vital role in dictating adsorption behavior of both adsorbent and dye molecules. pH, which reflects the acidity or alkalinity of an aqueous medium, directly impacts the ionization degree of dye molecules as well as the surface charge of adsorbent. The electrostatic interactions that govern adsorption are highly pH dependent. At acidic conditions ($\text{pH} < 7$), the adsorbent surface tends to acquire a positive charge, which enhances the adsorption of negatively charged (anionic) dyes. Conversely, in alkaline conditions ($\text{pH} > 7$), the surface is generally negatively charged, which favors the removal of cationic dyes. This pH responsive behavior is closely linked to point of zero charge (pH_{pzc}) or isoelectric point (pH_{IEP}) of adsorbent, which denotes the pH at which the surface carries no net charge. To determine the pH_{pzc} of an adsorbent, batch experiments are typically conducted by preparing dye solutions across a pH gradient and adding a fixed amount of adsorbent to each. After equilibrium, a plot of final pH versus initial pH is used to identify the pH_{pzc} where the initial and final pH values are equal. This value provides insight into surface-active sites and the electrokinetic characteristics of the adsorbent material. The presence of functional groups such as hydroxyl ($-\text{OH}$), carboxyl ($-\text{COOH}$), and amine ($-\text{NH}_2$) on the adsorbent surface also

affects the pH dependent adsorption process. In general, cationic dye adsorption is favored when $\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc}}$, while anionic dye uptake is enhanced when $\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$ due to prevailing surface charge conditions. Understanding the pH effect is vital for optimizing adsorption processes and designing efficient dye removal systems for real-world wastewater treatment applications.

3.2. Effect of initial dye concentration

The initial dye concentration plays a crucial role in determining on adsorption performance and efficiency of an adsorbent. It directly affects the mass transfer driving force and extent of interaction between dye molecules and available binding sites on adsorbent surface. When adsorption experiments are conducted with a fixed adsorbent dosage and varying initial dye concentrations, the results typically reveal a dual behavior. At lower concentrations, a higher percentage of dye removal is often achieved due to sufficient active sites being available for adsorption. However, as the initial concentration increases, these sites may become saturated, resulting in a reduced percentage of dye removed. Nevertheless, the total quantity of dye adsorbed (i.e., adsorption capacity) often increases with initial concentration. This is attributed to the stronger concentration gradient, which enhances mass transfer rates and accelerates the adsorption process. Optimizing the initial dye concentration is essential for designing efficient adsorption systems, particularly in large scale wastewater treatment applications where pollutant loads vary significantly (Kul et al., 2021).

3.3. Effect of temperature

Temperature is a significant physicochemical parameter influencing the adsorption of dyes onto adsorbents. It can affect both the adsorption capacity and the kinetics of the process by altering the mobility of dye molecules and the interaction strength

between adsorbate and adsorbent. Experimental evaluation typically involves preparing adsorbent–adsorbate mixtures at different temperatures and monitoring equilibrium dye uptake. Depending on the system, an increase in temperature can lead to two contrasting effects. If adsorption capacity increases with temperature, the process is classified as endothermic. This is often due to enhanced diffusion rates and increased surface activity that facilitate dye transport to binding sites. In contrast, a decrease in adsorption capacity with rising temperature indicates an exothermic process, likely due to the weakening of adsorptive forces. Thermodynamic changes such as the displacement of water molecules by dye ions and corresponding changes in system entropy also influence adsorption. Higher temperatures may increase the translational entropy of displaced water molecules, contributing to the spontaneity of the process. Thus, thermodynamic parameters like enthalpy (ΔH), entropy (ΔS), and Gibbs free energy (ΔG) are frequently analyzed to better understand temperature related adsorption behaviors (Koyuncu et al., 2021).

3.4. Effect of adsorbent dosage

The quantity of adsorbent used in a treatment system is a key determinant of its dye removal capacity under given operational conditions. Generally, increasing the adsorbent dosage enhances removal efficiency due to greater availability of surface area and active binding sites. This leads to higher probabilities for dye molecules to interact with and adhere to the adsorbent surface. However, beyond a certain threshold, further increasing the dosage may yield diminishing returns. Excessive adsorbent can cause particle aggregation, reducing the effective surface area and potentially lowering adsorption efficiency per unit mass. Evaluating the optimal dosage helps balance performance with material cost and operational feasibility. It also provides insight into the minimum adsorbent quantity required

for effective dye removal an essential consideration for economic and sustainable large-scale applications.

3.5. Effect of agitation speed

In batch adsorption systems, agitation speed significantly influences dye removal efficiency by enhancing solute dispersion and reducing external mass transfer resistance. Agitation minimizes the thickness of boundary layer surrounding the adsorbent particles, thereby facilitating transport of dye molecules from bulk solution to the active sites on adsorbent surface. The adsorption process generally comprises four sequential steps: (1) migration of dye molecules from the bulk solution to the adsorbent surface, (2) diffusion through the boundary layer, (3) attachment to an active site, and (4) intraparticle diffusion within the adsorbent pores. Increased agitation accelerates these steps by forcing more dye molecules toward the adsorbent interface, which results in improved adsorption kinetics and higher dye uptake. Experimental setups evaluating the effect of agitation typically involve varying the stirring speed while maintaining constant dye concentration, adsorbent dosage, and temperature. However, excessive agitation may lead to particle disintegration or dye desorption, highlighting the need to identify an optimal speed that maximizes efficiency without inducing mechanical instability.

3.6. Effect of ionic strength

The ionic strength of wastewater, often elevated due to high salt content, can significantly affect dye adsorption dynamics. This parameter modulates electrostatic interactions between the charged dye molecules and the adsorbent surface. Experimental investigations typically involve the addition of varying concentrations of salts such as sodium chloride (NaCl) to the adsorbent–adsorbate system, followed by equilibration under controlled conditions. The impact of ionic strength depends on

the nature of electrostatic interactions. When these interactions are attractive (e.g., between oppositely charged dye and adsorbent), increasing the ionic strength tends to compress the electrical double layer, reduce electrostatic potential, and thus hinder dye adsorption. Conversely, in systems where repulsive forces dominate, increased ionic strength may facilitate adsorption by mitigating repulsion through charge screening. Thermodynamically, ionic strength influences the electrostatic component of the system's Gibbs free energy (ΔG), which in turn governs adsorption spontaneity. A higher ionic concentration reduces the coulombic free energy, thereby decreasing the overall adsorption efficiency for certain dye species, especially basic dyes. Understanding and controlling ionic strength is vital in designing optimized adsorption protocols for real wastewater matrices.

4. MODELING APPLICABILITY OF ADSORPTION PROCESS

4.1. Applicability of isotherm models on adsorption process

The adsorption isotherm is significant for the explanation of the interaction of adsorbent with adsorbate molecules and propose an idea of removal capacity. The determination of the most suitable isotherm is important for obtain the mechanism of adsorption process. The parameters obtained from isotherm models are provided important informations for analysis and design of adsorption system. The surface phase may be considered as a monolayer or multilayer adsorption which are investigated with different isotherm models in the literature (Aldemir et al., 2023; Saadi et al., 2015). Langmuir and Freundlich models are the most widely used to describe the adsorption isotherm. Langmuir isotherm model assumed that

adsorption takes place at specific homogeneous sites within the adsorbent, and it has been used for many adsorption processes of monolayer adsorption. Freundlich isotherm model considers a heterogeneous adsorption surface that has unequal available sites with different energies of adsorption. The best fit isotherm model can be chosen based on the values of correlation coefficient (R^2) and/or calculated error values such as MSE, SSE, RMSE (Rajahmundry et al., 2021; Ayawei et al., 2017). Langmuir, Freundlich and other isotherm model equations with their plot axes are shown in Table 1.

