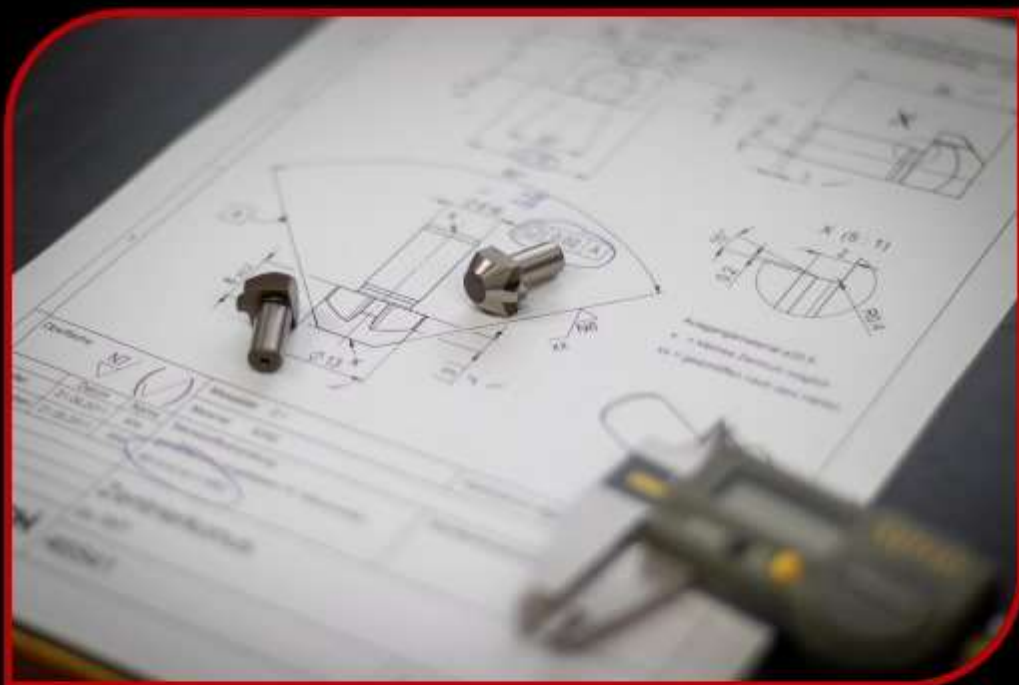


MAKİNA MÜHENDİSLİĞİNDE GÜNCEL KAVRAMLAR VE YENİLİKÇİ ARAŞTIRMALAR



*MAKİNA
MÜHENDİSLİĞİNDE
GÜNCEL KAVRAMLAR VE
YENİLİKÇİ ARAŞTIRMALAR*

Editör
Prof. Dr. İSMET SEZER





Makine Mühendisliğinde Güncel Kavramlar ve Yenilikçi Araştırmalar
Editör: Prof. Dr. İSMET SEZER

Dizayn: All Sciences Academy Design

Basım Tarihi: Aralık 2025

Yayıncı Sertifika Numarası: 72273

ISBN: 978-625-8536-44-7

© All Sciences Academy

www.allsciencesacademy.com

allsciencesacademy@gmail.com

İÇERİK

1. Bölüm	5
Havuz Kaynama Isı Transferi Alanında Yapay Zekâ Kullanımı <i>Doğan ÇİLOĞLU</i>	
2. Bölüm	21
Havuz Kaynama Isı Transferinin İyileştirilmesi: Isıtma Yüzeyinde Yapılan Modifikasyonlar <i>Doğan ÇİLOĞLU</i>	
3. Bölüm	33
Üçlü Vorteks Tüpü Sistemlerinde Nozul Sayısı ve Akışkan Türünün Ekserji Performansı ve Termodinamik Verim Üzerindeki Etkilerinin Deneysel İncelenmesi <i>Öğr. Gör. Dr. Murat KORKMAZ, Prof. Dr. Volkan KIRMACI</i>	
4. Bölüm	46
Paralel Bağlı Vorteks Tüplerinde Malzeme ve Akışkan Parametrelerinin Termodinamik Performansa Etkisi <i>Öğr. Gör. Dr. Murat KORKMAZ, Prof. Dr. Volkan KIRMACI</i>	
5. Bölüm	60
Biyogaz Üretiminde Verim Artışı için Proses Parametrelerinin Otomasyon Tabanlı Kontrolü <i>Mustafa KARAGÖZ, Nuri TUNÇ, Burak ÇİFTÇİ, Emrah DENİZ</i>	
6. Bölüm	78
Bor Katkılı Yakıtların Yanma Karakteristikleri <i>İsmet SEZER</i>	
7. Bölüm	101
İleri Teknoloji Ve Mühendislikte İş Birliği <i>Dr. Melike AVER GÜRBÜZ</i>	

8. Bölüm	116
İşbirliğiyle Çevre Dostu Mühendislik Çözümleri	
<i>Dr. Melike AVER GÜRBÜZ</i>	
10. Bölüm	140
Güneş Enerjisi Sistemleri: Tarihsel Gelişim, Fotovoltaik Tasarım ve Ekonomik Analiz	
<i>Umut ERCAN</i>	

Havuz Kaynama Isı Transferi Alanında Yapay Zekâ Kullanımı

Doğın ÇİLOĞLU¹

1- Doç. Dr. Doğın ÇİLOĞLU; Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü.
dciloglu@atauni.edu.tr ORCID No: 0000-0002-7570-9271

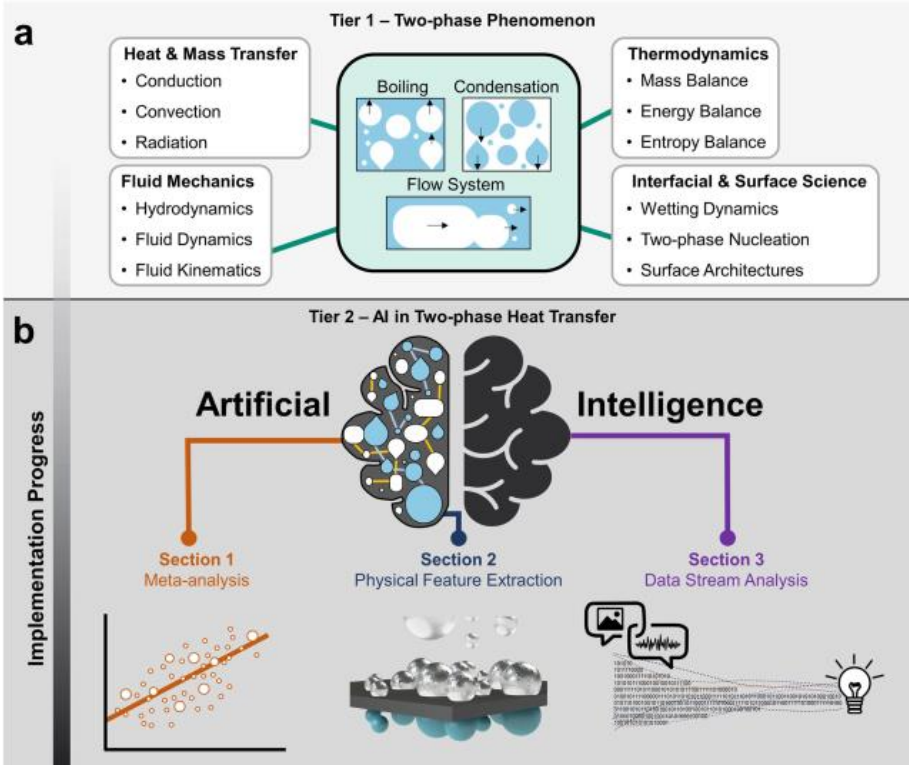
ÖZET

Havuz kaynama çok-fazlı akış, yüzey pürüzlülüğü, sıvı özellikleri, yüzey ıslanabilirliği, kabarcık oluşumu ve faz geçişi gibi çok sayıda fiziksel mekanizmanın aynı anda ve eşzamanlı olarak gerçekleştiği son derece karmaşık bir fenomendir. Katkı maddeleri ve nanoakışkanlar kullanıldığında bu karmaşıklık daha da artar; çünkü nanopartiküllerin yüzey ile etkileşimi, sıvı özelliklerinde meydana gelen değişimler ve kabarcık dinamiğinin dönüşümü geleneksel mühendislik korelasyonlarıyla tam olarak modellenemez hâle gelir. Bu nedenle araştırmacılar son 15 yıldır, yapay zekâ (Artificial Intelligence, AI) yöntemlerini kullanarak kaynama süreçlerini daha iyi anlamaya, tahmin etmeye ve optimize etmeye yönelik yeni çözümler geliştirmeye başlamıştır. Makine öğrenimi (ML) ve derin öğrenme (DL) gibi veri odaklı yöntemler; geniş veri kümelerinden öğrenebilme, doğrusal olmayan ilişkileri yakalama ve karmaşık fiziksel süreçleri istatistiksel olarak temsil edebilme özellikleri sayesinde bilimsel araştırmalarda güçlü araçlar hâline gelmiştir. Bu bölümde, havuz kaynamada katkı maddeleri ve nanoakışkanlar kullanılarak ısı transferini iyileştirilen sistemlerde, yapay zekâ yöntemlerinin kullanımı için kavramsal çerçeve, yöntemler, örnek uygulamalar, avantajlar, sınırlamalar, gelecek araştırma alanları ve önerilen metodolojileri ayrıntılı biçimde sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Havuz Kaynama, Isı Transfer Katsayısı, Kritik Isı Akısı, Yapay Sinir Ağları, Yapay Zekâ.

GİRİŞ

Havuz kaynama, faz değiştirmeli soğutmanın en verimli formlarından biri olup; elektronik soğutma, enerji sistemleri, metalurjik su verme (quenching) ve uzay teknolojileri gibi yüksek ısı akıllı uygulamalarda yaygın biçimde kullanılmaktadır (Liang ve Mudawar, 2018:1354). Pasif çalışma prensibi, pompasız tasarım kolaylığı ve düşük maliyet avantajları nedeniyle diğer gelişmiş iki-fazlı soğutma stratejilerine kıyasla geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak kaynama sürecinde ortaya çıkan karmaşık mikromekanik ve çok ölçekli etkileşimler, özellikle kritik ısı akısı (CHF) ve çekirdek kaynama ısı transfer katsayısının (HTC) kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, ısı transfer performansını artırmak amacıyla yüzey modifikasyonu, sıvı katkıları (surfactant, polimer) ve nanoakışkanlar gibi çeşitli pasif iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir (Cheng vd., 2007:2745). Son yıllarda ise yapay zekâ ve makine öğrenmesi yöntemleri, kaynama süreçlerinin modellenmesi ve ısı transfer parametrelerinin tahmininde yüksek doğruluk vadeden yeni araçlar olarak literatürde güçlü bir yer edinmeye başlamıştır (Şekil 1) (Liu vd., 2018:306; Swain ve Das, 2016:443; Zolghadri vd., 2021:2).

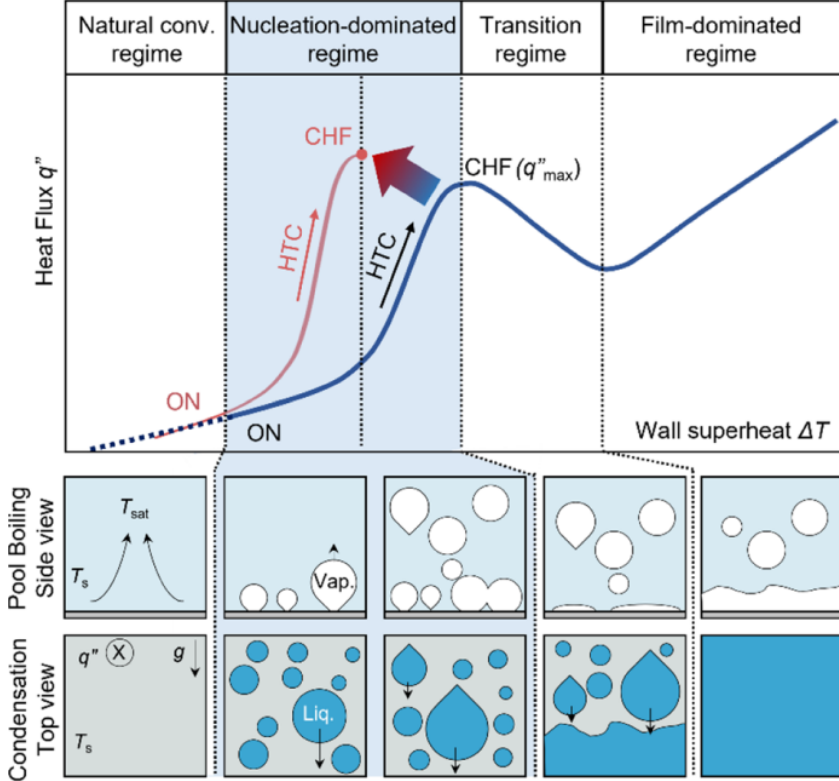


Şekil 1. Kaynama ısı transferinde yapay zekâ (AI); (a) Sıvı-buhar oluşumu ve (b) kaynama olgusu içi AI uygulaması (Suh vd., 2024:4).

HAVUZ KAYNAMA EĞRİLERİ VE REJİMLERİ

Havuz kaynama davranışının anlaşılması hem iyileştirme tekniklerini değerlendirmek hem de kritik çalışma noktalarını belirlemek açısından zorunludur. Kaynama eğrisi, kızma farkı ile yüzey ısı akısı arasındaki ilişkiyi gösterir ve dört temel rejimden oluşur; tek fazlı doğal (natural) taşınım, çekirdek (nucleate) kaynama, geçiş (transition) kaynama ve film kaynama (Şekil 2). CHF, buhar kabarcıklarının birleşerek yüzeyi kapladığı ve ısı transferinin keskin bir şekilde azaldığı kritik geçiş noktasıdır. Minimum ısı akısı ise Leidenfrost noktasına karşılık gelir; bu noktada sürekli buhar filmi çözülmeye başlar ve burası film kaynama rejimi ile son bulur. Çekirdek kaynama rejimi en yüksek ısı transfer katsayısını sağladığı için ısı transferini

iyileştirme çalışmalarının büyük bölümü bu rejimde yoğunlaşmaktadır. Su verme eğrileri ise yüksek sıcaklıktaki yüzeyin soğutulması sırasında ısı transfer katsayısındaki değişimleri gösterir ve özellikle metalurjik işlemlerde yüzey mikroyapısını belirlemesi açısından kritiktir (Cengel ve Ghajar, 2015:585).



Şekil 2. Kaynama eğrisi (Suh vd., 2024:2).

YAPAY ZEKÂ YAKLAŞIMLARININ TEMELLERİ

Makine öğreniminin temel yöntemleri denetimli öğrenme, denetimsiz öğrenme, yarı denetimli öğrenme ve pekiştirmeli öğrenmedir. Bu yöntemler, verinin türüne ve istenen sonuca göre kullanılır (Zolghadri vd., 2021:4).

- **Denetimli Öğrenme:** Etiketlenmiş veri kümeleriyle çalışır. Model hem girdi hem de çıktı arasındaki ilişkiyi öğrenir ve yeni, görülmemiş veriler için tahminlerde bulunur. Örneğin; sınıflandırma ve regresyon.

- *Denetimsiz Öğrenme*: Etiketlenmemiş verilerde gizli örüntüler ve yapılar keşfetmeye odaklanır. Örneğin; kümeleme ve boyut indirgeme.
- *Yarı Denetimli Öğrenme*: Az miktarda etiketli veri ve bol miktarda etiketlenmemiş verinin bir kombinasyonunu kullanır. Örneğin; sınırlı etiketli verinin olduğu durumlar için kullanılır.
- *Pekiştirmeli Öğrenme*: Bir "ajan", bir ortamda deneme-yanılma yoluyla en iyi çıktıyı üreten eylemleri öğrenir. Her doğru eylem için ödül, yanlış eylem için ceza alır.

YAPAY ZEKÂ VE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE MODELLEME

Havuz kaynama, mikroskobik kabarcık oluşumu ile makroskobik akış ve ısı transferi süreçlerinin eş zamanlı gerçekleştiği çok ölçekli ve oldukça karmaşık bir fenomendir. Yüzey pürüzlülüğü, ıslanabilirlik, nanopartikül birikimi, yüzey gerilimi, viskozite değişimi, kabarcık dinamiği ve buhar tabakası oluşumu gibi pek çok parametre HTC ve CHF üzerinde kritik öneme sahiptir. Bu parametrelerin doğrusal olmayan ve çoğu zaman etkileşimli yapısı nedeniyle geleneksel fiziksel modeller (örneğin ısı akısı ayrıştırma modelleri veya ampirik korelasyonlar) her çalışma koşulunda yüksek doğruluk sağlayamaz. İşte bu noktada AI ve ML yöntemleri, karmaşık kaynama süreçlerinin modellenmesi için güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

AI ve ML teknikleri birçok araştırmada hem HTC hem de CHF tahmini için $R^2 \approx 0,99$ düzeyinde başarı göstermiştir. Bu sonuç, klasik korelasyonların çoğunun sağlayamadığı yüksek doğruluk seviyesini işaret etmektedir (Zendehboudi vd. 2017:75).

HAVUZ KAYNAMADA AI GEREKLİLİĞİ

Termofiziksel özelliklerdeki değişimlerin, yüzey modifikasyonlarının ve katkı maddelerinin (seyrelticiler, polimer, nanopartikül) kaynama davranışına etkisi oldukça çok yönlüdür ve çoğu zaman doğrusal olmayan ilişkiler ortaya çıkarır. Örneğin: nanopartiküllerin yüzeyde birikimi

ıslanabilirliği artırırken aynı zamanda çekirdeklenme boşluklarının tıkanmasına da yol açabilir. Diğer taraftan, surfactantlar yüzey gerilimini düşürerek kabarcık boyutunu küçültür, ancak yüksek konsantrasyonlarda viskozite artışı performansı kötüleştirebilir. Polimer katkılar ise düşük konsantrasyonlarda kabarcık birleşimini azaltırken yüksek viskozite nedeniyle ısı transferini sınırlandırabilir. Bu nedenle, yüksek boyutlu ve karışık girdilerle çalışabilen ML modelleri havuz kaynamada büyük avantaj sağlamaktadır. Şimdiye kadar yapılan çalışmalar ML'nin karmaşık ısı transfer fenomenlerini güvenilir şekilde tahmin edebildiği göstermiştir (Liu vd., 2018:306; Swain ve Das, 2016:443; Zolghadri vd., 2021:2; Zendeheboudi vd. 2017:75; Girard vd. 2002:2; Rasmussen ve Williams, 2006:64; Chen vd. 2018:238; Fang vd. 2018:143). Havuz kaynama ısı transferi alanında AI kullanımının temel nedenleri aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır.

- *Karmaşık ve doğrusal olmayan kaynama fiziği:* Kabarcık oluşumu, yüzey gerilimi, faz değişimi, nanopartikül birikimi gibi süreçler yüksek doğrusal olmayan olayları içermektedir.
- *Geleneksel korelasyonların sınırlamaları:* Rohsenow, Cooper, Zuber gibi korelasyonlar belirli deney koşullarına bağlıdır. Yeni yüzey kaplamaları veya nanoakışkanlar için geçerlilikleri sınırlıdır.
- *Deneysel çalışmaların maliyetleri:* Kaynama deneyleri genellikle yüksek hızlı kamera gerektirir, hassas ısı akısı ölçümleri ister, maliyetlidir ve tekrarlanması oldukça zordur. AI, deneylerin tamamlayıcısı olarak mevcut verilerden öğrenebilir ve araştırmacıyı yönlendirebilir.
- *Çok boyutlu problem yapısı:* Kaynama mekanizması üzerine etkili olan kaynama sıvısı türü, katkı maddesi oranı (nanopartikül gibi), yüzey pürüzlülüğü, yüzey ve kaynama sıcaklığı, basınç gibi çok sayıda parametre bulunmaktadır. Bu çok değişkenli yapı AI için ideal bir öğrenme ortamı sağlar.

HAVUZ KAYNAMADA KULLANILAN ML YÖNTEMLERİ VE UYGULAMALARI

Havuz kaynama çalışmalarında kullanılan ML modelleri çeşitlilik göstermektedir. Literatür taramasında en sık kullanılan ML yöntemleri Tablo 1'de özetlenmiş ve aşağıdaki gibi açıklanmıştır:

- *Yapay sinir ağları (ANN/MLP/Deep learning):* Kullanılan en yaygın modellerdir ve yüksek doğruluk sağlarlar. Derin ağ mimarileri,

karmaşık kaynama mekanizmalarındaki çok değişkenli ilişkileri başarılı biçimde yakalar. Yapılan çalışmalar derin ağların ve çok katmanlı yapay sinir ağlarının HTC/CHF tahminlerinde çok yüksek doğruluk seviyelerine ulaştığı göstermiştir. Örneğin; Bouali vd. (2021:3911) tarafından geliştirilen ANN modeli, $R^2=0.9993$ ile HTC'yi tahmin etmiştir. Diğer bir çalışmada, optimum hesap alanının 30 nöronlu bir yapı olduğu vurgulanmıştır, daha karmaşık sistemlerde daha fazla gizli katman gerekebileceği ifade edilmiştir (Zendehboudi vd. 2017:78).

- *Destek vektör regresyonu (Support vector machine, SVR/LSSVM)*: Küçük ve orta ölçekli veri kümelerinde stabil sonuçlar verir. Özellikle termofiziksel özellik tahminlerinde etkin bulunmuştur (Raj ve Ananthi, 2019:33).
- *Gaussian process regression (GPR)*: GPR hem tahmin hem de belirsizlik analizi sağlar. Kaynama sistemlerinin deneysel belirsizlik içeren doğası göz önüne alındığında önemli bir avantaj sunar (Girard vd. 2002:2; Rasmussen ve Williams, 2006:64; Chen vd. 2018:238; Fang vd. 2018:143).
- *Uyarlanabilir bulanık sistemler (Adaptive neuro-fuzzy inference system, ANFIS)*: Az veriyle bile yüksek performans verebilir ve yorumlanabilirlik avantajı sunar (Swain ve Das, 2016:443). Örneğin, PSO-optimize ANFIS modelinin $R^2 = 0,998$ ile en yüksek doğruluğa ulaştığı raporlanmıştır.

Tablo 1: Havuz kaynama için kullanılan ML yöntemleri ve özellikleri.

ML Yöntemi	Temel Özellik	Avantajları	Sınırlamalar	Havuz Kaynama Uygulamaları
ANN/MLP/Deep NN	Çok katmanlı doğrusal olmayan modeller	Çok yüksek doğruluk, karmaşık ilişkileri öğrenme	Veri bağımlılığı, overfitting riski	HTC/CHF tahmini, nanoakışkan kaynama analizi
ANFIS	Bulanık mantık + ANN	Az veriyle çalışabilir, yorumlanabilirlik	Üyelik fonksiyonu seçimine duyarlı	Surfactant ve polimer katkılarının etkisi
SVM/LSSVM	Kernel tabanlı regresyon	Küçük veri setlerinde kararlı	Kernel seçimi kritik	Temel termofiziksel ilişki tahmini
GPR	Olasılıksal modelleme	Belirsizlik analizi sağlar	Büyük veriyle yavaşlar	Deneysel belirsizlik içeren kaynama verileri
ELM/RBF	Hızlı eğitim	Düşük hesap yükü	Rastlantısallığa duyarlı	HTC tahmini, düşük boyutlu veri setleri
Random Forest/Ensemble	Birden çok modelin birleşimi	Aşırı öğrenmeye karşı dayanıklı	Yorumlama zorluğu	Çoklu katkı sistemlerinde performans tahmini
CNN	Görüntü tabanlı öğrenme	Görsel kabarcık dinamiği analizinde güçlü	Büyük veri gerektirir	Kabarcık davranışının video/görüntü analizi

Derin öğrenme (DL), CNN ve Ensemble yöntemler de havuz kaynama tahminlerinde kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda, özellikle, Random Forest, KNN ve CNN gibi gelişmiş yöntemlerin, kaynama davranışının çok ölçekli ve doğrusal olmayan yapısını yakalamada güçlü araçlar olduğu vurgulanmıştır. Yukarıda bahsedilen tüm modeller kullanılarak havuz kaynamada HTC, CHF, kabarcık oluşum süreci, kabarcık ayrılma frekansı, ısıtma yüzeyinin ıslanabilirlik karakteristikleri, kaynama rejimi geçiş tahmini, nanoakışkan gibi kaynayan akışkanın performans tahmini gibi temel kaynama ısı transferi parametreleri için bilgi sahibi olabiliriz.

YAPAY ZEKÂ İLE TAHMİN EDİLEN BÜYÜKLÜKLER

AI yöntemleri literatürde özellikle aşağıda belirtilen çıktıları tahmin etmek için kullanılmıştır:

- *Isı Transfer Katsayısı (HTC)*: ANN ve SVR modelleri genelde HTC tahmininde iyi performans gösterir.
- *Kritik Isı Akısı (CHF)*: Nanoakışkanlar ve yüzey modifikasyonları sayesinde CHF oldukça değişebilir. AI ile CHF tahminleri korelasyonlara göre %10–25 daha düşük hata verebilir.
- *Kabarcık Dinamiği*: DL modelleri kabarcık yarıçapı, büyüme süresi, ayrılma hızı, birleşme eğilimleri gibi büyüklükleri tahmin edebilir.
- *Rejim Tanımlaması*: AI, görüntülerden doğal taşınım, çekirdek kaynama, geçiş kaynama ve film kaynama rejimlerini otomatik olarak ayırt edebilir.

AI'IN NANOAKIŞKAN VE KATKI MADDESİ KULLANIMINA ETKİSİ

Havuz kaynama ısı transferinde kaynama sıvısı için katkı maddeleri ve nanoakışkanlar, havuz kaynama performansını artırmak için sıklıkla kullanılmaktadır. Fakat bu malzemelerin fiziksel etkilerini modellemek çok zordur. Çünkü nanopartiküller yüzeyde ince bir tabaka oluşturur. Bu tabaka yüzey ıslanabilirliğini değiştirir. Nanopartikül türü ve hacimsel konsantrasyonu HTC'yi doğrudan etkilemektedir. Yüzey pürüzlülüğü ve

temas açısı bu etkiyle birlikte modifiye olmaktadır. Bu karışık olayı çözümlemede AI'dan faydalanılabilir. Örneğin AI ile çok değişkenli yapı eş zamanlı olarak analiz edilebilir. Diğer taraftan AI, deney verilerinden öğrenerek fiziksel eğilimleri kavrayabilir. Nanoakışkan konsantrasyonu ve HTC/CHF ilişkisindeki doğrusal olmayan durumları yakalayabilir (Tablo 2). Benzer şekilde, kaynayan sıvıya ilave edilen katkı maddelerinin kabarcık oluşumu üzerine etkisini tahmin edebilir. Ayrıca AI, yüzey modifikasyonu ile nanoakışkan etkileşimi gibi çift yönlü ilişkileri ortaya koyabilir (Liu vd., 2018:306).

Tablo 2: Nanoakışkan parametreleri ve AI tahmin çıktıları.

Parametre	Açıklama	AI'ın tahmin ettiği çıktı
Nanopartikül türü	Al ₂ O ₃ , CuO, Graphene vb.	HTC, CHF
Hacim fraksiyonu	%0.01–3 arası	HTC artış oranı
Yüzey pürüzlülüğü	Ra, Rz	Kabarcık eşik sıcaklığı
Katkı maddesi türü	Seyreltici/surfactant vs. polymer	Rejim geçişi

KULLANILAN VERİ TÜRLERİ VE VERİ TOPLAMA YAKLAŞIMLARI

ML modellerinin başarısı büyük ölçüde doğru girdi değişkenlerinin seçimine bağlıdır. Kaynama çalışmalarında kullanılan AI modellerini eğitmek için aşağıdaki veri türleri kullanılmaktadır.

- *Sayısal deney verileri:* Yüzey sıcaklığı, ısı akısı, CHF, HTC, basınç ve sıvı özellikleri gibi.
- *Görsel veriler (yüksek hızlı kamera):* Kabarcık yarıçapı, kabarcık ayrılma anı, kabarcık birleşmeleri ve film kaynama görüntüleri gibi.
- *Sıvı ve malzeme özellikleri:* Yoğunluk, viskozite, yüzey gerilimi ve ısıl iletkenlik gibi.
- *Yüzey özellikleri:* Temas açısı, pürüzlülük, kaplama türü vs.

Yapılan çalışmalarda Bo, Ja, Re ve Pr gibi boyutsuz sayılar kullanıldığında model doğruluğunun arttığına dair bilgiler rapor edilmiştir (Tablo 3) (Rasmussen ve Williams, 2006:64; Chen vd. 2018:238; Fang vd. 2018:143; Bouali vd. 2021:3911; Raj ve Ananthi, 2019:34).

Tablo 3: ML modellerinde kullanılan tipik girdi (input) parametreleri.

Parametre Grubu	Girdiler	Açıklama
Termofiziksel özellikler	ρ , μ , k , C_p , σ	Akışkan tipine ve katkıya bağlı olarak değişir.
Çalışma koşulları	q'' , ΔT , basınç, T_{sat}	Kaynama eğrisindeki konumu belirler.
Yüzey özellikleri	Ra , θ , kaplama türü	Kabarcık sitesi yoğunluğunu belirler.
Katkı madde özellikleri	ϕ , partikül boyutu, malzeme türü	Surfactant / polimer / nanoparçacık etkisi.
Transient etkiler	Zaman, birikim kalınlığı	Nanoparçacık çökmesi için önemlidir.
Boyutsuz sayılar	Re , Pr , Ja , Bo	Genelleştirilebilirlik için önerilir.

MODEL MİMARİSİ VE HİPERPARAMETRE OPTİMİZASYONU

Hiperparametre seçimi ML modellerinin doğruluğunu doğrudan etkilemektedir. ANN modellerinde katman sayısı, nöron sayısı ve aktivasyon fonksiyonları kritik öneme sahiptir. Aynı zamanda, uygun sayıda gizli katman kullanılmazsa model ya genelleme yapamaz ya da aşırı öğrenme (overfitting) eğilimine girmektedir. ANFIS modellerinde üyelik fonksiyonlarının sayısı performansı belirler. Optimizasyon algoritmaları (PSO, GA, ACO, DE) hiperparametre ayarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Tablo 4). Örneğin; PSO tabanlı ANFIS modeli en iyi doğruluğu sağlamıştır ($R^2 = 0.998$) ve GA-RBF modelleri, özellikle NP içeren kaynama sistemlerinde yüksek bütünlükte performans sağlamıştır (Sajjad vd., 2021:1911).

Tablo 4: ML modeli hiperparametreleri örnek ayar tablosu.

Model	Hiperparametre	Önerilen aralık veya örnek değer
ANN	Gizli katman sayısı	2–4
ANN	Nöron sayısı	10–50 (çalışmada 30 optimum)
ANN	Aktivasyon fonksiyonu	ReLU/Tanh/Sigmoid
ANFIS	Üyelik fonksiyonu sayısı	2–7
ANFIS	Optimizasyon	PSO/GA
SVM	Kernel tipi	RBF/Polynomial
GPR	Kernel	RBF, Matern
GA	Popülasyon büyüklüğü	20–200
PSO	Atalet katsayısı	0.2–0.9

ML YÖNTEMLERİNİN GELENEKSEL TEORİK MODELLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

Genel olarak ısı akısı bölümü, mikrolayer ve kontak açısı modelleri gibi teorik modeller fiziksel temele dayalıdır ve mekanizmaları açıklamada güçlüdür. Ancak çok ölçekli ve doğrusal olmayan süreçlerde sınırlı kalabilir. Akışkan katkıları ve yüzey kaplama gibi karmaşık etkileri öngörmeleri zordur. ML modelleri ise karmaşık ilişkileri veriden öğrenebilir. Çok değişkenli sistemlerde yüksek doğruluk sağlar. Ancak daha fazla veri gerektirir ve “kara kutu” özelliği nedeniyle yorumu zordur. AI modellerinde MAE (Mean Absolute Error), RMSE (Root Mean Square Error), MAPE (Mean Absolute Percentage Error) ve R^2 (Determination Coefficient) en sık kullanılan hata metrikleridir (Xu vd., 2014:1169). Kaynama tahminlerinde kabul edilebilir hata genellikle HTC için %5–15 ve CHF için %10–20 aralığındadır. Sonuç olarak, ML modellerinin yüksek doğruluğu ve uyarlanabilirliği nedeniyle karmaşık ve değişken çalışma koşullarında avantaj sağladığı belirlenmiştir.

HAVUZ KAYNAMA İÇİN ML TABANLI MODELLEME ADIMLARI

Pratik bir ML modeli geliştirmek için önerilen adımlar şunlardır (Wang vd. 2025:3);

- *Veri toplama*: Deneysel koşullar, yüzey hazırlığı, akışkan özellikleri ve çevresel koşullar eksiksiz kaydedilmelidir.
- *Öznitelik mühendisliği*: Termofiziksel özellikler, boyutsuz sayılar ve transient davranışlar modele dahil edilmelidir.
- *Model seçimi*: Basit regresyon modelleri ile başlanıp daha sonra ANN, GPR veya ANFIS gibi gelişmiş yöntemlere geçilebilir.
- *Optimizasyon*: GA, PSO gibi yöntemlerle hiperparametre ayarı yapılmalıdır.
- *Doğrulama*: K-fold çapraz doğrulama kullanılmalıdır.
- *Karma modeller*: Gerekirse fizik tabanlı modeller ML ile birleştirilerek hibrit modeller oluşturulabilir

AI'IN AVANTAJLARI VE SINIRLAMALARI

AI kullanımının yüksek doğruluğu ve uyarlanabilirliği nedeniyle birçok avantajı barındırdığı söylenebilir. Başlıca avantajları; deney gereksinimini azaltması, yeni malzemeler/hızlı optimizasyon sağlaması, karmaşık fiziksel etkileşimleri yakalaması ve yüksek doğruluk sağlaması olarak sıralanabilir. Bununla birlikte, AI yöntemleri güçlü olmasına rağmen bazı sınırlamalar barındırır. Geniş ve kaliteli veri seti gerektirmesi, fiziksel yorumun zayıf olabilmesi, zaman bağımlı süreçlerde genelleştirme problemlerinin yaşanabilmesi ve bazı modellerin yüksek hesaplama gücü istemesi dezavantajları arasındadır.

GELECEĞE YÖNELİK ARAŞTIRMA İMKÂNLARI

Havuz kaynama alanında hem deneysel hem de hesaplamalı çalışmalar için hâlâ çözülmeyi bekleyen pek çok konu bulunmaktadır. Aşağıda bu konuların öne çıkanları özetlenmiştir:

- *Nanopartikül birikimi ve zaman bağlı davranış:* Nanopartiküllerin yüzeyde oluşturduğu birikim, kaynama performansını artırabileceği gibi olumsuz etkiler de yaratabilir. Bu birikimin zamanla nasıl geliştiği, hangi koşullarda kalıcı olduğu ve hangi durumlarda performansın bozulmasına yol açtığı henüz tam olarak anlaşılmış değildir. Bu nedenle, transient davranışı açıklayan modellerin geliştirilmesi önem taşımaktadır.
- *Veri tabanı oluşturulması ve standardizasyon:* ML modellerinin başarısı için kapsamlı ve güvenilir veri gereklidir. Ancak literatürde kullanılan malzeme türleri, yüzey hazırlama yöntemleri, nanofluid üretim protokolleri ve deneysel düzenekler büyük farklılık göstermektedir. Bu durum verilerin birleştirilmesini güçleştirmektedir. Gelecekte standartlaştırılmış geniş veri tabanlarının oluşturulması, ML tabanlı modellerin genelleştirilebilirliğini önemli ölçüde artıracaktır.
- *Hibrit (fiziki-ML) modellerin geliştirilmesi:* Gelecekte hem fiziksel süreçleri temsil eden hem de deney verisinden öğrenebilen hibrit modellerin geliştirilmesi beklenmektedir. Bu modeller hem açıklayıcı hem de yüksek doğruluklu tahmin yapabilmelidir. Özellikle CHF ve NTTC gibi kritik parametrelerin tahmininde hibrit yaklaşımlar yeni bir standart oluşturabilir.
- *Yeni katkı maddeleri ve çoklu katkı sistemleri:* Surfactant-polimer-nanoparçacık kombine sistemlerinin sinerjik etkileri tam olarak

anlaşılmamıştır. Yeni nesil katkı maddeleri, fonksiyonel nano-yüzeyler ve çok bileşenli hibrit akışkanlar gelecekte önemli araştırma alanlarıdır.

- *Gerçek mühendislik uygulamaları için ölçeklendirme:* Şu anki sonuçların önemli bir kısmı laboratuvar ölçeğinde elde edilmiştir. Elektronik soğutma, nükleer soğutma, batarya termal yönetimi ve yüksek ısı akıllı endüstriyel prosesler için ölçek büyütme çalışmaları gerekmektedir.

TARTIŞMA

Havuz kaynama ısı transferinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar, yüzey modifikasyonları, surfactant ve polimer katkıları, nanoakışkan kullanımı ve son yıllarda yapay zekâ tabanlı modelleme yaklaşımlarıyla önemli bir ivme kazanmıştır. Bu farklı yöntemlerin performansları değerlendirildiğinde, her bir yaklaşımın kendine özgü avantajlar ve sınırlamalar taşıdığı görülmektedir.

Havuz kaynamada yüzey modifikasyonları yüzey ıslanabilirliği, pürüzlülüğü ve çekirdeklenme site yoğunluğunu kontrol etme açısından etkili olsa da maliyet ve dayanıklılık sorunları uygulamaları sınırlandırabilir. AI yöntemleri ise tüm bu karmaşık süreçleri bir arada ele alabilme yetenekleriyle dikkat çekmektedir. Fizik temelli modellerin açıklayıcı gücüne karşın, değişkenliği yüksek sistemlerde doğruluk kaybı yaşanabilir. Buna karşılık AI yöntemleri geniş veri kümelerinden karmaşık ilişkileri öğrenme kabiliyeti taşır ve birçok çalışmada da yüksek doğruluk seviyesine ulaşmıştır. Ancak veri bağımlılığı, modelin “kara kutu” yapısı ve deney koşullarına sıkı şekilde bağlı olması ML modellerinin temel kısıtlarıdır.

Bu tartışma ışığında, geleceğin yaklaşımı, fiziksel süreçleri temsil eden teorik modellerle, deneysel veriden öğrenen ML yöntemlerinin birleştirilmesi ile oluşturulan hibrit modeller olacaktır. Bu tür hibrit modeller hem yüksek doğruluk hem de fiziksel yorumlanabilirlik sağlayabilme potansiyeline sahiptir.

SONUÇ

Bu bölümde bahsedilen yapay zekâ (AI) ve makine öğrenme (ML) yöntemlerinin havuz kaynama ısı transferi alanındaki fırsatları ve zayıflıkları aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- AI, nanoakışkan ve katkı maddesi kullanılan kaynama sistemleri gibi çok değişkenli ve karmaşık kaynama davranışlarını modellemek için benzersiz avantajlar sağlar.
- Karmaşık fiziksel süreçleri öğrenebilir, tahmin edebilir ve optimize edebilir.
- Veri kalitesi ve çeşitliliği arttıkça, AI yöntemlerinin performansı da artacaktır.
- Havuz kaynaması araştırmalarında AI, deneysel ve teorik yaklaşımların güçlü bir tamamlayıcısıdır.

Bu nedenle, modern ısı transferi çalışmalarında AI'nın rolü giderek genişlemekte ve gelecekte daha da kritik bir konuma yerleşmektedir. Bununla birlikte, bu modellerin geniş ve doğru bir şekilde etiketlenmiş veri setlerine duyarlı olması ve fiziksel yorumlanabilirlik kısıtları, hibrit modellere olan ihtiyacı ortaya koymaktadır.

Genel olarak, havuz kaynama alanındaki ilerlemelerin hem deneysel yenilikler hem de veri odaklı modelleme yaklaşımlarıyla birlikte yürütülmesi gerektiği açıktır. Bu iki yaklaşımın bir araya getirilmesi, gelecekte daha güvenilir, verimli ve ölçeklenebilir kaynama sistemlerinin tasarlanmasını mümkün kılacaktır.

REFERANSLAR

- Bouali, A. vd., (2021). Using artificial neural network for predicting heat transfer coefficient during flow boiling in an inclined channel, *Thermal Science*, 25 (5 Part B), 3911–3921.
- Cengel, Y.A. ve Ghajar, A.J. (2015). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Education, New York.
- Chen, S., Mihara, K., Wen, J., (2018). Time series prediction of CO₂, TVOC and HCHO based on machine learning at different sampling points, *Building and Environment*, 146, 238–246.
- Cheng, L., Mewes, D., & Luke, A. (2007). Boiling phenomena with surfactants and polymeric additives: A state-of-the-art review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(13–14), 2744–2771.

- Fang, D. vd., (2018). A novel method for carbon dioxide emission forecasting based on improved Gaussian processes regression, *The Journal of Cleaner Production*, 173, 143–150.
- Girard, A. vd., (2002). Gaussian process priors with uncertain inputs application to multiple-step ahead time series forecasting, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 15.
- Liang, G., & Mudawar, I. (2018). Pool boiling critical heat flux (CHF)–Part 1: Review of mechanisms, models, and correlations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 117, 1352–1367.
- Liu, Y. vd., (2018). Data-driven modeling for boiling heat transfer: using deep neural networks and high-fidelity simulation results, *Applied Thermal Engineering*, 144, 305–320.
- Raj, J.S., & Ananthi, J.V., (2019). Recurrent neural networks and nonlinear prediction in support vector machines, *Journal of Soft Computing Paradigm (JSCP)*, 1(01), 33–40.
- Rasmussen, C.E., Williams, C.K.I., (2006). *Gaussian Processes for Machine Learning*. The MIT Press.
- Sajjad, U., vd., (2021). A deep learning method for estimating the boiling heat transfer coefficient of porous surfaces, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 145, 1911–1923.
- Suh, Y., Chandramowlishwaran, A. & Won, Y., (2024). Recent progress of artificial intelligence for liquid-vapor phase change heat transfer, *npj Comput Mater*, 10, 65.
- Swain, R., & Das, M.K. (2016). Prediction of heat transfer coefficient in flow boiling over tube bundles using ANFIS, *Heat Transfer Engineering*, 37(5), 443–455.
- Wang, Z., Sun, X., Baghoolizadeh, M., Esmacili, S., Alkhalifah, T., Marzouki, R., (2025). Review of pool boiling improvement with additives and nanofluids utilizing artificial intelligence, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 162, 108659.
- Xu, Z. vd., (2014). Experimental correlation for pool boiling heat transfer on metallic foam surface and bubble cluster growth behavior on grooved array foam surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 77, 1169–1182.
- Zendehboudi, A., Wang, B., & Li, X., (2017). Robust model to predict the migration ratios of nanoparticles during the pool-boiling process of nanorefrigerants, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 84, 75–85.
- Zolghadri, A. vd., (2021), Predicting parameters of heat transfer in a shell and tube heat exchanger using aluminum oxide nanofluid with artificial neural network (ANN) and self-organizing map (SOM), *Sustainability* 13 (16) 8824.

Havuz Kaynama Isı Transferinin İyileştirilmesi: Isıtma Yüzeyinde Yapılan Modifikasyonlar

Doğan ÇİLOĞLU¹

1- Doç. Dr. Doğan ÇİLOĞLU; Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü.
dciloglu@atauni.edu.tr ORCID No: 0000-0002-7570-9271

ÖZET

Havuz kaynama, yüksek ısı akılarının nispeten düşük sıcaklık farklarıyla aktarılabilmesini sağlayan en etkili iki-fazlı ısı transferi mekanizmasıdır. Kaynama ısı transferi ısı değıştircileri, güç üretim sistemleri, elektronik soğutma uygulamaları ve kimyasal prosesler gibi çok sayıda mühendislik alanında kritik rol oynamaktadır. Kaynama ısı transfer katsayısı (HTC) ve kritik ısı akısı (CHF) sistem performansını belirleyen iki temel parametredir. Bu parametreleri artırmanın en etkili yollarından biri, ısıtma yüzeyinin topografyasını, kimyasal özelliklerini veya kaplamalarını değıştirmektir. Bu bölümde, ısıtma yüzeyinde yapılan fiziksel, kimyasal ve mikro/nano ölçekli modifikasyonların kaynama mekanizmalarını nasıl etkilediğı ve bu değışikliklerin ısı transferi performansına katkıları ayrıntılı olarak incelenecektir.

Anahtar Kelimeler – Havuz Kaynama, Isı Transfer Katsayısı, Kritik Isı Akısı, Yüzey Modifikasyon Yöntemleri, İyileştirilmiş Yüzeyler, Kaplama.

GİRİŞ

Havuz kaynama ısı transferini artırmak için genellikle iki tür pasif iyileştirme stratejisi kullanılır; (i) yüzey modifikasyonu ve (ii) sıvı özelliklerinin değıştirilmesi. Yüzey modifikasyonu pürüzlülük artırma, mikro/nano yapılandırma, kaplamalar ve ıslanabilirlik düzenleme gibi yöntemlerle çekirdek sitesi yoğunluğunu artırmayı amaçlar. Bu yöntemler doğrudan aktif çekirdek sitelerinin sayısını ve büyüklüğünü değıştirerek HTC ve CHF değerlerinde ciddi artışlar sağlayabilir. Sıvı özelliklerini değıştirmeye yönelik iyileştirmeler ise akışkan içine çeşitli kimyasal veya nano-katılar ekleyerek yüzey gerilimi, viskozite, ısıl iletkenlik ve kabarcık dinamiklerini etkilemeyi hedefler. Yapılan araştırmalar, farklı katkı tiplerinin (surfactant, polimer, nanoakışkan) yüzey modifikasyonlarıyla birlikte kullanıldığında sinerjik etkiler doğurabileceğini vurgulamaktadır (Cheng vd., 2007:2745).

Kaynama performansı, yüzey ile sıvı arasındaki etkileşimlere doğrudan bağlıdır. Yüzey morfolojisi tasarımları kaynama başlangıcını iyileştirmek, HTC'yi artırmak, CHF'yi yükseltmek ve uzun süreli kararlılığı sağlamak amacıyla yapılmaktadır (Saha vd., 2020:6). Isıtma yüzeyi üzerinde oluşan çekirdek siteleri, kabarcık genişleme–ayrılma dinamikleri ve yüzey-sıvı temas özellikleri ısı transferinin hızını belirler. Isıtma yüzeyinde yapılan değışiklikler aşağıda belirtilen ve kaynama performansını belirleyen temel mekanizmaları etkilemektedir (Chu vd., 2022:3);

- Çekirdek site yoğunluğu
- Kabarcık ayrılma çapı ve frekansı
- Yüzeyin ıslanabilirliği (hidrofilik–hidrofobik özellik)

- Sıvının yeniden ıslanma eğilimi
- Düşük ve yüksek akı rejimlerinde termal direncin değişimi

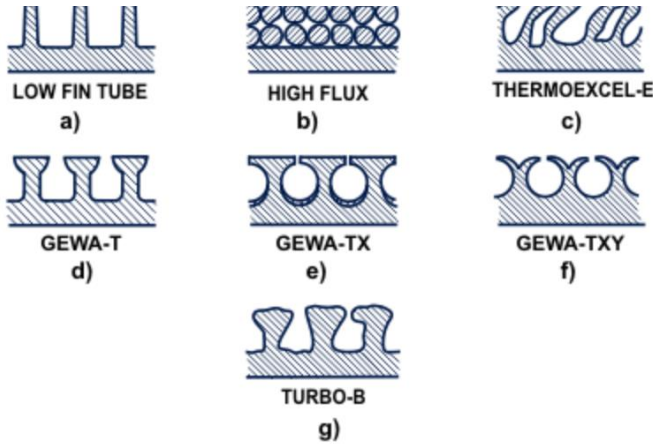
Bu parametrelerin çoğu doğrudan yüzey geometrisi tarafından kontrol edildiğinden, yüzey mühendisliği yüksek ısı akısı uygulamalarının merkezinde yer alır.

ISITMA YÜZEYİNDE YAPILAN MODİFİKASYON TÜRLERİ

Makro Ölçekli Modifikasyonlar

Kanallar, çentikler ve girinti-çıkıntılar

Havuz kaynama ısı transferini artırmak amacıyla ısıtma yüzeyinde kanallar, çentikler ve girinti-çıkıntılar şeklinde yapılar oluşturulabilir (Şekil 1). Bu makro kanallar ve yüzey çentikleri, kabarcıkların belirli bölgelerde oluşmasını kolaylaştırır ve buralardan kontrollü bir şekilde ayrılmalarını sağlar. Böylece çekirdek site yoğunluğu artar. Böylesi yapılar ısıtma yüzeyindeki buhar kabarcığının tutunma süresini düşürür ve yeni buhar kabarcıklarının daha hızlı oluşmasını tetikler. Meydana gelen bu olay havuz kaynama HTC'sini önemli ölçüde artırır.

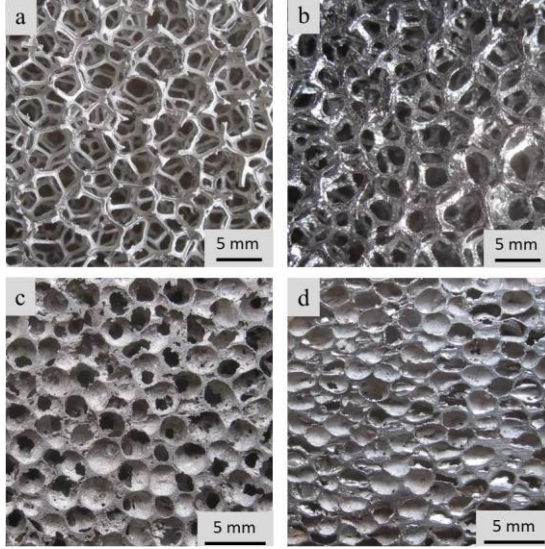


Şekil 1. Mikro ölçekli kanallar, girinti ve çıkıntılar (Bergles, 2011:2).

Gözenekli yapılar (porous metal foam, sinterlenmiş yüzeyler)

Sinterlenmiş metal partiküller, tel örgü katmanları ve metal köpükler en yaygın kullanılan gözenekli yüzeylerdir (Şekil 2). Bu ip yüzeyler yüksek yoğunlukta çekirdek sitesi barındırırlar. Kaynama sıvısı kapiler etkiler nedeniyle yüzey doğru çekilir. Araştırmacılar böyle yüzeylerde CHF

değerinde %30–200 aralığında artışlar rapor etmişlerdir. Bununla birlikte poros yapılardaki fazla kalın gözenekli katmanlar ısı direncini artırabilir. Böylesi ısıtma yüzeylerin uzun süreli kullanımı sonrası kararlılık (korozyon, kirlenme) problemleriyle karşılaşılabilir.

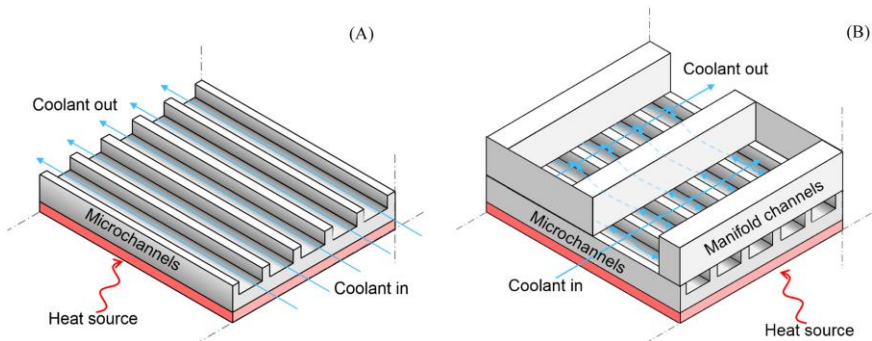


Şekil 2. Prozif köpüksü yapılar (Smorygo vd., 2019:2).

Mikro Ölçekli Modifikasyonlar

Mikrokanallar

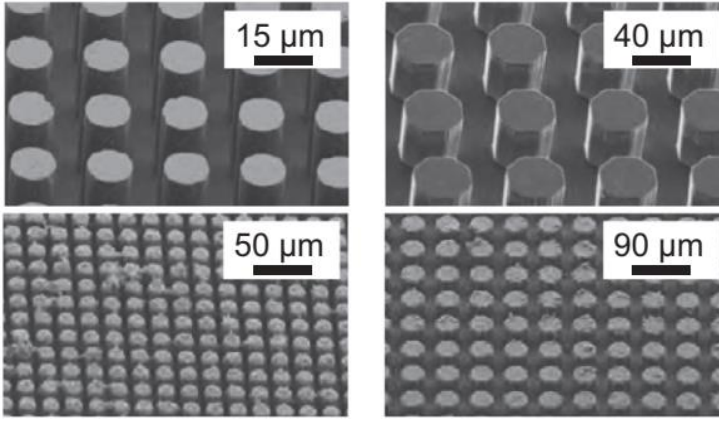
Mikrokanallar, 10 ila 200 μm genişlikte olup sıvı hareketini yönlendirmekte ve kabarcık dinamiklerini değiştirebilmektedir (Şekil 3). Bu yapılar sayesinde aktif yüzey alanı ve kabarcık frekansı artar. Araştırmacılar bu yüzeylerde CHF için %50 den fazla artışlar rapor etmişlerdir.



Şekil 3. (A) Düz mikrokanalın ve (B) manifold mikrokanalının kesit şeması (Gilmore vd., 2018:1048).

Mikro yapılandırılmış yapılar

Isıtma yüzeyinde mikro yapıda tümsekler ve çukurlar fotolitografi, lazer işleme veya mikro frezeleme ile oluşturulmaktadır (Şekil 4). Bu yüzeyler kaynama esnasında oluşacak buhar kabarcığının ayrılma çapını düşürür ve daha kararlı kaynama meydana gelmesini sağlar. Ayrıca yüzeydeki sıcaklık dalgalanmaları azalır ve sonuç olarak bu yüzeyler HTC artışına katkı sağlarlar.



Şekil 4. Micro/nano yapıly yüzeyler (Liang ve Mudawar, 2019:921).

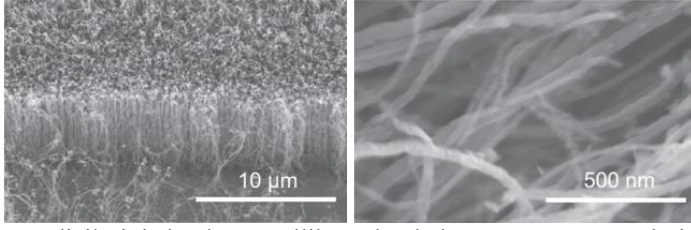
Nano Ölçekli Modifikasyonlar

Nanopartikül kaplamalar

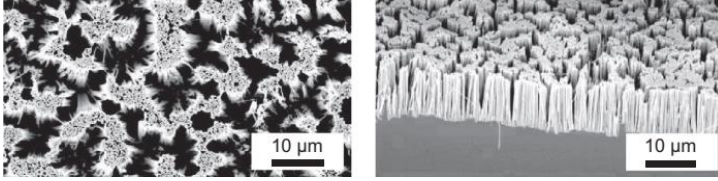
Şimdiye kadar araştırmacılar tarafından alümina (Al_2O_3), silika (SiO_2) ve titanyum oksit (TiO_2) gibi nano kaplamalar yaygın olarak kullanılmaktadır. Nano partiküller ısıtma yüzeyinin hidrofiliğini önemli ölçüde artırmaktadırlar. Nanopartiküller yüzey üzerinde çekirdek oluşumu için mikro oyuklar oluştururlar. Havuz kaynamada CHF üzerine etkili en önemli yöntemlerden biridir. Literatürde %50 ila %300 arası artışlar rapor edilmiştir. Bununla birlikte araştırmacılar, çok kalın kaplamaların ısı iletimini düşürebileceğini de belirtmişlerdir.

Nano teller, nano çubuklar, karbon nano tüpler (CNT, ZnO vb.)

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) gibi yöntemlerle bu yapılar üretilmektedir (Şekil 5 ve 6). Böylesi yapılar aşırı yüksek yüzey alanına sahiptirler. Kaynama esnasında sıvı yüzeye kapiler etkilerle emilir ve böylece kabarcık ayrılma frekansı artar.



Şekil 5. CNT dizileriyle kaplanmış silikon alt tabakanın SEM görüntüleri (Liang ve Mudawar, 2019:913).



Şekil 6. Silikon nanotel dizileri (Liang ve Mudawar, 2019:914).

Isıl Sprey Kaplamalar

Bu amaçla kullanılan plazma sprej, soğuk sprej ve termal püskürtme yöntemleri ısıtma yüzeyi topografyasını önemli ölçüde değiştirmektedir. Üretimleri kolay, makro-mikro karma yapılar oluşturmaları, gözenek yoğunluğunun ayarlanabilir olması bu kaplama yöntemlerinin avantajları arasındadır. Özellikle elektronik soğutmada, nükleer reaktör bileşenlerinde ve yüksek ısı akılı endüstriyel yüzeylerde kullanılmaktadırlar.

Kimyasal Modifikasyonlar

Hidrofilik ve hidrofobik yüzey işlemleri

Havuz kaynamada ısıtma yüzeyinde kimyasal aşındırma, anodizasyon, plazma oksidasyon veya florokarbon gibi kaplamalar kullanılarak yüzeyin ıslanabilirliği modifiye edilmektedir. Elde edilen hidrofilik yüzeyler sıvı yayılma kabiliyetini artırır ve böylece kaynama krizi gecikerek CHF önemli ölçüde artar. Hidrofobik yüzeylerde ise, kabarcık oluşumu daha kolaydır. Bu nedenle düşük yüzey sıcaklıklı (süperheat) bölgelerde HTC artabilir. Araştırmacılar süperhidrofilik-süperhidrofobik hibrit yüzeylerden en iyi kaynama performansı elde edilebileceğini rapor etmişlerdir.

ISIL PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLER

Modifiye yüzeylerde elde edilen kaynama ısı transferi iyileşmelerinin nedenleri aşağıdaki ilgili parametreler dikkate alınarak açıklanmıştır.

HTC Artışı

Yüzey modifikasyonları, havuz kaynama ısı transferi sırasında kabarcık oluşumu, büyümesi ve yüzeyden ayrılması gibi mikroskobik süreçleri doğrudan etkileyerek ısı transfer katsayısında belirgin artışlara yol açar. Özellikle mikro- ve nano-yapılandırılmış yüzeyler, yüzeyin efektif ıslanabilirliğini ve aktif çekirdeklenme bölgesi sayısını artırır. Çekirdeklenme noktalarının çoğalması, kabarcıkların daha sık ve daha düzenli biçimde oluşmasına neden olarak konvektif ısı transferinin güçlenmesini sağlar. Bu iyileştirme, sıcaklık farkının düşük olduğu çalışma koşullarında bile daha verimli bir kaynama rejimi elde edilmesine katkı sunar.

Isı transfer katsayısındaki artışın bir diğer önemli mekanizması da yüzey pürüzlülüğü, gözeneklilik ve kapiler yapılar sayesinde sıvının yüzeye geri taşınmasının kolaylaşmasıdır. Bu yapılar, yüzeyde ince bir sıvı film tabakasının korunmasına ve kuru noktaların oluşumunun geciktirilmesine olanak tanır. Böylece sıvı-yüzey etkileşimi iyileşirken, ısı transfer direnci azalır. Özellikle hidrofobik-hidrofilik desenlemeler gibi hibrit yüzey tasarımları, kabarcık ayrılma frekansını optimize ederek ısı transfer katsayısında klasik düz yüzeylere kıyasla ciddi oranlarda iyileşmeler sağlayabilmektedir.

Sonuç olarak, ısıtma yüzeyindeki mikro/nano yapılar çekirdek site sayısını artırarak ısı transferini artırmıştır. Gözenekli (poroz) kaplamalar ve nanoyapılar en yüksek ısı transferi artışlarına neden olmuşlardır.

CHF Artışı

Yüzey modifikasyonları ile kritik ısı akısının yükselmesi temel olarak yüzeydeki sıvı beslemesinin artması ve buhar filminin erken oluşumunu engelleme prensiplerine dayanmaktadır. Mikro gözenekli ve kapiler yapıya sahip yüzeyler, sıvının kaynama sırasında yüzeye sürekli taşınmasını sağlayarak kuru yüzey alanlarının oluşmasını geciktirir. Bu durum, havuz kaynama sırasında yüzeyi tamamen kaplayan buhar tabakasının oluşumunu geciktirdiğinden, CHF değerinin güvenli sınırlar içinde daha yüksek ısı akılarına taşınmasını mümkün kılar. Ayrıca ıslatılabilirliği artırılmış hidrofilik yüzeyler, sıvının yüzeye yayılmasını kolaylaştırarak sıvı yenilenme hızını artırır.

CHF'nin yükselmesinde bir diğer önemli etki, yüzeyde oluşturulan mikro/nano yapılar sayesinde kabarcık ayrılma dinamiğinin stabilize edilmesidir. Düzenli kabarcık ayrılması, buhar kabarcıklarının yüzeyde birleşerek büyük buhar örtüsü oluşturmasını geciktirir. Böylece sıvı ve buhar fazlarının daha dengeli bir şekilde yüzeyle temas etmesi sağlanır. Literatürde özellikle nano kaplamalar, çukur/tümsek yapılar ve karbon nanotüp kaplamalar, klasik yüzeylere göre CHF'yi iki kata kadar artırabilen önemli modifikasyonlar olarak öne çıkmaktadır. Bu geliştirmeler, yüksek ısı akısı

gerektiren uygulamalarda yüzey güvenliğini ve performans sınırlarını önemli ölçüde genişletmektedir.

Genel olarak, CHF artışını en çok etkileyen faktör, yüzeyin sıvı ile yeniden ıslanabilme kapasitesidir. Nano kaplamalar ve süperhidrofilik yüzeyler CHF’de dramatik artışa neden olmuşlardır. Mikrokanallar ise yüzeylerden kontrollü kabarcık uzaklaşmasına katkıda bulunmuştur.

Yüzey Kararlılığı

Uzun süreli kaynama uygulamalarında, yüzey modifikasyonlarının ısı transfer performansını sürdürmesi büyük önem taşır. Zaman içinde kaplamaların dökülmesi, yüzey aşınması ve korozyon, kaynama sırasında oluşan kabarcık dinamiklerini bozarak ısı transfer katsayısının azalmasına yol açabilir. Bu tür bozulmalar, özellikle yüksek sıcaklık ve yüksek ısı akısı koşullarında daha hızlı gerçekleşmektedir. Dolayısıyla, yüzeyin termal ve mekanik stabilitesini koruyacak malzeme ve kaplama seçimi kritik bir rol oynamaktadır (Xu vd., 2024:2; Upot vd., 2022:1242).

Diğer taraftan, fouling (kirlenme) gibi yüzeyde biriken partikül ve tortu tabakaları da ısı transferini olumsuz etkiler. Bu tür kirlenmeler, sıvının yüzeye temasını engelleyerek lokal sıcaklık artışlarına ve sıcak noktaların oluşmasına sebep olur. Özellikle endüstriyel sistemlerde, uzun süreli operasyonlarda bu etkilerin minimize edilmesi için yüzeylerin korozyona, oksidasyona ve kimyasal reaksiyonlara dayanıklı malzemelerden yapılması gerekir. Ayrıca mikro/nano yapıları kaplamaların yüzey pürüzlülüğü ve gözenek yapısı, fouling oluşumunu azaltacak şekilde tasarlanabilir; böylece hem ısı transfer performansı korunur. Ayrıca sistemin bakım ve temizlik periyotları uzatılabilir.

Yüzey kararlılığı açısından bir diğer önemli faktör, kaplamanın uzun dönemli termal döngülere dayanımıdır. Tekrarlayan ısınma ve soğuma döngüleri, malzemede mikroskobik çatlaklar veya deformasyonlara yol açabilir. Bu durum hem CHF düşmesine hem de kabarcık ayrılma dinamiklerinin bozulmasına sebep olur. Bu nedenle, yüzey modifikasyonları uygulanırken hem ısı dayanımı hem de mekanik stabilite göz önünde bulundurulmalı, gerektiğinde aşınmaya karşı koruyucu kaplamalar veya hibrit yüzey tasarımları tercih edilmelidir.

ENDÜSTRİYEL UYGULAMALAR

Kaynama ısı transferinin endüstriyel uygulamaları, özellikle yüksek ısı akısı gerektiren sistemlerde kritik öneme sahiptir. Elektronik soğutma alanında, modern yüksek performanslı mikroişlemciler ve güç elektroniği cihazları, birim yüzey başına düşen ısı akısının çok yüksek olduğu koşullarda çalışır. Bu tür sistemlerde yüzey modifikasyonları, kabarcık oluşumunu ve ayrılmasını optimize ederek ısı transfer katsayısını artırır ve sıcak noktaların oluşmasını engeller (Al-Nagdy vd., 2025:24). Özellikle mikro ve nano yapılandırılmış kaplamalar, elektronik çiplerin güvenli ve uzun ömürlü çalışmasını sağlayacak şekilde ısıyı etkin biçimde uzaklaştırmaktadır (Tang vd., 2021:2).

Evaporatörler ve kondenserler gibi klasik ısı değiştirici elemanlarda da yüzey modifikasyonları önemli performans avantajları sunar. Gözenekli veya kapiler yüzeyler, sıvı akısını ve yüzey ıslanabilirliğini artırarak kritik ısı akısını yükseltir ve enerji verimliliğini artırır. Bu, HVAC sistemlerinde ve endüstriyel soğutma tesislerinde daha düşük enerji tüketimi ve daha kompakt tasarımların mümkün olmasını sağlar. Ayrıca, modifiye edilmiş yüzeyler buhar tabakasının erken oluşumunu engellediği için korozyon ve yüzey aşınması riskini de azaltır (Ranjan vd., 2023:6338).

Nükleer reaktörlerde ısıtıcı yüzey modifikasyonları, çekirdek güvenliği ve verimli enerji üretimi açısından büyük öneme sahiptir. Yüzeydeki mikro/nano yapılar, yüksek ısı akısı ve basınç altında kaynamayı stabilize eder, CHF'yi yükselterek reaktör elemanlarının termal sınırlarını güvenli biçimde genişletir. Bu sayede reaktör operasyonlarında acil soğutma gerekliliği azalır ve güvenlik düzeyi artar. Benzer şekilde ısı boruları ve soğutmalı lazer modüllerinde, yüzey modifikasyonları yüksek yoğunluklu ısıyı etkin şekilde taşır, sistem boyutlarını küçültür ve güvenilirliği artırır (Al-Nagdy vd., 2025:7).

Güneş enerjili ısıtma sistemlerinde de kaynama ısı transfer performansının iyileştirilmesi kritik rol oynar. Yoğunlaştırıcı veya düz panel tasarımlarında, modifiye edilmiş yüzeyler güneşten gelen ısının daha etkin şekilde sıvıya aktarılmasını sağlar. Bu sayede sistem verimliliği artar ve özellikle yüksek sıcaklık operasyonlarında kayıplar minimize edilir. Yapılan araştırmalar, yüzey modifikasyonlarının özellikle 100–200 W/cm² ve üzerindeki yüksek ısı akısı koşullarında performansı çarpıcı biçimde artırdığını ve endüstriyel uygulamalarda enerji tasarrufu ile güvenilirliği bir arada sunduğunu göstermektedir (Tang vd., 2021:6; Al-Nagdy vd., 2025:20).

SONUÇ

Isıtma yüzeyinde yapılan makro, mikro ve nano ölçekli modifikasyonlar, havuz kaynama ısı transferinin iyileştirilmesinde temel bir rol oynamaktadır. En etkili yöntemler arasında nano kaplamalar, gözenekli yüzeyler ve mikrokanallar yer almaktadır. Bu modifikasyonlar hem ısı transfer katsayısının hem de kritik ısı akısının artmasını sağlayarak sistemlerin daha verimli ve güvenli çalışmasını mümkün kılar. İhtiyaca göre uygun yüzey modifikasyonu seçimi, uygulamanın ısı akı gereksinimi, malzeme özellikleri, uzun dönem stabilitesi ve maliyet gibi faktörlere bağlıdır.

REFERANSLAR

- Al-Nagdy, A.A., Khalaf-Allah, R.A., Mohamed, S.M. et al., (2025). Pool boiling performance enhancement via latest microstructural surface modifications: a review, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*.
- Bergles, A.E., (2011). Augmentation of Heat Transfer, Two-Phase, *Thermopedia*.
- Cheng, L., Mewes, D., & Luke, A. (2007). Boiling phenomena with surfactants and polymeric additives: A state-of-the-art review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(13–14), 2744–2771.
- Chu H, Xu N, Yu X, Jiang H, Ma W, Qiao F., (2022). Review of surface modification in pool boiling application: Coating manufacturing process and heat transfer enhancement mechanism, *Applied Thermal Engineering*, 215, 119041.
- Gilmore, N., Timchenko, V., Menictas, C., (2018). Microchannel cooling of concentrator photovoltaics: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 1041-1059.
- Liang, G., ve Mudawar, I., (2019). Review of pool boiling enhancement by surface modification, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 128, 892–933.
- Ranjan, A., Priy, A., Ahmad, I., et al. (2023). Heat transfer characteristics of pool boiling with scalable plasma-sprayed aluminum coatings, *Langmuir*, 39, 6337–6354.
- Saha, S.K., Ranjan, H., Emani, M.S., Bharti, A.K. (2020). Pool Boiling Enhancement Techniques. In: *Two-Phase Heat Transfer Enhancement*. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Springer, Cham.
- Smorygo, O., Marukovich, A., Vazhnova, A., Mikutski, V., Ilyushchanka, A., (2019). Comparison of Mechanical Strength of Metal Foams with Different Cellular Structures and Compositions, *European Powder Metallurgy Association (EPMA)*.

- Tang, K., Bai, J., Chen, S., Zhang, S., Li, J., Sun, Y., & Chen, G. (2021). Pool Boiling Performance of Multilayer Micromeshes for Commercial High-Power Cooling. *Micromachines*, 12(8), 980.
- Upot, N.V., Fazle, R.K., Khodakarami, S, Ho, J.Y., Kohler, M.J., Miljkovic, N., (2022). Advances in micro and nanoengineered surfaces for enhancing boiling and condensation heat transfer: a review, *Nanoscale Advances*, 5(5), 1232-1270.
- Xu, W., Tang, L., Zhao, N., Ouyang, K., He, X., Liu, X., (2024). Corrosive effect on saturated pool boiling heat transfer characteristics of metallic surfaces with hierarchical micro/nano structures, *Heliyon*, 10 (8), e29750.

Üçlü Vorteks Tüpü Sistemlerinde Nozul Sayısı ve Akışkan Türünün Ekserji Performansı ve Termodinamik Verim Üzerindeki Etkilerinin Deneysel İncelenmesi

Öğr. Gör. Dr. Murat KORKMAZ¹
Prof. Dr. Volkan KIRMACI²

1- Dr; Hacettepe Üniversitesi Başkent OSB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü. mkorkmaz@hacettepe.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-3721-2854

2- Prof. Dr.; Bartın Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık-Tasarım Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. volkankirmaci@bartin.edu.tr, ORCID No: 0000-0001-7076-1911

ÖZET

Bu çalışma, paralel bağlanmış üç adet zıt akışlı vorteks tüp ile oluşturulan sistemde pirinç malzemeden üretilmiş 3, 4 ve 5 nozul ve hava ve oksijen çalışma akışkanlarındaki termodinamik performans üzerine olan etkilerini deneysel olarak incelemektedir. Oluşturulan sistemde hava ve oksijen ayrı ayrı olarak 250–650 kPa aralığında 100 kPa arttırılarak deneysel ölçümler yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada, verim, ekserji girişi, ekserji çıkışı, ekserji kaybı ve sıcaklık farkı değerleri ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Sonuçlar, artan basınçla birlikte hem hava hem de oksijen akışkanlarında sıcaklık ayrışmasının belirgin şekilde yükseldiğini, bunun da ekserji çıkış değerlerini güçlendirdiğini göstermiştir. Nozul sayısının artması, özellikle 5 nozullu konfigürasyonda, ekserji çıkışı ve verimde belirgin iyileşmelere yol açmıştır. Öte yandan oksijen akışkanı, hava ile karşılaştırıldığında sistem genelinde daha yüksek verim ve daha düşük ekserji kaybı eğilimleri sergilemiştir. Çalışmanın yenilikçi yönü, üçlü vorteks tüpü yapısının nozul sayısı–basınç–akışkan türü etkileşimini eşzamanlı olarak inceleyen ilk deneysel karşılaştırmalı analizlerden birini sunmasıdır. Elde edilen bulgular, çoklu bağlantı vorteks tüp konfigürasyonlarının optimize edilmesi ve endüstriyel soğutma–ayırma uygulamalarında daha yüksek termodinamik performans elde edilmesi açısından önemli bir referans niteliği taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler – Üçlü Vorteks Tüp, Verim, Ekserji Kaybı, Nozul, Akışkan.