Table 1. Isotherm model equations and their plot axes

Equation no	Isotherm name	Isotherm model equation	Plot axes (y vs x)
1	Langmuir	$\frac{q_e}{C_e} = K_L * q_m - K_L * q_e$	$\frac{q_e}{C_e}$ vs q_e
2	Freundlich	$\ln(q_e) = \ln(K_F) + \frac{1}{n} * \ln(C_e)$	$\ln(q_e)$ vs $\ln(C_e)$
3	Temkin	$q_e = B_T * \ln(K_T) + B_T * \ln(C_e)$	q_e vs $\ln(C_e)$
4	Dubinin-Radushkevich	$\ln(q_e) = \ln(q_m) - K_D * \varepsilon^2$	$\ln(q_e)$ vs ε^2
5	Frumkin	$\ln\left[\left(\frac{\theta}{1-\theta}\right) * \frac{1}{C_e}\right] = \ln(k) + 2 * \alpha * \theta$	$\ln\left[\left(\frac{\theta}{1-\theta}\right) * \frac{1}{C_e}\right]$ vs θ
6	Hill-Deboer	$\ln\left(\frac{C_e * (1-\theta)}{\theta}\right) - \frac{\theta}{(1-\theta)}$ $= -\ln(K_1) - \frac{K_2 * \theta}{R * T}$	$\ln\left(\frac{C_e * (1-\theta)}{\theta}\right) - \frac{\theta}{(1-\theta)}$ vs θ
7	Flory-Huggins	$\ln\left(\frac{\theta}{C_0}\right) = \ln(K_{FH}) + n_{FH} * \ln(1-\theta)$	$\ln\left(\frac{\theta}{C_0}\right)$ vs $\ln(1-\theta)$
8	Redlich-Peterson	$\ln(C_e/q_e) = \beta * \ln(C_e) - \ln(K_{RP})$	$\ln(C_e/q_e)$ vs $\ln(C_e)$
9	Harkin-Jura	$1/q_e^2 = \frac{B_H}{A_H} - (1/A_H) * \log(C_e)$	$1/q_e^2$ vs $\log(C_e)$
10	Henry	$q_e = (K_{HE}) * (C_e)$	q_e vs C_e

11	Harkins-Henderson	$\ln(q_e) = \frac{1}{n_h} * \ln(K_h) - \frac{1}{n_h} * \ln(C_e)$	$\ln q_e \text{ vs } \ln C_e$
12	Halsey	$q_e = \frac{1}{n_h} * \ln(K_H) - \frac{1}{n_H} * \ln(C_e)$	$\ln q_e \text{ vs } \ln C_e$
13	Scatchard	$\frac{q_e}{C_e} = K_S * Q_S - K_S * q_e$	$\frac{q_e}{C_e} \text{ vs } q_e$
14	Elovich	$\ln\left(\frac{q_e}{C_e}\right) = \ln(K_E) * q_m - \frac{q_e}{q_m}$	$\ln \frac{q_e}{C_e} \text{ vs } q_e$
15	Hill	$\ln\left(\frac{q_e}{q_H - q_e}\right) = n * H * \ln(C_e) - \ln(K_D)$	$\ln\left(\frac{q_e}{q_H - q_e}\right) \text{ vs } \ln(C_e)$
16	Jossens	$\ln\left(\frac{C_e}{q_e}\right) = -\ln(H) + F * q_e^p$	$\ln\left(\frac{C_e}{q_e}\right) \text{ vs } q_e^p$
17	Jovanovich	$\ln(q_e) = \ln(q_m) - K_j * C_e * \ln(q_m)$	$\ln(q_e) \text{ vs } C_e$

4.2. Applicability of kinetic models on adsorption process

The control mechanism of adsorption process such as chemical reaction, diffusion control or mass transfer coefficient is determine with kinetic models. The kinetics of dye adsorption onto adsorbent is prerequisite for choosing the best operating conditions. The study of adsorption kinetics illustrates how the solute uptake rate and obviously this rate control the residence time of the adsorbate at the solution interface. Different kinetic models are used in the adsorption studies which were given in literature (Kul et al., 2023). Pseudo first order (PFO), pseudo second order (PSO), and intraparticle diffusion (IPD) models are the most widely used to describe the adsorption kinetics. For the PFO model, the adsorption rate was expected to be proportional to the first power of concentration, where the adsorption was characterized by diffusion through a boundary. The PFO model sometimes does not fit well for the whole range of contact time. In that case, the PSO model was based on the adsorption capacity of the solid phase and this model assumes that chemisorption may

be the rate controlling step in the adsorption processes. The best fit kinetic model can be chosen based on the values of the correlation coefficient (R^2) and/or calculated error values such as MSE, SSE, RMSE. PFO, PSO, IPD and other kinetic models of dye adsorption onto various adsorbent materials are shown in Table 2.

Table 2. Kinetic model equations and their plots axes

Equation no	Kinetic model name	Kinetic model equations	Plot axes (y vs x)
18	Pseudo First Order (Lagereng)	$\ln (q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 * t$	$\ln (q_e - q_t) \text{ vs } t$
19	Pseudo Second Order (Ho & Mckay)	$\frac{t}{q} = \frac{1}{k_1 * q_e^2} + \frac{t}{q_e}$	$t/q \text{ vs } t$
20	Intraparticle diffusion (Weber-Morris)	$q = k_{int} * t^{1/2} + C$	$q_t \text{ vs } t^{1/2}$
21	Elovich	$q_t = \frac{1}{\beta} * \ln(\alpha * \beta) + \frac{1}{\beta} * \ln(t)$	$q_t \text{ vs } \ln t$
22	Fractional Power	$\ln q_t = \ln(K) + v * \ln(t)$	$\ln q_t \text{ vs } \ln t$
23	Diffusion Coefficient (Fick's Law)	$\ln \left(1 - \frac{q_t}{q_e} \right) = (D_2 * \pi^2 / a^2) * t - 0.4977$	For D_1 : $\left(\frac{q_t}{q_e} \right) \text{ vs } t^{\frac{1}{2}}$ For D_2 : $\ln \left(1 - \frac{q_t}{q_e} \right) \text{ vs } t$
24	Bangham-Arrhenius	$\ln k_2 = \ln k_0 - \frac{E_a}{R * T}$	$\ln k_2 \text{ vs } 1/T$
25	Avrami	$\ln [\ln (q_e / (q_e - q))] = n_{AV} * \ln K_A + n_{AV} * \ln (t)$	$\ln [\ln (q_e / (q_e - q))] \text{ vs } \ln t$

4.3. Applicability of thermodynamic parameters on adsorption process

Thermodynamic parameters provide an important information about inherent energetic changes associated with adsorption process; the most common equations that related thermodynamic parameters such as change in free energy (ΔG), enthalpy (ΔH), and entropy (ΔS) are determined with Eq (26) – Eq (28);

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_d \quad (26)$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T \Delta S^\circ \quad (27)$$

$$\ln K_d = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (28)$$

K_d is a constant ($L \text{ g}^{-1}$), which is obtained by plot of q_e/C_e versus q_e . ΔH° and ΔS° values are determined from plot of $\ln K_d$ versus $1/T$. The activation energy (E_A) supply an idea about the adsorption type for physical ($0\text{--}40 \text{ kJ mol}^{-1}$) or chemical ($40\text{--}800 \text{ kJ mol}^{-1}$). E_A of adsorption process is obtained from Arrhenius equation which is given in Eq. (29);

$$\ln k_2 = \ln A - \frac{E_A}{RT} \quad (29)$$

where k_2 is rate constant ($\text{g.mol}^{-1}.\text{s}^{-1}$), A is Arrhenius factor ($\text{g.mol}^{-1}.\text{s}^{-1}$), E_A is activation energy (J mol^{-1}), R is gas constant ($\text{J mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$), and T is temperature (K), (Kul and Aldemir, 2024).

5. CONCLUSION

Dyes represent a significant class of pollutants, posing severe threats to ecosystems. The choice of colorants in manufacturing industries critically influences product quality, but the resulting wastewater generation adversely impacts the environment. Consequently, treating dye industrial effluent before discharge is essential. This review examines various dye removal methods, including coagulation, membrane filtration, advanced oxidation processes (AOPs), and adsorption. Among these, chemical oxidation, biological treatment, and adsorption have been widely employed in recent decades, achieving removal efficiencies exceeding 80% and in some cases, 90% when they are combined. Coagulation faces limitations such as sludge disposal challenges and inefficacy against diverse dye types, prompting research into hybrid coagulation systems. Membrane processes, though effective, encounter complexities like fouling and concentrated sludge generation, driving studies toward low-cost, high-strength membranes. AOPs excel in decolorization and

mineralization but suffer from high energy demands. Biological treatments offer an eco-friendly and straightforward approach, yet their efficiency depends on effluent conditions, dye type, and operational parameters. While promising, these methods are often time-consuming, necessitating further research to optimize degradation rates. Adsorption has been extensively studied, with a substantial body of research dedicated to dye removal using various adsorbent materials. However, the regeneration of spent adsorbents remains a significant challenge. Despite this, adsorption is widely regarded as a highly efficient and advantageous method due to its cost-effectiveness, compact operational requirements, high removal efficiency, and operational flexibility. Recent studies have increasingly focused on the reuse potential of spent adsorbents, demonstrating that properly regenerated materials can be employed for multiple treatment cycles without compromising their adsorption capacity. For practical applications, adsorbents must exhibit selectivity toward specific dye types while remaining economically viable. In recent years, considerable research efforts have been directed toward wastewater treatment, driven by the critical importance of water as both a precious resource and a fundamental component of ecosystems. Ensuring safe treatment practices and water conservation is a collective responsibility. Moving forward, the development of advanced, low-cost treatment technologies with enhanced efficiency will be essential to address growing environmental concerns. Application and comparison of adsorption process among the dye removal methods from wastewater effluents were explained with effects of process conditions such as solution pH, temperature, adsorbent dosage, initial dye concentration, and isotherm - kinetic modeling with thermodynamic behaviours.