GİRİŞ

Ranque–Hilsch vorteks tüpü, herhangi bir hareketli parça içermeksizin sıkıştırılmış bir akışkanı sıcak ve soğuk akımlara ayırabilen özgün bir termodinamik ayardır. Bu cihaz, yüksek dönme hareketi ve viskoz etkileşimler sonucunda akışkanın iç enerjisinin yeniden dağılımına olanak tanıyarak belirgin sıcaklık farkları oluşturur. Basit yapısı, düşük bakım gereksinimi ve çevresel açıdan sürdürülebilir çalışma prensibi nedeniyle endüstriyel soğutma, elektronik bileşenlerin noktadan soğutulması ve gaz ayırma gibi birçok alanda kullanım potansiyeli taşımaktadır. Vorteks tüplerinin performansı, kullanılan akışkan türü, nozul geometrisi, giriş basıncı ve çıkış açıklıkları gibi sistem parametrelerine duyarlı olup, bu unsurların optimize edilmesi cihazın verimliliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Son yıllarda, çoklu vorteks tüpü konfigürasyonları ve farklı malzeme-nozul tasarımlarının performans etkilerini inceleyen çalışmalar artmış, böylece bu teknolojinin yenilikçi ve yüksek verimli uygulamalara uyarlanması için önemli bilimsel bir temel oluşturulmuştur. Literatürde vorteks tüpleri ile yapılan çalışmalardan, Kırmacı 2020 yaptığı çalışmada, iki adet karşıt akışlı vorteks tüpünden oluşan paralel bağlı bir sistemde sıcak–soğuk çıkış sıcaklık farkı Taguchi yöntemi ile optimize edilmiştir. Çalışma parametreleri; giriş

basıncı, çalışma akışkanı (hava ve CO₂), nozul sayısı ve nozul malzemesi olarak seçilmiştir. Sekiz farklı basınç seviyesi ve polyamid/pirinç nozullar yapılan deneylerde en etkili faktörün %75'e yakın katkı oranı ile giriş basıncı olduğu rapor edilmiştir. Sonuçlar, paralel bağlı vorteks tüplerinin performans tasarımı istatistiksel optimizasyon yöntemlerinin güvenilir şekilde kullanılabilceğini göstermektedir (Kırmacı, 2020). Sadeghiseraji ve arkadaşları 2021, çalışmalarında sıcaklık ayrışmasının deneysel olarak ölçülmesi ve ardından üç farklı RANS türbülans modeli kullanılarak sayısal olarak yeniden üretilmesidir. Farklı giriş basınçlarında gerçekleştirilen deneyler, referans olarak kullanılarak standart $k-\epsilon$, standart $k-\omega$ ve SST $k-\omega$ modelleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, sıcaklık dağılımlarının ve sıcak-soğuk çıkış farklarının tahmininde SST $k-\omega$ modelinin daha kararlı ve gerçeğe en yakın sonuç verdiğini göstermiştir. Böylece, vorteks tüplerinde enerji ayrışmasının CFD temelli tasarım çalışmalarında hangi türbülans modelinin tercih edilmesi gerektiğine yönelik önemli bir kılavuz sunulmuştur (Sadeghiseraji et al., 2021). Alsaghir ve arkadaşları 2022, yaptıkları çalışmada helyum, hava, oksijen, azot ve CO₂ gibi farklı gazların vorteks tüpü içindeki enerji ayrışmasına etkisi sayısal olarak incelenmiştir. SST $k-\omega$ türbülans modeli ve viskoz ısı üretimini içeren CFD analizi kullanılmıştır. Sonuçlar, düşük molekül ağırlığı ve yüksek dinamik viskoziteye sahip akışkanların daha yüksek sıcaklık ayrışması sağladığını ortaya koymuştur. Böylece, sadece geometri değil, akışkan türü seçiminin de vorteks tüplü soğutma sistemlerinin tasarımı belirleyici olduğu gösterilmiştir (Alsaghir et al., 2022). Bagre ve arkadaşları 2023, dört farklı tüp ve vorteks üretici malzemesinin (örneğin pirinç, bakır, alüminyum ve plastik) termodinamik performansa etkisini deneysel ve ekserji analizleri ile incelemiştir. Farklı malzeme kombinasyonları için sıcaklık ayrışması, enerji verimi ve ekserji yıkımı karşılaştırılmıştır. Özellikle alüminyum ısı borusu ve vorteks jeneratörü kullanılan tasarımın en yüksek sıcaklık farkı ve ikinci yasa verimine sahip olduğu rapor edilmiştir. Sonuçlar, malzemenin ısıl iletkenliğinin iç akış yapısı ve ekserji dağılımı üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir (Bagre et al., 2023). Koraim ve arkadaşları 2023, farklı nozul sayıları, sıcak boru boy/çap oranları, soğuk kütle oranları ve giriş basınçlarının vorteks tüpü performansına etkisini üç boyutlu CFD modeliyle incelemiştir. Standart $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılarak sıcak ve soğuk çıkış sıcaklık farkları ile soğutma ve ısıtma COP değerleri hesaplanmıştır. Analizler, belirli bir giriş basıncı ve soğuk kütle oranında optimum nozul sayısı ve sıcak boru boyunun bulunduğunu göstermiştir. Çalışma, tasarım parametrelerinin birlikte optimizasyonunun, tek tek parametre değişimlerine göre daha yüksek performans iyileştirmesi sağladığını ortaya koymaktadır (Koraim et al., 2023).

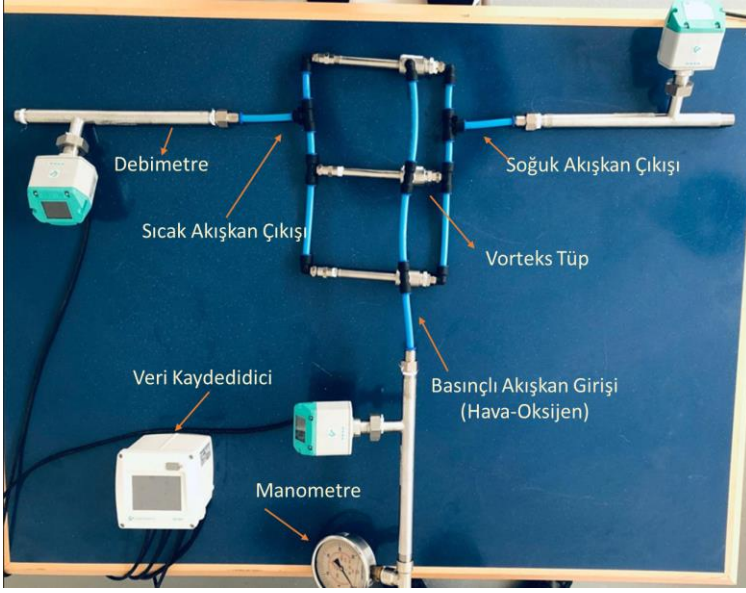
Bu çalışma kapsamında, üçlü paralel bağlı Ranque-Hilsch vorteks tüpü sistemi deneysel olarak tasarlanmış ve pirinç malzemenin üretilmiş 3, 4 ve 5 çıkışlı nozullar kullanılarak kapsamlı bir performans değerlendirmesi

gerçekleştirilmiştir. Deneyler, 250–650 kPa aralığında her 100 kPa basamakta hem hava hem de oksijen akışkanları için yürütülmüş; sistemin verimi, sıcaklık farkı, ekserji kaybı, ekserji çıkışı ve ekserji girişi ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Literatürde üçlü paralel bağlı RHVT konfigürasyonlarına ilişkin verilerin sınırlı olması nedeniyle, bu çalışma çoklu çıkış geometrisinin ve farklı akışkan türlerinin sistem davranışı üzerindeki etkisini bütüncül şekilde ortaya koyması bakımından özgün bir yapıya sahiptir. Böylece, çoklu vorteks tüpü uygulamalarında performans artırmaya yönelik yeni tasarım yaklaşımlarına bilimsel bir temel sunulmaktadır.

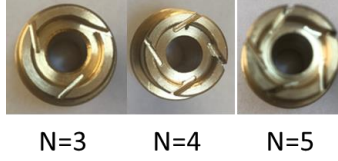
METARYAL VE METOD

Bu araştırmada, karşıt akış prensibiyle çalışan üç adet Ranque–Hilsch vorteks tüpü paralel olarak birleştirilmiş ve böylece üçlü vorteks tüpü yapısına sahip deney düzeneği oluşturulmuştur (Şekil 1). Her bir tüpün iç çapı 7 mm, toplam gövde uzunluğu ise 100 mm olup, sistem modüler bir yapıda tasarlanarak farklı nozul geometrilerinin kolayca değiştirilebilmesi sağlanmıştır. Deneylerde, pirinç malzemeden imal edilen üç, dört ve beş çıkışlı nozul konfigürasyonları kullanılmıştır (Şekil 2). Çalışma akışkanı olarak hem hava hem de oksijen seçilmiş, böylece malzeme–akışkan etkileşiminin performansa etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Basınç değerleri 250 kPa ile 650 kPa arasında, her 100 kPa artışla ayarlanmış ve giriş basıncı PAKKENS marka yüksek hassasiyetli bir manometre ile izlenmiştir. Sıcaklık ölçümleri ± 1 °C duyarlılığa sahip dijital bir termal sensör aracılığıyla, debi değerleri ise laboratuvar tipi bir akış ölçer kullanılarak kaydedilmiştir. DeneySEL veriler sıcaklık, basınç, debi ve soğuk/ sıcak çıkış oranlarına göre sınıflandırılmış ve cihazın termodinamik performansına esas teşkil edecek şekilde düzenlenmiştir.

Ekserji verimliliği, ekserji çıkışı ve ekserji kaybı hesaplamalarında sistem giriş–çıkışına ait entalpi ve entropi değerleri kullanılmıştır. Bu termodinamik özellikler, ölçülen sıcaklık ve basınca bağlı olarak CoolPack yazılımı üzerinden elde edilmiştir. Tüm ölçümler üç kez tekrarlanmış, hesaplamalarda ortalama değerler dikkate alınarak sistemin güvenilirlik ve tekrarlanabilirliği sağlanmıştır.



Şekil 1: Üçlü vorteks tüp deney düzeneği



Şekil 2: Pirinç nozullar

Belirsizlik Analizi

Deneyssel çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen belirsizlik analizi, ölçüm sonuçlarının doğruluğunu değerlendirmek ve kullanılan cihazların güvenilirliğini ortaya koymak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, elde edilen deneyssel verilerin duyarlılığını doğrulamak amacıyla kapsamlı bir belirsizlik analizi uygulanmıştır. Çalışmada sistem performansını doğrudan etkileyen temel ölçüm büyüklükleri; debimetre ve manometre aracılığıyla belirlenen basınç, sıcaklık ve akış hızıdır. Söz konusu parametrelere ilişkin belirsizlik değerleri, literatürde yaygın olarak kabul gören RSS yöntemi kullanılarak hesaplanmış olup, ilgili matematiksel ifade Eşitlik 1’de sunulmuştur (Moffat, 1988:5).

$$\frac{\partial w}{w} = \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial x_i}{x_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Ekserji Analizi

Ekserji analizi, bir termodinamik sistemde çalışma sırasında ortaya çıkan geri döndürülemezlikleri dikkate alarak ikinci yasa verimliliğinin belirlenmesini sağlayan bir değerlendirme yöntemidir. Başka bir ifadeyle, sistem bileşenlerinde sürtünme, karışma ve ısı geçişi gibi süreçler sonucunda oluşan entropi üretimi dikkate alınarak, kullanılabilir enerji miktarındaki azalma nicel olarak hesaplanmaktadır. Bu yaklaşım, enerji analizlerinden farklı olarak yalnızca miktarı değil, enerjinin kullanılabilirlik derecesini de ortaya koyduğu için özellikle vorteks tüpü gibi kararlı akışlı cihazların performans incelemelerinde önemli bir yere sahiptir (Kaya. H et al., 2022).

$$(1 - \mu_c)(T_h - T_c) + (T_c - T_i) = 0 \quad (2)$$

$$\dot{S}_g = \dot{m}_i \left[(1 - \mu_c)(S_c - S_h) + (S_i - S_c) \right] \quad (3)$$

Paralel bağlı karşı-akışlı RHVT yapılarına uygulanan ekserji çözümlemesinde, sistemin dış çevreyle ısı ve iş etkileşiminin olmadığı, akışın zamana bağlı değişmediği ve giriş ile çıkış sınırlarının kontrol hacmini oluşturduğu varsayılmaktadır. Belirlenen kontrol hacmi içerisinde, giriş ve çıkış noktalarındaki sıcaklıklar, basınçlar ve soğuk kütle oranı kullanılarak entropi üretimi, Eşitlik (2) ve (3)'te verilen ifadeler yardımıyla hesaplanabilmektedir.

Çalışma akışkanı ideal gaz kabul edildiğinde, bu iki temel ifade uygun bağıntılarla birleştirilerek sistemdeki toplam entropi üretimini tanımlayan genel form Eşitlik (4) ile elde edilmektedir (Saidi & Yazdi, 1999:627).

$$\dot{S}_g = \dot{m}_i \left[C_p \ln \frac{(T_h / T_c)^{(1-\mu_c)}}{1 + (1 - \mu_c)(T_h / T_c - 1)} + R \ln \frac{P_i}{P_c} \right] \quad (4)$$

Paralel bağlı RHVT sistemleriyle gerçekleştirilen deneylerde, farklı nozül geometrilerinde giriş ve çıkış noktalarından ölçülen basınç ve sıcaklık değerleri kullanılarak, sistemde yok edilen ekserji miktarı belirlenmektedir. Vorteks tüpündeki geri döndürülemezliklerin ölçütü olan özgül kayıp ekserji, giriş ve çıkış bölgeleri arasındaki ekserji farkı şeklinde tanımlanmakta ve hesaplamalar eşitlik (5)-(9) yardımıyla yürütülmektedir (Kırmacı, 2009:1629).

$$i = e_i - e_o \quad (5)$$

$$e_i = (h_i - h_a) - T_a(s_i - s_a) \quad (6)$$

$$e_o = \mu_c e_c + (1 + \mu_c) e_h \quad (7)$$

$$e_c = (h_c - h_a) - T_a (s_c - s_a) \quad (8)$$

$$e_h = (h_h - h_a) - T_a (s_h - s_a) \quad (9)$$

Sıcak ve soğuk akışların spesifik ekserji değerleri bu eşitlikler yardımıyla elde edildikten sonra, sistemin ikinci yasa verimliliği Eşitlik (10)'da verilen bağıntı üzerinden hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon = \frac{e_o}{e_i} \quad (10)$$

Buna ek olarak, sıcak ve soğuk çıkış sıcaklıklarının giriş sıcaklığına göre değişimi Eşitlik (11) ve (12) ile ifade edilmekte ve bu iki değer arasındaki farktan tüpün temel performans göstergesi olan toplam sıcaklık farkı (ΔT) Eşitlik (13) kullanılarak hesaplanmaktadır (Doğan et al., 2023).

$$\Delta T_c = T_i - T_c \quad (11)$$

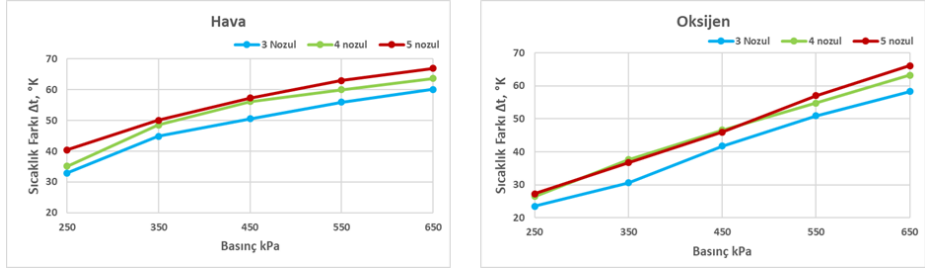
$$\Delta T_h = T_h - T_i \quad (12)$$

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (13)$$

BULGULAR VE TARTIŞMA

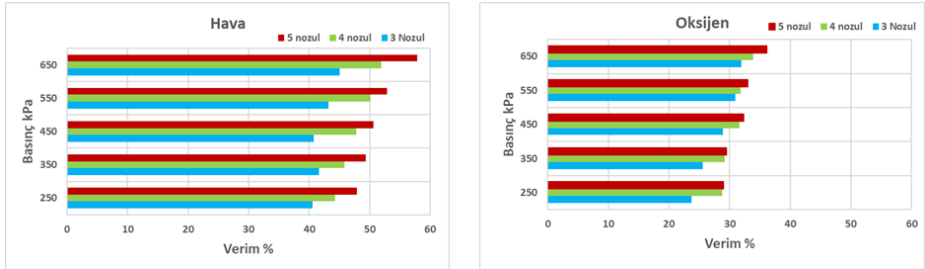
DeneySEL bulgular, basınç seviyesindeki artışın hem hava hem de oksijen akışkanlarında sistem performansına doğrudan etki ettiğini göstermektedir. Verim değerleri tüm nozullar için basınç yükseldikçe belirgin şekilde artmış; özellikle 5 çıkışlı nozulların daha yüksek kütsel debi ve gelişmiş akış yapısı sayesinde diğer nozullara kıyasla daha yüksek performans sergilediği görülmüştür. Sıcaklık farkı grafikleri de benzer eğilim göstermiş, üç akışkan geometrisi arasında en yüksek ΔT değerlerinin 5 nozullu yapıdan elde edildiği belirlenmiştir. Ekserji kaybı ve ekserji çıkışı incelendiğinde, artan basınç ile sistemdeki kullanılabilir enerji miktarının yükseldiği; buna bağlı olarak kayıp ekserji değerlerinin de basınca duyarlı olarak arttığı

görülmüştür. Hem hava hem de oksijen akışkanının eğilimleri benzer olsa da oksijenin daha yüksek yoğunluk ve termofiziksel özellikleri nedeniyle belirli basınç seviyelerinde daha dengeli ekserji davranışı sergilediği tespit edilmiştir.



Şekil 3: Üçlü vorteks tüp farklı nozullar ve akışkanlar için sıcaklık farkı grafiği

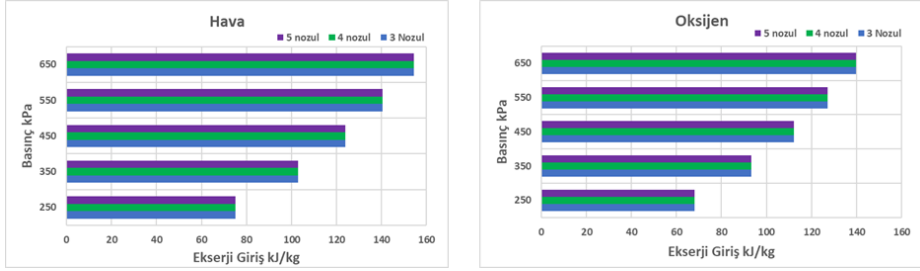
Hava ve oksijen akışlarında sıcaklık farklarının basınca bağlı olarak benzer eğilimde artmasına rağmen, oksijenin düşük basınçlarda daha sınırlı bir sıcaklık değişimi oluşturduğu Şekil 3’de görülmektedir. Hava akışında beş nozullu konfigürasyonun performans üstünlüğü daha erken basınç seviyelerinde ortaya çıkarken, oksijen kullanılan sistemlerde bu fark yüksek basınçta belirginleşmektedir. Her iki akışkanda da nozulların sayısı arttıkça tüp içerisindeki dönme hızı ve enerji ayrışması güçlenmektedir. Basınç seviyesi 650 kPa olduğunda her iki akışkan için de beş nozullu yapı en yüksek sıcaklık farkını sağlamıştır. Sonuç olarak, akışkan tipinin ve nozul sayısının sıcaklık ayrışması üzerinde ortak fakat farklı yoğunlukta etkiler yarattığı deneysel bulgular ile desteklenmiştir.



Şekil 4: Üçlü vorteks tüp farklı nozullar ve akışkanlar için verim grafiği

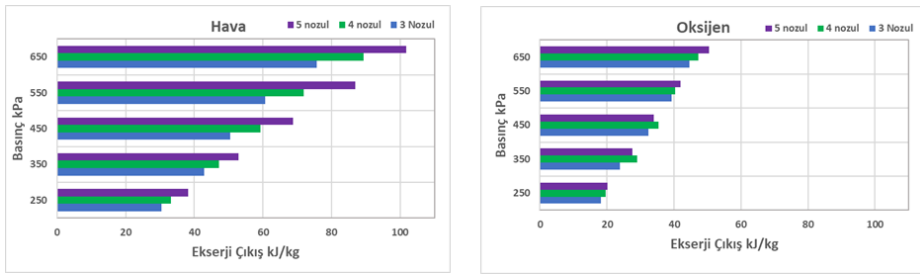
Veriler, hem hava hem de oksijen için verimin basınç arttıkça düzenli biçimde yükseldiğini Şekil 4’de göstermektedir. Nozul sayısının artması, özellikle 5 nozullu yapı için belirgin bir performans avantajı sağlamış ve tüm basınç seviyelerinde en yüksek verim elde edilmiştir. Havanın verim değerleri oksijene kıyasla daha yüksek seyretmiş olup, bu durum akışkanın termofiziksel özelliklerinin sistem davranışı üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. 250–650 kPa aralığında basınç yükseldikçe sistemin enerji

ayırıştırma kapasitesinin güçlendiği görülmektedir. Sonuç olarak, üçlü paralel bağlı vorteks tüpü sisteminde hem basınç artışı hem de nozul sayısının yükselmesi verim performansını olumlu yönde etkilemiştir.



Şekil 5: Üçlü vorteks tüp farklı nozullar ve akışkanlar için ekserji giriş grafiği

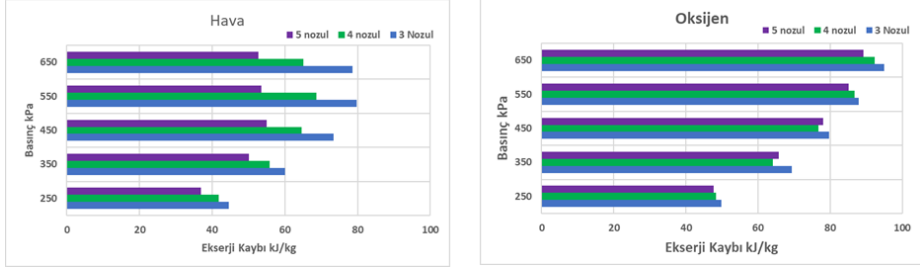
Hava için ekserji giriş değerleri incelendiğinde, basınç artışının doğrudan ekserji seviyesini yükselttiği ve sistemin kullanılabilir enerji miktarının nozul sayısından bağımsız olarak benzer eğilim gösterdiği belirlenmiştir. Üç, dört ve beş nozullu konfigürasyonların ekserji girişleri arasında çok büyük farklar oluşmaması, giriş ekserjisinin daha çok basınç ve akışkan özellikleri tarafından belirlendiğini işaret etmektedir (Şekil 5). Oksijen akışkanında ise ekserji girişinin aynı basınç seviyelerinde havaya göre daha yüksek olduğu gözlenmiş olup bu durum oksijenin daha yüksek özgül ekserji içeriğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Basıncın 650 kPa seviyesine çıkarılması hem hava hem oksijen için maksimum giriş ekserjisine ulaşılmasını sağlamıştır. Genel olarak grafikler, sistem geometrisinden ziyade akışkanın termodinamik özellikleri ve basınç seviyesinin giriş ekserjisi üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir.



Şekil 6: Üçlü vorteks tüp farklı nozullar ve akışkanlar için ekserji çıkış grafiği

Ekserji çıkışı, her iki akışkan için de basınç yükseldikçe artmış ve bu artış 5 nozullu konfigürasyonda belirgin şekilde daha yüksek seviyelere ulaşmıştır (Şekil 6). Hava ile gerçekleştirilen deneylerde ekserji çıkış değerleri oksijene kıyasla daha büyük olup, sistemin enerji ayırıştırma kabiliyetinin akışkan cinsine duyarlı olduğunu göstermektedir. Nozul sayısının artması,

özellikle yüksek basınçlarda ekserji transfer kapasitesini güçlendirerek sistem performansını olumlu yönde etkilemiştir. 3 nozullu yapılar daha düşük ekserji çıkışı sergilemiş olsa da basınç artışına duyarlılıkları düzenli bir eğilim göstermiştir. Genel değerlendirme, üçlü vorteks tüpü yapısının yüksek basınç ve çoklu nozul kullanımında daha verimli ekserji dönüşümü sağlayabildiğini göstermektedir.



Şekil 7: Üçlü vorteks tüp farklı nozullar ve akışkanlar için ekserji kaybı grafiği

Ekserji kaybı, tüm nozul konfigürasyonları için basınç arttıkça belirgin şekilde yükselmiş olup bu artış özellikle 5 nozullu yapı için daha yüksek seviyelerde gerçekleşmiştir (Şekil 7). Hava kullanılan deneylerde ekserji kayıpları oksijene göre biraz daha düşük seyretmiş ve bu durum akışkanın özgül ısı ve viskozite özelliklerinin entropi üretimine etkisini ortaya koymuştur. Basınç seviyelerinin yükselmesiyle akış içerisindeki düzensizlik ve iç sürtünme artmış, buna paralel olarak ekserji kayıpları da daha büyük değerler almıştır. 3 nozullu sistemler, tüm basınçlarda en düşük ekserji kaybını göstererek daha istikrarlı bir davranış sergilemiştir. Genel olarak, artan basıncın sistemde termodinamik geri dönüşsüzlükleri kuvvetlendirdiği net bir biçimde görülmektedir.

Tüm analizler genel olarak değerlendirildiğinde, nozul sayısındaki artış hem ısı ayrışma mekanizmasını hem de akış hızını etkileyerek sistemin termodinamik performansını iyileştirmiştir. Oksijen çalışma akışkanı, özellikle yüksek basınçlarda hava ile kıyaslandığında daha kararlı bir sıcaklık farklılaşması ve daha düşük ekserji kaybı eğilimleri göstermiştir. Çoklu nozullu yapıların, akışın dönel yapısını güçlendirerek daha yüksek soğuk çıkış etkinliği sağlaması önemli bir tasarım avantajı olarak ortaya çıkmıştır. Üçlü paralel bağlantının sağladığı toplam kütleli debi artışı ise, tekli ve ikili RHVT sistemlerine göre daha geniş bir çalışma aralığında performans optimizasyonu imkânı sunmaktadır. Bu sonuçlar, çoklu tüp yapılarının gelecekte endüstriyel soğutma, gaz ayırma ve atık ısı geri kazanım uygulamalarında daha etkin şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

SONUÇ

Bu çalışma, üçlü paralel bağlı vorteks tüplerinde farklı çıkış geometrileri ve iki farklı akışkanın sistem performansına etkilerini bütüncül şekilde değerlendirmiştir. Elde edilen sonuçlar, basınç seviyesinin performans üzerinde belirgin bir belirleyici olduğunu ve nozul sayısındaki artışın verim, sıcaklık farkı ve ekserji çıkışı üzerinde olumlu etkiler yarattığını ortaya koymaktadır. En yüksek performans değerleri 5 nozullu konfigürasyonda elde edilmiş olup, bu durum akışın dönel yapısının güçlenmesiyle ilişkilendirilmiştir. Hava ve oksijen arasındaki karşılaştırmada oksijenin yüksek basınçlarda daha stabil sonuçlar verdiği görülmüş, bu da oksijenin termodinamik özelliklerinin vorteks ayrıştırmasına uygun olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, bu çalışma çoklu RHVT konfigürasyonlarına ilişkin literatürdeki boşluğu doldurmakta ve ileri vorteks tüpü tasarımları için hem deneysel hem de teorik açıdan önemli bir referans oluşturmaktadır.

REFERANSLAR

- Alsaghir, A., Hamdan, M. O., & Orhan, M. F. (2022). Fluid properties impact on energy separation in Ranque–Hilsch vortex tube. *SN Applied Sciences*, 4(8), 227.
- Bagre, N., Parekh, A. D., & Patel, V. K. (2023). Exergy analysis and experimental investigation of various vortex tube material with different combination of vortex generators. *International Journal of Refrigeration*, 150, 113–124.
- Doğan, A., Korkmaz, M., & Kirmacı, V. (2023). Estimation Of Ranque-Hilsch Vortex Tube Performance By Machine Learning Techniques. *International Journal of Refrigeration*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.01.021>
- Kaya, H., Gökçe, H., & Kirmacı, V. (2022). Effect of Cold Diameter on Thermal Performance and Exergy Analysis of Ranque-Hilsch Vortex Tube with Copper Nozzles. *Heat Transfer Research*, 53(2), 59–70.
- Kirmacı, V. (2009). Exergy analysis and performance of A Ranque-Hilsch counter flow vortex tube having various nozzle numbers at different inlet pressures of oxygen and air". *International Journal of Refrigeration*, 32(7), 1626–1633.
- Kirmacı, V. (2020). PERFORMANCE OPTIMIZATION OF PARALLEL CONNECTED RANQUE– HILSCH VORTEX TUBES WITH CARBON DIOXIDE AND AIR USING THE TAGUCHI METHOD. *Heat Transfer Research*, 51(10).
- Koraim, E., Selim, S. M., Abdel-hamid, A. A., & Hussien, A. A. (2023). Numerical Investigation on the Performance of Vortex Tube. *ERJ. Engineering Research Journal*, 46(3), 323–338.

- Moffat, R. J. (1988). Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1(1), 3–17.
- Sadeghiseraji, J., Moradicheghamahi, J., & Sedaghatkish, A. (2021). Investigation of a vortex tube using three different RANS-based turbulence models. *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, 143(6).
- Saidi, M. H., & Yazdi, M. R. A. (1999). Exergy model of a vortex tube system with experimental results. *Energy*, 24(7), 625–632.

Paralel Bağlı Vorteks Tüplerinde Malzeme ve Akışkan Parametrelerinin Termodinamik Performansa Etkisi

Öğr. Gör. Dr. Murat KORKMAZ¹
Prof. Dr. Volkan KIRMACI²

1- Dr; Hacettepe Üniversitesi Başkent OSB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü. mkorkmaz@hacettepe.edu.tr, ORCID No: 0000-0002-3721-2854

2- Prof. Dr.; Bartın Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık-Tasarım Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. volkankirmaci@bartin.edu.tr, ORCID No: 0000-0001-7076-1911

ÖZET

Bu çalışma, paralel bağlı iki vorteks tüpünden oluşan deneysel bir sistemde, polyamid, alüminyum ve pirinç malzemelerden üretilmiş altı çıkışlı nozul geometrilerinin termodinamik performans üzerindeki etkilerini incelemektedir. Hem hava hem de oksijen akışkanları kullanılarak 200–600 kPa basınç aralığında, her 50 kPa artışta gerçekleştirilen deneylerde sıcaklık farkı, verim, ekserji girişi, ekserji çıkışı ve ekserji kaybı değerleri kapsamlı biçimde karşılaştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, farklı malzeme–akışkan kombinasyonlarının paralel vorteks tüplerinin enerji ayrıştırma mekanizmasına etkisini deneysel olarak ortaya koymak ve çoklu konfigürasyonlara ilişkin literatürdeki boşluğu doldurmaktır. Bulgular, basınç artışının tüm malzemelerde sıcaklık ayrışmasını ve ekserji çıkışını belirgin biçimde yükselttiğini, alüminyum nozul yapısının yüksek ısıl iletkenliği sayesinde en iyi performansı sergilediğini göstermiştir. Pirinç malzeme orta düzeyde bir davranış sergilerken, polyamid düşük iletkenlik özellikleri nedeniyle en düşük verim ve ekserji değerlerini üretmiştir. Oksijen akışkanı, yüksek yoğunluk ve özgül ısı özellikleri nedeniyle daha yüksek sıcaklık farkı yaratmasına karşın, hava akışkanına kıyasla daha fazla ekserji kaybı üretmiştir. Elde edilen sonuçlar, malzeme özellikleri ile akışkan tipinin vorteks tüpü performansında belirleyici olduğunu ve çoklu tüp konfigürasyonlarında termodinamik davranışın bu faktörlere duyarlı şekilde değiştiğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler – Vorteks Tüp, Verim, Ekserji Analizi, Sıcaklık Ayrımı, Akışkan.

GİRİŞ

Vorteks tüpleri, enerji ve ekserji ayrışmasının pasif olarak sağlanabildiği, hareketli parça içermeyen ve basınçlı akışkanın yalnızca geometrik etkileşimle soğuk ve sıcak akımlara ayrıldığı özgün termodinamik aygıtlardır. Literatürde çoğunlukla tek tüp tasarımlarının ve sınırlı malzeme çeşitliliğinin incelendiği görülmekle birlikte, paralel bağlı çoklu tüp konfigürasyonlarının farklı malzeme yapılarıyla birlikte değerlendirilmesine yönelik kapsamlı çalışmalar oldukça sınırlıdır. Cartlidge ve arkadaşları 2022, turbo makine deneylerinde soğuk hava kaynağı olarak kullanılmak üzere boyut ve performans açısından optimize edilmiş iraksak bir vorteks tüpü tasarlanmıştır. 3–7 bar aralığında giriş basınçları ve farklı kütleli debiler için sıcaklık ayrışması ve soğutma performansı detaylı biçimde ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, uygun iraksama açısı ve boy/çap oranı ile klasik silindirik tüplere kıyasla daha yüksek sıcaklık farkı ve soğutma katsayısı elde edilebileceğini göstermiştir. Çalışma, vorteks tüplerinin yüksek debili mühendislik uygulamalarına entegrasyonu için tasarım kriterleri sunmaktadır (Cartlidge et al., 2022). Chowdhury ve arkadaşları 2024, turbo makine

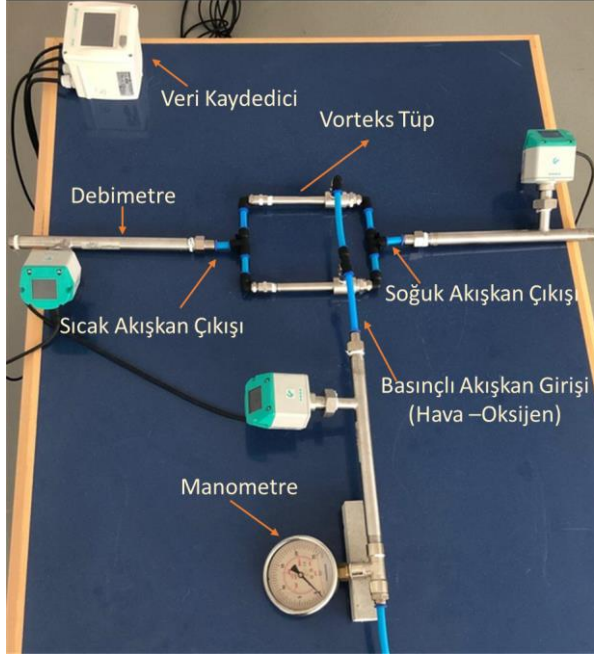
soğutma uygulamaları için optimize edilmiş bir Ranque–Hilsch vorteks tüpünün performans karakteristikleri yüksek hassasiyetli ölçümlerle ortaya konmuştur. Giriş basınç oranı, kütsel debi ve soğuk kütle oranı geniş bir aralıkta değiştirilerek sıcaklık ayrışması ve soğutma katsayısı ölçülmüştür. Çalışma, özellikle basınç oranı ile sıcaklık farkı arasındaki ilişkiyi düşük belirsizlikle nicel olarak vermekte ve tasarımı kullanılabilecek performans haritaları sunmaktadır. Elde edilen veriler, sayısal modellerin kalibrasyonu ve endüstriyel ölçekte vorteks tüpü tasarımı için güvenilir bir referans niteliğindedir (Chowdhury & Povey, 2024). Park ve çalışma arkadaşları, vorteks tüpünde enerji ayrışmasını açıklamak için radyal ve eksenel basınç gradyanları ile viskoz dağılmanın görelî katkılarını ayrıntılı olarak incelemiştir. Üç boyutlu sayısal model ve enerji denkleminde dayalı analizlerle, sıcaklık ayrışmasının yalnızca radyal sıcaklık profilleriyle açıklanamayacağını göstermişlerdir. Çalışma, özellikle radyal basınç gradyanının soğuk çekirdekte sıcaklık düşüşüne, viskoz dağılmanın ise sıcak akım bölgesinde ısınmaya katkısını nicel olarak ortaya koymuştur. Bu yaklaşım, vorteks tüpü tasarımında termodinamik ve akışkanlar mekaniği etkilerinin birlikte değerlendirilmesine imkân vermektedir (Park et al., 2022). Thakare 2025, çalışmasında girdaplı akış yapısının ve işletme basıncının vorteks tüpte ekserji davranışına etkisini hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile araştırmaktadır. Çalışmada, farklı giriş basınçları ve soğuk kütle oranları için sıcaklık ayrışması, entropi üretimi ve ekserji kaybı dağılımları hesaplanmıştır. Sonuçlar, giriş basıncının artmasıyla enerji ayrışmasının güçlendiğini ancak belirli bir seviyeden sonra ekserji yıkımının da hızla arttığını göstermiştir. Böylece, sadece maksimum sıcaklık farkını değil, toplam ekserji verimini esas alan optimum çalışma aralıkları tanımlanmıştır (Thakare, 2025). Sadeghiseraji ve arkadaşları 2023, Bu çalışmada, vorteks tüpünde meydana gelen sıcaklık ayrışmasının önce deneysel olarak belirlenmesi, ardından bu bulguların üç farklı RANS türbülans modeli kullanılarak sayısal ortamda doğrulanması amaçlanmıştır. Farklı giriş basınçlarında elde edilen deneysel veriler, sayısal çözüm sonuçlarının değerlendirilmesinde temel referans olarak kullanılmış ve standart $k-\epsilon$, standart $k-\omega$ ile SST $k-\omega$ modellerinin performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, SST $k-\omega$ modelinin hem sıcaklık dağılımını hem de sıcak ve soğuk çıkışlar arasındaki sıcaklık farkını öngörmekte daha tutarlı ve deneysel verilere en yakın sonuçları sağladığını ortaya koymuştur. Bu yönüyle çalışma, vorteks tüplerindeki enerji ayrışmasının sayısal modellenmesine yönelik tasarım ve optimizasyon çalışmalarında hangi türbülans modelinin daha güvenilir şekilde kullanılabileceğine dair önemli bir metodolojik rehber sunmaktadır (Sadeghiseraji et al., 2021).

Bu çalışma, paralel bağılı iki vorteks tüpünün polyamid, alüminyum ve pirinç malzemelerle üretilen gövdeleri üzerinde hem hava hem de oksijen akışkanları kullanılarak 200–600 kPa aralığında gerçekleştirilen deneylerle

sistem davranışını bütüncül olarak ortaya koymaktadır. Altı çıkışlı nozul geometrisinin kullanıldığı bu deneysel düzenek, malzeme ile akışkan tipinin sıcaklık ayrışması, verim, ekserji çıkışı ve ekserji kaybı üzerindeki etkilerini doğrudan ilişkilendirerek literatürdeki tekil incelemelerden ayrılmaktadır. Çalışmanın temel amacı, çoklu vorteks tüpü konfigürasyonlarında malzeme özelliklerinin ve akışkan türünün termodinamik performans üzerindeki belirleyici rolünü deneysel olarak ortaya koymak ve bu alandaki mevcut bilgi birikimine özgün katkı sunmaktır.

METARYAL VE METOD

Bu araştırmada, karşıt akış prensibiyle çalışan iki adet Ranque–Hilsch vorteks tüpü paralel olarak bağlanmış ve böylece ikili vorteks tüpü yapısına sahip deneysel bir sistem oluşturulmuştur. Her iki tüpün iç çapı 7 mm ve toplam gövde uzunluğu 100 mm olup, modüler tasarım sayesinde farklı malzemelerden üretilmiş altı çıkışlı nozul geometrilerinin hızlı biçimde değiştirilebilmesi sağlanmıştır. Deneylerde polyamid, alüminyum ve pirinç malzemelerden imal edilen 6 çıkışlı nozul yapıları kullanılmış; çalışma akışkanı olarak hava ve oksijen seçilmiştir. Giriş basıncı 200–600 kPa aralığında, her 50 kPa artışla ayarlanmış ve tüm basınç ölçümleri yüksek hassasiyetli PAKKENS marka manometre ile izlenmiştir. Sıcaklık değerleri ± 1 °C duyarlılığa sahip dijital sensörlerle kaydedilmiş; debi ölçümleri laboratuvar tipi akış ölçer aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler sıcaklık farkı, verim, ekserji girişi, ekserji çıkışı ve ekserji kaybı hesaplamalarında kullanılmış; termodinamik özellikler CoolPack yazılımı üzerinden belirlenmiştir. Tüm ölçümlerin üç kez tekrarlanmasıyla sistemin güvenilirliği ölçülmüş ve hesaplamalarda ortalama değerler esas alınmıştır. Bu yönetsel yaklaşım, malzeme–akışkan etkileşiminin ikili vorteks tüpü performansına olan etkilerini bütüncül biçimde değerlendirmeye olanak sağlamıştır.



Şekil 1: Paralel bağlı vorteks tüp deney düzeneği



Pirinç Polyamid Alüminyum

Şekil 2: Pirinç nozullar

Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen belirsizlik analizi, ölçüm sonuçlarının doğruluğunu değerlendirmek ve kullanılan cihazların güvenilirliğini ortaya koymak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, elde edilen deneysel verilerin duyarlılığını doğrulamak amacıyla kapsamlı bir belirsizlik analizi uygulanmıştır. Çalışmada sistem performansını doğrudan etkileyen temel ölçüm büyüklükleri; debimetre ve manometre aracılığıyla belirlenen basınç, sıcaklık ve akış hızıdır. Söz konusu parametrelere ilişkin belirsizlik değerleri, literatürde yaygın olarak kabul gören RSS yöntemi kullanılarak hesaplanmış olup, ilgili matematiksel ifade Eşitlik 1’de sunulmuştur (Moffat, 1988:5).

$$\frac{\partial w}{w} = \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial x_i}{x_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Ekserji Analizi

Ekserji analizi, bir termodinamik sistemin çalışması sırasında ortaya çıkan geri döndürülemez etkileri dikkate alarak ikinci yasa verimliliğini ortaya koyan temel bir değerlendirme yöntemidir. Bu bağlamda, sistemde sürtünme, karışma ve ısı geçişi gibi mekanizmalarla oluşan entropi artışı hesaba katılarak, enerjinin işe dönüştürülebilir kısmındaki azalma nicel olarak belirlenmektedir. Enerji analizlerinin yalnızca miktara odaklanmasının aksine, ekserji yaklaşımı enerjinin kullanım potansiyelini de değerlendirdiğinden, özellikle kararlı akışla çalışan vorteks tüpleri gibi ayırma mekanizmasına sahip sistemlerde performansın doğru yorumlanmasında kritik bir rol üstlenmektedir. (Kaya. H et al., 2022).

$$(1 - \mu_c)(T_h - T_c) + (T_c - T_i) = 0 \quad (2)$$

$$\dot{S}_g = \dot{m}_i \left[(1 - \mu_c)(S_c - S_h) + (S_i - S_c) \right] \quad (3)$$

Paralel bağlı karşı-akışlı RHVT sistemlerinin ekserji analizinde, kontrol hacmi yaklaşımı esas alınmakta olup, akışın zamandan bağımsız olduğu ve sistemin dış ortamla ısı veya iş alışverişinde bulunmadığı kabul edilmektedir. Bu çerçevede, kontrol hacmini giriş bölgesi ile sıcak ve soğuk çıkışların sınırladığı varsayılır. Giriş ve çıkıştaki sıcaklık ve basınç değerleri ile soğuk kütle oranı kullanılarak sistemde oluşan entropi üretimi, Eşitlik (2) ve (3)'te verilen bağıntılar yardımıyla hesaplanmaktadır. Çalışma akışkanının ideal gaz özellikleri gösterdiği kabul edildiğinde ise, söz konusu iki temel denklem uygun termodinamik ilişkilerle birleştirilerek sistemin toplam entropi üretimini tanımlayan genel ifade Eşitlik (4) şeklinde formüle edilmektedir (Saidi & Yazdi, 1999:627).

$$\dot{S}_g = \dot{m}_i \left[C_p \ln \frac{(T_h / T_c)^{(1-\mu_c)}}{1 + (1 - \mu_c)(T_h / T_c - 1)} + R \ln \frac{P_i}{P_c} \right] \quad (4)$$

Paralel bağlı RHVT sistemleri üzerinde yürütülen deneysel çalışmalarda, farklı nozül konfigürasyonları için giriş ve çıkış bölgelerinden elde edilen basınç ve sıcaklık verileri kullanılarak sistemde yok edilen ekserji miktarı hesaplanmaktadır. Vorteks tüpündeki geri döndürülemezliklerin temel göstergesi olan özgül kayıp ekserji, giriş ve çıkış hattı arasındaki toplam

ekserji farkı şeklinde tanımlanmakta ve bu değerler eşitlik (5)–(9) kapsamındaki bağıntılar üzerinden değerlendirilmektedir. Bu analiz yaklaşımı, her bir nozül tipinin termodinamik performansa etkisini ayrıntılı biçimde ortaya koymakta ve sistem bileşenlerindeki entropi üretimi hakkında nicel bilgi sağlamaktadır. Böylece, farklı malzeme ve geometri seçeneklerinin ekserji kayıplarına olan katkısı karşılaştırılabilir bir çerçevede incelenebilmiştir (Kırmacı, 2009:1629).

$$i = e_i - e_o \quad (5)$$

$$e_i = (h_i - h_a) - T_a(s_i - s_a) \quad (6)$$

$$e_o = \mu_c e_c + (1 + \mu_c) e_h \quad (7)$$

$$e_c = (h_c - h_a) - T_a(s_c - s_a) \quad (8)$$

$$e_h = (h_h - h_a) - T_a(s_h - s_a) \quad (9)$$

Sıcak ve soğuk akışların spesifik ekserji değerleri ilgili ifadeler yardımıyla elde edildikten sonra, sistemin ikinci yasa verimliliği Eşitlik (10)'da verilen bağıntı kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\mathcal{E} = \frac{e_o}{e_i} \quad (10)$$

Buna ek olarak, sıcak ve soğuk çıkış sıcaklıklarının giriş sıcaklığına göre değişimi Eşitlik (11) ve (12) ile ifade edilmekte ve bu iki değer arasındaki farktan tüpün temel performans göstergesi olan toplam sıcaklık farkı (ΔT) Eşitlik (13) kullanılarak hesaplanmaktadır (Doğan et al., 2023).

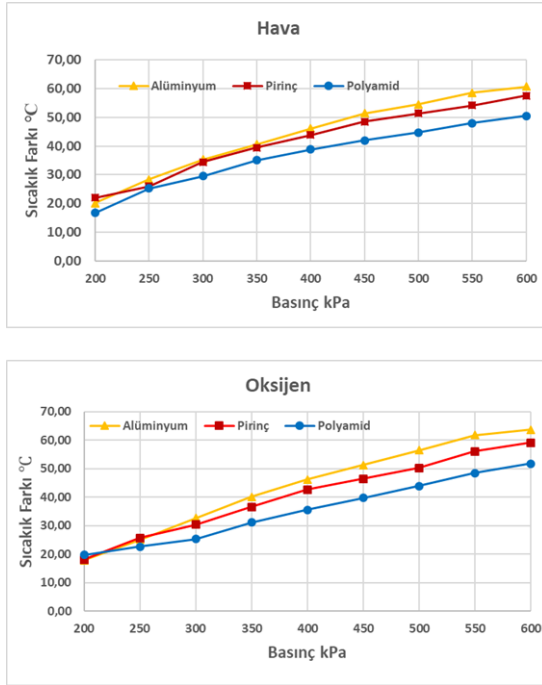
$$\Delta T_c = T_i - T_c \quad (11)$$

$$\Delta T_h = T_h - T_i \quad (12)$$

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (13)$$

BULGULAR VE TARTIŞMA

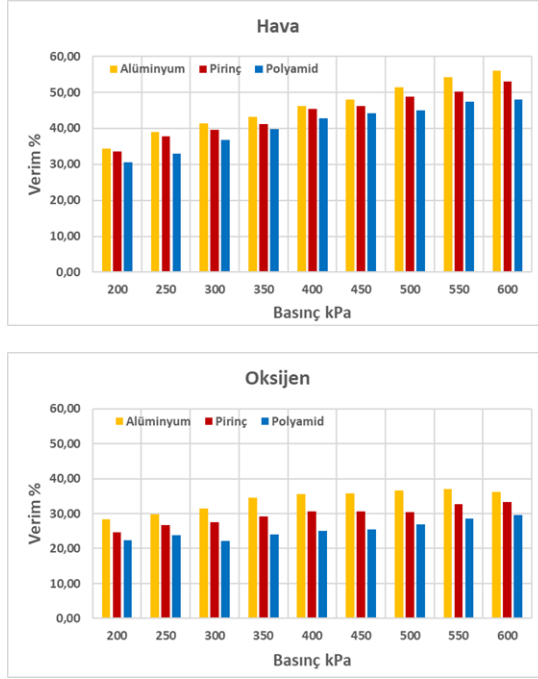
Deney sonuçları, basınçtaki artışın tüm malzemelerde sıcaklık farkı, verim ve ekserji çıkışı üzerinde pozitif yönde etkili olduğunu göstermiştir. Alüminyum gövde, yüksek ısı iletkenliği sayesinde hem hava hem de oksijen akışkanlarında en yüksek sıcaklık farkını ve en yüksek verim değerlerini üretmiş; pirinç malzeme orta seviyede bir performans sergilemiş; polyamid ise en düşük değerleri vermiştir. Oksijen akışkanının, özellikle yüksek basınçlarda, havaya göre daha yüksek sıcaklık ayrışması üretmesine rağmen verim değerlerinin hava akışkanının gerisinde kalması, oksijenin termodinamik özelliklerinin neden olduğu farklı enerji bölünme oranlarıyla ilişkilendirilmiştir.



Şekil 3: Paralel bağlı vorteks tüp farklı malzeme ve akışkanlar için sıcaklık farkı grafiği

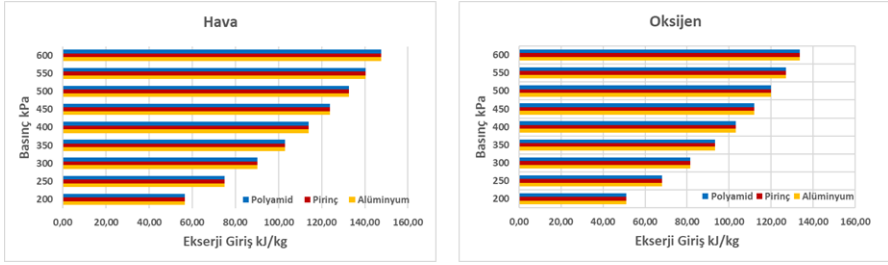
Hava ve oksijen akışkanlarıyla gerçekleştirilen deneylerde basınç arttıkça tüm malzemelerde sıcaklık farkının düzenli biçimde yükseldiği görülmüştür (Şekil 3). Alüminyum gövde, yüksek ısı iletkenliği sayesinde her iki akışkan için de en yüksek sıcaklık farkını üretmiş ve performans açısından diğer malzemelerin üzerinde konumlanmıştır. Pirinç malzeme, alüminyuma yakın ancak daha düşük iletkenliğine bağlı olarak orta seviyede bir performans sergilemiştir. Polyamid ise düşük ısı iletkenliği nedeniyle tüm basınç

aralıklarında en düşük sıcaklık farkını ortaya koymuştur. Oksijen akışkanı, özellikle yüksek basınçlarda havaya kıyasla daha yüksek sıcaklık ayrışması sağlayarak akışkan türünün performans üzerindeki etkisini belirginleştirmiştir. Bu bulgular, malzeme özelliklerinin ve akışkan tipinin vorteks tüplerinin termal davranışı üzerinde kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.



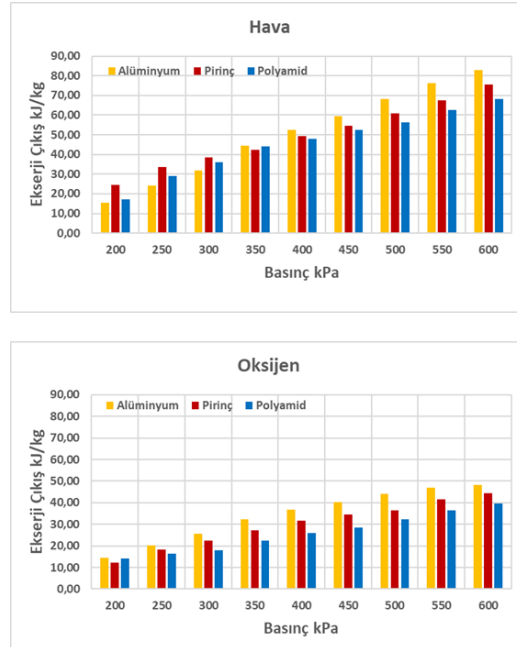
Şekil 4: Paralel bağlı vorteks tüp farklı malzeme ve akışkanlar için verim grafiği

Hava akışkanı ile elde edilen verim sonuçlarında basınç arttıkça tüm malzemelerde verim değerlerinin genel olarak yükseldiği ve en yüksek verimlerin 550–600 kPa aralığında gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 4). Alüminyum gövde, yüksek ısı iletkenliğinin etkisiyle tüm basınç seviyelerinde en yüksek verimi sağlamış ve malzemeler arasındaki performans farkını belirginleştirmiştir. Pirinç malzeme, alüminyumdan düşük ancak polyamidden daha yüksek verim değerleri üreterek orta seviyede bir performans ortaya koymuştur. Polyamid gövde ise düşük ısı iletkenliği nedeniyle hem hava hem de oksijen deneylerinde en düşük verim sonuçlarını vermiştir. Oksijen akışkanı ile yapılan deneylerde verim düzeylerinin hava deneylerine kıyasla daha düşük olduğu, bunun oksijenin daha yüksek sıcaklık farkı üretmesine rağmen enerji bölünme oranlarını sınırlamasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Bu sonuçlar, malzeme seçiminin ve akışkan türünün vorteks tüplerinin enerji verimliliği üzerinde doğrudan belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır.



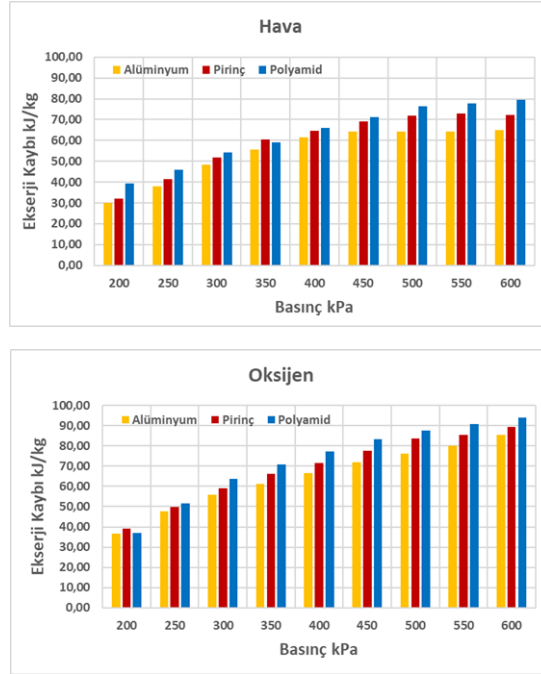
Şekil 5: Paralel bağlı vorteks tüp farklı malzeme ve akışkanlar için ekserji giriş grafiği

Hava akışkanı için elde edilen ekserji giriş değerleri, artan basınç seviyeleriyle birlikte düzenli bir biçimde yükselmekte olup, tüm basınç adımlarında polyamid, pirinç ve alüminyum nozullar arasında yalnızca sınırlı bir fark gözlenmektedir. Malzemeler karşılaştırıldığında, özellikle yüksek basınçlarda alüminyum nozulun diğer malzemelere kıyasla biraz daha yüksek ekserji giriş değerleri sağladığı dikkat çekmektedir. Oksijen akışkanına ait sonuçlarda da benzer bir eğilim görülmekte; basınç arttıkça ekserji girişi belirgin şekilde yükselirken malzeme türleri arasındaki farklar sınırlı aralıkta kalmaktadır. Genel olarak, her iki akışkan için de ekserji girişinin basınçla doğru orantılı olarak arttığı ve malzeme farklılığının sistem performansına etkisinin yalnızca yüksek basınç bölgelerinde belirginleştiği söylenebilir.



Şekil 6: Paralel bağlı vorteks tüp farklı malzeme ve akışkanlar için ekserji çıkış grafiği

Hava akışkanını kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde basınç arttıkça tüm malzemelerde ekserji çıkışının belirgin biçimde yükseldiği ve en yüksek değerlerin 550–600 kPa aralığında elde edildiği görülmüştür (Şekil 6). Alüminyum gövde, yüksek ısıl iletkenliği ve daha etkin enerji ayrıştırma kapasitesi sayesinde tüm basınç seviyelerinde en yüksek ekserji çıkışını üretmiştir. Pirinç malzeme, alüminyuma kıyasla daha düşük ancak polyamidden daha yüksek ekserji değerleri oluşturarak orta seviyede bir performans sergilemiştir. Polyamid gövde ise düşük iletkenliğine bağlı olarak tüm basınçlarda en düşük ekserji çıkışını sağlamıştır. Oksijen akışkanı ile elde edilen sonuçlar da benzer eğilim göstermiş olup ekserji çıkışı hava deneylerine kıyasla daha düşük seviyelerde gerçekleşmiştir. Bu durum, oksijenin yüksek sıcaklık ayrışması üretmesine rağmen ekserji transfer etkinliğinin akışkan özelliklerinden etkilenmesiyle açıklanabilir.



Şekil 7: Paralel bağlı vorteks tüp farklı malzeme ve akışkanlar için ekserji kaybı grafiği

Deney sonuçları, basınç arttıkça tüm malzemelerde ekserji kaybının yükseldiğini ve bu artışın hem hava hem de oksijen akışkanlarında belirgin olduğunu göstermektedir (Şekil 7). Alüminyum gövdede ekserji kaybı hava için 30–64 kJ/kg aralığında, oksijen için ise 36–85 kJ/kg seviyelerinde gerçekleşmiş ve oksijenin daha yüksek kayıp oluşturduğu görülmüştür. Pirinç malzemede ekserji kaybı hava akışkanında 31–72 kJ/kg, oksijen akışkanında ise 39–89 kJ/kg olarak ölçülmüş ve sonuçlar pirincin alüminyuma kıyasla

daha fazla kayıp ürettiğini ortaya koymuştur. Polyamid gövde ise her iki akışkanda da en yüksek ekserji kayıplarını üretmiş; hava için 39–79 kJ/kg ve oksijen için 37–94 kJ/kg değerlerine ulaşmıştır. Bu durum polyamidin düşük ısı iletkenliğinin enerji ayrışmasını sınırlaması ve tersinmezlikleri artırmasıyla ilişkilendirilebilir. Oksijen akışkanında tüm malzemelerde ekserji kayıplarının havaya göre daha yüksek olması, oksijenin termodinamik özelliklerinden kaynaklanan daha güçlü ayrışma ve geriye dönüşsüzlük etkileriyle açıklanabilir.

Çalışmanın yenilikçi yönü, literatürde çoğunlukla tek tüp ve tek malzeme üzerinden ilerleyen araştırmaların aksine, paralel bağlı iki vorteks tüpünün farklı malzemelerle, iki farklı akışkanla ve geniş bir basınç aralığında karşılaştırmalı olarak analiz edilmesidir. Ayrıca ekserji giriş-çıkış-kayıp ilişkilerinin malzeme ve akışkan temelli olarak aynı deneysel platformda değerlendirilmesi, enerji-iletkenlik ilişkisine dair önceki çalışmalarda yer almayan yeni bir bakış açısı sunmaktadır. Bu özgün yaklaşım, vorteks tüplerinin tasarımında malzeme seçiminin kritik önemini kanıtlayarak gelecekteki optimizasyon çalışmalarına temel oluşturacak nitelikte bulgular sağlamıştır.

SONUÇ

Bu çalışma, paralel bağlı iki vorteks tüpü üzerinde farklı malzeme türleri ve akışkanlar kullanılarak gerçekleştirilen geniş kapsamlı deneyler aracılığıyla sistemin termodinamik performansını detaylı biçimde ortaya koymuştur. Alüminyum gövdenin tüm performans kriterlerinde en yüksek başarıyı sergilediği, pirincin orta seviyede kaldığı ve polyamidin düşük ısı iletkenliği nedeniyle en zayıf sonucu verdiği belirlenmiştir. Oksijen akışkanı, sıcaklık ayrışması açısından havaya göre üstün olsa da verim ve ekserji çıkışı bakımından daha düşük performans göstermiş, buna karşın ekserji kayıpları daha yüksek gerçekleşmiştir. Basınç artışı genel olarak performansı olumlu etkilemiş ancak tersinmezliklerin de aynı oranda arttığı gözlenmiştir. Ekserji analizi sonuçları, malzeme seçiminin yalnızca sıcaklık farkı veya verim açısından değil, sistemdeki geri dönüşsüzlüklerin azaltılmasında da belirleyici olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, paralel bağlı vorteks tüpü sistemlerinde malzeme ve akışkan etkileşiminin performansı belirlemede kritik bir rol oynadığını göstermekte ve literatürde sınırlı biçimde ele alınan paralel tüp konfigürasyonlarına dair önemli ve yenilikçi katkılar sunmaktadır.

REFERANSLAR

- Cartlidge, J., Chowdhury, N., & Povey, T. (2022). Performance characteristics of a divergent vortex tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 186, 122497.
- Chowdhury, N. H. K., & Povey, T. (2024). High-accuracy experimental study of performance characteristics of optimised Ranque-Hilsch vortex tube. *Applied Thermal Engineering*, 251, 123385.
- Doğan, A., Korkmaz, M., & Kirmacı, V. (2023). Estimation Of Ranque-Hilsch Vortex Tube Performance By Machine Learning Techniques. *International Journal of Refrigeration*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.01.021>
- Kaya, H., Gökçe, H., & Kırmaç, V. (2022). Effect of Cold Diameter on Thermal Performance and Exergy Analysis of Ranque-Hilsch Vortex Tube with Copper Nozzles. *Heat Transfer Research*, 53(2), 59–70.
- Kırmaç, V. (2009). Exergy analysis and performance of A Ranque-Hilsch counter flow vortex tube having various nozzle numbers at different inlet pressures of oxygen and air". *International Journal of Refrigeration*, 32(7), 1626–1633.
- Moffat, R. J. (1988). Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1(1), 3–17.
- Park, S. Y., Yoon, S. H., Yu, S. S., & Kim, B. J. (2022). Numerical Investigation on the Principle of Energy Separation in the Vortex Tube. *Applied Sciences*, 12(19), 10142.
- Sadeghiseraji, J., Moradicheghamahi, J., & Sedaghatkish, A. (2021). Investigation of a vortex tube using three different RANS-based turbulence models. *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, 143(6).
- Saidi, M. H., & Yazdi, M. R. A. (1999). Exergy model of a vortex tube system with experimental results. *Energy*, 24(7), 625–632.
- Thakare, H. R. (2025). Computational investigation and exergy analysis of swirling flow in vortex tube. *Journal of Thermal Engineering*, 11(4), 991–1010. <https://doi.org/10.14744/thermal.0000959>

Biyogaz Üretiminde Verim Artışı için Proses Parametrelerinin Otomasyon Tabanlı Kontrolü

Mustafa KARAGÖZ¹

Nuri TUNÇ²

Burak ÇİFTÇİ³

Emrah DENİZ⁴

- 1- Doç.Dr.; Karabük Üniversitesi, TOBB MYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojisi Bölümü. mustafakaragoz@karabuk.edu.tr ORCID No: 0000-0002-2595-9002
- 2- Dr.; Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD. tunckar.nt@gmail.com ORCID No: 0000-0001-8186-8386
- 3- Dr. Öğr. Gör.; Karabük Üniversitesi, TOBB MYO, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojisi Bölümü. burakciftci@karabuk.edu.tr ORCID No: 0000-0003-3671-0824
- 4- Prof. Dr.; Karabük Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü. emrahdeniz@karabuk.edu.tr ORCID No: 0000-0003-0182-2631

ÖZET

Biyogaz, hayvan gübresi, kanalizasyon çamuru, bitkisel ve gıda gibi organik atıkların anaerobik şartlarda metan üreten mikroorganizmalar tarafından parçalanması sonucu ortaya çıkan yanabilir gaz karışımıdır. Bünyesinde yüksek oranda metan bulunduran biyogaz üretim sürecinde atıkların enerjiye dönüşümünü sağlayarak atık yönetimi, fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması, sera gazı emisyonu azaltımı ve gübre üretimi gibi birçok avantaj sunar. Bu avantajların yansira üretilen biyogaz, elektrik üretiminde, ısı üretiminde, biyometan üretiminde ve yakıt olarak kullanılabilir. Biyogaz üretimi birçok avantaj sunmasına rağmen biyogaz üretiminde kullanılan anaerobik fermentasyon süreci pH, C/H oranı, hidrolik bekleme süresi ve sıcaklık gibi birçok değişkene doğrudan bağlıdır ve prosesin kararlı bir şekilde işletilmesi zordur. Belirtilen sorunların çözümü için biyogaz üretim sürecinde otomasyon kullanımı hem metan üretim veriminin artırılması hem de prosesin kararlı şekilde işletilebilmesi açısından önemlidir. Özellikle reaktör ısı, reaktör yükleme oranı ve karıştırma gibi temel işletme parametrelerinin otomatik olarak izlenip yönetilmesi, anaerobik fermentasyon sürecinin daha kontrollü ve verimli olmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada pilot ölçekte bir biyogaz tesisinde, PLC kontrollü otomasyon sistemi entegre edilerek üretim performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Sürecin uzaktan takibi ve müdahalesi için SCADA tabanlı bir ara yüz geliştirilmiş, operasyon sırasında sıcaklık, karıştırma hızı ve organik yükleme oranı gerçek zamanlı olarak yönetilmiştir. Ayrıca, farklı organik atıkların birlikte işlenmesine dayanan kofermantasyon yaklaşımı kullanılarak reaktörün biyokimyasal verimi artırılmıştır. Çalışmada otomasyon sisteminin bileşenleri, entegrasyon adımları ve prosesi iyileştirmeye yönelik teknik öneriler ayrıntılı biçimde sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Biyogaz, Üretim, Otomasyonu, Metan, Kofermantasyon.

GİRİŞ

Artan enerji ihtiyacı ve fosil yakıtların çevresel etkileri, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini artırmıştır. Bu kaynaklardan biri olan biyogaz, organik atıkların enerjiye dönüştürülmesini sağlayan ve sürdürülebilir enerji üretimine katkı sunan çevre dostu bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Biyogaz; hayvansal atıklar, bitkisel artıklar, gıda endüstrisi atıkları ve kanalizasyon çamurlarının anaerobik mikroorganizmalar tarafından parçalanması sonucu oluşmaktadır. İçeriğinde ağırlıklı olarak metan (%40-75) ve karbondioksit (%15-60) bulunmakta olup, bunun yanı sıra su buharı, azot, oksijen, amonyak, karbon monoksit ve hidrojen sülfür gibi düşük oranlarda bulunan diğer gaz bileşenlerini de içermektedir (Andriani vd., 2014:1909).

Biyogazın enerji değeri büyük ölçüde metan içeriğine bağlıdır. Ancak ham biyogaz içerisindeki CO₂ ve H₂S gibi istenmeyen gazlar, yakıt kalitesini düşürmekte, korozyona neden olmakta ve enerji sistemlerinde verim kayıplarına yol açmaktadır. Bu nedenle, günümüzde biyogazın saflaştırılması ve zenginleştirilmesi önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Andriani ve arkadaşları (2014:1909), CO₂ giderimine yönelik fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma tekniklerinin biyometan kalitesini önemli ölçüde artırdığını ve biyogazın doğal gaz eşdeğerine dönüştürülebildiğini ortaya koymuştur.

Biyogaz teknolojisi yalnızca enerji üretimi açısından değil, aynı zamanda atık yönetimi ve kırsal kalkınma açısından da önemli bir role sahiptir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde biyogaz sistemlerinin kırsal hanelerde kullanımı hem enerji erişimini kolaylaştırmakta hem de çevresel kirliliğin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Katuwal ve Bohara (2009:2668) Nepal’de kırsal hanelerde kullanılan biyogaz sistemlerinin, yakacak odun kullanımını azalttığını, sera gazı salınımını düşürdüğünü ve yaşam kalitesini artırdığını rapor etmiştir.

Anaerobik çürütme süreci, birbirini izleyen karmaşık biyokimyasal reaksiyonlardan oluşmakta ve hidroliz, asidogenez, asetogenez ve metanojeniz olmak üzere dört temel aşamada gerçekleşmektedir. Bu süreçte görev alan mikroorganizmaların faaliyetleri; sıcaklık, pH, organik yükleme hızı, hidroliz bekleme süresi, karıştırma koşulları ve inhibitör maddeler gibi birçok işletme parametresine bağlı olarak değişmektedir. Özellikle amonyak, sülfür ve ağır metaller gibi inhibitörlerin yüksek konsantrasyonlarda bulunması, metanojen bakteriler üzerinde toksik etki oluşturarak biyogaz üretimini önemli ölçüde düşürebilmektedir (Angelidaki ve Ahring, 1993:560, Gerardi, 2003, Ward vd., 2008:7928, Chen vd., 2008:4044). Bu faktörler hem üretilen biyogaz miktarını hem de gazın bileşimini doğrudan etkilemektedir (Işıkyürek ve Yaldız, 2015:89). Gerardi (2003), anaerobik çürütme süreçlerinin mikrobiyolojik dengesinin korunmasının sürdürülebilir biyogaz üretimi için kritik öneme sahip olduğunu vurgulamıştır.

Tarım ve hayvancılık atıklarının biyogaz üretiminde kullanımı hem çevresel kirliliği azaltmakta hem de organik atıkların enerjiye dönüştürülmesini sağlamaktadır. Ward ve arkadaşları (2008:7928), tarımsal atıkların anaerobik çürütme prosesinin optimize edilmesiyle biyogaz veriminin %50’ye kadar artırılabilirdiğini ortaya koymuştur. Anaerobik çürütme süreçlerinin biyolojik yapısı gereği dinamik ve hassas olması, prosesin sürekli izlenmesini ve kontrol edilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle modern biyogaz tesislerinde otomasyon sistemlerinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Weiland (2010:849), günümüzde biyogaz tesislerinde otomasyonun proses güvenliği, işletme sürekliliği ve enerji verimliliği açısından vazgeçilmez bir unsur haline geldiğini belirtmiştir. Bu sürecin karmaşık yapısı ve süreklilik gerektirmesi, biyogaz tesislerinde otomasyon sistemlerinin önemini artırmıştır. Biyogaz üretim tesislerinde kullanılan otomasyon sistemleri; proses güvenliğini artırmak, verimliliği

yükseltmek, insan kaynaklı hataları azaltmak ve enerji kullanımını optimize etmek amacıyla çeşitli teknolojileri bir araya getiren kritik bir araçtır (Mata-Alvarez vd., 2000:3, Appels vd., 2008:755).

Işıküre ve Yıldız (2015:89), Akdeniz Üniversitesi'nde kurulan bir biyogaz tesisinde PLC (Programlanabilir Lojik Denetleyici) tabanlı bir otomasyon sistemi uygulamışlardır. Bu sistem ile ön yükleme tankı ve gaz üretim bölümlerindeki motor ve pompaların başlatma, durdurma ve bekleme süreleri dokunmatik operatör paneli üzerinden ayarlanabilmiştir. Sistem, sıcaklık verilerini sürekli olarak ölçmüş ve hem anlık hem de geçmişe dönük verileri operatör arayüzünde depolamıştır. Araştırmacılar, dokunmatik panel üzerinden motor ve pompa parametrelerinin kolayca değiştirilebilmesi sayesinde otomasyon sisteminin hızlı ve esnek bir işletme sağladığını bildirmiştir. Ayrıca, sistemin manuel ve otomatik çalışma modlarına sahip olmasının operatörler açısından önemli bir avantaj sunduğunu ve hem büyük ölçekli biyogaz tesislerine hem de küçük ölçekli çiftlik uygulamalarına uyarlanabilir olduğunu vurgulamışlardır.

Song ve arkadaşları (2016:2182), iki fazlı anaerobik fermentasyon süreci için otomatik bir kontrol sistemi geliştirmiştir. Geliştirilen sistemin fermentasyon sürecinin teknik gereksinimlerini karşıladığı, metanojen bakterilerin farklı aktivite evrelerini optimize ettiği ve hızlı, verimli ve kararlı bir gaz üretimi sağladığı belirtilmiştir. Sistem içerisinde kullanılan PLC konfigürasyon yazılımı sayesinde biyogaz üretim sürecine ait veriler otomatik olarak toplanmış, sıvı seviyesi, sıcaklık ve pH gibi temel fermentasyon parametreleri izlenmiş ve kontrol edilmiştir.

Sahu ve arkadaşları (2017:5351), bir biyometanasyon tesisinin işletme koşullarını incelemiş ve kış aylarında gaz üretiminin azaldığını, aşırı gaz basıncı nedeniyle de çürütücüde mekanik arızalar meydana geldiğini tespit etmiştir. Bu sorunlara çözüm olarak besleme geçiş sürecini modifiye etmiş ve güneş enerjili bir ısıtma sistemi entegre etmiştir. Ayrıca, işletme güvenliğini artırmak ve arızaları önlemek amacıyla göstergeler, basınç şalterleri, sensörler, servo motorlar ve aktüatörlerden oluşan bir otomasyon sistemi önermiştir.