REFERENCES

- Aldemir, A., Turan, A., Kul, A.R., Koyuncu, H., (2023). Comprehensive investigation of basic red 46 removal by pinecone adsorbent: experimental, isotherm, kinetic and thermodynamic studies. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(3), 2601-2622.
- Aldemir, A., Hakkıtanır, E., Özgüven, A., (2021). Determination of optimum treatment conditions for paint industry wastewater with the coagulation/flocculation method. *Desalination and Water Treatment*, 211, 165-176.
- Arora, R., & Sharma, A., (2023). Advances in membrane bioreactors for textile wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(2), 109876.
- Ayawei, N., Ebelegi, A.N., & Wankasi, D., (2017). Modelling and Interpretation of Adsorption Isotherms. *Journal of Chemistry*, 1-11.
- Ayhan, N.N., Aldemir, A., Özgüven, A., (2024). Treatment of petroleum refinery wastewater by chemical coagulation method: determination of optimum removal conditions using experimental design. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 41(1), 121-137.
- Benkhaya, S., M'rabet, S., El Harfi, A., (2020). A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes, *Inorganic Chemistry Communications*, 115, 107891.
- Berradi, M., Hsissou, R., Khudhair, M., Assouag, M., Cherkaoui, O., El Bachiri, A., El Harfi, A., (2019). Textile finishing dyes and their impact on aquatic environs, *Heliyon*, 5(11), e02711.

- Demiral, İ., Samdan, C., Demiral, H., (2021). Enrichment of the surface functional groups of activated carbon by modification method. *Surfaces and Interfaces* 22, 100873.
- de Rosset, A., Torres-Mendieta, R., Pasternak, G., & Yalcinkaya, F., (2025). Synergistic effects of natural biosurfactant and metal oxides modification on PVDF nanofiber filters for efficient microplastic and oil removal. *arXiv preprint arXiv:2501.09529*.
- Dutta, S., Gupta, B., Srivastava, S.K., & Gupta, A.K., (2021). Recent advances on the removal of dyes from wastewater using various adsorbents: A critical review. *Materials Advances*, 2(14), 4497–4531.
- Ghosh, A., & Pal, S., (2022). Comparative assessment of dye removal techniques: An overview. *Environmental Research and Technology*, 5(1), 56–64.
- Gupta, V.K., & Suhas., (2020). A review on dye pollution and its removal methods. *Environmental Technology & Innovation*, 17, 100775.
- Heidarinejad, Z., Dehghani, M.H., Heidari, M., Javedan, G., Ali, I., Sillanpää, M., (2020). Methods for preparation and activation of activated carbon: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 393–415.
- Holkar, C.R., Jadhav, A.J., Pinjari, D.V., Mahamuni, N.M., Pandit, A.B., (2016). A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches, *Journal of Environmental Management*, 182, 351-366.
- Kalia, A., Khorram, M., & Fallah, M., (2024). Evaluation of the impacts of seawater integration to electrocoagulation process for dye removal. *Environmental Sciences Europe*, 33(1), 1-18.

- Koyuncu, H., Aldemir, A., Kul, A.R., Canayaz, M., (2021). Removal of thymol blue from aqueous solution by natural and modified bentonite: comparative analysis of ANN and ANFIS models for the prediction of removal percentage, *Pollution*, 7(4), 959-980.
- Kul, A.R., Aldemir, A., (2024). An investigation of aniline removal performance by the activated carbon prepared from biomass conversion: adsorption results of isotherm, kinetic and thermodynamic studies. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-16
- Kul, A.R., Koyuncu, H., Turan, A., Aldemir, A., (2023). Comparative research of isotherm, kinetic and thermodynamic studies for neutral red adsorption by activated carbon prepared from apple peel. *Water Air & Soil Pollution*, 234(383), 1-26.
- Kul A.R., Aldemir A., Koyuncu H., (2021). An investigation of natural and modified diatomite performance for adsorption of Basic Blue 41: isotherm, kinetic, and thermodynamic studies, *Desalination And Water Treatment*, 229, 384-394.
- Kumar, N., Pandey, A., Rosy, Sharma, Y.C., (2023). A review on sustainable mesoporous activated carbon as adsorbent for efficient removal of hazardous dyes from industrial wastewater, *Journal of Water Process Engineering*, 54, 104054.
- Kumar, R., Sharma, P., & Singh, M., (2025). A comprehensive review on the adsorption of dyes onto activated carbon derived from invasive plant biomass. *Environmental Research*, 215, 114567.
- Kumari, H., Suman, S., Ranga, R., Chahal, S., Devi, S, Sharma, S., Kumar, S., Kumar, P., Kumar, S., Kumar, A., Parmar,

- R., (2023). A Review on photocatalysis used for wastewater treatment: dye degradation, *Water Air Soil Pollution*, 234(6), 349.
- Lellis, B., Fávaro-Polonio, C.Z., Pamphile, J.A., Polonio, J.C., (2019). Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms, *Biotechnology Research and Innovation*, 3(2), 275-290.
- Li, W., Mu, B., Yang, Y., (2019). Feasibility of industrial-scale treatment of dye wastewater via bio-adsorption technology, *Bioresource Technology*, 277, 157-170.
- Li, X., Zhang, Y., & Wang, L., (2025). Boosting water flux and dye removal: Advanced composite membranes for wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 612, 118456.
- Mehta, S., & Patel, R., (2023). Integrated treatment technologies for effective textile wastewater remediation. *Cleaner Engineering and Technology*, 13, 100741.
- Nguyen, D.T.C., Abdul Jalil, A., Nguyen, L.M., Nguyen, D.H., (2025). A comprehensive review on the adsorption of dyes onto activated carbons derived from harmful invasive plants, *Environmental Research*, 279(2), 121807.
- Parsa, J.B., Vaziri, S., & Alavi, S., (2023). Optimization of electrocoagulation process for industrial dye effluent treatment. *Separation and Purification Technology*, 314, 123502.
- Rajahmundry, G.K., Garlapati, C., Kumar, P.S., Alwi, R.S., & Vo, D.V.N., (2021). Statistical analysis of adsorption isotherm models and its appropriate selection. *Chemosphere*, 276, 130176.

- Saadi, R., Saadi, Z., Fazaali, R., & Fard, N.E., (2015). Monolayer and multilayer adsorption isotherm models for sorption from aqueous media. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 32(5), 787–799.
- Salleh, M.A.M., Mahmoud, D.K., Karim, W.A.W.A., & Idris, A., (2011). Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: A comprehensive review. *Desalination*, 280(1–3), 1–13.
- Saratale, R.G., Saratale, G.D., Chang, J.S., Govindwar, S.P., (2011). Bacterial decolorization and degradation of azo dyes: A review, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 42(1), 138-157.
- Sathishkumar, M., Murugan, K., & Jeganathan, K., (2021). A review on recent developments in dye removal technologies from wastewater. *Journal of Environmental Management*, 296, 113236.
- Sharma, A., Kumar, R., & Yadav, R., (2023). Dyes classification and their environmental impacts. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(1), 99–118.
- Singh, K.P., Wareppam, B., & Ghosh, S., (2025). Heterophased grain boundary-rich superparamagnetic iron oxides/carbon composite for cationic and anionic dye removal. *arXiv preprint arXiv:2307.02142*.
- Srinivasan, S., Sadasivam, S.K., (2021). Biodegradation of textile azo dyes by textile effluent non-adapted and adapted *Aeromonas hydrophila*, *Environmental Research*, 194, 110643.
- Tan, Y., Li, J., & Wang, F., (2024). A review of low-cost adsorbents for dye removal from aqueous systems. *Journal of Water Process Engineering*, 56, 103945.