Mudaheranwa (2015), biyogaz üretim süreçlerinde güvenliği ve verimliliği artırmak amacıyla PLC tabanlı bir otomasyon sistemi geliştirmiştir. Sistem; besleme sıklığı, sıcaklık, basınç ve gaz debisi gibi kritik işletme parametrelerini izlemiş ve kontrol etmiştir. Bu sayede hem gaz verimi hem de gaz kalitesi artmıştır. Ayrıca, çürütücü ile gaz depolama tankı arasındaki basınç farkı düzenlenerek olası arızaların önüne geçilmiş ve tesis güvenliği artırılmıştır. Simülasyon ve uygulamalı testler, geliştirilen otomasyon sisteminin biyogaz tesislerinde daha güvenli ve verimli enerji üretimine katkı sağladığını göstermiştir.

Guimarães ve arkadaşları (2023:18), anaerobik çürütme süreçlerinde düşük biyobozunurluğa sahip biyokütlelerin verimsizliğini gidermek amacıyla otomasyon tabanlı izleme ve kontrol birimleri ile donatılmış bir

biyodigester tasarlamıştır. Sistem, yarı-sürekli ve kesikli modlarda çalıştırılmış olup, 60 gün boyunca 37 °C’de organik atık, anaerobik çamur ve arıtılmamış atık su karışımı işlenmiştir. Yarı-sürekli modda en yüksek performans elde edilmiş, %80,7 uçucu katı madde giderimi, 68,5 L toplam biyogaz üretimi ve %78,5 metan içeriği sağlanmıştır. Sıcaklık, besleme sıklığı ve gaz birikimi gibi temel parametrelerin otomatik izlenmesi ve kontrolü, proses kararlılığını artırmış ve biyogaz verimi ile kalitesini optimize etmiştir. Bu çalışma, düşük maliyetli otomasyon sistemleriyle donatılmış biyodigesterlerin büyük ölçekli ve sürdürülebilir biyogaz üretimi için uygulanabilir bir çözüm sunduğunu göstermiştir.

Ajay ve arkadaşları (2016:171), hayvansal atıklar, insan atıkları ve gıda artıkları gibi çeşitli organik atıkları kullanan biyogaz tesisleri için PLC ve SCADA tabanlı bir otomasyon sistemi geliştirmiştir. Bu çalışmada atık toplama, karıştırma, anaerobik çürütme, gaz depolama ve dağıtım gibi temel süreçler otomatikleştirilmiştir. Uzaktan izleme ve kontrol imkânı sayesinde insan kaynaklı hatalar azaltılmış, işletme güvenliği artırılmış ve iş gücü maliyetleri düşürülmüştür. Sonuçlar, SCADA sistemleri ile sensörler ve cihazların internet üzerinden birbirine bağlanmasını sağlayan Nesnelerin İnterneti Tabanlı (IoT) teknolojilerin, biyogaz tesislerinde daha verimli, sürdürülebilir ve güvenilir bir üretim altyapısı sunduğunu ortaya koymuştur.

Çınar ve arkadaşları (2021:85), biyogaz üretim tesislerinde proses kontrolünü iyileştirmek amacıyla yapay zekâ tabanlı izleme ve karar destek sistemleri geliştirmiştir. Anaerobik çürütmenin biyolojik karmaşıklığı ve değişkenliği nedeniyle geleneksel kontrol yöntemlerinin yetersiz kaldığına dikkat çeken çalışmada, sıcaklık, pH ve organik yükleme hızı gibi üretim parametreleri yapay zekâ algoritmaları ile analiz edilmiştir. Kendi kendine uyarlanabilen bu sistem sayesinde gaz üretimi artmış, proses kararlılığı iyileşmiş ve işletme maliyetleri azalmıştır. Çalışma, yapay zekânın biyogaz sistemlerine entegrasyonunun sürdürülebilirlik ve verimlilik açısından stratejik katkı sağladığını göstermiştir.

Lukasik ve arkadaşları (2021:125), biyogaz üretim süreçlerinin enerji üretim sistemlerine entegrasyonunu kapsayan modern bir otomasyon ve görselleştirme sistemi geliştirmiştir. Sistem, enerji depolama ünitesi, biyokütle dağıtıcısı, çürütme odaları, sindirilmiş atık depolama alanı, ısıtmalı çiftlik binaları, ölçüm ve kontrol ekipmanları, kojenerasyon ünitesi ve transformatörü içermektedir. PLC’ler ve kontrol panelleri ile biyokütlenin transferinden çürütücülere beslenmesine, gaz toplanmasından elektrik üretimine kadar tüm süreçler izlenmiş ve kontrol edilmiştir. Ayrıca, görselleştirme teknikleri kullanılarak sistem bileşenlerine ait ayrıntılı bilgiler operatörlere sunulmuş, böylece işletme yönetimi ve süreç hakimiyeti artırılmıştır. Geliştirilen otomasyon ve görselleştirme altyapısı, biyogaz proses kontrolünü iyileştirmiş, insan kaynaklı hataları azaltmış, enerji verimliliğini artırmış ve tesis güvenliğini güçlendirmiştir.

Son yıllarda biyogaz tesislerinde PLC tabanlı otomasyon sistemlerinden, SCADA ve IoT destekli uzaktan izleme altyapılarına, hatta yapay zekâ ve derin öğrenme algoritmalarına kadar uzanan çok sayıda yenilikçi yaklaşım başarıyla uygulanmaktadır (Guimares ve Maia., 2023:18, Ajay vd., 2016:171, Çınar vd., 2021:85). Bu teknolojiler, proses parametrelerinin daha hassas izlenmesini sağlamış, gaz üretim verimliliğini artırmış ve işletme risklerini azaltmıştır (Mudaheranwa, 2015, Lukasik vd., 2021:125). Özellikle görselleştirme ve karar destek sistemleri, operatörlerin süreçleri bütüncül olarak değerlendirmesine olanak tanımış ve insan hatalarından kaynaklanan olumsuzlukları en aza indirmiştir.

Bu çalışmada, pilot ölçekli bir biyogaz tesisinde otomasyon destekli kontrol sisteminin uygulanması ele alınmış, sistemin süreç kararlılığı, işletme koşullarının yönetimi ve biyogaz üretim performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Anaerobik fermantasyon sürecine ait sıcaklık, karıştırma ve yükleme oranı gibi temel parametreler sensörler aracılığıyla izlenmiş ve PLC tabanlı, SCADA destekli uzaktan kontrol sistemine entegre edilmiştir. Ayrıca, biyogaz verimini artırmak amacıyla farklı organik atıkların karışımından oluşan kofermantasyon yöntemi uygulanmış ve süreç performansı değerlendirilmiştir. Çalışmada, hem otomasyon sistem bileşenlerinin hem de kofermantasyon besleme materyalinin biyogaz üretimine olan etkileri analiz edilerek metan veriminin optimizasyonuna yönelik bütüncül bir yaklaşım sunulmuştur. Seçilen otomasyon yaklaşımı, literatürdeki güncel gelişmeler ışığında sistematik olarak değerlendirilmiştir.

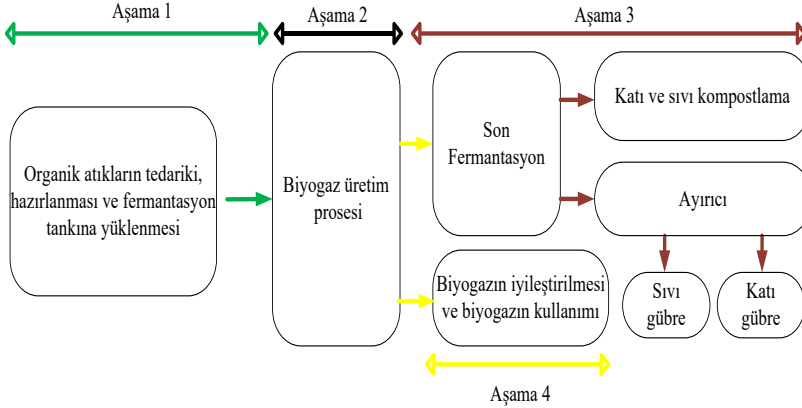
MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, biyogaz üretimi sırasında metan verimini artırmak amacıyla otomatik kontrol sistemi ile desteklenen pilot ölçekli bir biyogaz tesisinde otomasyon bileşenleri kullanılmaktadır. Otomasyon sisteminin entegrasyonuna ek olarak, biyogaz verimi üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla kofermantasyon sürecinde kullanılmak üzere özel bir besleme materyali karışımı hazırlanmış ve uygulanmıştır. Bu bölümde, biyogaz üretim süreci ve kofermantasyonda kullanılan karışımın bileşimi açıklanmaktadır. Ayrıca, biyogaz üretim verimliliğini artırmak ve desteklemek amacıyla tesise entegre edilen otomasyon sistemi ekipmanları ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

Biyogaz üretim süreci

Biyogaz üretim süreci dört ana aşamadan oluşmaktadır. Şekil 1, biyogaz üretim sürecinin şematik bir gösterimini sunmaktadır (Karagöz vd.,

2019:24). Birinci aşama, besleme materyalinin temin edilmesini, depolanmasını ve gerekli durumlarda kırma, parçalama, homojenleştirme ve prosese hazırlanmasını kapsamaktadır. İkinci aşama, fermentör içerisinde gerçekleşen anaerobik çürütme sürecini içermekte olup, bu süreçte besleme materyali metan üreten bakteriler tarafından parçalanarak metan gazı oluşmaktadır. Metanojen mikroorganizmaların faaliyetlerinin sürdürülebilmesi için uygun çevresel koşulların sağlanması büyük önem taşımaktadır. Üçüncü aşama, fermentasyon sonucu oluşan büyük miktardaki artıkların son depolama tankında depolanmasını veya sonradan işlenmesini kapsamaktadır. Bu aşamada ayrıca fermentasyon artıklarının sıvı kompost olarak değerlendirilmesi ya da sıvı veya katı gübreye dönüştürülmesi de ele alınmaktadır. Son aşama ise üretilen biyogazın arıtılması ve ardından çeşitli uygulamalarda kullanımını içermektedir.



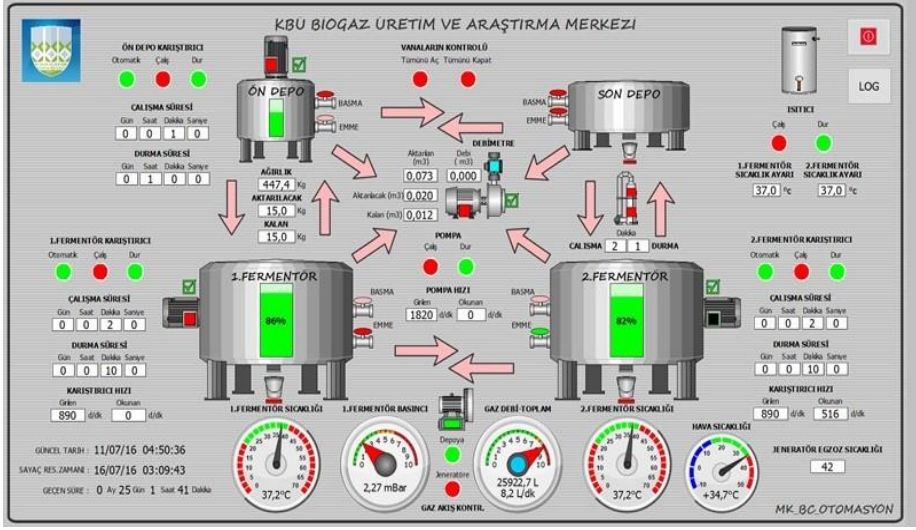
Şekil 1. Biyogaz üretim süreci.

Biyogaz üretim sürecinde anaerobik fermentasyon yöntemi kullanılmış olup, besleme materyalinin toplam katı madde içeriği %12 olarak belirlenmiştir. Bu karışım kütlece %40 sığır gübresi, %35 su, %17 peynir altı suyu ve %8 kanatlı gübresinden oluşmaktadır. Bu besleme materyallerinin her biri biyogaz üretiminde tek başına kullanıldığında bazı dezavantajlar olmaktadır. Kanatlı gübresinin tek başına kullanımı, anaerobik çürütme süreci üzerinde çoğunlukla inhibitör bir etkiye neden olmaktadır (Güngör-Demirci ve Demirer, 2004:109). Anaerobik koşullar altında peynir altı suyunun kullanımı, fermentasyon sırasında pH seviyesini önemli ölçüde düşürmekte, bu durum metanojen bakterilerin aktivitesini baskılamakta ve biyogaz üretimini azaltmaktadır (Gelegenis vd., 2007:2147). Sığır gübresi ise nispeten düşük biyogaz üretim potansiyeline sahip olmasına rağmen yüksek tamponlama kapasitesi göstermektedir (Zhang vd., 2013:170). Bu çalışmada,

her biri tek başına kullanıldığında dezavantajlı olan bu besleme materyalleri bir araya getirilerek, sınırlayıcı etkilerinin azaltılması ve yüksek metan içeriğine sahip biyogaz üretebilen bir besleme karışımı elde edilmesi amaçlanmıştır. Daha düşük işletme maliyetine sahip olması nedeniyle mezofilik fermentasyon tercih edilmiş ve çürütücü sıcaklığı 37 °C olarak ayarlanmıştır. Yeterli homojenizasyonun sağlanması amacıyla karıştırıcılar her 10 dakikada bir yaklaşık 900 dev/dk hızında çalıştırılmıştır.

Otomasyon sistemi

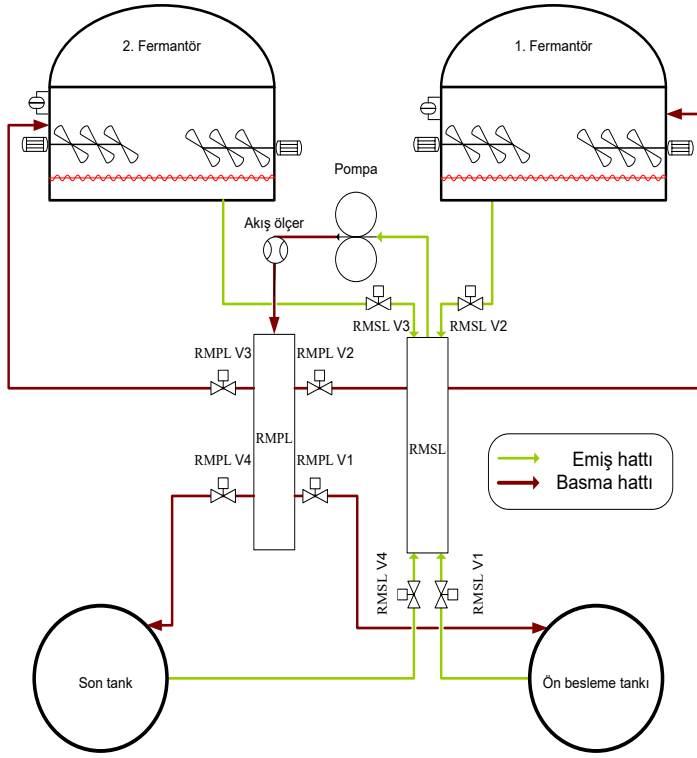
Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin giderek artması, biyogaz teknolojilerinin daha verimli ve güvenilir bir şekilde geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda pilot ölçekli biyogaz tesisleri, tam ölçekli uygulamalara geçilmeden önce sistemin teknik, ekonomik ve çevresel açıdan uygulanabilirliğinin değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu pilot tesisler, farklı türdeki organik atıkların anaerobik çürütme süreçlerine uygunluğunun belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu süreçte sıcaklık, karıştırma hızı ve hidrolik bekleme süresi gibi temel işletme parametrelerinin biyogaz verimi, özellikle metan (CH₄) içeriği üzerindeki etkileri analiz edilebilmektedir (Şerit vd., 2009). Bu sayede en uygun proses koşullarının belirlenmesi mümkün olmaktadır. Farklı işletme senaryoları altında en uygun prosesi belirlemek amacıyla Karabük Üniversitesi bünyesinde pilot ölçekli bir biyogaz tesisi kurulmuş ve seçilen besleme materyaline özgü optimum işletme koşullarını tanımlamak üzere bir otomasyon sistemi ile donatılmıştır. Şekil 2’de otomasyon sistemine ait bir SCADA ekran görüntüsü sunulmaktadır (Karagöz, 2016).



Şekil 2. Otomasyon sistemine ait SCADA ekran görüntüsü.

Biyogaz üretiminde otomasyon temelli iyileştirmeler

Tesis, bir ön yükleme tankı, iki adet fermentör ve bir adet son depolama tankı olmak üzere dört ana üniteden oluşmaktadır. Şekil 3'te sistemin besleme şeması sunulmaktadır (Karagöz vd., 2017:657). Tanklar, Hammadde Emme Hattı (RMSL) ve Hammadde Basma Hattı (RMPL) aracılığıyla birbirine bağlanmış olup, besleme materyalinin tanklar arasında otomasyon sistemi üzerinden transfer edilmesine olanak sağlamaktadır. Ön yükleme tankından Fermentör 1'e belirli miktarda besleme materyalinin aktarılması gerektiğinde, otomasyon sistemi RMSL V1 bıçak vanasını ve RMPL V2 bıçak vanasını açarken, diğer vanaları kapatmakta ve loblu pompayı devreye almaktadır.



Şekil 3. Tesisin besleme şeması.

Debi, bir debimetre yardımıyla ölçülmekte ve istenilen miktardaki besleme materyali Fermantör 1'e aktarılmaktadır. Aktarım işlemi tamamlandıktan sonra otomasyon sistemi, PLC ve aktüatörler aracılığıyla pompayı durdurmakta ve tüm bıçak vanaları kapatmaktadır. Bu sayede sisteme gerekli miktarda besleme materyalinin hassas bir şekilde yüklenmesi sağlanmaktadır. Mevcut sistemde, ön yükleme tankından Fermantör 1'e günlük olarak 150 kg besleme materyali aktarılmıştır. Farklı besleme materyali türleri için değişik yükleme hızları ve bekleme süreleri test edilerek optimum gaz üretimi elde edilebilmektedir.

Ön depolama tankının ayaklarının altına ağırlık sensörü yerleştirilmiş ve bunlar otomasyon sistemine entegre edilmiştir. Bu sayede tanka eklenen besleme materyalinin miktarı hassas bir şekilde belirlenebilmektedir. Farklı besleme materyallerinin belirli oranlarda eklenmesiyle optimum metan üretimi sağlanabilmektedir. Pilot tesis, ayrıca yerel olarak temin edilebilen besleme materyallerinin farklı karışım oranlarında biyogaz verimlerinin araştırılmasına da olanak tanımaktadır. Biyogaz üretiminde kullanılan besleme materyalinin kütlesi, ön depolama tankının tartım özelliği kullanılarak belirlenmiştir.

Üretilen biyogaz miktarının ölçülmesi için New-Flow TLF-09-A model bir gaz debimetresi kullanılmıştır. Üretilen toplam gaz hacmi kaydedilmiş ve otomasyon sistemi üzerinden izlenmiştir. Biyogazın metan içeriği ise Geotech GA 2000 taşınabilir biyogaz analiz cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Böylece üretilen biyogazın hem miktarı hem de bileşimi bu cihazlar yardımıyla ölçülmüştür.

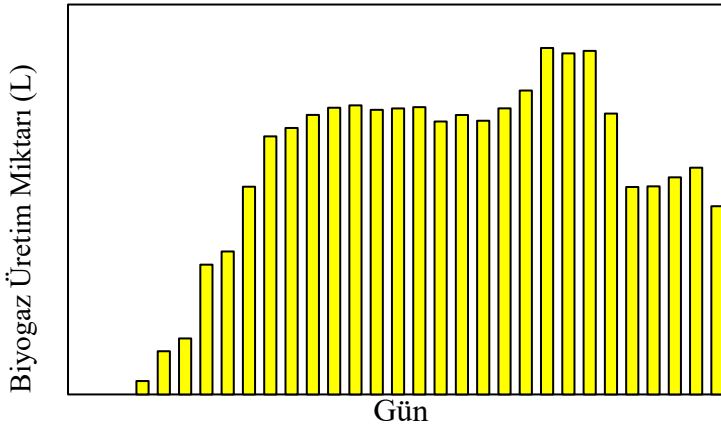
Biyogaz genellikle düşük basınç altında depolanmaktadır (FNR, 2010). Düşük basınç, işletme güvenliğini artırmakla birlikte biyogaz üretimini de etkilemektedir. Kurulan pilot biyogaz tesisinde üretilen gaz, fermantörlerin üzerinde bulunan membranlarda düşük basınç altında biriktirilmektedir. Membranda depolanan gazın basıncı 200-300 mbar aralığında tutulmuştur. Gaz basıncının izlenmesi amacıyla fermantör üzerine VCP marka bir diferansiyel basınç transmitteri monte edilmiştir. Basınç belirlenen eşik değerin üzerine çıktığında, sisteme bağlı bir blower fan devreye girerek biyogazın ana depolama tankına transfer edilmesini sağlamaktadır. Bu yaklaşım, sistem güvenliğini sağlamakla birlikte sürekli gaz üretimini de desteklemiştir. Tasarlanan sistem, basıncın biyogaz üretimi üzerindeki etkisinin analiz edilmesine de olanak tanımaktadır.

Fermantör içerisinde ısı ve besin maddelerinin homojen dağılımı biyogaz üretimini artırmaktadır (Babaei ve Shayegan, 2020:1077). Bu nedenle pilot ölçekli biyogaz tesisi, hız ve çalışma süresi ayarlanabilir karıştırıcılar ile donatılmıştır. Karıştırma sistemi, bir karıştırıcı, redüktör, motor, motor sürücüsü, PLC ve otomasyon bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu yapı sayesinde karıştırma süresi ve dönme hızı gerçek zamanlı olarak ayarlanabilmektedir. Sistem, fermantör içerisinde homojen karıştırma, materyallerin etkin parçalanması ve eşit ısı dağılımı sağlarken, karıştırıcıların aralıklı çalıştırılması enerji tasarrufuna katkı sunmuştur. Seçilen besleme materyali için optimum karıştırma oranlarının belirlenmesiyle biyogaz veriminin artırılması mümkün olmuştur.

Sıcaklık dalgalanmaları biyogaz üretimi açısından kritik öneme sahiptir. Örneğin, mezofilik sıcaklık aralığında saatlik ± 1 °C'yi aşan değişimler toksik etkilere neden olabilmekte ve metanojen bakterilerin faaliyetlerini durdurabilmektedir (Marchaim, 1992). Bu nedenle, fermantör içerisindeki sıcaklığın hassas bir şekilde kontrol edilmesi biyogaz üretim sistemleri için zorunludur. Deneysel düzende sıcaklık gerçek zamanlı olarak izlenmiş ve meydana gelen sapmalar anında düzeltilmiştir. Bu amaçla, K tipi bir termokupl, PLC ve SCADA yazılımı, bir sıcak su hazırlama ünitesi ve bir sirkülasyon pompası kullanılmıştır. Sıcak su ünitesinde ısıtılan su, sıcak su hattı aracılığıyla fermantör içerisinden sirküle edilerek besleme materyalinin sıcaklığı sürekli olarak 37 °C'de tutulmuştur. Bu tasarım sayesinde sıcaklık istenilen değere ayarlanabilmiş ve biyogaz üretimi optimum termal koşullar altında gerçekleştirilmiştir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, metan üretimini artırmak amacıyla pilot ölçekli bir biyogaz tesisine entegre edilen otomasyon sistemi bileşenleri ve metan verimini artırmaya yönelik kontrol stratejisi tanıtılmıştır. Ayrıca, otomasyon sistemi içerisinde kullanılmak üzere belirli bir besleme karışımı oluşturulmuş ve biyogaz üretim sürecinden elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Belirlenen oranlarda farklı besleme materyallerinin karıştırılması sonucunda elde edilen biyogaz miktarı ile üretilen biyogazın metan içeriği analiz edilerek literatür ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4 ve Şekil 5'te sırasıyla günlük biyogaz üretimi ve biyogazdaki günlük metan içeriği sunulmaktadır.



Şekil 4. Günlük biyogaz üretimi.

Şekil 4'te görüldüğü üzere, 1. ve 3. günler arasında biyogaz üretimi gerçekleşmemiştir. Bu başlangıç evresi, reaktörün henüz aktif olmadığı, anaerobik çürüme sürecinin başlamadığı ve mikroorganizmaların ortama uyum sağladığı biyolojik gecikme (adaptasyon) dönemini yansıtmaktadır. 4. ve 10. günler arasında ise, biyogaz üretimi hızlı bir artış göstermiştir. Bu durum, fermentasyon sisteminin etkin bir şekilde çalışmaya başladığını ve çevresel koşulların (örneğin sıcaklık, C/N oranı) uygun olduğunu göstermektedir. Bu aşamada, besleme materyalinin parçalanma süreci başlamış ve metanojen mikroorganizmalar biyogaz üretimine geçmiştir.

11. ve 17. günler arasında biyogaz üretimi daha yavaş bir artış göstermeye devam etmiştir. Bu durum, artış hızının azalmış olmasına rağmen üretimin hala yüksek seviyede sürdüğünü göstermektedir. Bu evre, sistemin biyolojik kararlılığa yaklaştığını ve kararlı hal üretim aşamasına girmekte olduğunu ifade etmektedir. 18. ve 25. günler arası ise, sistemin olgunlaşma

fazını temsil etmekte olup, bu dönemde maksimum üretim verimliliğine ulaşılmıştır. 23. günde 2665 litre ile en yüksek günlük biyogaz üretimi kaydedilmiş ve bu değer, sistemin maksimum biyolojik kapasitede çalıştığını göstermiştir.

26. ve 31. günler arasında biyogaz üretiminde azalma başlamıştır. Şekil 5'te görüldüğü üzere, ilk dört gün boyunca biyogaz üretiminin hiç olmaması veya çok düşük seviyelerde gerçekleşmesi nedeniyle metan içeriği ölçülememiştir. 5. ve 24. günler arasında ise, metan oranı %7'den %48'e kadar düzenli bir artış göstermiş ve metan oluşumunda sürekli ve doğrusal bir yükseliş meydana gelmiştir. Bu süreçte metanojen mikroorganizmalar tamamen aktif hâle gelmiş ve ortamda bulunan uçucu yağ asitleri başarıyla metana dönüştürülmüştür. Özellikle 10. günden sonra sistem, kararlı bir biyogaz üretim seviyesine yaklaşmıştır.



Şekil 5. Biyogazdaki günlük metan içeriği.

25. ve 31. günler arasında metan içeriği %71,7 seviyesine kadar ulaşmış olup, bu durum sistemin yüksek verimli bir biyogaz reaktörü profiline eriştiğini göstermektedir. Metan oranının %65'in üzerine çıkması, literatürde genel olarak kabul edilen değerlerin üzerinde bir sonuç elde edildiğini ortaya koymaktadır. Biyogaz, genellikle metan (%45-65) ve karbondioksit (%30-40) bileşenlerinden oluşmaktadır (Ruan vd., 2019:43). Qian ve arkadaşları (2025:1425) yaptıkları çalışmada, geleneksel biyogaz mühendisliği sistemleriyle üretilen biyogazın metan içeriğinin genellikle %50-65 aralığında olduğunu ve bu oranın yalnızca temel yanma uygulamaları için yeterli seviyede bulunduğunu belirtmişlerdir. 30. günde %71,7 ile en yüksek değere ulaşan metan oranı, 31. günde hafif bir düşüş göstererek %70 seviyesine gerilemiştir.

SON DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, otomasyon sistemiyle desteklenen pilot ölçekli bir biyogaz tesisinde metan içeriğini artırmaya yönelik olarak uygulanan yöntemler ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Biyogaz üretimi, farklı besleme materyallerinin belirli oranlarda birleştirilmesiyle oluşturulan özel bir besleme karışımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve üretim süreci boyunca elde edilen veriler analiz edilmiştir. Sığır gübresi, tavuk gübresi ve peynir altı suyu gibi besleme materyallerinin uygun oranlarda birlikte kullanılmasıyla inhibitör etkilerin azaltıldığı ve metan üretim verimliliğinin artırıldığı gözlemlenmiştir. Kurulan otomasyon sistemi sayesinde besleme yükleme, sıcaklık kontrolü, karıştırma, gaz debisi ölçümü ve metan konsantrasyonu izleme gibi kritik işlemler yüksek hassasiyetle gerçekleştirilmiş; böylece gerçek zamanlı izleme ve hızlı müdahale imkânı sağlanmıştır.

Gerçekleştirilen izleme ve ölçümler sonucunda, sistemin 23. günde 2665 litre ile maksimum günlük biyogaz üretimine ulaştığı, 30. günde ise biyogaz içerisindeki metan oranının %71,7 ile en yüksek seviyeye çıktığı belirlenmiştir. Bu değer, literatürde genel kabul gören %65'lik metan eşiğinin üzerinde olup, sistemin yüksek verimlilikle çalıştığını göstermektedir.

Karıştırmanın etkisi: Karıştırıcının aralıklı olarak çalıştırılması, fermantör içerisindeki ısı ve besin maddelerinin homojen bir şekilde dağılmasını sağlamış ve bu durum biyogaz verimini olumlu yönde etkilemiştir.

Sıcaklık kontrolü: Otomasyon sistemine entegre edilen sıcaklık düzenleme mekanizması sayesinde fermantör sıcaklığı $37 \pm 0,5$ °C aralığında sabit tutulmuştur. Bu durum, metanojen arkeler için ideal çalışma koşullarının sağlanmasına olanak tanımış ve kararlı bir biyogaz üretim sürecine katkı sağlamıştır.

Gaz basıncının kontrolü: Fermantörün üzerinde yer alan düşük basınçlı membran ve otomatik blower sistemi sayesinde gaz basıncı 200-300 mbar aralığında sabit tutulmuştur. Bu durum hem işletme güvenliğine hem de üretim sürekliliğine katkı sağlamıştır.

Pilot tesisin SCADA tabanlı otomasyon sistemi sayesinde süreç parametreleri gerçek zamanlı olarak izlenebilmiş ve gerekli müdahaleler hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmiştir. Bu sayede enerji verimliliği sağlanmış, insan müdahalesine ihtiyaç duyulmadan otomatik kontrol yoluyla biyogaz üretimi optimize edilmiştir. Otomasyon sistemi ile donatılmış bir biyogaz tesisinde, metan üreten metanojen arkeler için gerekli optimum koşulların sağlanabildiği ve bu koşulların sürekli olarak izlenebildiği gösterilmiştir. Bu yetenek sayesinde sistemde meydana gelen dalgalanmalara hızlı yanıt verilebilmiş, böylece biyogaz üretimi artırılmış, fermantör inhibisyonu riski azaltılmış ve işletme güvenliği iyileştirilmiştir.

Pilot biyogaz tesisi deneyimlerinden elde edilen sonuçlara dayanarak aşağıdaki otomasyon tabanlı öneriler geliştirilmiştir:

Kurulan tesiste metan konsantrasyonu taşınabilir bir gaz analizörü kullanılarak ölçülmüştür. Otomasyon sistemine entegre edilecek bir analizör ile metan düşüşleri gerçek zamanlı olarak izlenebilir ve buna bağlı olarak zamanında düzeltici önlemler alınabilir.

Otomasyon sistemine bağlı analizörler ve yapay zeka destekli yazılımlar kullanılarak metan düşüşleri, C/N oranı, pH, alkalinite, H₂S seviyesi, toksisite, reaktör sıcaklığı ve köpük oluşumu gibi kritik parametreler gerçek zamanlı olarak izlenebilir. Gerekğinde dozajlama, karıştırma, sıcaklık stabilizasyonu, ilave besleme yüklemesi ve biyolojik oksidasyon gibi otomatik müdahaleler sistem tarafından gerçekleştirilebilir.

Bu yaklaşım sayesinde, yüksek verimle çalışan, maksimum metan üretimini sürekli olarak sürdürebilen ve inhibisyon senaryolarından güvenli şekilde kaçınılabilen biyogaz tesislerinin kurulması mümkün olacaktır.

REFERANSLAR

- Ajay, A. D., Kayalvizhi, P., Rakesh, R., & Balamurugan, S. (2016). Automation in biomethanation plant using PLC and SCADA. *International Journal of Bio-Science and Bio-Technology*, 8(2), 171-180.
- Andriani, D., Wresta, A., Atmaja, T. D., & Saepudin, A. (2014). A review on optimization production and upgrading biogas through CO₂ removal using various techniques. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 172(4), 1909-1928.
- Angelidaki, I., & Ahring, B. K. (1993). Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: The effect of ammonia. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 38(4), 560-564.
- Appels, L., Baeyens, J., Degreëve, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755-781.
- Babaei, A., & Shayegan, J. (2020). *Effects of temperature and mixing modes on the performance of municipal solid waste anaerobic slurry digester*. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 17(2), 1077-1084.
- Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, 99(10), 4044-4064.
- Çınar, S., Çınar, S. Ö., Wiczorek, N., Sohoo, I., & Kuchta, K. (2021). Integration of artificial intelligence into biogas plant operation. *Processes*, 9(1), 85.
- Gelegen, J., Georgakakis, D., Angelidaki, I., & Mavris, V. (2007). *Optimization of biogas production by co-digesting whey with diluted poultry manure*. Renewable Energy, 32, 2147-2160.
- Gerardi, M. H. (2003). *The microbiology of anaerobic digesters*. John Wiley & Sons.

- Güngör-Demirci, G., & Demirel, G. N., (2004). Effect of initial COD concentration, nutrient addition, temperature and microbial acclimation on anaerobic treatability of broiler and cattle manure. *Bioresource Technology*, 93, 109–117.
- Guimarães, C. de S., & Maia, D. R. da S. (2023). Development of anaerobic biodigester for the production of biogas used in semi-continuous system bioprocesses. *Biomass*, 3(1), 18-30.
- Işıkyürek, Ç., & Yıldız, O., (2015). Bir biyogaz tesisi için PLC otomasyon sistemi tasarımı. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 11(1), 89-96.
- Karagöz, M. (2016). *Biogas production with cofermentation of animal wastes* (PhD thesis, Karabük University, Department of Mechanical Engineering, Karabük, Türkiye).
- Karagöz, M., Çiftçi, B., Tunç, N., & Deniz, E. (2019, June). Improvements that are applicable in the automation system to increase CH₄ ratio in co-fermentation plants. In *2nd International Scientific Conference on Chemical Technology and Engineering* (pp. 24-28).
- Karagöz, M., Tunç, N., Çiftçi, B., & Deniz, E. (2017). An experimental investigation of biogas purification with granulated slag under different pressures. *International Journal of Ecosystem & Ecology Science*, 7(4), 657.
- Katuwal, H., & Bohara, A. K. (2009). Biogas: A promising renewable technology and its impact on rural households in Nepal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2668-2674.
- Łukasik, P., Kuśmińska-Fijałkowska, A., & Kozyra, J. (2021). Automation and visualization of the process of production of biogas for the purposes of production of electric energy. *Przegląd Elektrotechniczny*, 1(2), 125-130.
- Marchaim, U. (1992). *Biogas processes for sustainable development*. Food & Agriculture Organization.
- Mata-Alvarez, J., Mace, S., & Llabrés, P. (2000). Anaerobic digestion of organic solid wastes: An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*, 74(1), 3-16.
- Mudaheranwa, E. (2015). *Biogas power plant PLC based automation* (Master's thesis). Sharda University.
- Qian, S., Chen, L., Xu, S., Zeng, C., Lian, X., Xia, Z., & Zou, J. (2025). *Research on Methane-Rich Biogas Production Technology by Anaerobic Digestion Under Carbon Neutrality: A Review*. *Sustainability*, 17(4), 1425.
- Ruan, R., Zhang, Y., Chen, P., Liu, S., Fan, L., Zhou, N., Ding, K., Peng, P., Addy, M., Cheng, Y., Anderson, E., Wang, Y., Liu, Y., Lei, H., & Li, B. (2019). Biofuels: Introduction. In A. Pandey, C. Larroche, C.-G. Dussap, E. Gnansounou, S. K. Khanal, & S. Ricke (Eds.), *Biofuels: Alternative feedstocks and conversion processes for the production of liquid and gaseous biofuels* (2nd ed., pp. 3-43). Academic Press.
- Sahu, P., Sahu, S., Purohit, R., Warudkar, V., Arisutha, S., & Suresh, S., (2017). Automation in biogas plant for enhancement of efficiency and safety. *Materials Today: Proceedings*, 4(4), 5351-5356.
- Song, X., Liu, Q., Yu, Y., & Lv, X. (2016). Using PLC programmable logic controller to realize the automation controller of anaerobic fermentation of biogas engineering. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 9(5), 2182-2187.

- Şerit, G., Yiğit, K. S., Gündüz, M. R. B., & Toraman, Ö. (2009). İki fazlı biyogaz üretim tesislerinde gaz üretimine etki eden parametreler. *III. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu (EVK) Bildirileri* (Kocaeli, Türkiye).
- Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99(17), 7928-7940.
- Weiland, P. (2010). *Biogas production: Current state and perspectives. Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849-860.
- Yenilenebilir Hammaddeler İhtisas Ajansı (FNR). (2010). *Biyogaz kılavuzu: Üretimden kullanıma*. Gülzow, Almanya.
- Zhang, C., Xiao, G., Peng, L., Su, H., & Tan, T. (2013). The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure. *Bioresource Technology*, 129, 170-176.

Bor Katkılı Yakıtların Yanma Karakteristikleri

İsmet SEZER¹

1- Prof. Dr.; Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü. isezer@gumushane.edu.tr ORCID No: 0000-0001-7342-9172

ÖZET

İçten yanmalı motorların çoğunlukla kullandığı fosil yakıtların yakın bir gelecekte tükenebileceği öngörülmektedir. Araştırmacılar, alternatif yakıtlara ek olarak mevcut yakıtların performansını artırmanın yollarını araştırmaktadır. Günümüzde içten yanmalı motorlara yönelik araştırma konuları arasında benzin ve dizel yakıtlarının daha verimli yanmasını sağlayarak yakıt tüketimini ve zararlı emisyonları azaltmaktır. Bu amaçla çeşitli yakıt katkılarının kullanılmasının en uygun ve ekonomik yöntem olduğu belirtilmektedir. Bor, fosil yakıtlar için umut verici bir yakıt katkısı olarak görülmektedir. Bor, belirli koşullar sağlandığında aşırı patlayıcı ve yanıcıdır. Ayrıca, bu ekzotermik reaksiyon esnasında geleneksel yakıtlardan farklı olarak herhangi bir zararlı gaz emisyonu oluşmaz. Bu özelliklerinden dolayı borun yakıt olarak kullanımı için 1950'lerden itibaren çalışmalar sürdürülmektedir. Bununla birlikte, borun tek başına kullanılabilmesi için yanma sırasında saf oksijen ve özel yakma sistemleri gerekmektedir. Ayrıca, bor geleneksel yakıtlardan daha yüksek enerjiye sahip olduğundan yanmayı iyileştirebilir, yanma veriminin artırabilir, yakıt tüketimi ve zararlı emisyonların azalmasını sağlayabilir. Nano teknolojiadaki gelişmeler sayesinde bor içerikli yakıt katkıları üretilmiştir. Bu bölümde, farklı motor yakıtlarına bor katkılı katkıların katılmasının yanma karakteristiklerine etkilerini incelenmektedir.

Anahtar Kelimeler – Motorlar, Bor içerikli katkılar, Yakıtlar, Yanma.

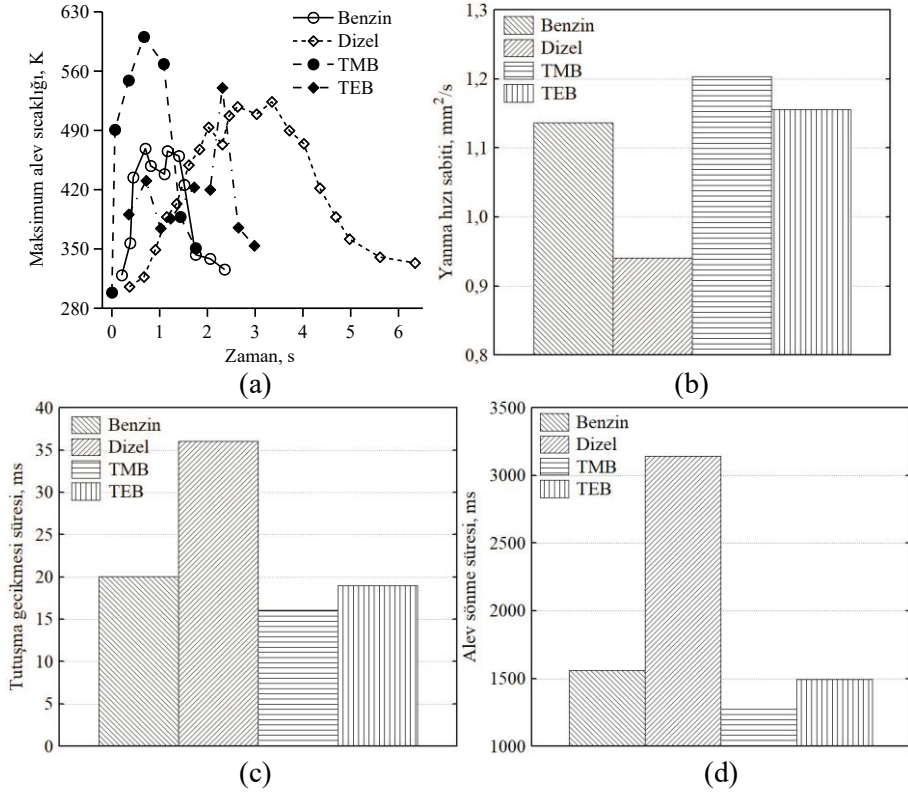
GİRİŞ

Günümüzde içten yanmalı motorların çoğunda petrol kökenli yakıtlar kullanılmaktadır. Ancak, fosil yakıt kaynakları sınırlı olup fosil kökenli yakıtların yanması sonucunda oluşan zararlı emisyonların son yıllarda getirilen yasal kısıtlamalarla önemli ölçüde azaltılmasına rağmen atmosferi ve çevreyi önemli ölçüde kirletmektedir. Bundan dolayı, araştırmacılar petrol kaynaklı yakıtların yerini alabilecek alternatif yakıtlar üzerine yoğun çalışma yürütmektedir. Diğer taraftan, fosil kökenli yakıtların özelliklerini iyileştirmek ve istenmeyen emisyonları azaltmak için yakıt katkılarıyla ilgili olarak da yoğun şekilde çalışmaktadır (Sertkaya ve Akbıyık, 2016:633; Akbıyık vd., 2022:1; Bas ve Karabacak, 2014:740). Borun gelecek için umut veren bir yakıt olabileceği (Wang, 2012:1) ve fosil kökenli yakıtlar için oldukça uygun bir yakıt katkısı olduğu düşünülmektedir. Bor (B), enerji içeriği yüksek olduğu için yanma sırasında açığa çıkan enerji miktarını artırabilme potansiyeline sahip olduğu düşünülmektedir (Wang, 2012:2; Karmakar, 2012:707; Ojha ve Karmakar, 2018:19). Ayrıca, bor katkısının yanma verimini artırarak emisyonları azaltacağı düşünülmektedir (Smith vd., 2014:1). Bor parçacıkları ilk kez yakıt katkısı olarak 1950–1970 yılları

arasında roket geliştirme çalışmalarında kullanılmış ve yakıtın enerji içeriğini önemli ölçüde artırabileceği ancak bor içeren yakıtların yanması esnasında ateşleme (tutuşma), alev stabilitesi ve sönmesiyle ilgili sorunlar olduğu belirlenmiştir (Şimsek vd., 2021:2; Ramteke ve Chelladurai, 2020a:34; Ramteke ve Chelladurai, 2020b:17). Günümüzde, nano teknolojideki gelişmeler sayesinde bor içerikli katkılar ticari olarak üretilmekte ve piyasada yaygın olarak satılmaktadır. Ancak, bu katkıların üretici firmaların ileri sürdüğü faydaları sağladığının belirlenebilmesi için kapsamlı araştırmaların yapılması gerekmektedir. Bu bölümde, yakıtlara bor içerikli katkıların katılmasının yanma karakteristiklerine etkileri incelenmiştir.

BOR KATKILI YAKITLARIN YANMA KARAKTERİSTİKLERİ

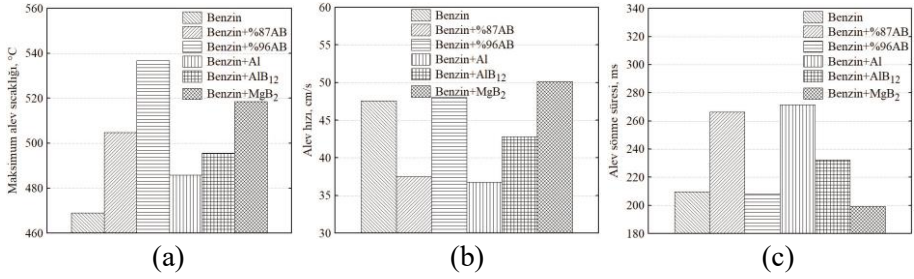
Yontar vd. (2023:7–8), benzin ve dizel yakıtları ile bor, hidrojen (H) ve oksijen (O) içeren trimetil borat ($\text{TMB}=[(\text{CH}_3\text{O})_3\text{B}]$) ve trietil borat ($\text{TEB}=[\text{B}(\text{OCH}_2\text{CH}_3)_3]$) yakıt damlacıklarının yanma özelliklerini deneysel olarak incelemiştir.



Şekil 1. Benzin, dizel, TMB ve TEB yakıtları için a) maksimum alev sıcaklığının, b) yanma hızı sabitinin, c) tutuşma gecikmesi süresinin ve d) alev sönme süresinin değişimi (Yontar vd., 2023:7–8)

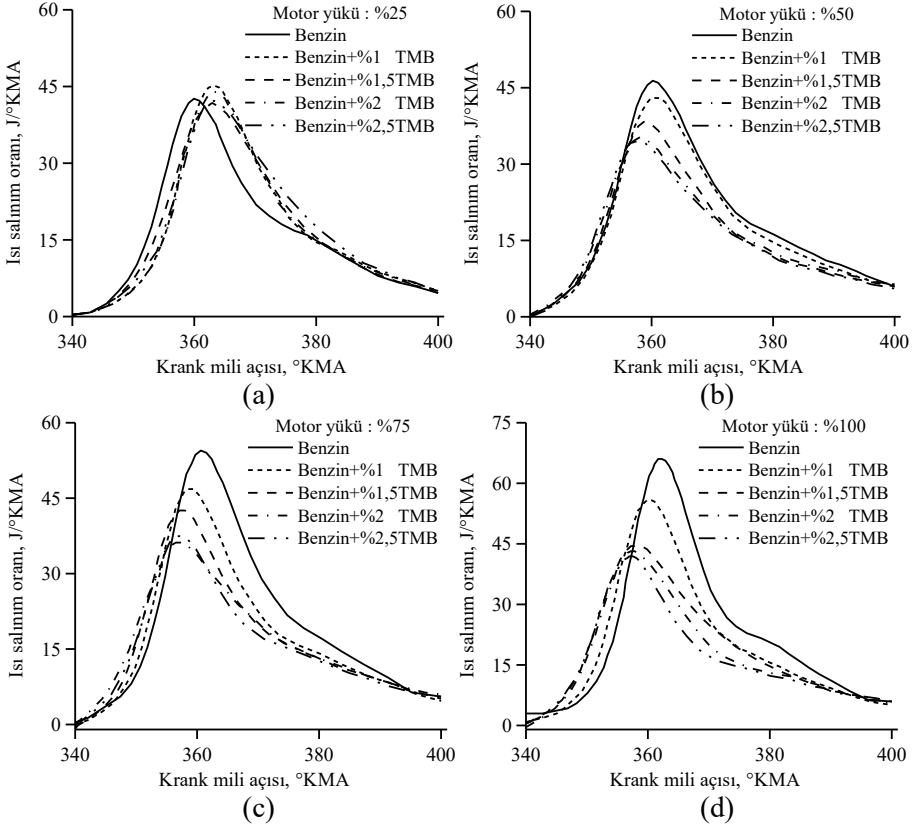
Benzin ve dizel yakıt damlacıklarının alev yapısının, TMB ve TEB yakıtlara göre daha parlak ve büyük olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 1(a) ve (b)'de görüldüğü gibi, bor içeren yakıtların daha yüksek maksimum alev sıcaklığına ve yanma hızı sabitine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Şekil 1(c) ve (d)'de görüldüğü gibi, bor içeren yakıtların tutuşma gecikmesi süresini ve alev sönme (yanma) süresini kısalttığı belirlenmiştir. Bunun, TMB ve TEB yakıtlarının yapısında oksijen bulunması sayesinde yanmayı iyileştirilmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Ayrıca TMB'nin, TEB'ye kıyasla daha yüksek maksimum alev sıcaklığına ve yanma hızı sabitine, daha kısa tutuşma gecikmesi ve yanma sürelerine sahip olduğu belirlenmiştir (Yontar vd., 2023:7–8). Küçükosman vd. (2023:9–12), %2,5 oranında bor (B) nanoparçacıkları içeren %87 ve %96 saflıkta amorf bor (AB), alüminyum dodekaborür (AlB_{12}) ve magnezyum diborür (MgB_2) ve alüminyum (Al) nanoparçacıklarının benzine katılmasıyla elde edilen yakıt damlacıklarının yanma özelliklerini incelenmiştir. Çalışmada yüksek hızlı kamera ve termal kamera kullanılmıştır. Şekil 2(a)'da görüldüğü gibi, bor içeren tüm bileşenlerin maksimum alev sıcaklığını artırdığı belirlenmiş ve bu

durumun borun yüksek enerji içeriğine sahip olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Ayrıca, Şekil 2(b)'de görüldüğü gibi %96 saflıkta AB ve MgB_2 katkılarının alev hızını biraz artırdığı ve Şekil 2(c)'de görüldüğü gibi yanma süresini kısalttığı belirlenmiştir. Ayrıca, bor içeren katkıların genel olarak tutuşma gecikme süresini kısalttığı ve bor ile birlikte alüminyum (Al) ve magnezyum (Mg) nanoparçacıkları kullanılmasının yanma kalitesinin iyileşmesine katkıda bulunabileceği belirtilmiştir.



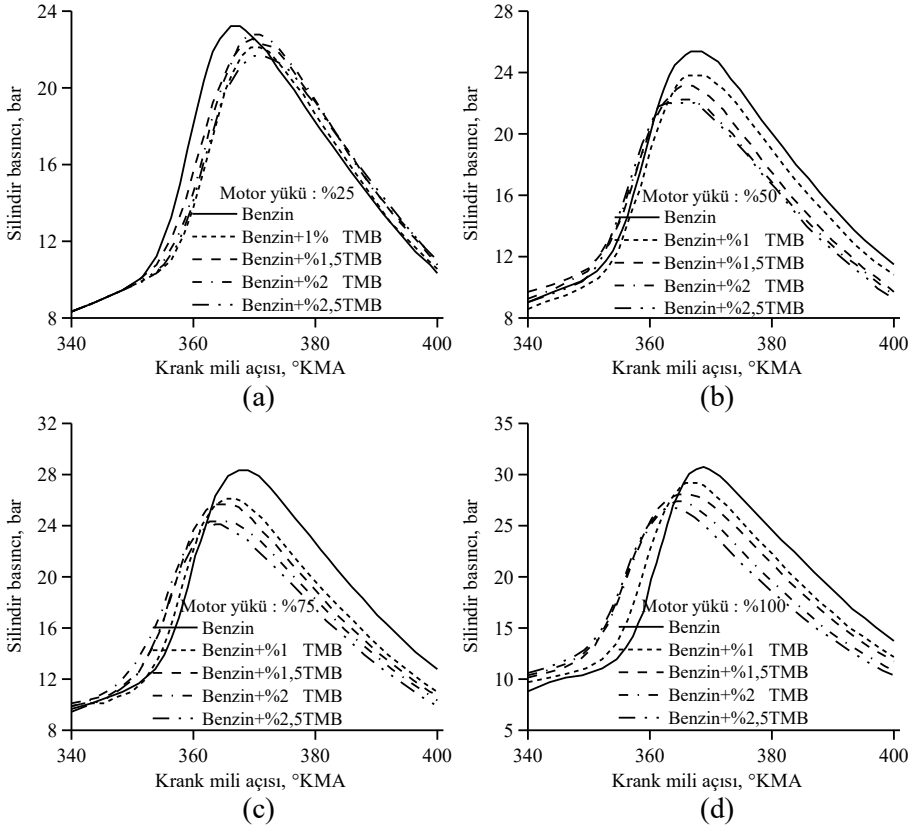
Şekil 2. Çeşitli bor içerikli katkıların benzine katılması durumunda a) maksimum alev sıcaklığının, b) alev hızının ve c) alev sönmeye süresinin değişimi (Küçükösman vd., 2023:9–12)

Gültekin vd. (2023:425), benzine TMB eklenmesinin yanma, performans ve emisyonlara etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Şekil 3(a)–(d)'de görüldüğü gibi, benzine TMB eklendiğinde %25 motor yükü haricinde yanmanın daha erken başladığı ve ısı salınım oranının azaldığı belirlenmiştir. %25 motor yükünde silindire az miktarda yakıt gönderilmesinin yakıt–hava karışımının fakirleşmesine yol açarak yanmanın gecikmesine ve ani ısı salınımına neden olduğu belirtilmiştir.



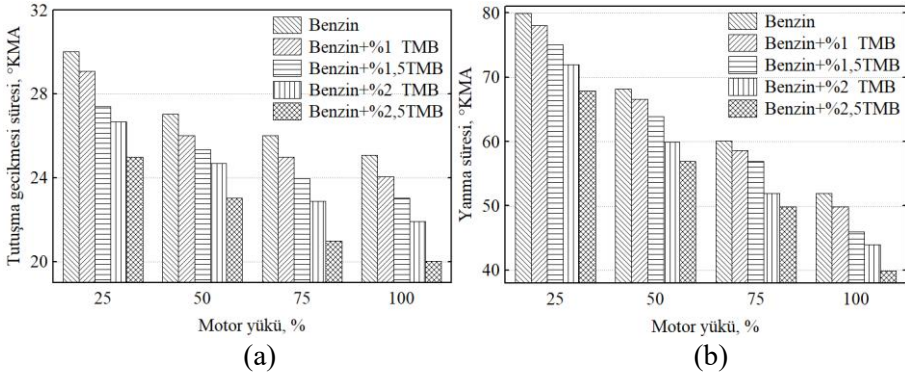
Şekil 3. Benzine farklı oranlarda TMB katılması durumunda ısı salınım oranının a) %25, b) %50, c) %75 ve d) %100 motor yükleri için değişimi (Gültekin vd., 2023:425)

Şekil 4(a)–(d)’de benzine farklı miktarlarda TMB eklendiğinde farklı motor yükleri için silindir basıncının değişimi verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi düşük yüklerde silindire daha az yakıt gönderilmesi nedeniyle tüm yakıt karışımları için daha düşük maksimum silindir basıncı değerlerinin oluştuğu, ancak yük arttıkça maksimum silindir basıncının arttığı belirlenmiştir. En yüksek silindir basıncının 30,51 bar olarak saf benzinle %100 motor yükünde elde edildiği belirlenmiştir. Ayrıca, benzine TMB eklenmesinin maksimum silindir basıncını düşürdüğü ve basınçtaki azalmanın TMB oranının artmasıyla arttığı belirlenmiştir. Öte yandan, düşük yükte (%25) yanmanın biraz geciktiği, ancak yük arttıkça yanmanın daha erken gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu durumun, TMB’nin içeriğindeki hidrojen ve oksijen sayesinde yanma hızını artmasından kaynaklandığı belirtilmiştir (Gültekin vd., 2023:425).



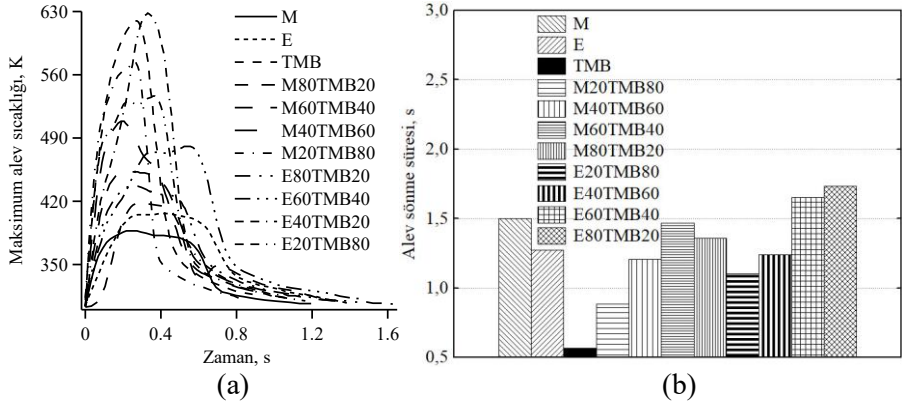
Şekil 4. Benzine farklı oranlarda TMB katılması durumunda silindir basıncının a) %25, b) %50, c) %75 ve d) %100 motor yükleri için değişimi (Gültekin vd., 2023:425)

Şekil 5(a)–(b)’de benzine farklı miktarlarda TMB eklenmesi durumunda tutuşma gecikmesi ve yanma sürelerinin farklı yükler için değişimi verilmiştir. Tutuşma gecikmesi süresinin yakıt–hava karışımının %10’luk kısmının yanma süresi ve yanma süresinin de yakıt–hava karışımının %90’lık kısmının yanma süresi olarak belirlendiği belirtilmiştir. Tutuşma gecikmesi süresinin yakıt–hava karışımının bileşimine, yakıtın özelliklerine ve ateşlemeden önce silindirdeki gazların sıcaklığına bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir. Tutuşma gecikmesi ve yanma sürelerinin artan motor yüküyle motorun daha yüksek sıcaklıklarda çalışması sonucu kısaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, benzine TMB eklenmesinin tutuşma gecikmesi ve yanma sürelerini kısalttığı belirlenmiştir. TMB’nin, içeriğinde bulunan oksijen sayesinde yakıtın daha kolay oksitlenmesini sağlayarak tutuşma gecikmesi ve yanma sürelerini kısalttığı belirtilmiştir (Gültekin vd., 2023:426).

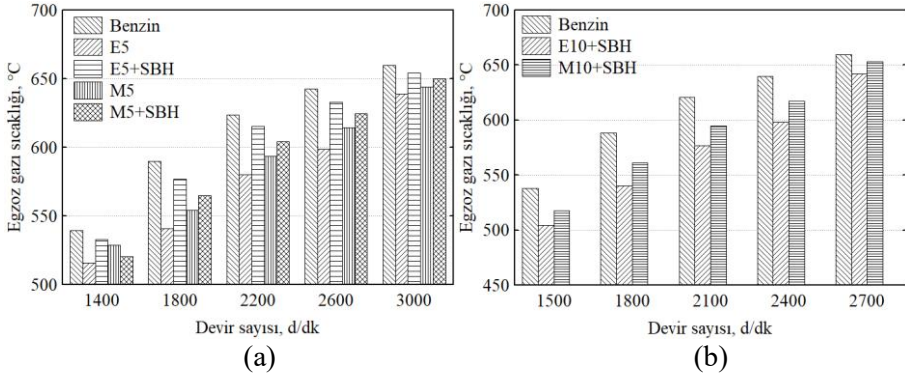


Şekil 5. Benzine farklı oranlarda TMB katılması durumunda a) tutuşma gecikmesi süresinin ve b) yanma süresinin motor yükü ile değişimi (Gültekin vd., 2023:426)

Değirmenci vd. (2024:19), metanol, etanol, TMB ve bunların karışımlarının yanma özelliklerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada yüksek hızlı kamera ve termal kamera kullanılmıştır. Saf metanol ve etanolün yanma sırasında sarı bir alev oluşturduğu, TMB ve karışımlarının ise yeşil bir alev oluşturduğu, ancak metanol-TMB karışımlarının başlangıçta yeşil bir alev verdiği ve yanma sonuna doğru alevin sarıya döndüğü belirlenmiştir. Yeşil alevin TMB'deki borun yanması sonucu oluştuğu belirtilmiştir. Şekil 6(a) ve (b)'de metanol, etanol ve TMB yakıtları ile bunların karışımları için maksimum alev sıcaklığı ve alev sönme süresinin değişimi verilmiştir. TMB'nin metanol ve etanole kıyasla daha yüksek maksimum alev sıcaklığı verdiği ve TMB oranının artmasıyla maksimum alev sıcaklığının arttığı belirlenmiş ve bunun borun yüksek enerji içeriğinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Ayrıca, karışımlardaki alkol oranı arttıkça maksimum alev sıcaklığının azaldığı belirlenmiş ve bunun alkol yakıtların düşük enerji içeriğinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Öte yandan, TMB'nin metanol ve etanole göre belirgin şekilde daha kısa alev sönme (yanma) süresi verdiği, etanolün ise metanolden daha kısa yanma süresi verdiği belirlenmiştir. Bu durumun, TMB'nin alkollere kıyasla daha hızlı buharlaşmasından ve daha yüksek reaksiyon hızına sahip olmasından kaynaklandığı, alkollerin ise ortamdan nem çekme özellikleri nedeniyle buharlaşmalarının daha zor olması sonucu yanma süresinin uzadığı belirtilmiştir. Ayrıca, metanol-TMB karışımlarının etanol-TMB karışımlarına göre daha kısa yanma süresi verdiği ve karışımlardaki TMB oranının artmasıyla yanma süresinin uzadığı belirlenmiş ve bunun homojen bir karışımın oluşmamasından kaynaklandığı belirtilmiştir.



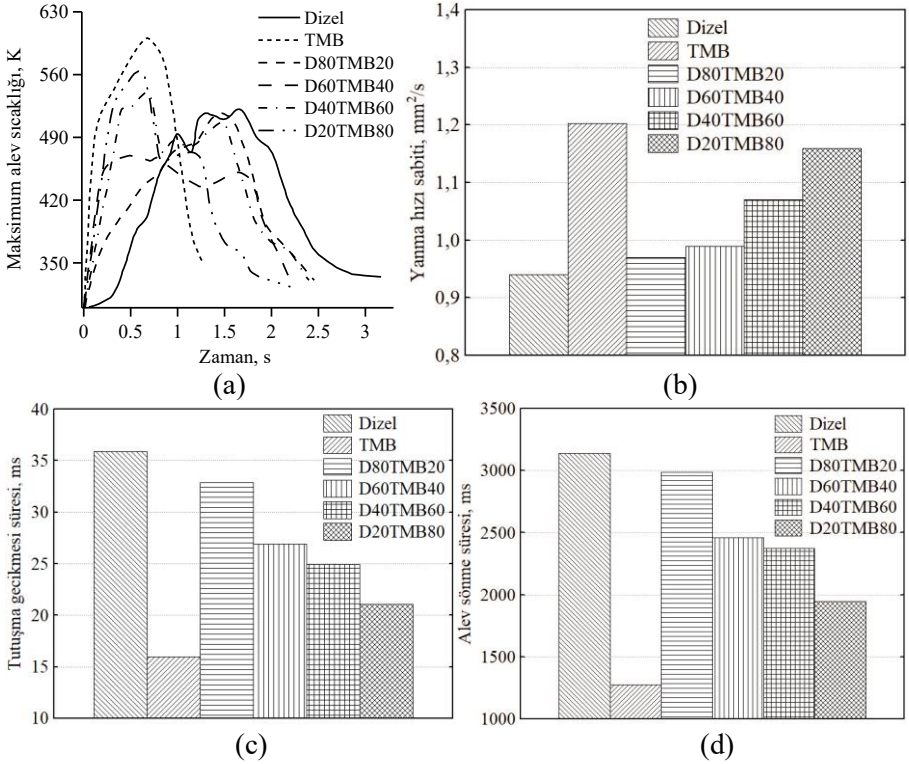
Şekil 6. Metanol, etanol ve TMB yakıtları ve karışımları için a) maksimum alev sıcaklığının ve b) alev sönmeye süresinin değişimi (Degirmenci vd., 2024:19)



Şekil 7. Egzoz gazı sıcaklığının a) benzin, E5, E5+SBH, M5 ve M5+SBH karışımları için (Yakın vd., 2022:7) ve b) benzin, E10+SBH, M10+SBH karışımları için (Behcet vd., 2022:22323) devir sayısı ile değişimi

Yakın vd. (2022:7), %5 etanol–benzin karışımına (E5) ve %5 metanol–benzin karışımına (M5) sodyum bor hidrit (SBH) ilavesinin motor performansı ve emisyonlara etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Şekil 7(a)’da benzin ve E5, E5+SBH, M5+SBH karışımları için egzoz gazı sıcaklığının (EGS) motor devriyle değişimi verilmiştir. Alkol ve SBH içeren karışımların benzine göre daha düşük EGS değerleri verdiği ve etanol katkısının EGS’yi metanolden daha fazla düşürdüğü belirlenmiştir. EGS’deki bu azalmanın alkol yakıtların daha düşük ısıl değere ve daha yüksek buharlaşma gizli ısısına sahip olması nedeniyle yanma sıcaklığını düşürmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Öte yandan, alkol yakıtlara SBH ilavesiyle EGS’de görülen hafif artışın SBH’nin bileşimindeki hidrojen ve borun enerji içeriğinin yüksek olması sayesinde yanma sıcaklığını artırmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Behcet vd. (2022:22323), %10 etanol–benzin (E10) ve %10 metanol–benzin (M10)’a SBH ilavesinin motor performansı ve emisyonlara etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Şekil

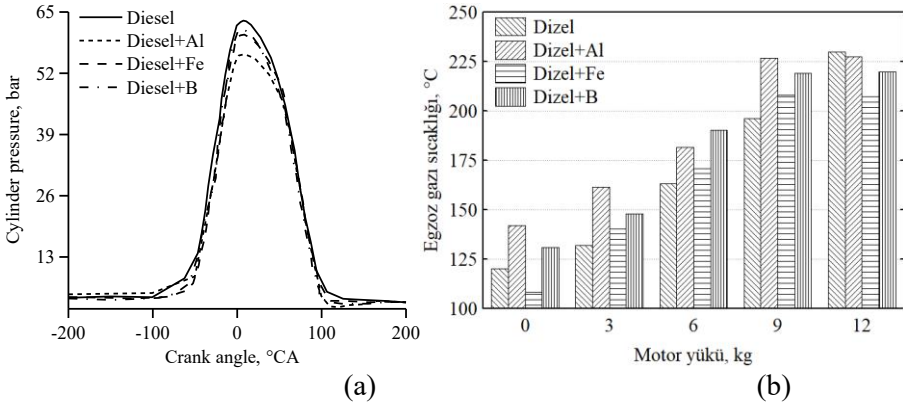
7(b)'de test edilen tüm yakıtlar için EGS'nin motor devriyle değişimi verilmiştir. EGS test edilen tüm yakıtlar için motor devri arttıkça yükseldiği, bunun motor devri arttıkça sıcak gazların silindir yüzeyleriyle temas süresinin azalmasından ve egzoz gazlarının daha fazla enerji taşımasından kaynaklandığı belirtilmiştir. En düşük EGS değerinin E10+SBH karışımı ile en yüksek EGS değerlerinin ise saf benzinle elde edildiği ve bunun yakıtların yanma verimliliği ve hava-yakıt oranlarına bağlı olarak ortaya çıkan yanma sıcaklığından kaynaklandığı belirtilmiştir.



Şekil 8. Dizel, TMB ve karışımları için a) maksimum alev sıcaklığının, b) yanma hızı sabitinin, c) tutuşma gecikmesi süresinin ve d) alev sönmeye süresinin değişimi (Yontar vd., 2022:227–228)

Yontar vd. (2022:227–228) dizel ve TMB yakıtlarının ve bunların karışımlarının yanma özelliklerini deneysel olarak incelemiştir. TMB'nin dizel yakıtına kıyasla daha yüksek maksimum alev sıcaklığı ve daha kısa tutuşma gecikmesi ve daha kısa yanma süreleri verdiği belirlenmiştir. Bu durumun, TMB'nin yüksek enerji içeriği ve yüksek reaksiyon hızından kaynaklandığı belirtilmiştir. Bu sayede, Şekil 8 (a–d)'de görüldüğü gibi, TMB oranının artmasıyla maksimum alev sıcaklığının arttığı, tutuşma gecikmesi ve yanma sürelerinin kısaldığı belirlenmiştir.

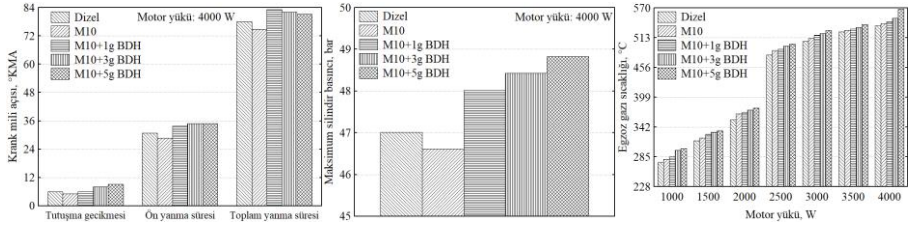
Mehta vd. (2014:95), dizel yakıtına ayrı ayrı %0,1 Span80 ve %0,5 alüminyum (Al), demir (Fe) ve bor (B) nanoparçacıkları eklenmesinin motor performansı ve emisyonlara etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Şekil 9(a)'da dizel yakıtı Al, Fe ve B nanoparçacıkları katılması durumunda silindir basıncının değişimi verilmiştir. Al, Fe ve B içeren karışımlar ve saf dizel yakıt için maksimum silindir basıncı değerlerinin sırasıyla 55, 59, 60 ve 62 bar olduğu belirlenmiş ve nanoparçacıkları ilavesinin dizel yakıtı kıyasla silindir basıncını genel olarak düşürdüğü belirtilmiştir. Silindir basıncındaki bu azalmanın nanoparçacıkların dizel yakıtı farklı özelliklere sahip olması sebebiyle tutuşma gecikme süresini kısılmasından ve yanmanın daha erken başlamasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Şekil 9(b)'de dizel yakıtına Al, Fe ve B nanoparçacıkları eklenmesi durumunda EGS'nin motor yükü ile değişimi verilmiştir. Motor yükü arttıkça EGS'nin arttığı ve nanoparçacık ilavesinin genel olarak EGS'deki artışa neden olduğu belirtilmiştir. Motor yükü arttıkça silindire daha fazla yakıt gönderildiği, bunun da yanma sıcaklığının ve EGS'nin yükselmesine neden olduğu belirtilmiştir. Öte yandan, nanoparçacıkların yüksek enerji içeriğinin ve yanma sırasında nanoparçacıkların oluşturduğu mikro patlamaların yanma sıcaklığını ve dolayısıyla EGS'yi arttığı bildirilmiştir. Dizel yakıtına Al, Fe ve B nanoparçacıkları eklenmesiyle EGS'nin sırasıyla %9, %7 ve %5 oranında arttığı belirlenmiştir.



Şekil 9. Dizel yakıtı Al, Fe ve B nanoparçacıkları katılması durumunda a) silindir basıncının ve b) egzoz gazı sıcaklığının değişimi (Mehta vd., 2014:95)

Özer vd. (2023:8–10), %10 metanol–dizel (M10) karışımına farklı miktarlarda boraks dekahidrat (BDH) katılmasının motor performansı ve emisyonlara etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Şekil 10(a)'da M10 karışımına 1, 3 ve 5 g BDH eklenmesi durumunda tutuşma gecikmesi ve yanma sürelerine etkileri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi dizel yakıtı metanol ve BDH eklenmesi tutuşma gecikmesi, ön yanma ve toplam yanma sürelerinin kısılmasını sağladığı belirlenmiş olup dizel yakıtı katılan metanol ve BDH katkısı silindire püskürtülen yakıtın buharlaşmasını

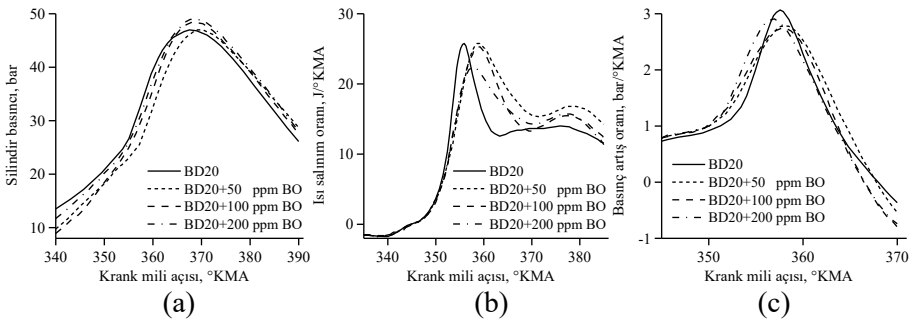
kolaylaştırarak daha homojen bir yakıt–hava karışımı oluşturarak tutuşma gecikmesi ve yanma sürelerinin kısaldığını sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca, katkı maddelerinin sağladığı fazladan oksijenin yanmanın daha erken başlamasını sağlayarak yanma süresinin kısaldığına katkı sağladığı belirtilmiştir. Öte yandan, yakıt karışımı içerisindeki katkı miktarının artmasının karışımın yoğunluk, viskozite ve buharlaşma gizli ısısını artırarak homojen olmayan bir yakıt–hava karışımı oluşturup tutuşma gecikmesi ve yanma sürelerinin uzamasına neden olduğu belirtilmiştir. Şekil 10(b)’de görüldüğü gibi dizel yakıtına metanol katılması maksimum silindir basıncının azalmasını BDH katkısı ise maksimum silindir basıncının artmasını sağladığı belirlenmiştir. Basınçtaki düşüşün metanolün ısıl değerinin düşük olmasından artışı ise BDH’nin yüksek enerji içeriğine sahip olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Şekil 10(c)’de görüldüğü gibi dizel yakıtına metanol ve BDH katılmasının EGS’nin artmasını sağladığı belirlenmiş olup bu durumun metanol ve BDH katkılarının içeriğindeki oksijen sayesinde yanma verimini artırmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Ayrıca, yanma süresinin uzamasının EGS’nin artmasına katkı sağladığı belirtilmiştir.