- Tanasa, A., Puitel, A.C., Zaharia, C., Suteu, D., (2021). Sorption of reactive dyes from aqueous media using the lavender waste as biosorbent, *Desalination and Water Treatment*, 236, 348-358.
- Yagub, M.T., Sen, T.K., Afroze, S., Ang, H.M., (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review, *Advances in Colloid and Interface Science*, 209, 172-184.
- Yaseen, D.A., Scholz, M., (2019). Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 1193–1226.
- Zaharia, C., & Suteu, D., (2020). Textile organic dyes characteristics, polluting effects and separation/elimination procedures from industrial effluents a critical overview. *Organic Pollutants*, 55–72.
- Zhou, Y., Liu, H., & Chen, J., (2025). Recent progress in highly effective electrocoagulation-coupled systems for dye removal. *Environmental Advances*, 12, 100345.

KAMU KURUMLARINDA GÜNEŞ ENERJİSİ KULLANIMININ VERİMLİLİĞİ VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Bülent KARAKUŞ¹

Harun YAKA²

1. GİRİŞ

Güneş enerjisi, doğal bir kaynak olarak, yenilenebilir enerji arasındaki önemi ve sürdürülebilir kalkınmadaki rolüyle dikkat çekmektedir. Özellikle kamu kurumları, çevresel etkiyi azaltmayı ve enerji maliyetlerini düşürmeyi hedeflerken güneş enerjisinin kullanımını benimsemekte, böylece hem ekonomik hem de ekolojik sürdürülebilirlik sağlama yolunda önemli adımlar atmaktadır. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli, coğrafi konum ve iklim koşulları açısından oldukça yüksektir (Şekil 1). Bu nedenle, kamu kurumlarında güneş enerjisi sistemleri kurmak hem yeşil enerji üretimi hem de enerji verimliliği açısından stratejik bir hamle olarak değerlendirilmektedir.

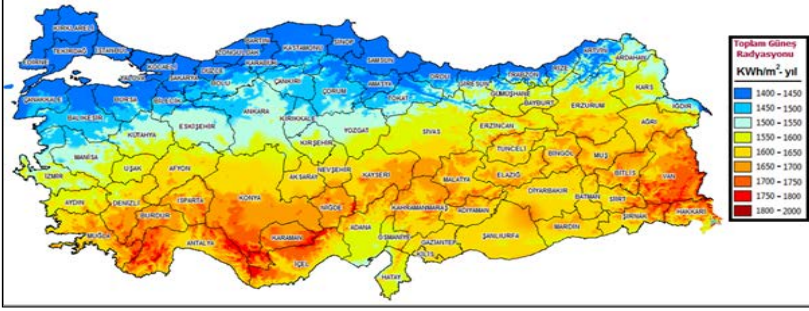
Güneş enerjisi sistemleri, fotovoltaik (PV) hücreler ve termal güneş sistemleri gibi çeşitli teknolojiler aracılığıyla enerji üretimi etkinliğini artırmaktadır. Bu kaynakların entegrasyonu, kamu kurumlarının hem işleyişinde hem de çevresel hedeflerinde belirgin bir değişim yaratmaktadır. Fotovoltaik

¹ Mardin Valiliği, Mardin İl Sağlık Müdürlüğü, Elektrik Mühendisi, bulent.karakus@saglik.gov.tr, bulent.karakus@icisleri.gov.tr,

² Doç. Dr., Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, harun.yaka@amasya.edu.tr, ORCID: 0000-0003-4859-9609.

sistemler, güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürerek, kurumların elektrik tüketiminde bağımsızlık sağlayarak enerji maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilir. Ayrıca, güneş termal sistemleri, su ısıtma gibi uygulamalarda enerji tasarrufuna katkıda bulunmakta ve sürdürülebilir kaynakların verimliliğini artırmaktadır.

Şekil 1. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli



(<https://gepa.enerji.gov.tr/>)

Aynı zamanda, güneş enerjisinin kullanılması, kamu kurumlarının karbon salınımını azaltma hedefleriyle uyumlu olduğu için iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Bu dönüşüm, çevresel bilinçlenmeyi artırmanın yanı sıra toplumda yeşil teknolojilere yönelik bir eğilim oluşturarak yenilikçi çözümler geliştirilmesine de katkıda bulunabilir. Sonuç olarak, kamu kurumlarında güneş enerjisi kullanımının verimliliği ve sürdürülebilirlik üzerindeki etkileri hem çevresel hem de ekonomik açılarından ele alınarak toplumun genel yararına hizmet eden bir unsurdur. Bu bağlamda, güneş enerjisi projeleri, yalnızca enerji üretiminde değil, aynı zamanda sosyal ve ekonomik sürdürülebilirliğin sağlanmasında da kritik bir rol oynamaktadır. Güneş enerjisinin uygulanabilirliği, özellikle günümüzde artan enerji talebi ve fosil yakıtların tükenmesi eğiliminde olduğu göz önüne alındığında, daha da ön plana çıkmaktadır. Türkiye gibi ülkelere, güneş enerjisinin kullanımıyla ilgili olarak gerek coğrafi konum gerekse iklim

özellikleri açısından önemli avantajlar sunulmaktadır. Bu bağlamda, kamu kurumları, güneş enerjisi teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanmasına öncülük ederek hem enerji güvenliğini artırmakta hem de çevresel hedeflere ulaşma çabalarına katkıda bulunmaktadır (Aksu2025).

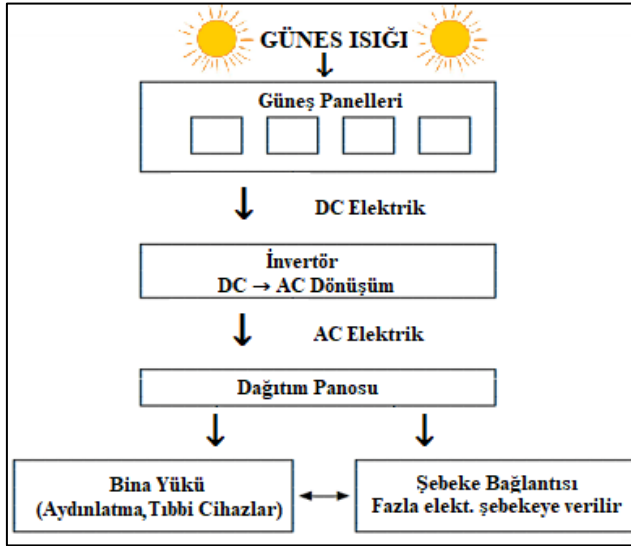
Kamu sektöründe güneş enerjisi uygulamalarının yaygınlaşmasının sağladığı yararlar çeşitlilik göstermektedir. Enerji verimliliği artırılarak, kamu hizmetlerinin yürütülmesinde maliyetlerin düşürülmesi hedeflenmektedir. Güneş enerjisi sistemleri, genellikle düşük bakım maliyetleri ve uzun ömürlülüğü ile dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, bu sistemlerin kamu kurumlarına entegre edilmesi, sadece ekonomik yararlar sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda toplumda enerji bilincinin artmasına ve yenilenebilir enerjiye olan güvenin pekişmesine de katkı sağlamaktadır. Ayrıca, bu uygulamalar, kamu kurumlarının kendi sürdürülebilirlik hedeflerini gerçekleştirmelerine önemli bir zemin hazırlamakta ve çeşitli stratejilerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Sonuç olarak, güneş enerjisinin kamu kurumlarında kullanımı, verimliliği artırmanın yanı sıra sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada da kritik bir rol oynamaktadır. Bu enerji kaynağının etkin bir şekilde entegrasyonu hem çevresel etkilerin azaltılmasına hem de ulusal enerji politikalarının güçlendirilmesine katkıda bulunarak, toplumsal faydayı artırmaktadır. Böylece hem günümüz hem de gelecek nesiller için daha sürdürülebilir bir enerji yapısının inşa edilmesine olanak tanınmaktadır. Bu çerçevede, kamu kurumlarının güneş enerjisi uygulamalarını benimsemesi, gelecekteki enerji senaryolarında belirleyici bir unsur haline gelecektir.

2. GÜNEŞ ENERJİSİNİN TEMEL İLKELERİ

Güneş enerjisi, doğanın sunduğu en zengin ve sürdürülebilir enerji kaynaklarından biri olarak, temel prensipleri üzerinde şekillenmektedir. Bu enerji formu, güneşin elektromanyetik spektrumundaki fotonları kullanarak, çeşitli teknolojiler aracılığıyla doğrudan elektriğe veya ısı enerjisiye dönüştürülmektedir. Güneş enerjisinin verimliliği, hem fotovoltaiik (FV) hücrelerin etkinliğine hem de güneş termal sistemlerinin tasarımına bağlıdır. Fotovoltaiik sistemlerde, güneş ışığını doğrudan elektrik akımına çeviren güneş hücreleri bulunmaktadır. Bu hücreler genellikle silikon tabanlı malzemelerden üretilmektedir ve fotonların enerji transferini kullanarak, pozitif ve negatif yüklerin ayrılması yoluyla elektrik üretir. Şekil 2’de fotovoltaiik sistem şeması gösterilmiştir.

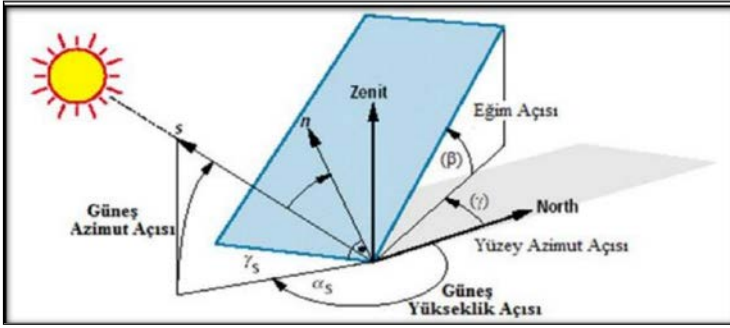
Şekil 2. Fotovoltaiik sistem şeması



Güneş enerjisi sistemlerinin etkin çalışabilmesi için, güneş ışığının doğrudan alınması ve toplamaya yönelik optimum açıların belirlenmesi oldukça kritik bir rol oynamaktadır. Şekil 3’te güneş açıları gösterilmiştir. Yüzeylerin eğimi ve yönü,

güneş ışınlamının maksimum seviyede toplanmasını sağlar. Ayrıca, güneş izleme sistemleri gibi gelişmiş teknolojiler, panel açılarının gün boyunca güneşe göre otomatik olarak ayarlanmasını mümkün kılar ve bu sayede enerji verimliliğini daha da artırır. Diğer yandan, güneş termal sistemlerde, güneş ışığı doğrudan ısıya dönüştürülmekte ve bu ısı çeşitli uygulamalarda kullanılabilir; örneğin, sıcak su üretimi ve yapıların ısıtılması gibi.

Şekil 3. Güneş açıları



Sürdürülebilirlik açısından, güneş enerjisi sistemlerinin kullanılması, karbondioksit emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlarken, yerel ve ulusal enerji bağımsızlığının artırılmasına da yardımcı olur. Bununla birlikte, güneş teknolojilerinin çevresel etkileri de dikkate alınması gereken bir diğer önemli unsurdur. Özellikle, bu sistemlerin üretimi ve geri dönüşümleri sırasında ortaya çıkan atıkların yönetimi hem çevresel koruma amaçları hem de sürdürülebilir gelişim hedefleri açısından önem arz etmektedir. Dolayısıyla, güneş enerjisi kullanımının daha fazla benimsenmesi, sadece enerji verimliliği sağlayarak değil, aynı zamanda sosyal ve çevresel boyutları göz önünde bulundurularak planlanmalıdır.

Güneş enerjisi, doğal bir kaynak olarak, güneş ışığının enerjiye dönüştürülmesi prensibine dayanmaktadır. Güneş, her saniye büyük bir miktarda enerji üretmekte ve bu enerjinin

Dünya'ya ulaşan kesri, çeşitli teknolojik süreçlerle elektrik ve ısı enerjisine dönüştürülebilmektedir. Güneş enerjisi sistemleri, esasen iki ana kategoriye ayrılmaktadır: fotovoltaiik (PV) paneller ve güneş termal sistemler. Fotovoltaiik paneller, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çeviren yarı iletken malzemelerden oluşur. Bu sistemler, güneş ışığını absorbe ederek elektriği üreten bir dönüşüm süreci içerir; burada fotonlar, elektronları uyararak akım oluşturur. Güneş termal sistemler ise, güneş ısını toplayarak sıcak su veya buhar üretir ve bu enerji genellikle binaların ısıtılması gibi uygulamalar için kullanılır (Özdemir ve Özmen, 2023).

Güneş enerjisinin maksimum verimliliği, sistemlerin tasarımına, yerel iklim koşullarına ve coğrafyaya bağlıdır. Örneğin, bir PV sisteminin verimliliği, kullanılan malzeme kalitesine, panelin açısına ve güneş ışığının yoğunluğuna bağlıdır. Ayrıca, güneş enerjisi sistemlerinin kurulum yerleri, gölgelenme gibi faktörlerle etkileşime girdiklerinde, toplam enerji üretimini etkileyen kritik unsurlardan birini oluşturur. Güneş enerjisinin sürdürülebilirliği açısından, tarımsal alanların veya doğal yaşam alanlarının korunması ve güneş enerjisi sistemlerinin ekosistemle uyumlu biçimde entegre edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu noktada gezegenimizin enerji ihtiyacının karşılanmasında güneş enerjisinin potansiyeli, fosil yakıtların yol açtığı çevresel sorunların azaltılması ile büyük bir tezat oluşturur.

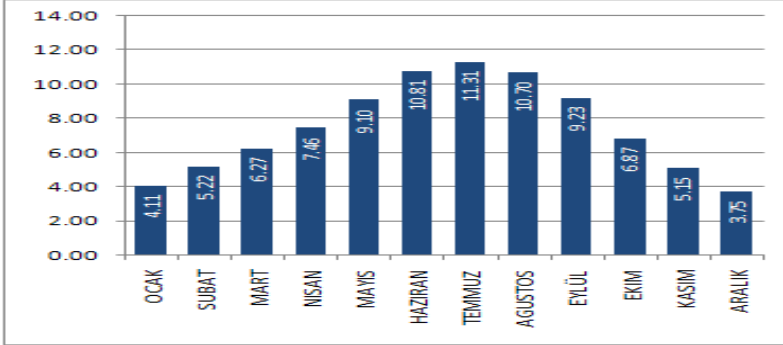
Sonuç olarak, güneş enerjisinin temel ilkeleri, toplumların enerji gereksinimlerini sürdürülebilir bir biçimde karşılama noktasında kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, güneş enerjisi sistemlerinin etkinliği ve verimliliği, enerji dönüşüm süreçlerinin anlaşılması, teknoloji geliştirilmesi ve uygulama alanlarının genişletilmesi ile sürekli olarak iyileştirilmektedir. Bu girişim hem bireysel hem de kurumsal düzeyde çevresel faydalar sağlarken, enerji bağımsızlığı ve

güvenliği yönünde de önemli adımlar atılmasına olanak tanımaktadır.

3. TÜRKİYE'DE GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ

Türkiye, coğrafi konumu ve iklim koşulları nedeniyle güneş enerjisi potansiyeli bakımından oldukça avantajlı bir ülke konumundadır. Şekil 4'te Ülkenin büyük bir kısmı, yıllık ortalama 2.740 saatlik güneşlenme süresi ile güneş enerjisi üretimi için elverişli bir iklime sahiptir. Özellikle güney ve güneydoğu bölgeleri, bu potansiyelin en yüksek olduğu alanlar arasında yer almakta olup, Adana, Gaziantep ve Kilis gibi iller, güneş enerjisi üretiminde öncü rol oynamaktadır. Türkiye'nin toplam güneş enerjisi potansiyeli, yıllık 380 milyar kilovat-saat olarak hesaplanmakta, bu rakam ülkenin enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılayacak düzeydedir (Yaşarsoy, 2024).