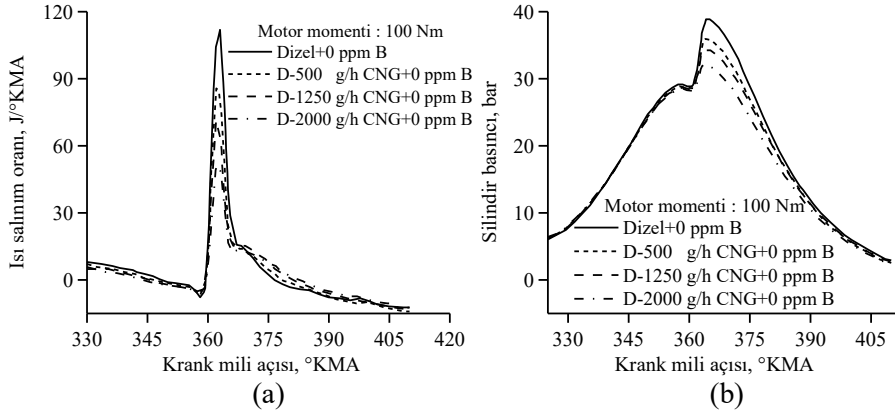
Şekil 10. %10 metanol–dizel (M10) karışımına farklı miktarlarda boraks dekahidrat (BDH) katılması durumunda a) tutuşma gecikmesi ve yanma sürelerinin, b) maksimum silindir basıncının ve c) egzoz gazı sıcaklığının değişimi (Özer vd., 2023:8–10)

Çakmak ve Özcan (2022:424), %20 biyodizel (BD20) içeren dizel–biyodizel karışımına 50, 100 ve 200 ppm bor oksit– B_2O_3 (BO) nanoparçacıkları eklenmesinin motor performansı ve emisyonlara etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Şekil 11(a)–(c)’de BD20 karışımına 50, 100 ve 200 ppm oranlarında BO nanoparçacıkları eklenmesinin silindir basıncı, basınç artış oranı ve ısı salınım oranına etkileri verilmiştir. Şekil 11(a)’da görüldüğü gibi BO içeren karışımların yanmanın başlamasından önceki tutuşma gecikmesi aşamasında ve yanmanın başlamasından sonraki kontrolsüz yanma aşamasının ortasına kadar BD20 karışımına göre daha düşük silindir basınç değerleri verdiği belirlenmiştir. Bu durumun, BO nanoparçacıkları aracılığıyla ısı iletim katsayısının artması sonucu, silindirdeki sıcak gazlardan ve sıcak motor parçalarından yakıt moleküllerine olan ısı transferinin artmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Öte yandan,

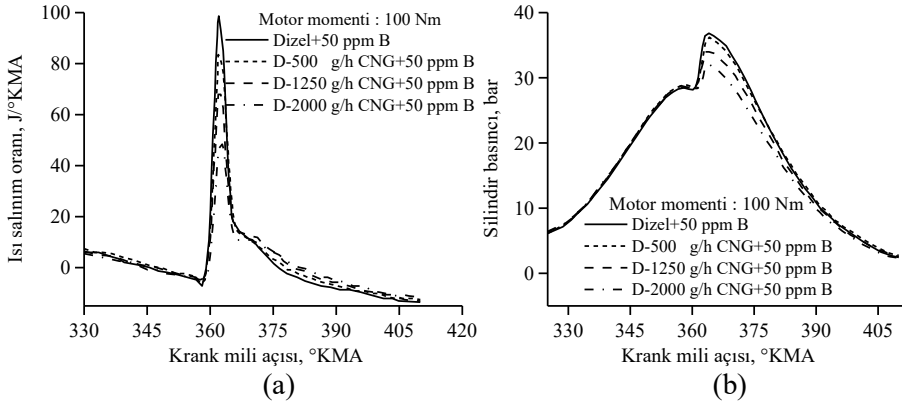
100 ppm ve 200 ppm BO nanoparçacık ilave oranlarında maksimum silindir basıncının hafifçe arttığı belirtilmiş ve BD20, BD20BO50, BD20BO100 ve BD20BO200 karışımları için maksimum silindir basıncı değerleri sırasıyla 48,69, 48,60, 50,31 ve 50,61 bar olarak belirlenmiştir. BO içeren karışımların, BD20 karışımına kıyasla genişleme süreci boyunca silindir basıncında artışa neden olduğu belirtilmiş ve Şekil 11(b)'de görüldüğü gibi bu durumun BO içeren karışımların neden olduğu gecikmiş yanmadan ve ısı salınımının genişleme periyoduna doğru kaymasından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Yanmadaki gecikmenin, BO içeren karışımların kaynama ve damıtma noktası sıcaklıklarının düşük olmasından ve BO içeren karışımların yüksek viskozitesi nedeniyle tutuşma gecikmesinden sonra karışım oluşum hızının yavaşlamasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Bunun sonucunda difüzyon yanma fazında yanan yakıt miktarının arttığı belirtilmiş ve BD20, BD20BO50, BD20BO100 ve BD20BO200 karışımları için maksimum ısı salınım oranı değerleri sırasıyla 25,7, 25,93, 25,32 ve 22,41 J/°KMA olarak belirlenmiştir. Öte yandan, BO içeren karışımların yanma hızını azaltmasının Şekil 10(c)'de görüldüğü gibi basınç artış oranının azalmasına neden olduğu belirlenmiş ve BD20, BD20BO50, BD20BO100 ve BD20BO200 karışımları için maksimum basınç artış oranları sırasıyla 3,01, 2,77, 2,75 ve 2,89 bar/°KMA olarak belirlenmiştir. Ayrıca, BO içeren karışımlar kullanıldığında yanma süresinin uzadığı, ancak tüm yakıtlar için tutuşma gecikme süresinin yaklaşık 7°KMA civarında olduğu belirtilmiş ve BD20, BD20BO50, BD20BO100 ve BD20BO200 karışımları için yanma süreleri sırasıyla 65, 77, 78 ve 78 °KMA olarak belirlenmiştir. Bu durumun Şekil 11(b)'de görüldüğü gibi BO içeren karışımlar kullanıldığında yanmanın genişleme periyoduna doğru kaymasıyla yanma işleminin uzamasından kaynaklandığı belirtilmiştir.



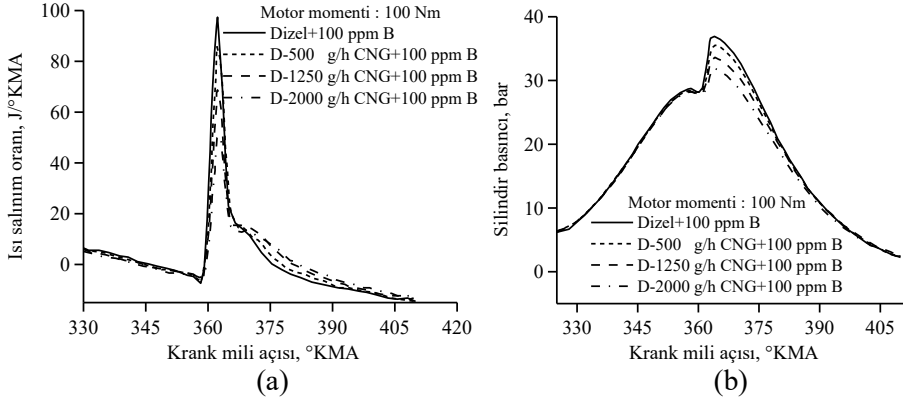
Şekil 11. %20 biyodizel–dizel (BD20) karışımına boroksit (BO) katılması durumunda a) silindir basıncının, b) ısı salınım oranının ve c) basınç artış oranının değişimi (Çakmak ve Özcan, 2022:424)



Şekil 12. Dizel–CNG çift yakıtlı motorda a) ısı salınım oranının ve b) silindir basıncının değişimi (Kül ve Akansu, 2022:12–13)



Şekil 13. Dizel–CNG çift yakıtlı motorda dizel yakıtı 50 ppm bor katılması durumunda a) ısı salınım oranının ve b) silindir basıncının değişimi (Kül ve Akansu, 2022:12–13)



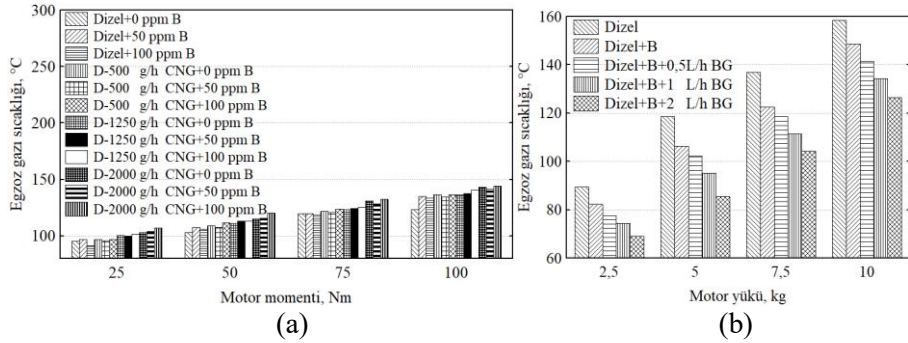
Şekil 14. Dizel-CNG çift yakıtlı motorda dizel yakıtı 100 ppm bor katılması durumunda a) ısı salınım oranının ve b) silindir basıncının değişimi (Kül ve Akansu, 2022:12-13)

Kül ve Akansu (2022:12-13), dizel-doğalgaz (CNG) çift yakıtlı bir motorda dizel yakıtına 50 ve 100 ppm oranlarında bor nanoparçacık eklenmesinin motor performansı ve emisyonlara etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Şekil 12(a)-(b), 13(a)-(b) ve 14(a)-(b)'de saf dizel yakıtı ve dizel yakıtına 50 ve 100 ppm oranlarında bor nanoparçacık katılması durumunda dizel-CNG çift yakıtlı motorda ısı salınım oranı ve silindir basıncının KMA ile değişimleri verilmiştir. Çift yakıtlı durumda CNG miktarının artmasının ısı salınım oranı ve silindir basıncını düşürdüğü belirlenmiş ve bu durumun artan CNG miktarıyla dizel yakıtın püskürtme zamanındaki gecikme ve CNG'nin alev hızının düşük olması nedeniyle yanma işleminin gecikmesinden ve bunun sonucunda tam yanma olmamasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Ayrıca, saf dizel yakıtı kullanıldığında ısı salınım oranının üst ölü noktadan önce (ÜÖNÖ) arttığı, çift yakıtlı çalışma durumunda ise CNG miktarının artmasıyla ısı salınım oranının üst ölü noktadan sonra (ÜÖNS) arttığı belirlenmiştir. Bu durumun, CNG'nin setan sayısının düşük olması nedeniyle kullanılan CNG miktarın artmasıyla tutuşma gecikmesi süresinin uzamasından ve bunun sonucunda geciken yanma işleminden kaynaklandığı belirtilmiştir. Şekil 15(a)'da görüldüğü gibi CNG miktarının artmasıyla EGS'nin yükselmesinin geciken yanma işleminin göstergesi olduğu belirtilmiştir.

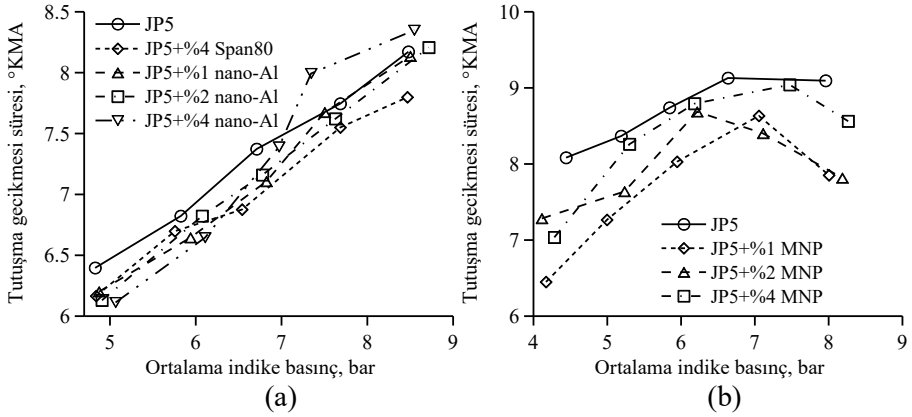
Şekil 15(a)'da dizel-CNG çift yakıtlı motorda dizel yakıtı farklı oranlarda bor nanoparçacıkları eklenmesi durumunda EGS'nin motor moment (yük) ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi silindire gönderilen yakıt miktarının artması nedeniyle tüm yakıtlar için EGS değerlerinin motor yükünün artmasıyla artmış ve saf dizel yakıtla elde edilen EGS değerlerinin dizel-CNG çift yakıtla çalışmaya göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, dizel yakıtına bor nanoparçacıkları eklenmesinin ve dizel-CNG çift yakıtla çalışma durumunda CNG miktarının artmasının EGS'yi artırdığı belirlenmiştir. Borun yüksek enerji içeriği nedeniyle yanma sıcaklığını ve dolayısıyla EGS'yi yükselttiği belirtilmiştir. Ayrıca, CNG'nin

gecikmeli yanması nedeniyle yanma süresinin uzadığı ve CNG miktarının artmasıyla EGS'nin arttığı belirtilmiştir (Kül ve Akansu, 2022:15).

Polat vd. (2022:517), farklı miktarlarda (0,5, 1, 2 L/dk) biyogaz (BG) kullanılan dizel–BG çift yakıtlı motorda dizel yakıtına 100 ppm bor oranında nanoparçacık eklenmesinin performans ve emisyonlara etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Şekil 15(b)'de dizel–BG çift yakıtlı motorda dizel yakıtına 100 ppm oranında bor nanoparçacık eklenmesi durumunda EGS'nin motor yükü ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi motor yükünün artmasıyla EGS'nin arttığı tespit edilmiş ve bunun motor yükünün artmasıyla silindire daha fazla yakıt gönderilmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Ayrıca, dizel yakıtına bor ilavesinin ve dizel yakıtla birlikte BG kullanımının EGS'yi düşürdüğü belirtilmiştir. Saf dizel yakıtla kıyaslandığında EGS'nin Diesel+B için %8,6, Diesel+B+0,5BG için %14,4, Diesel+B+1BG için %21 ve Diesel+B+2BG için %23,4 oranında azaldığı belirlenmiştir. Dizel yakıtına katılan bor nanoparçacıklarının yanma işlemi sırasında yanma odasından silindir duvarlarına olan ısı transferini artırması ve BG'nin içerisindeki karbondioksit (CO₂) gazının yanma odasından ısı çekerek ve yanma hızını yavaşlatmasının yanma sıcaklığını ve dolayısıyla EGS'yi düşmesine neden olduğu belirtilmiştir.



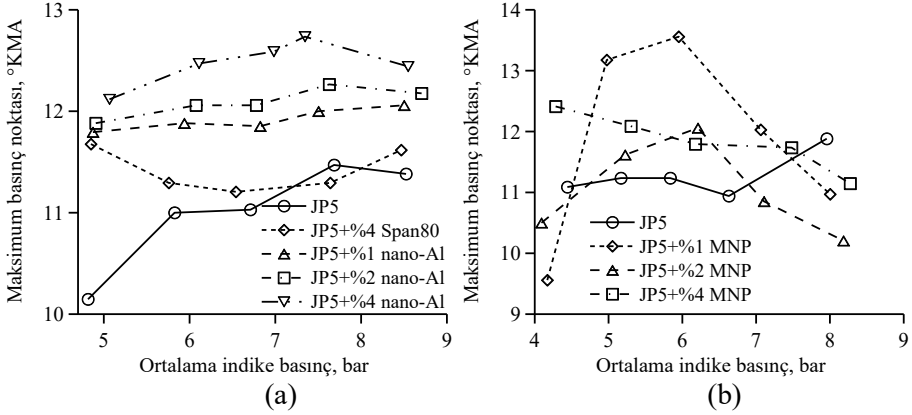
Şekil 15. Bor katkısı kullanılması durumunda egzoz gazı sıcaklığının a) dizel–CNG çift yakıtlı motorda (Kül ve Akansu, 2022:15) ve b) dizel–BG çift yakıtlı motorda (Polat vd., 2022:517) değişimi



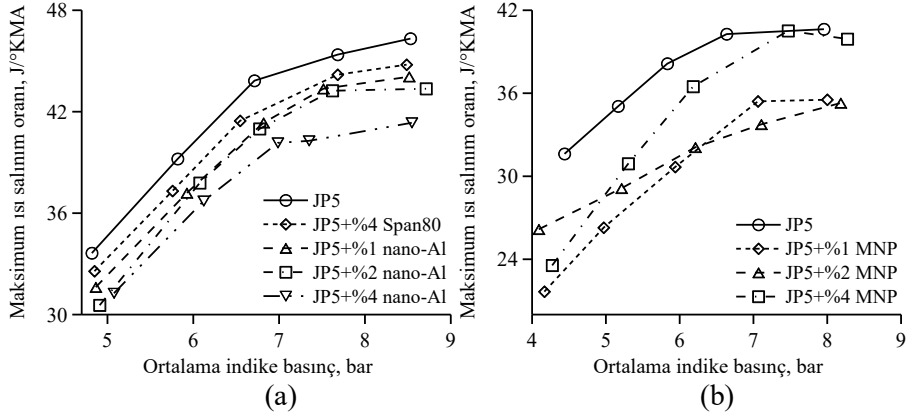
Şekil 16. JP5 yakıtına a) n-Al nanoparçacıkları ve b) Ti-Al-B metalik nanoparçacık (MNP) karışımı katılması durumunda tutuşma gecikmesi süresinin değişimi (Fisher vd., 2017:4)

Fisher vd. (2017:3–5), JP5 yakıtına farklı miktarlarda nano-Al ve Ti-Al-B metalik nanoparçacık (MNP) karışımı eklenmesinin yanma, performans ve emisyonlara üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Şekil 16(a) ve (b)’de görüldüğü gibi, bu durumun nanoparçacık ilavesiyle tutuşma gecikmesi süresinin kısalmışından kaynaklandığı belirtilmiş ve %4 oranında MNP nanoparçacık katkısı kullanıldığında tutuşma gecikme süresinin yaklaşık %4 oranında kısaldığı tespit edilmiştir. Tutuşma gecikmesi süresindeki kısalmışının ise nanopartikül ilavesinin setan sayısını artmasından kaynaklandığı belirtilmiştir.

Şekil 17(a) ve (b)’de JP5 yakıtına farklı miktarlarda n-Al ve MNP ilave edilmesi durumunda maksimum basınç konumunun ortalama efektif basınç (motor yükü) ile değişimi verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi nanoparçacık ilavesiyle maksimum basınç noktasının ileriye doğru ötelendiği belirtilmiştir. Maksimum basınç noktasının tutuşma gecikme süresiyle ters yöne değiştiği ve nanoparçacık ilavesinin tutuşma gecikme süresini kısılması sonucu maksimum basınç noktasının öne doğru kaydığı belirtilmiştir. Ayrıca, bu durumun yanma süresinin uzamasına da neden olduğu belirtilmiştir (Fisher vd., 2017:4).



Şekil 17. JP5 yakıtına a) n-Al nanoparçacıkları ve b) Ti-Al-B metalik nanoparçacık (MNP) karışımı katılması durumunda maksimum basınç noktasının değişimi (Fisher vd., 2017:4)

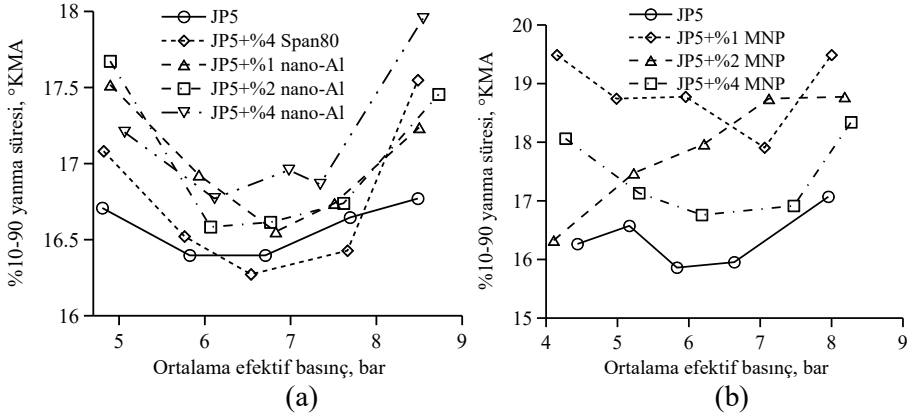


Şekil 18. JP5 yakıtına a) n-Al nanoparçacıkları ve b) Ti-Al-B metalik nanoparçacık (MNP) karışımı katılması durumunda maksimum ısı salınım oranının değişimi (Fisher vd., 2017:4)

Şekil 18(a) ve (b)'de JP5 yakıtına farklı miktarlarda n-Al ve MNP ilavesiyle maksimum ısı salınım oranının motor yüküyle değişimi verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi motor yükünün artmasıyla maksimum ısı salınım oranının arttığı tespit edilmiş ve bunun motor yükü arttıkça silindire gönderilen yakıt miktarının artmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Öte yandan, nanoparçacık ilavesiyle maksimum ısı salınım oranının azaldığı belirlenmiş ve bunun nanopartikül ilavesiyle setan sayısının artması sonucu tutuşma gecikmesi süresinin kısalmasından kaynaklandığı belirtilmiştir (Fisher vd., 2017:4).

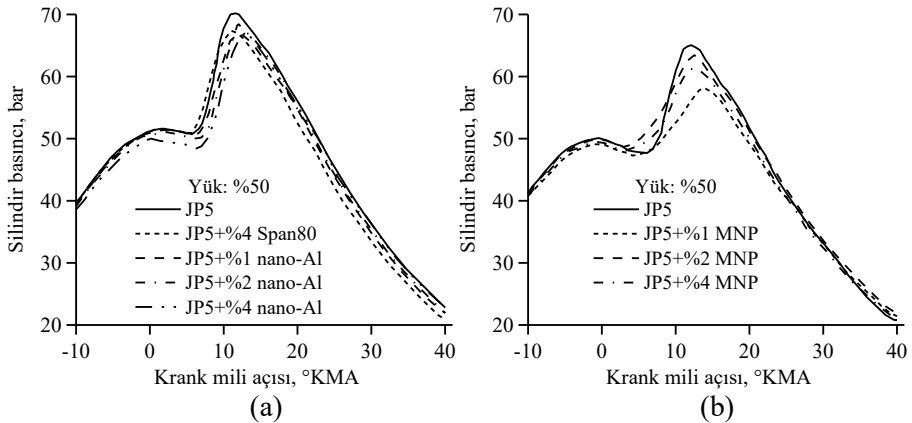
Şekil 19(a) ve (b)'de JP5 yakıtına farklı miktarlarda n-Al ve MNP eklenmesi durumunda yanma süresinin motor yüküyle değişimi verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi motor yükü arttıkça yanma süresinin önce tutuşma gecikmesi süresindeki kısalmaya bağlı olarak bir miktar azaldığı, ancak

motor yükünün belirli bir değerinden sonra silindire gönderilen yakıt miktarının artması sonucu yanma süresinin de artış eğilimi gösterdiği belirtilmiştir. Öte yandan, tutuşma gecikme süresinin kısaltmasına rağmen nanoparçacıkların yanmasının daha uzun süre sürmesi nedeniyle şekillerde de görüldüğü gibi nanoparçacık ilavesiyle yanma süresi uzamıştır (Fisher vd., 2017:4).



Şekil 19. JP5 yakıtına a) n-Al nanoparçacıkları ve b) Ti-Al-B metalik nanoparçacık (MNP) karışımı katılması durumunda yanma süresinin değişimi (Fisher vd., 2017:4)

Şekil 20(a) ve (b)'de JP5 yakıtına n-Al parçacıkları ve MNP karışımı eklenmesiyle silindir basıncındaki değişimler gösterilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi JP5 yakıtına eklenen n-Al ve MNP miktarının artmasıyla silindir basıncının azaldığı belirtilmiş ve nanoparçacık katkıları kullanıldığında silindir basıncının ortalama 1,5 bar azaldığı tespit edilmiştir (Fisher vd., 2017:5).



Şekil 16. JP5 yakıtına a) n-Al nanoparçacıkları ve b) Ti-Al-B metalik nanoparçacık (MNP) karışımı katılması durumunda silindir basıncının değişimi (Fisher vd., 2017:5)

SONUÇLAR

Bu bölümde bor içerikli farklı yakıtların yanma karakteristikleri incelenmiş olup aşağıdaki sonuçlar özetlenebilir.

- Nano parçacık ve nano akışkan endüstrisindeki gelişmeler bor içerikli katkıların daha kolay üretilmesini mümkün kılmış ve pratik şekilde kullanımına imkan sağlamıştır.
- Bor içerikli katkılarının kullanımının yaygınlaşabilmesi için bu katkıların kullanımına yönelik çalışmaların sayılarının ve incelenen parametrelerin artırılarak sonuçların genelleştirilmesi gerekmektedir.
- Genel olarak değerlerinde, bor içerikli katkıların yanıtların daha verimli şekilde yanmasını sağlayarak yanmanın iyileştirilmesine katkı sağladığı söylenebilir.

REFERANSLAR

- Akbıyık, T., Kahraman, N. ve Taner T. (2022). Investigation of the effect of boron additive to lubricating oil on engine performance, exhaust, and emissions. *Fuel*, 312, 122931.
- Baş, H. ve Karabacak, Y.E. (2014). Investigation of the effects of boron additives on the performance of engine oil. *Tribology Transactions*, 57, 740–748.
- Behcet, R. ve Yakin, A. (2022). Evaluation of hydrogen-containing NaBH₄ and oxygen-containing alcohols (CH₃OH, C₂H₅OH) as fuel additives in a gasoline engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 22316–22327.
- Çakmak, A. ve Özcan, H. (2022). Investigation of the usability of boron oxide nanoparticles as diesel fuel additive. *Boron*, 7(1), 420–429.
- Degirmenci, H., Küçükosman, R. ve Yontar, A. A. (2024). An experimental study on droplet-scale combustion and atomization behavior in pure ethanol, methanol, and trimethyl borate, and their blends. *Fuel*, 357, 129716.
- Doğu, Y., Yontar, A.A. ve Kantaroğlu E. (2020). Experimental investigation of effects of single and mixed alternative fuels (gasoline, CNG, LPG, acetone, naphthalene, and boron derivatives) on a commercial i-DSI engine. *Energy Sources Part A: Recovery, Utilization, And Environmental Effects*.
- Fisher, B.T., Cowart, J.S., Weismiller, M.R., Huba, Z.J. ve Epshteyn, A. (2017). Effects of Amorphous Ti–Al–B Nanopowder Additives on Combustion in a Single-Cylinder Diesel Engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 139, 1–8.

- Gültekin, E., Calam, A. ve Şahin, M. (2023). Experimental investigation of trimethyl borate as a fuel additive for a SI engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(1), 419–433.
- Karataş, Ö. ve Yüksel, T. (2023). Experimental investigation of the effects of boron oil additive in internal combustion engine. *Fuel*, 353, 129234.
- Karmakar, S. (2012). *Energetic nanoparticles as fuel additives for enhanced performance in propulsion systems*. Louisiana, LA, Doctoral Dissertation, Louisiana State University, Department of Mechanical Engineering.
- Küçükosman, R., Degirmenci, H., Yontar, A. A. ve Ocakoglu, K. (2023). Combustion characteristics of gasoline fuel droplets containing boron-based particles. *Combustion and Flame* 255, 112887.
- Kül, V.S. ve Akansu, S.O. (2022). Experimental investigation of the impact of boron nanoparticles and CNG on performance and emissions of heavy-duty diesel engines. *Fuel*, 324, 124470.
- Mehta, R.N., Chakraborty, M. ve Parikh, P.A. (2014). Nanofuels: Combustion, engine performance and emissions. *Fuel*, 120, 91–97.
- Ojha, P.K. ve Karmakar, S. (2018). Boron for liquid fuel engines—A review on synthesis, dispersion stability in liquid fuel, and combustion aspects. *Progress in Aerospace Sciences*, 100, 18–45.
- Ozer, S., Demir, U. ve Koçyigit, S. (2023). Effect of using borax decahydrate as nanomaterials additive diesel fuel on diesel engine performance and emissions. *Energy*, 266, 126412.
- Polat, F., Yeşilyurt, M. K., Ağbulut, U., Karagöz, M. ve Sarıdemir, S. (2022). Experimental assessment of the influences of liquid–solid–gas fuel blends on DI–CI engine behaviors. *Process Safety and Environmental Protection*, 159, 511–524.
- Ramteke, S. ve Chelladurai, H. (2020a). Examining the role of hexagonal boron nitride nanoparticles as an additive in the lubricating oil and studying its application. *Journal of Nanomaterials, Nanoengineering and Nanosystems* 234(1–2) 19–36.
- Ramteke, S.M. ve Chelladurai, H. (2020b). Effects of hexagonal boron nitride based nanofluid on the tribological and performance, emission characteristics of a diesel engine: An experimental study. *Engineering Reports*, 2, 12216.
- Sertkaya, A.A. ve Akbıyık, T. (2016). Operate with a gasoline internal combustion engine evaluation of different boron addition of the fuel additive inside performance and emissions impact. *Journal of Polytechnic*, 19(4), 633–640.
- Şimsek, S., Uslu, S. ve Şimsek, H. (2022). Evaluation of the effect of a new alternative fuel containing boron and hydrogen on gasoline engine performance and emission responses. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 4913–4922.
- Şimsek, S., Uslu, S., Sahin, M., Arlı, F. ve Bilgic, G. (2021). Impact of a novel fuel additive containing boron and hydrogen on diesel engine performance and emissions. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1–15.
- Smith, J.P., Montgomery, M.T., Masutani, S.M., Yoza, B.A., Kurasaki, R., Kinoshita, C. ve Coffin, R.B. (2014). *Aerolization during boron nanoparticle multi-component fuel group burning studies*. Washington, DC, Naval Research Laboratory Report, Report number: NRL/MR/6110–14–9506.

- Wang, N. (2012). *Boron composite nanoparticles for enhancement of bio-fuel combustion*. Master of Science Theses, Louisiana State University, Agricultural and Mechanical College.
- Yakın, A., Behcet, R., Solmaz, H. ve Halis, S. (2022). Testing sodium borohydride as a fuel additive in internal combustion gasoline engine. *Energy*, 254, 124300.
- Yontar, A. A., Özgüner, A. G., Adıgüzel, M. A. ve Ustun, D. (2022). Combustion characteristics of trimethyl borate, diesel, and trimethyl borate–diesel blend droplets. *Journal of the Energy Institute*, 105, 221–231.
- Yontar, A. A., Sofuoğlu, D., Degirmenci, H., Ayaz, T. ve Ustun, D. (2023). Investigation of combustion characteristics on triethyl borate, trimethyl borate, diesel, and gasoline droplets. *Energy*, 266, 126440.

İleri Teknoloji Ve Mühendislikte İş Birliği

Dr. Melike AVER GÜRBÜZ¹

1- Dr. Arş. Gör. Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
maver@firat.edu.tr, 0000-0002-3852-5713

ÖZET

İleri teknoloji ve mühendislik arasındaki ilişki; sadece teknik başarıyı değil, aynı zamanda toplumsal fayda üretimini de hedefleyen, entegre ve sürdürülebilir çözümlerin geliştirilmesine hizmet eden bir model sunmaktadır. Akıllı şehirler, otonom araçlar, biyomedikal sistemler gibi karmaşık mühendislik projeleri; yazılım mühendisliği, veri bilimi, sosyoloji, etik ve kamu politikası gibi farklı alanların katkısıyla topluma duyarlı çözümler üretmektedir. Bu kitap bölümünde, ileri teknolojilerin mühendislik alanındaki uygulamaları ve disiplinler arası iş birliğinin yapılan projelerdeki başarısındaki belirleyici rolü ele alınmıştır. Küreselleşen dünyada, mühendislik aşamalarının farklı ekiplerle yürütülmesi ve teknolojik gelişmelerin yükseköğretimden endüstriye kadar geniş bir etki yaratması vurgulanmıştır. Disiplinler arası iş birliğinin, inovasyon ve sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerine de vurgu yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler – İleri Teknoloji, Mühendislik, İş Birliği

GİRİŞ

Günümüzün küresel ekonomisinde, mühendislikte dağıtılmış işbirliği önem taşıdığı bir gerçektir. Farklı yerlerde bulunan mühendislik ekiplerinin katılımcıları, belirli bilgileriyle ürün geliştirmeye uygun değerde katkı sağlamak için mümkün olduğunca verimli ve rahat bir şekilde birlikte çalışabilmelidir (Willner, Powell, Duchi, ve Schönsleben, 2014). Özellikle yükseköğretime bakıldığında, teknolojik ilerlemeler ve dördüncü sanayi devrimi (4IR) adaptasyonunun yükseköğretim kurumlarının büyümesi ve konumlandırılması için hayati önem taşıdığı ve eğitim teknolojisine yatırım yapılmasının gerekli olduğu görülmektedir. Bu kurumlarda işbirliğini güçlendirmek, akademisyenler ve kurumların paydaşlarıyla hem iç hem de dış işbirliğini teşvik etmek, devletlerin temel politikalarından biri olması gerekmektedir (Lyytinen, Kohtamäki, Kivistö, Pekkola, ve Hölttä, 2017).

İleri Teknoloji, modern mühendislik uygulamalarında kökten bir değişimi teşvik etmekte ve endüstriyel aşamalarındaki işleyiş şekillerini derinden etkilemektedir. Yapay Zekâ(YZ), robotik sistemler, nanoteknoloji, biyoteknoloji ve Nesnelerin İnterneti (IoT) gibi ileri düzeydeki teknolojiler, mühendislik alanlarında sınırların ötesinde yenilikçi çözümler üretmesine imkân sağlamaktadır (Tsigie ve Dagnaw, 2021) (Rane, 2023). Bu teknolojiler, karmaşık mühendislik problemlerine çözüm sunarak daha önce çözülemeyen zorluklarla başa çıkmayı mümkün hale getirmektedir. Bunun yanı sıra, bu teknolojilerin mühendislik projelerinde etkin şekilde uygulanabilmesi, yalnızca bir mühendislik alanının bilgi birikimi ve

yetenekleriyle değil, aynı zamanda çeşitli uzmanlık alanlarına sahip disiplinler arası işbirliklerinin bir sonucu olarak gerçekleştirilebilir.

Dördüncü Sanayi Devrimi (4IR), Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Endüstri 4.0 paradigması gibi yeni yaklaşımlar sunarak mühendislik uygulamasındaki normları yeniden yazan fiziksel, dijital ve biyolojik teknolojinin birleşmesini sürdürmektedir ve bu yaklaşımlar küresel olarak eğitim sektörünün de değişiminde etkili olmaya başlamıştır. 4IR ile mühendislik eğitimi arasındaki ilişki olumlu bir geri bildirim döngüsü olarak kabul edilir. 4IR teknolojileri, mühendislik eğitim sisteminin kalitesini artırmada büyük bir potansiyele sahiptir ve bu da Endüstri 4.0 çağında sürdürülebilir sonuçlar üretmek amacıyla daha donanımlı ve gelişmiş mühendislik eğitimi teşvik etmektedir. Mühendislik eğitimi ile Endüstri 4.0 arasında var olan birbirini besleme ilişkisinin, yıkıcı teknolojinin gerçekliğini ele almak için, paydaşların dikkatli ilgisine ihtiyaç duyduğu sonucu çıkarılmaktadır (Odetoye ve Odetoye, 2021).