Şekil 4. Türkiye'de güneşlenme süreleri



(<https://gepa.enerji.gov.tr/>)

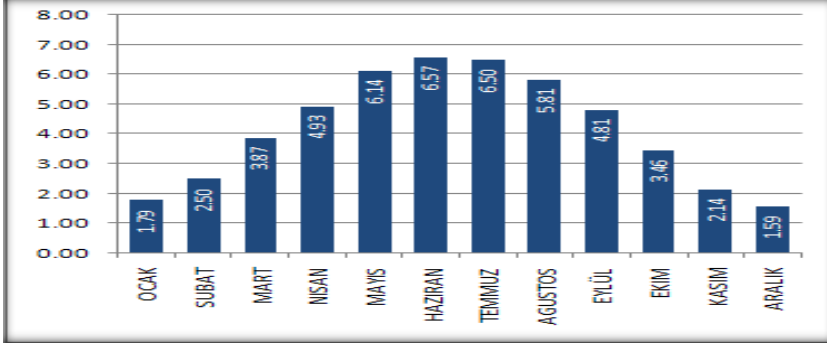
Güneş enerjisi potansiyelinin yerinde değerlendirilmesi için Türkiye, çeşitli stratejiler ve yatırımlar gerçekleştirmektedir. Özellikle 2010 yılında yürürlüğe giren Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM), güneş enerjisi yatırımları için önemli bir teşvik mekanizması

oluşturmuştur. Ayrıca, güneş enerjisi santralleri hem yerleşik hem de yerel ölçeklerde kurularak, sanayi tesislerinden konutlara kadar geniş bir yelpazede enerji sağlama kapasitesine sahiptir. Bu durum, yalnızca enerji bağımlılığının azaltılmasına katkı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda istihdamı artırmak ve yerel ekonomilere canlılık kazandırmak adına da önemli bir fırsat sunmaktadır (Yahlizade, 2025).

Bununla birlikte, Türkiye'de güneş enerjisi potansiyelinin verimli bir şekilde kullanılması için çeşitli zorluklarla da karşılaşilmektedir. Teknik altyapının yetersizliği, finansal kaynakların sınırlılığı ve bürokratik engeller, bu potansiyelin gerçekleştirilmesinde önemli engeller teşkil etmektedir. Ancak, iklim değişikliği ile mücadele ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda, güneş enerjisi yatırımlarının artırılması ve bu alandaki teknolojik gelişmelerin desteklenmesi, ülkenin enerji dönüşüm sürecinde kritik bir öneme sahip olacaktır. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin etkin bir şekilde değerlendirilmesi, gelecekte enerji güvenliğinin sağlanması ve çevresel sürdürülebilirliğin elde edilmesi açısından elzemdir.

Türkiye, coğrafi konumu ve iklim koşulları itibarıyla oldukça zengin bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Ülkenin büyük bir kısmı, yıllık güneşlenme süresinin 2,700 saatten fazla olduğu, ılıman ve güneşli iklim kuşaklarında yer alır. Özellikle Türkiye'nin güney ve iç kesimlerinde bu potansiyel daha da belirginleşmektedir; Adana, Mersin, Antalya ve Kayseri gibi iller, yüksek güneş ışıınımı değerleri ile dikkat çekmektedir. Şekil 5 açısından bakıldığında, Türkiye'nin güneş enerjisi kapasitesi yıllık ortalama 1,400 kWh/m² civarında bir yıllık güneş enerjisi verimi sağlamaktadır. Ayrıca, Türkiye'nin toplam yüzey alanının yaklaşık %92'si güneş enerjisi üretimi için uygun alanlar olarak değerlendirilmektedir (Yaşarsoy, 2024).

Şekil 5. Türkiye'nin global radyasyon değerleri (KWh/m²-gün)



(<https://gepa.enerji.gov.tr/>)

Güneş enerjisi, Türkiye'nin enerji bağımlılığını azaltma ve sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşma noktasında önemli bir rol oynamaktadır. Mevcut koşullar dahilinde, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin yalnızca bir kısmı kullanılmakta olup, bu durum enerjinin ulusal ekonomideki etkinliğini artırma yönünde geniş bir alan sunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımlar sonucunda, güneş enerjisi santrallerinin sayısı her geçen gün artmakta ve bu durum, yerel istihdama ek olarak elektrik faturalarını indirme gibi avantajlar da sağlamaktadır. Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın verilerine göre, 2022 yılı itibarıyla ülke genelinde kurulu güneş enerji gücü yaklaşık 10,000 MW seviyelerine ulaşmıştır. Bu rakam, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin mevcut durumunu ve gelecekteki büyüme fırsatlarını gözler önüne sermektedir (Beyoğlu, 2023).

Dolayısıyla, Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli hem çevresel sürdürülebilirlik açısından hem de ekonomik açıdan büyük bir değer taşımaktadır. Özellikle, güneş enerjisi sistemlerinin kurulması ve entegrasyonu üzerine yürütülen araştırmalar, bu potansiyelin ekonomik ve çevresel etkilerini daha da derinleştirmekte ve yenilikçi çözümler geliştirmektedir. Dolayısıyla, güneş enerjisi, Türkiye'nin enerji geleceğinde

merkezi bir rol oynamakta ve yerel kaynakların en verimli şekilde kullanılması noktasında somut adımlar atılmasına zemin hazırlamaktadır. Bu bağlamda, güneş enerjisinin önemi hem enerji güvenliğini artırma hem de iklim değişikliği ile mücadele çabalarını destekleme açısından vurgulanmaktadır.

4. ÜLKEMİZ'DEKİ UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Ülkemizde, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelerek, özellikle güneş enerjisi kullanımı konusunda önemli adımlar atmaktadır. Güneş enerjisi, yüksek enerji tüketimi olan hastaneler için oldukça verimli ve sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Şekil 6 ile 7' deki ülkemizde bazı başarılı hastane güneş enerjisi uygulama örnekleri, bu alandaki gelişimi göstermektedir.

Şekil 6. Kale DH kendi tükettiği elektriğin tamamını hastanede kurulan güneş enerji santralinden üretiyor



(<https://kaledh.saglik.gov.tr/>)

Şekil 7. Antalya kamu hastaneleri birliğine bağlı Kepez Devlet Hastanesine kurulan 17.16 kilovatlık (kW) güneş panelleri



(<https://www.aa.com.tr>)

5. GÜNEŞ ENERJİSİ VE KAMU POLİTİKALARI

Güneş enerjisi, kamu politikaları kapsamında önemli bir rol oynamakta ve iklim değişikliği ile mücadele, enerji güvenliği ve ekonomik kalkınma gibi çeşitli hedeflere ulaşılmasında stratejik bir araç olarak görülmektedir. Kamu kurumları, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmek amacıyla kapsamlı mevzuatlar ve düzenlemeler geliştirmektedir. Bu düzenlemeler, güneş enerjisinin verimli bir şekilde entegrasyonunu sağlamak için teknik standartların belirlenmesi, izin süreçlerinin hızlandırılması ve finansal teşviklerin sunulması gibi unsurları içermektedir. Özellikle, “güneş enerjisi santralleri için arazi kullanımı” gibi konular, kamu politikası aracılığıyla düzenlenerek, çevresel sürdürülebilirlik ile ekonomik faydaların dengesini korumaya çalışmaktadır.

Destekleme mekanizmaları, güneş enerjisi projelerinin hayata geçişini kolaylaştıran önemli bir unsur olmaktadır. Bu

mekanizmalar, genellikle sübvansiyonlar, vergi indirimleri ve yeşil sertifikalar gibi ekonomik teşvikler aracılığıyla uygulanmaktadır. Örneğin, devlet destekli finansman programları, kamu kuruluşlarının güneş enerjisi sistemlerine yatırım yapmasını teşvik ederek, ilk kurulum maliyetlerini düşürmektedir. Ayrıca, çeşitli ülkelerde uygulanan besleme tarifeleri (Feed-in Tariffs-FiTs) gibi girişimler, yenilenebilir enerji üreticilerine belirli bir süre boyunca sabit fiyatla elektrik satma hakkı tanıyarak, güneş enerjisi yatırımlarını cazip hale getirmektedir. Bu tür destekleme mekanizmaları, yalnızca güneş enerjisi kullanımını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda bu alanda istihdam yaratma ve yerel ekonomilere katkıda bulunma potansiyelini de beraberinde getirmektedir (Yahlizade, 2025).

Sonuç olarak, güneş enerjisi ve kamu politikaları arasındaki ilişki, sürdürülebilir enerji geçişinin temel taşlarından birini oluşturmaktadır. Kamu kurumlarının etkin düzenlemeleri ve destekleyici politika çerçeveleri, güneş enerjisi altyapısının güçlendirilmesine ve bu kaynağın toplum genelinde benimsenmesine zemin hazırlamaktadır. Bunun yanı sıra, uluslararası iş birlikleri ve bilgi paylaşımının artırılması, güneş enerjisi kullanımının yaygınlaşmasına katkı sağlayan bir diğer önemli faktör olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, güneş enerjisi projeleri, sadece çevresel faydalar sunmakla kalmayıp, aynı zamanda kamu politikalarının başarısını sağlamada merkezi bir rol oynamakta ve toplumların sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmalarına yardımcı olmaktadır.

Güneş enerjisi, kamu politikaları açısından önemli bir alan oluşturarak hem çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaktadır hem de enerji bağımsızlığı açısından stratejik bir kaynak teşkil etmektedir. Kamu politikaları, güneş enerjisi sistemlerinin entegre edilmesi ve geniş çapta benimsenmesi için düzenleyici çerçeveler ve teşvik mekanizmaları geliştirmektedir. Bu bağlamda, mevzuat ve düzenlemeler, inovasyonu teşvik

etmek ve yatırımları artırmak adına kritik bir rol oynamaktadır. Ülkeler, güneş enerjisi potansiyelini en üst düzeye çıkarmak amacıyla, yenilenebilir enerji hedefleri belirlemekte ve bu hedeflerin gerçekleştirilmesini sağlamak üzere hukuki altyapıyı oluşturma yönünde adımlar atmaktadır. Öne çıkan yasal düzenlemeler arasında, teşvik sistemleri, net metering uygulamaları ve yerel yönetimlerin güneş enerjisi projeleri için sağladığı izin süreçleri yer almaktadır.

Destekleme mekanizmaları, güneş enerjisi kurumlarının yaygınlaştırılarak, ekonomik ve çevresel faydaların sağlanmasını desteklemektedir. Bu mekanizmalar arasında, mali teşviklerin yanı sıra, vergi indirimleri, hibe programları ve düşük faizli krediler öne çıkmaktadır. Ülkeler, bu tür desteklerle hem bireysel hem de ticari tüketicilerin güneş enerjisi projelerine yatırım yapmalarını teşvik etmeyi hedeflemektedir. Ayrıca, enerji üreticileri için garanti fiyat uygulamaları gibi mekanizmalar, yatırımcıların uzun vadeli güvence altında kalmasını sağlamaktadır. Tüm bu düzenlemeler, güneş enerjisinin enerji portföylerinde daha fazla yer almasını kolaylaştırmakta ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda ilerlemeyi teşvik etmektedir.

Sonuç olarak, kamu politikaları, güneş enerjisi kullanımı açısından kritik bir altyapı oluşturarak çevresel sorunların çözümüne ve enerji ihtiyaçlarının karşılanmasına yönelik etkili bir yaklaşım geliştirmektedir. Bu politikaların etkinliği, yalnızca enerji üretiminde değil, aynı zamanda ekonomik kalkınma ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerini gerçekleştirmede de önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Güneş enerjisi ve kamu politikaları arasındaki ilişki, yenilenebilir enerji geçişinde belirleyici bir unsur temsil etmekte ve gelecek nesillere daha sürdürülebilir bir yaşam alanı sunma adına atılan adımları şekillendirmektedir.

5.1. Mevzuat ve Düzenlemeler

Güneş enerjisinin kamu kurumları tarafından kullanımını düzenleyen mevzuat ve düzenlemeler, ülkenin enerji politikalarının ve sürdürülebilirlik hedeflerinin başarısını doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, yasalar ve yönetmelikler, güneş enerjisi santrallerinin kurulumu, işletilmesi ve entegrasyonu sürecinde önemli bir çerçeve sunmaktadır. Örneğin, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının teşvik edilmesine yönelik düzenlemeler, yerel yönetimler ve devlet organları arasında iş birliğini sağlamaya yönelik prensipleri de içermektedir. Bu kapsamda, Türkiye’de 2005 yılında yürürlüğe giren Yenilenebilir Enerji Kanunu, güneş enerjisi yatırımlarını destekleyen mali teşvikler ve vergi indirimleri ile işletmelere avantaj sağlamaktadır.

Mevzuatın etkinliği, yalnızca teşvikler ile sınırlı kalmayıp, güneş enerjisi sistemlerinin güvenli bir şekilde kurulmasını temin eden inşaat ve işletme standartları ile de yakından ilişkilidir. Kamusal alanlarda güneş enerjisi uygulamalarının yaygınlaşması için gerekli olan bu standartlar, doğal kaynakların verimli kullanımını destekleyen çevresel düzenlemelerle bütünleştirilmiştir. Örneğin, çevresel etki değerlendirmeleri, potansiyel kurulum alanlarının seçimi esnasında göz önünde bulundurulmakta ve alanın ekosistem üzerindeki muhtemel etkileri değerlendirilmektedir. Ayrıca, çeşitli yerel ve ulusal otoritelerin bu alanda ortak çalışmalar yaparak uyumlu bir mevzuat geliştirilmesi, güneş enerjisi projelerinin başarısını önemli ölçüde artırmaktadır.

Sonuç olarak, sunulan düzenlemeler ve mevzuat çerçevesi, güneş enerjisi kullanımının yaygınlaştırılması açısından kritik bir rol oynarken, sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşılmasında da temel bir araç sunmaktadır. Kamu kurumları, bu düzenlemeleri etkin bir şekilde uygulayarak güneş

enerjisi yatırımlarını teşvik edebilir ve toplumun bu yenilikçi enerji kaynağına olan erişimini artırma potansiyelini güçlendirebilir. Böylelikle hem ekonomik kalkınmanın desteklenmesi hem de çevresel etki alanında sürdürülebilirlik sağlanmış olur.

Kamu kurumlarında güneş enerjisi kullanımını şekillendiren mevzuat ve düzenlemeler hem enerji piyasasının işleyişini hem de sürdürülebilirlik hedeflerini doğrudan etkileyen temel bir yapı taşını oluşturur. Özellikle, devletin yenilenebilir enerjiye yönelik politikaları, güneş enerjisi projelerinin hayata geçirilmesinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Türkiye’de, Elektrik Piyasası Kanunu ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması gibi düzenleyici çerçeveler, güneş enerjisi yatırımlarını teşvik etmek üzere tasarlanmıştır. Bu tür mevzuatlar, enerji üretiminde yenilenebilir kaynakların payını artırarak, kamu kurumlarının çevresel sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu hareket etmesine olanak tanımaktadır.

Bunun yanı sıra, güneş enerjisi sistemlerine yönelik imar ve altyapı düzenlemeleri de projelerin uygulanabilirliğini doğrudan etkilemektedir. İlgili kamu kurumları, arazi kullanım hakkı, tesis yer seçimi ve çevresel etki değerlendirme süreçlerine dair net düzenlemeler oluşturarak, güneş enerjisi yatırımlarının hızlanmasını sağlamayı hedeflemektedir. Örneğin, güneş enerjisi santralleri için belirlenen kurulum standartları ve izin süreçleri, yatırımcıların projelerini güvenli ve hızlı bir şekilde hayata geçirebilmelerini sağlamak için hayati öneme sahiptir. Bu bağlamda, mevzuatın düzenli ve güncel tutulması, ayrıca yerel yönetimlerin iş birliği ile süreçlerin kolaylaştırılması, sektörün büyümesi açısından kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Türkiye'nin, 2053 yılına kadar net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda güneş enerjisi kullanımı üzerine geliştirdiği mevzuat, kamu kurumlarının enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik stratejilerini destekleyebilmesi için önem arz etmektedir. Bu bağlamda, lisanslama süreçleri, teşvikler ve tarife sistemleri gibi unsurların yanı sıra, yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde yapılan araştırmalar ve geliştirme projelerine sağlanan destekler, güneş enerjisinin potansiyelinin gerçekleştirilmesinde büyük rol oynamaktadır. Sonuç olarak, bu düzenlemeler hem enerji bağımlılığını azaltmak hem de çevresel sorunlarla mücadele etmek amacıyla kamu kurumlarına ciddi fırsatlar sunmaktadır, dolayısıyla sürdürülebilir bir gelecek için hayati bir öneme sahiptir (Aykanat, 2023).

5.2. Destekleme Mekanizmaları

Güneş enerjisi potansiyelinin etkin bir şekilde değerlendirilmesi, kamu kurumlarında benimsenen destekleme mekanizmalarıyla doğrudan ilişkilidir. Şekil 8,9,10,11'de olduğu gibi bu mekanizmalar, karbon salınımını azaltma hedefleri doğrultusunda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmeye yönelik tasarlanmış bir dizi stratejiyi kapsamaktadır. Ülkeler, güneş enerjisi projelerini desteklemek için çeşitli mali teşvikler sunarak, bu alandaki yatırımcıların risklerini asgariye indirmeyi amaçlamaktadır. Örneğin, yatırım teşvikleri, vergi indirimleri veya geri ödeme sistemleri gibi finansal avantajlar sağlanarak güneş enerji santrallerinin kurulumu ve işletilmesi sürecinde karşılaşılan engellerin aşılması hedeflenmektedir.

Şekil 8. Enerji verimliliği destekleri



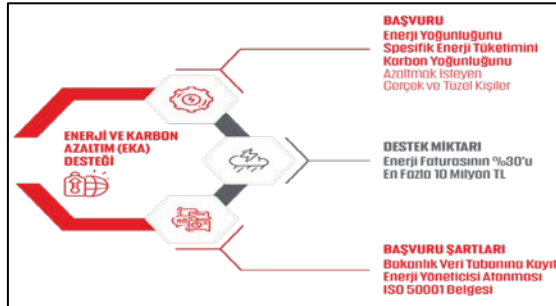
(<https://enerji.gov.tr/>)

Şekil 9. VAP destek programı kapsamında başvurular yıl içerisinde sürekli veya dönemsel olarak alınmaktadır.



(<https://enerji.gov.tr/>)

Şekil 10. Enerji ve Karbon Azaltımı (EKA) destek programı



(<https://enerji.gov.tr/>)

Şekil 11. 5. Bölge teşvikleri



(<https://enerji.gov.tr>)

Ayrıca, kamu kurumları tarafından oluşturulan çeşitli fonlar ve hibeler, güneş enerjisi projelerinin teknik geliştirmelerini destekleyerek, teknolojinin inovasyonunu teşvik etmektedir. Bu bağlamda, Ar-Ge yatırımları için sağlanan desteklerle birlikte, yerel düzeyde güneş enerjisi çözümlerini benimseyen girişimcilerin cesareti artırılmakta, böylece sürdürülebilir enerji sistemlerinin kurulmasına zemin hazırlanmaktadır. Öte yandan, kamu politikaları çerçevesinde sağlanan eğitim ve bilinçlendirme programları, güneş enerjisi kullanımında toplumsal farkındalığı artırmakta ve bu alandaki teknolojiye olan kabulü kolaylaştırmaktadır.

Destekleme mekanizmalarının etkinliği, zamanla değişen piyasa koşullarına ve siyasi iradeye bağlı olarak dalgalanmakta; bu durum, kamu kurumlarının stratejilerinin sürekli olarak gözden geçirilmesini gerektirmektedir. Uzun vadeli sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşabilmek için, bu mekanizmaların sadece başlangıç aşamasında değil, aynı zamanda operasyonel süreçlerde de etkin bir şekilde uygulanması önem arz etmektedir. Aksi halde, yatırımcılar ve kamuoyu nezdinde oluşabilecek güvensizlik, güneş enerjisi

yatırımlarını olumsuz yönde etkileyebilir. Dolayısıyla, nesnel veriler ışığında geliştirilen bu destekleme mekanizmalarının optimize edilmesi hem verimliliği artıracak hem de sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmayı kolaylaştıracaktır.

Güneş enerjisinin kamu kurumlarında etkin bir şekilde kullanılabilmesi için gerekli olan destekleme mekanizmaları, yalnızca mali teşvikler değil, aynı zamanda teknik ve yapısal unsurları da içeren karmaşık bir sistemdir. Bu mekanizmaların temeli, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talebin artırılması ve bu kaynakların kullanılabilir hale gelmesidir. Kamu sektöründe güneş enerjisi uygulamalarını teşvik eden başlıca destekleme mekanizmaları arasında doğrudan mali hibeler, vergi indirimleri, uzun vadeli enerji alım garantileri (YAEAG) ve finansman sağlama imkânları yer almaktadır. Örneğin, çeşitli ülkelerde uygulanan YAEAG yöntemleri, güneş enerjisi projelerinin gelir garantisi sağlayarak, özel sektörün bu alana yatırım yapma istekliliğini artırmaktadır (Yönetken ve Gürsoy, 2021).

Bu mekanizmaların; sunulan teşviklerin yanı sıra, kamu kurumlarının güneş enerjisi sistemleri kurulum ve işletme süreçlerinde rehberlik sağlayacakları teknik destek programları da önem taşımaktadır. Kamu kurumları, güneş enerjisi projelerine yönelik mevcut bilgi eksikliklerini giderebilmek için eğitim programları düzenleyerek, proje geliştiricilerini bilgilendirmekte ve en iyi uygulamaları yaygınlaştırmaktadır. Ayrıca, yerel yönetimlerin ve devlet kurumlarının iş birliği içinde geliştirdiği projeler, gerekli altyapının oluşturulmasına katkı sağlamakta ve bu süreçte paydaşların rolünü artırmaktadır. Böylece hem çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması hem de enerji verimliliğinin artırılması sağlanmaktadır.

Sonuç olarak, destekleme mekanizmaları, kamu kurumlarında güneş enerjisi kullanımının yaygınlaşmasında

kritik bir rol oynamaktadır. Enerji piyasasında rekabetin teşvik edilmesi ve yenilikçi çözümlerin geliştirilmesi amacıyla uygulanan bu mekanizmalar, sadece mali kaynakların etkin kullanımını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda toplumda enerjinin sürdürülebilirliğine dair bilinç oluşturulmasına da katkı sunmaktadır. Kamu sektörünün bu mekanizmalara yönelik stratejik yaklaşımları, güneş enerjisinin geleceği ve yenilenebilir enerji hedeflerinin gerçekleştirilmesi açısından hayati önem taşımaktadır.

6. SONUÇ

Kamu kurumlarında güneş enerjisi kullanımı, enerji verimliliğini artırarak maliyetleri düşürür ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı sağlar. Fosil yakıt bağımlılığını azaltarak sera gazı emisyonlarını düşüren bu uygulamalar, iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynar. Kamu sektörünün yenilenebilir enerji projelerine öncülük etmesi, özel sektörü de teşvik eder ve toplumsal bilinci artırır.

Güneş enerjisi, kamu kurumlarının işletme giderlerini azaltırken çevresel sürdürülebilirliği destekler. Eğitim ve farkındalık çalışmalarıyla yeşil enerji bilinci yaygınlaştırılabilir, aynı zamanda yeni istihdam alanları yaratılabilir. Bu dönüşüm hem ekonomik hem de ekolojik faydalar sunarak daha yaşanabilir bir gelecek için temel oluşturur.

Sonuç olarak Kamu kurumlarında güneş enerjisinin yaygınlaşması, enerji bağımsızlığı, çevre koruma ve sürdürülebilir kalkınma açısından stratejik bir adımdır. Destekleyici politikalar ve yenilikçi çözümlerle bu sistemlerin etkinliği artırılmalıdır.

KAYNAKÇA

- Aksu, M. (2025). Yenilenebilir Enerji Finansmanında Fintek ve Blokzincir Uygulamaları: Türkiye Açısından Bir Değerlendirme. *Anadolu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 26(1), 362-378.
- Aykanat, A. (2023). Sistem İlişkileri Açısından Sürdürülebilir Sağlıklı Yapı Üretimi Kuramsal Modeli. *Digital international journal of Architecture Art Heritage*, 2(3), 62-81.
- <https://enerji.gov.tr/>
- <https://gepa.enerji.gov.tr/>
- <https://kaledh.saglik.gov.tr/>
- <https://www.aa.com.tr>
- Özdemir, T., Özmen, Ö. T. (2023). Farklı Tipteki Fotovoltaik Güneş Panellerinin Düzce için 2014-2019 Yılları Arası Yaz Ayları Performans ve Verimlilik Analizi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 11(1), 381-398.
- Yahlizade, M.L. (2025). *Şebekeden Bağımsız Sistemlerde Farklı Fotovoltaik Panel ve Akülerin Performans Analizleri* (Doctoral dissertation).
- Yaşarsoy, M. (2024). *Harran Üniversitesi Güneş Enerjisi Santralinin Performans Analizi* (Doctoral dissertation).
- Yönetken, A., Gürsoy, T. (2021). Algılayıcı türlerinin güneş takip sisteminde etkinliğinin araştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (25), 112-119.

AKADEMİK PERSPEKTİFTEN MÜHENDİSLİK

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com