Teknolojik gelişmelerin başarılı bir şekilde hayata geçirilmesi, mühendislik alanındaki farklı disiplinlerin bilgi ve yetkinliklerinin entegrasyonunu gerektirmektedir. Özellikle karmaşık mühendislik projeleri, yalnızca tek bir mühendislik dalının uzmanlığından faydalanmakla kalmayıp, aynı zamanda yazılım mühendisliği, veri bilimi, biyoteknoloji, kimya mühendisliği, fizik ve diğer bilimsel alanlardan gelen katkılarla şekillenmektedir. Bu bağlamda, mühendislik ve ileri teknoloji arasındaki işbirliği, sadece teknik çözümler üretmekle kalmaz, aynı zamanda bu çözümlerin toplumsal, çevresel ve ekonomik açıdan daha sürdürülebilir olmasını sağlamaktadır (Schoen, 2018).

Mühendislik projelerinin büyük bir kısmında, sistemlerin yüksek derecede karmaşık hale gelmesiyle beraber disiplinler arası bir yaklaşımı zorunlu hale gelmiştir. Örneğin, yapay zekâ ve makine öğrenimi, mühendislik tasarım süreçlerinde optimizasyonu sağlarken, robotik ve otomasyon teknolojileri endüstriyel üretimi daha verimli ve hatasız hale getirmektedir. Bunun yanında, biyoteknoloji ve nanoteknoloji gibi alanlar, mühendislik tasarımlarında yeni malzeme ve üretim tekniklerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu tür teknolojiler, yalnızca mühendislik disiplinlerinin sınırlarını aşmakla kalmayıp aynı zamanda bu alanlar arasında işbirliği yaparak daha inovatif ve verimli çözümler ortaya koymaktadır (Adeniyi Kehinde Adeleke, Danny Jose Portillo Montero, Kehinde Andrew Olu-lawal, ve Oladiran Kayode Olajiga, 2024).

İleri teknoloji ve mühendislik arasındaki işbirlikleri, sadece mühendislik çözümlerinin etkinliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda toplumsal ve ekonomik faydalar sağlayan yenilikçi uygulamalar da ortaya koymaktadır. Bu işbirlikleri, mühendislerin çok disiplinli bir yaklaşımla, karmaşık problemleri çözme ve endüstriyel ihtiyaçları karşılamak için entegre çözümler geliştirme yeteneğini güçlendirmektedir. İleri teknolojilerin mühendislik alanındaki uygulanabilirliği, disiplinler arası

işbirliğinin etkinliğine ve bu işbirliklerinin sürdürülebilir, verimli ve toplumsal fayda sağlama kapasitesine bağlı olduğu bildirilmiştir (Sattler et al., 2012)

Bu kitap bölümünde, ileri teknolojilerin mühendislik alanındaki uygulamaları ve disiplinler arası iş birliğinin yapılan projelerdeki başarısındaki belirleyici rolü ele alınmıştır. Küreselleşen dünyada, mühendislik aşamalarının farklı ekiplerle yürütülmesi ve teknolojik gelişmelerin yükseköğretimden endüstriye kadar geniş bir etki yaratması vurgulanmıştır. Disiplinler arası iş birliğinin, inovasyon ve sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerine de vurgu yapılmıştır.

İLERİ TEKNOLOJİNİN MÜHENDİSLİK DİSİPLİNLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Çağdaş mühendislik uygulamaları, yalnızca teknik sorunlara çözüm üreten sistemlerin geliştirilmesiyle sınırlı kalmamakta; aynı zamanda mühendislik düşüncesinin temelini oluşturan kavramsal çerçeveyi de dönüştürmektedir. Bu dönüşümün temel dinamiklerinden biri, yapay zekâ (YZ) ve veri analitiği gibi dijital teknolojilerin mühendislik tasarım süreçlerine entegrasyonudur. Tablo 1 de gösterildiği üzere ileri teknolojinin mühendislik alanlarına katkısı önemlidir.

Tablo 1. İleri Teknoloji Alanlarının Mühendislik Disiplinlerine Etkisi

Teknoloji Alanı	Etki Sağladığı Mühendislik Disiplinleri	Öne Çıkan Kazanımlar
Yapay Zekâ (AI)	Makine, Yazılım, Elektrik-Elektronik, Endüstri	Tasarım optimizasyonu, veri analitiği, öngörüşel bakım
Robotik	Mekatronik, Makine, Elektrik, Kontrol	Hız, hassasiyet, iş güvenliği, otomasyon
Nanoteknoloji	Malzeme, Kimya, Biyomedikal	Hafif & dayanıklı malzeme, enerji verimliliği, yüzey fonksiyonelleştirme
Biyoteknoloji	Biyomühendislik, Kimya, Sağlık Teknolojileri	Yapay organlar, doku mühendisliği, biyosensörler
IoT	Bilgisayar, Elektrik, Endüstri	Gerçek zamanlı veri yönetimi, akıllı sistem entegrasyonu

Yapay Zekâ ve Veri Analitiği

Geleneksel olarak uzun zaman gerektiren ve yüksek hata riski taşıyan hesaplama, modelleme ve analiz süreçleri; yapay zekâ destekli algoritmalar sayesinde çok daha hızlı, doğru ve verimli biçimde gerçekleştirilebilmektedir. Bu durum, yalnızca teknik kararların doğruluğunu artırmakla kalmayıp; aynı zamanda ekonomik verimlilik, çevresel sürdürülebilirlik ve toplumsal etki gibi çok boyutlu değerlendirmeleri mühendislik kararlarına entegre etme olanağı sunmaktadır (Huang, 2023).

Robotik ve Otomasyon

Robotik ve otomasyon teknolojileri mühendislik uygulamalarında önemli bir paradigma değişimine zemin hazırlamaktadır. Bu teknolojiler, üretim süreçlerinde esnekliği artırmakta, standart dışı ve kişiselleştirilmiş ürünlerin daha kısa sürede ve daha düşük maliyetle üretimini mümkün kılmaktadır. Aynı zamanda, insan kaynaklı hataların azaltılması ve kalite kontrol süreçlerinin güçlendirilmesi yoluyla, mühendislik çıktılarının güvenilirliği önemli ölçüde artırılmaktadır. Bu bağlamda, robotik sistemlerin mühendislik pratiğine entegre edilmesi, yalnızca üretim kapasitesini genişletmekle kalmamakta; aynı zamanda inovasyonun ve yaratıcı çözümlerin önünü açan yeni bir mühendislik kültürü inşa etmektedir (Adeniyi Kehinde Adeleke vd., 2024).

Nanoteknoloji ve Yeni Nesil Malzemeler

Öte yandan, nanoteknoloji ve biyoteknoloji gibi çığır açıcı bilimsel alanlar, mühendislik disiplinlerinde yalnızca araçsal değil, aynı zamanda düşünsel bir dönüşüm yaratmaktadır. Nanoteknoloji sayesinde, malzemeler atomik ve moleküler düzeyde yeniden tasarlanabilmekte; bu da daha hafif, daha dayanıklı ve çevresel etkisi düşük mühendislik çözümlerinin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır (Chaupoo vd., 2023). Karbon nanotüpler gibi gelişmiş nanomalzemeler; inşaat, otomotiv ve elektronik gibi sektörlerde enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından önemli kazanımlar sağlamaktadır. Bu gelişmeler, malzeme bilimiyle mühendisliğin etkileşiminde yeni ufuklar açmakta; mühendislik uygulamalarına çevresel duyarlılık boyutunu daha etkin biçimde dâhil etmektedir (Hussain ve Palit, 2019).

Tüm bu gelişmeler, mühendislik disiplininin sınırlarını genişleterek; çok disiplinli, toplumsal sorumluluk bilinci yüksek ve teknolojiyle iç içe geçmiş yeni bir mühendislik anlayışının oluşmasına öncülük etmektedir. Yapay zekâdan robotik sistemlere, nanomalzemelerden biyoteknolojik çözümlere kadar uzanan geniş bir teknoloji yelpazesi; yalnızca yenilik üretme kapasitesini değil, aynı zamanda bu yeniliklerin toplumsal, çevresel ve insani boyutlarını da dikkate alan bütüncül yaklaşımların geliştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda, mühendislik artık yalnızca nasıl yapıldığı değil, kimin için, neden ve hangi etkilerle yapıldığı da bir mesleki pratiğe

dönüşmektedir. Böylece mühendislik, teknolojik ilerlemeyi toplumsal faydayla buluşturan, daha etik, daha sürdürülebilir ve daha insan merkezli bir disiplin olma yolunda ilerlemektedir (Kohlgrüber, Schröder, Bayón Yusta, ve Arteaga Ayarza, 2019).

İLERİ TEKNOLOJİLERDE DİSİPLİNLER ARASI İŞ BİRLİĞİ

İleri teknolojilerin mühendislik arenasında etkili şekilde uygulanabilmesi, yalnızca teknik bilgi ve becerilerin yeterliliğiyle değil, farklı uzmanlık alanlarının bir araya gelerek ortak bir anlayış geliştirmesiyle mümkün hale gelmektedir. Günümüzde karmaşık mühendislik projeleri, tek bir disiplinin sınırlarını aşmakta; yazılım geliştiricilerinden veri bilimcilerine, biyologlardan sosyologlara kadar geniş bir uzmanlık yelpazesinin iş birliğini zorunlu kılmaktadır. Bu çok yönlü etkileşim, mühendislik çözümlerinin yalnızca teknik açıdan değil, toplumsal, çevresel ve ekonomik bağlamlarda da daha verimli ve etkili bir biçimde tasarlanmasına katkı sunmaktadır (Cataldo, Scholtes, ve Valetto, 2014).

Tablo 2. Disiplinler Arası İş Birliği Modelleri

Model Türü	Paydaşlar	Avantajları	Zorlukları
Üniversite–Sanayi İş Birliği	Akademi, Ar-Ge merkezleri, firmalar	Ticarileştirme, uygulama transferi	Fikri mülkiyet paylaşımı
Çok Disiplinli Araştırma Takımları	Farklı mühendislik dalları	Yaratıcı çözümler	İletişim sorunları
Kamu–Özel–Akademi Konsorsiyumu	Üniversite, devlet, özel sektör	Büyük ölçekli projeler	Bürokrasi
Uluslararası İş Birliği	Yurt içi–yurt dışı araştırma grupları	Küresel bilgi akışı	Standart uyumsuzluklar

Özellikle akıllı şehir tasarımı gibi kapsamlı projelerde, disiplinlerarası yaklaşım vazgeçilmez bir rol üstlenmektedir. Akıllı şehirler; ulaşım, enerji, altyapı ve çevre yönetimi gibi çeşitli bileşenlerin bütüncül biçimde ele alındığı sistemlerdir. Bu bağlamda, inşaat ve elektrik mühendisliği gibi geleneksel disiplinlerin yanı sıra, bilgisayar mühendisliği, veri analitiği, psikoloji, sosyoloji ve kamu yönetimi gibi alanların da sürece dâhil edilmesi gereklidir. Örneğin, akıllı ulaşım sistemlerinin tasarımı yalnızca trafik akışının teknik yönetimiyle sınırlı değildir; aynı zamanda bireylerin davranış

kalıplarının ve toplumsal alışkanlıkların da analiz edilmesini zorunlu kılar. Bu nedenle sosyal bilimlerin katkısıyla geliştirilen mühendislik çözümleri, daha gerçekçi, uygulanabilir ve sürdürülebilir sonuçlar doğurabilmektedir (Alanazi ve Alenezi, 2023).

Benzer şekilde, IoT tabanlı kentsel sistemler veya büyük veri analizine dayalı altyapı yönetimi gibi alanlarda da, disiplinlerarası iş birliği mühendislik uygulamalarının başarısını belirleyen temel faktörlerden biri haline gelmiştir. Teknolojik sistemlerin yalnızca veriye dayalı olarak değil, bu verilerin toplumsal etkileşimler ve yerel dinamiklerle birlikte değerlendirilerek anlamlandırılması, akıllı şehir çözümlerinin başarısını doğrudan etkilemektedir (Zhao ve Zhang, 2020).

Dolayısıyla, ileri teknolojilerin mühendislikteki etkinliğini artırmak amacıyla farklı disiplinlerden gelen bilgi ve deneyimlerin ortak bir zeminde buluşturulması, yalnızca teknik doğruluk açısından değil, toplumsal kabul ve sürdürülebilirlik açısından da kritik öneme sahiptir. Bu tür iş birlikleri, mühendislik disiplinlerinin ötesine geçerek insan-merkezli, duyarlı ve bütüncül bir tasarım anlayışını teşvik etmektedir. Sonuç olarak, mühendislik ile diğer bilimsel alanlar arasında kurulan bu etkileşim ağı, toplumların daha yaşanabilir, uyumlu ve dirençli yaşam alanları inşa etmelerine olanak tanımakta; teknolojik gelişmelerin toplumsal faydaya dönüşmesini sağlayan temel bir strateji olarak öne çıkmaktadır (Cañavate, Martínez-Marroquín, ve Colom, 2025).

İleri Teknoloji ve Mühendislikte İnovasyon: Ortaklıkların Rolü

İleri teknoloji ve mühendislik alanındaki yenilikçi gelişmeler, çoğu zaman tek bir disiplinin ya da kurumun sınırlarını aşarak, farklı sektörlerin, araştırma alanlarının ve uzmanlıkların iş birliğiyle şekillenmektedir. Özellikle yapay zekâ ve robotik mühendisliğin biyoteknoloji ile kesişiminde ortaya çıkan gelişmeler, insan sağlığı, tarım ve çevresel sürdürülebilirlik gibi kritik alanlarda dönüştürücü etkiler yaratmaktadır. Bu tür disiplinlerarası iş birlikleri, yalnızca teknolojik verimliliği artırmakla kalmamakta; aynı zamanda toplumsal fayda üreten, uzun vadeli ve sürdürülebilir çözümlerin geliştirilmesine de olanak sağlamaktadır (Urrea ve Kern, 2025).

Örneğin, biyoteknolojik araştırmalar ile robotik sistemlerin entegrasyonu, tarım sektöründe otomatik hasat makineleri ya da iklim koşullarına duyarlı bitki yetiştirme sistemleri gibi yenilikçi uygulamaların önünü açmaktadır. Bu gibi projelerde, yalnızca teknik bilgi değil, aynı zamanda biyolojik süreçlerin anlaşılması, çevresel etki değerlendirmesi ve kullanıcı odaklı tasarım gibi çok yönlü bilgi alanlarının da bir arada ele alınması gerekmektedir (Satyannarayana, 2025).

Bu noktada, ileri teknolojilerin mühendislik uygulamalarında etkili bir şekilde kullanılabilmesi, yalnızca sektörel iş birliklerine değil; aynı zamanda mühendislik eğitiminin yeniden yapılandırılmasına da bağlıdır. Günümüz

mühendislik eğitimi, artık yalnızca belirli bir alandaki teknik uzmanlığı değil, aynı zamanda farklı disiplinlerle iletişim kurabilme, çok boyutlu düşünme ve karmaşık problemleri sistematik bir yaklaşımla çözebilme becerilerini de içermelidir. Disiplinler arası eğitim modelleri, mühendislik öğrencilerinin hem teknik hem de sosyal bakış açılarını harmanlayarak, onları daha esnek, yaratıcı ve iş birliğine açık bireyler olarak yetiştirmeyi hedeflemektedir (Lantada, 2020).

Bu eğitim anlayışı, teknolojik gelişmelerin yalnızca laboratuvar ya da akademik ortamlarla sınırlı kalmayıp, endüstriyel uygulamalara hızla aktarılmasını ve toplumsal düzeyde etkili sonuçlar doğurmasını sağlamaktadır. Mühendislik eğitimi ile uygulama dünyası arasındaki bu güçlü bağ, teknolojik yeniliklerin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine hizmet edecek şekilde topluma entegre edilmesinde kilit bir rol oynamaktadır.

Mühendislikte ileri teknoloji uygulamalarının etkili ve yaygın bir şekilde kullanılabilmesi; disiplinler arası iş birliklerinin artırılması, eğitimde yenilikçi yaklaşımların benimsenmesi ve çok boyutlu düşünmeyi teşvik eden bir öğrenme kültürünün geliştirilmesiyle mümkündür. Bu bütüncül yaklaşım, yalnızca mühendislik disiplinlerinde değil, teknolojinin şekillendirdiği tüm sektörlerde daha dirençli, yenilikçi ve topluma duyarlı çözümler üretmenin temelini oluşturmaktadır (Xu, 2025).

İLERİ TEKNOLOJİ UYGULAMALARI

Akıllı Fabrikalar ve Endüstri 4.0

Endüstri 4.0 devrimi, ileri teknoloji ile mühendislik disiplinlerinin entegrasyonunun en çarpıcı örneklerinden birini teşkil etmektedir. Bu dönüşüm süreci, üretim altyapılarının akıllı fabrikalar, robotik sistemler, veri analitiği, yapay zekâ ve Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojileriyle donatılması yoluyla; üretim süreçlerinin dijitalleştirilmesini, verimliliğin artırılmasını ve operasyonel maliyetlerin azaltılmasını mümkün kılmaktadır (Büchi, Cugno, ve Castagnoli, 2020).

Tablo 2. Endüstri 4.0 Teknolojilerinin Üretim Sistemlerine Katkısı

Endüstri 4.0 Teknolojisi	Üretim Sistemine Katkısı	Örnek Uygulamalar
Cyber-Physical Systems	Makine-işlem entegrasyonu	Akıllı üretim hatları
Büyük Veri	Karar destek sistemleri	Kalite analitiği
Otonom Robotlar	Esnek üretim	Montaj robotları
Dijital İkiz	Sanal prototipleme	Fabrika simülasyonları
3B Yazıcılar	Hızlı üretim	Parça prototipleri

Söz konusu dönüşüm, yalnızca üretim mühendisliği perspektifiyle ele alınamayacak kadar çok boyutlu bir yapıya sahiptir. Akıllı üretim sistemlerinin hayata geçirilebilmesi için yazılım mühendisliği, elektrik-elektronik mühendisliği, endüstriyel tasarım ve veri mühendisliği gibi birçok farklı disiplinin koordineli bir şekilde çalışması gerekmektedir (Lu, Xu, ve Wang, 2020). Bu disiplinler arası etkileşim, üretim sistemlerinin sensör verilerinin işlenmesinden robotik otomasyon süreçlerine ve makine öğrenimi algoritmalarının entegrasyonuna kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır.

Bu tür sistemlerin etkinliğinin sağlanabilmesi, bileşenlerin birbiriyle yüksek düzeyde entegre çalışmasına bağlıdır. Bu entegrasyon yalnızca teknik anlamda değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda çevresel etki analizi, enerji verimliliği ve atık yönetimi gibi alanlarda da disiplinler arası yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Çevre mühendisliği, enerji sistemleri mühendisliği ve sürdürülebilir tasarım gibi alanlar bu kapsamda önemli katkılar sunmaktadır.

Sonuçta Endüstri 4.0 yalnızca teknolojik bir paradigma değişimini değil, aynı zamanda mühendislik disiplinleri arasında bütüncül ve etkileşimli bir iş birliği modelini zorunlu kılmaktadır. Bu yönüyle, hem teknik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından geleceğin üretim sistemlerinin şekillenmesinde disiplinler arası mühendislik yaklaşımları belirleyici bir rol oynamaktadır (Zizic, Mladineo, Gjeldum, ve Celent, 2022).

Otonom Araçlar

Otonom araçlar, yalnızca mühendislik dünyası için olmayıp, aynı zamanda toplumsal, etik ve hukuksal alanlarda da derin etkiler yaratan çok boyutlu bir inovasyon alanı olarak öne çıkmaktadır. Bu araçların geliştirilmesi; elektrik mühendisliği, yazılım mühendisliği, makine mühendisliği ve robotik mühendislik gibi farklı mühendislik dallarının entegre biçimde çalışmasını gerektirmektedir.

Geliştirilen sürücüsüz sistemler, insan müdahalesine ihtiyaç duymadan güvenli sürüş gerçekleştirebilecek düzeye ulaşmakta; bu da sensör teknolojilerinden yapay zekâ algoritmalarına, gerçek zamanlı veri işleme süreçlerinden karmaşık kontrol sistemlerine kadar pek çok teknik bileşenin bir araya gelmesiyle mümkün olmaktadır. Ancak bu teknolojinin başarısı yalnızca mühendislik mükemmeliyetiyle sınırlı değildir.

Otonom araçların toplumsal yaşamda yer bulabilmesi, geniş kapsamlı sosyal kabule, güvenlik algısına ve yasal düzenlemelere de bağlıdır (Matos, Bernardino, Durães, ve Cunha, 2024). Bu noktada, etik karar mekanizmaları, veri gizliliği, kullanıcı güvenliği ve sorumluluk paylaşımı gibi konular da gündeme gelmektedir. Dolayısıyla otonom sürüş teknolojileri, yalnızca teknik disiplinlerin katkısıyla değil; aynı zamanda hukuk, sosyoloji, psikoloji ve ekonomi gibi sosyal bilimlerin aktif katılımıyla şekillenebilecek bir yapı arz etmektedir.

Bu bağlamda, otonom araçların yaygınlaştırılması ve topluma entegre edilmesi süreci, mühendislik çözümleri ile toplumsal normların, yasal çerçevelerin ve etik değerlerin uyum içinde ele alındığı disiplinler arası bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Gelecekte bu tür teknolojilerin sürdürülebilir ve güvenli bir biçimde yaşama geçirilebilmesi için, yalnızca teknik yeterlilik değil; aynı zamanda toplumla kurulan bütüncül bir diyalog da belirleyici olacaktır (Karami, Shemshaki, ve Ghazanfar, 2024)

Biyomühendislik ve Sağlık Teknolojileri

Biyoteknolojinin sağlık mühendisliği ile birleşimi, günümüzde genetik mühendislikten yapay organlara, biyomedikal cihazlardan yenilikçi tedavi yöntemlerine kadar uzanan geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Bu alan, yalnızca biyoloji ve tıbbın değil; aynı zamanda mühendisliğin çok çeşitli alt disiplinlerinin iş birliğini zorunlu kılan oldukça karmaşık ve dinamik bir yapıya sahiptir.

Biyomedikal cihazların tasarımı ve geliştirilmesi sürecinde genetik mühendisliği, biyomühendislik, elektronik mühendisliği, kimya mühendisliği ve bilgisayar mühendisliği gibi alanlar birbirini tamamlayan roller üstlenmektedir (Keshava, Mitra, Gope, ve Gope, 2018) (Evangel Chinyere Anyanwu vd., 2024). Örneğin, yapay bir organın hayata geçirilmesi; hücre mühendisliği ile biyoyoumlu malzeme tasarımı gibi biyolojik süreçlerin, elektriksel ve mekanik sistemlerle entegre edilmesini gerektirmektedir.

Bu bağlamda, canlı sistemlerin mühendislik prensiplerine uygun biçimde çalışmasını sağlamak, yalnızca teknik bilgiyle değil; aynı zamanda biyolojik süreçlere derinlemesine bir anlayışla yaklaşmayı da gerektirir. Ancak bu teknolojik gelişmelerin sahada uygulanabilir hâle gelmesi, yalnızca mühendislik yeterliliğine dayanmaz. Biyoteknolojik çözümlerin ve sağlık teknolojilerinin topluma entegre edilebilmesi; etik ilkeler, yasal düzenlemeler, sağlık politikaları ve toplumsal kabul gibi çok boyutlu faktörlerle yakından ilişkilidir (Wang, 2019). Örneğin, genetik müdahalelerin sınırları, yapay organ nakillerinde etik sorumluluklar ya da kişisel sağlık verilerinin gizliliği gibi konular, mühendislikten çok öte değerlendirmeleri gerekli kılmaktadır.

Dolayısıyla bu alandaki ilerlemeler, yalnızca teknik mühendislik becerileriyle değil; aynı zamanda etik standartlara duyarlı, sosyal boyutları gözetken ve halk sağlığı perspektifini içeren bir yaklaşımla şekillenmektedir. Biyoteknoloji ile sağlık mühendisliği arasındaki bu bütüncül iş birliği, gelecekte bireyselleştirilmiş tedavi, daha erişilebilir sağlık hizmetleri ve yaşam kalitesini artıran yenilikçi çözümler üretmek adına kritik bir rol oynamaya devam edecektir (Bunnik, de Jongh, ve Massey, 2022).

SONUÇ

Günümüzde, ileri teknoloji ve mühendislik sadece teknik sorunlara çözüm üretmekle kalmıyor; aynı zamanda toplumun, ekonominin ve çevrenin karşı karşıya olduğu karmaşık problemleri de ele alıyor. Bu noktada farklı mühendislik dallarının bir araya gelerek disiplinler arası çalışması, her zamankinden daha büyük bir önem taşımaktadır. Çünkü karşılaşılan problemler tek bir disiplinin bilgi ve becerisiyle çözülemeyecek kadar çok katmanlı olmaya başlamıştır.

Disiplinler arası iş birliği, mühendislerin yalnızca kendi uzmanlık alanlarına odaklanmalarını değil, aynı zamanda birbirlerinin bakış açılarını ve yöntemlerini anlamalarını sağlamaktadır. Bu sayede, farklı bilim alanları bir araya gelerek, ortaya daha yaratıcı, sürdürülebilir ve etkili çözümler çıkarmaktadırlar. Bu süreçte sadece teknik bilgiler değil, aynı zamanda farklı disiplinlerin yaklaşım biçimleri, düşünme yolları ve problem çözme stratejileri de paylaşılmaktadır.

Özellikle çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik gibi geniş kapsamlı hedeflerde, disiplinler arası etkileşim çok daha belirleyici bir rol oynamaktadır. Örneğin, çevre mühendisleriyle enerji mühendislerinin birlikte çalışması, yenilenebilir enerji sistemlerinin hem teknik olarak daha verimli olmasını hem de ekonomik ve toplumsal açıdan uygulanabilirliğini artırmaktadır. Benzer şekilde, sağlık mühendisliği; biyoteknoloji ve bilgisayar mühendisliğinin kesişiminde geliştirilen çözümler, bireylerin sağlıklarını daha yakından takip etmeye ve yönetmeye olanak tanıyarak oldukça yenilikçi yollarla yapmaktadır.

Gelecekte bu iş birliği daha da derinleşerek; yapay zekâ, robotik, biyoteknoloji, nanoteknoloji gibi ileri teknolojiler mühendislik disiplinlerini birbirine daha fazla yaklaştıracak ve doğaya daha duyarlı çözümlerin önünü açacaktır. Üstelik bu iş birliği sadece mühendislik alanıyla sınırlı kalmayıp; politika, ekonomi ve sosyal bilimler gibi farklı alanlarla kurulan köprüler, geliştirilen çözümlerin toplumsal etkisini artıracak.

Özetle, mühendislik dünyasında farklı disiplinler arasında kurulan güçlü iş birlikleri, artık sadece teknik başarı için değil, aynı zamanda toplumsal fayda yaratmak için de vazgeçilmez hale gelmektedir. Geleceğin mühendislik projeleri; daha bütünleşmiş, daha insan odaklı ve daha sürdürülebilir olacağı ön görülmekle beraber bu projelerin temelinde, disiplinler arası anlayış ve teknolojiye dayalı ortaklıklar yatacaktır.

REFERANSLAR

- Adeniyi Kehinde Adeleke, Danny Jose Portillo Montero, Kehinde Andrew Oluwalaw, & Oladiran Kayode Olajiga. (2024). Process Development in Mechanical Engineering: Innovations, Challenges, and Opportunities. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(3), 901–912. doi:10.51594/estj.v5i3.945
- Alanazi, F., & Alenezi, M. (2023). Software Engineering Techniques for Building Sustainable Cities with Electric Vehicles. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(15). doi:10.3390/app13158741
- Büchi, G., Cugno, M., & Castagnoli, R. (2020). Smart factory performance and Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 150(November 2019), 119790. doi:10.1016/j.techfore.2019.119790
- Bunnik, E. M., de Jongh, D., & Massey, E. (2022). Ethics of Early Clinical Trials of Bio-Artificial Organs. *Transplant International*, 35(July), 1–6. doi:10.3389/ti.2022.10621
- Cañavate, J., Martínez-Marroquín, E., & Colom, X. (2025). Engineering a Sustainable Future Through the Integration of Generative AI in Engineering Education. *Sustainability (Switzerland)*, 17(7). doi:10.3390/su17073201
- Cataldo, M., Scholtes, I., & Valetto, G. (2014). A complex networks perspective on collaborative software engineering. *Advances in Complex Systems*, 17(7–8), 1–10. doi:10.1142/S0219525914300011
- Chaupoo, A. S., Dhakad, A., Beese, S., Kumar, A., Kumar, P., Pandey, S. K., & Kurdekar, A. K. (2023). Transforming Horticulture: The Influence of Nanotechnology on Crop Enhancement. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 3381–3400. doi:10.9734/ijecc/2023/v13i113512
- Evangel Chinyere Anyanwu, Femi Osasona, Opeoluwa Oluwanifemi Akomolafe, Jane Osareme Ogugua, Tolulope Olorunsogo, & Ebere Rosita Daraojimba. (2024). Biomedical engineering advances: A review of innovations in healthcare and patient outcomes. *International Journal of Science and Research Archive*, 11(1), 870–882. doi:10.30574/ijrsra.2024.11.1.0139
- Huang, J. (2023). Digital engineering transformation with trustworthy AI towards industry 4.0: Emerging paradigm shifts. *Journal of Integrated Design and Process Science*, 26(3–4), 267–290. doi:10.3233/JID-229010
- Hussain, C. M., & Palit, S. (2019). Nanomaterials, ecomaterials, and wide vision of material science. *Handbook of Ecomaterials*, 1, 3–31. doi:10.1007/978-3-319-68255-6_107
- Karami, A., Shemshaki, M., & Ghazanfar, M. A. (2024). Exploring the Ethical Implications of AI-Powered Personalization in Digital Marketing. *Data Intelligence*, (October). doi:10.3724/2096-7004.di.2024.0055
- Keshava, R., Mitra, R., Gope, M. L., & Gope, R. (2018). *Synthetic biology: Overview and Applications. Omics Technologies and Bio-engineering: Towards Improving Quality of Life* (Vol. 1). doi:10.1016/B978-0-12-804659-3.00004-X
- Kohlgrüber, M., Schröder, A., Bayón Yusta, F., & Arteaga Ayarza, A. (2019). A new innovation paradigm: Combining technological and social innovation. *Materiaux et Techniques*, 107(1). doi:10.1051/mattech/2018065

- Lantada, A. D. (2020). Engineering education 5.0: Continuously evolving engineering education. *International Journal of Engineering Education*, 36(6), 1814–1832.
- Linsenmeier, R. A. (2013). Medical and biological engineering in the next 20 years: The promise and the challenges. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 60(7), 1767–1775. doi:10.1109/TBME.2013.2264829
- Lu, Y., Xu, X., & Wang, L. (2020). Smart manufacturing process and system automation—a critical review of the standards and envisioned scenarios. *Journal of Manufacturing Systems*, 56, 312–325.
- Lyytinen, A., Kohtamäki, V., Kivistö, J., Pekkola, E., & Hölttä, S. (2017). Scenarios of quality assurance of stakeholder relationships in Finnish higher education institutions. *Quality in Higher Education*, 23(1), 35–49. doi:10.1080/13538322.2017.1294410
- Matos, F., Bernardino, J., Durães, J., & Cunha, J. (2024). A Survey on Sensor Failures in Autonomous Vehicles: Challenges and Solutions. *Sensors*, 24(16). doi:10.3390/s24165108
- Odetoeye, O. A., & Odetoeye, T. E. (2021). Disruptive engineering: Maximizing the feedback relationship between industry 4.0 and the Nigerian engineering education sector. *Fuoye Journal of Engineering and Technology*, 6(4).
- Rane, N. L. (2023). Integrating Leading-Edge Artificial Intelligence (AI), Internet of Things (IoT), and Big Data Technologies for Smart and Sustainable Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry: Challenges and Future Directions. *International Journal of Data Science and Big Data Analytics*, 3(2), 73–95. doi:10.51483/ijdsbda.3.2.2023.73-95
- Sattler, M. L., Sattler, A. M., Foundation, N. S., Commission, T., Quality, E., Power, L., ... Rani, M. (2012). AC 2012-4251: INTEGRATING SUSTAINABILITY ACROSS THE CUR- Integrating Sustainability across the Curriculum : Engineering Sustainable Engineers.
- Satyannarayana, B. (2025). *Bioengineering Tomorrow : A Comprehensive Look at Emerging Technologies*.
- Schoen, M. (2018). Integrating Writing and Engineering Instruction to build a foundation for student success in their engineering disciplines. *Proceedings of the Canadian Engineering Education Association (CEEAA)*, 1–8. doi:10.24908/pceea.v0i0.13089
- Tsigie, S. E., & Dagnaw, G. A. (2021). The Role of Robotics Technology and Internet of Things for Industry 4.0 Realization. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 10(2), 1331–1339. doi:10.30534/ijatcse/2021/1201022021
- Urrea, C., & Kern, J. (2025). Recent Advances and Challenges in Industrial Robotics: A Systematic Review of Technological Trends and Emerging Applications. *Processes*, 13(3), 1–20. doi:10.3390/pr13030832
- Wang, X. (2019). Bioartificial Organ Manufacturing Technologies. *Cell Transplantation*, 28(1), 5–17. doi:10.1177/0963689718809918
- Willner, O., Powell, D., Duchi, A., & Schönsleben, P. (2014). Globally distributed engineering processes: Making the distinction between engineer-To-order and make-To-order. *Procedia CIRP*, 17, 663–668. doi:10.1016/j.procir.2014.02.054
- Xu, L. (2025). Innovative interdisciplinary models in engineering education : Transforming practices across global, 2(January), 129–144.

- Zhao, Z., & Zhang, Y. (2020). Impact of Smart City Planning and Construction on Economic and Social Benefits Based on Big Data Analysis. *Complexity*, 2020. doi:10.1155/2020/8879132
- Zizic, M. C., Mladineo, M., Gjeldum, N., & Celent, L. (2022). of Paradigm Shift for the People , Organization and Technology. *Energies*.

İşbirliğiyle Çevre Dostu Mühendislik Çözümleri

Dr. Melike AVER GÜRBÜZ¹

1- Dr. Arş. Gör. Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
maver@firat.edu.tr, 0000-0002-3852-5713

ÖZET

Günümüzün karmaşık ve çeşitli çevre sorunlarına etkili çözümler üretmek, teknik bilgiyle sınırlı kalan yaklaşımların ötesine geçmenin yanında farklı mühendislik disiplinlerinin ortak hedefler etrafında çalışmasını zorunlu kılmıştır. Çevresel sürdürülebilirlik, diğer toplumsal ve ekonomik yönleriyle beraber değerlendirildiğinde; enerji, çevre, inşaat, malzeme ve su mühendisliği gibi farklı arenalarda, bilgi ve deneyimlerin bir araya getirilmesi ile yenilikçi ve etkili çözümler üretmeyi mümkün kılmaktadır. Bu kitap bölümünde, çevre sorunlarına etkili çözümler üretmek için disiplinler arası yaklaşımlar çerçevesinde, farklı disiplinlerin bir arada çalışmasının sağladığı katkılar üzerine çalışmalar derlenmiştir. Çevre dostu çözümlerin yalnızca ekolojik etkileri azaltmakla kalmadığını, aynı zamanda ekonomik verimlilik ve toplumsal fayda gibi çok yönlü kazanımlar da sağladığını görülmektedir. Sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşma yolunda mühendislik disiplinleri arasındaki etkileşimin daha da derinleşmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Disiplinler arası etkileşim ve toplumsal bağlamın entegrasyonu, çevre dostu mühendislik uygulamalarının uzun vadede sürdürülebilirliğini sağlam temellere oturtmak açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Anahtar Kelimeler – İşbirliği, Çevre, Mühendislik

GİRİŞ

Günümüzde çevresel sürdürülebilirlik, mühendislik disiplinleri açısından yalnızca teknik bir gereklilik değil, aynı zamanda etik bir sorumluluk ve toplumsal bir zorunluluk haline gelmiştir. Hızla değişen iklim koşulları, sınırlı doğal kaynakların tükenme riski ve biyolojik çeşitlilikteki dramatik azalma gibi küresel çevre sorunları, mühendislik uygulamalarının temel prensiplerinin yeniden düşünülmesini ve dönüştürülmesini gerektirmektedir. Bu dönüşüm, yalnızca mevcut mühendislik çözümlerinin güncellenmesiyle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda mühendislik yaklaşımının özünde daha bütüncül, kapsayıcı ve uzun vadeli düşünebilen bir bakış açısının yerleştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Hariram, Mekha, Suganthan, ve Sudhakar, 2023).

Teknik bilgi birikimi ve mühendislik becerileri kadar, disiplinler arası iş birliğini, ortak vizyon geliştirme kapasitesini ve yenilikçi düşünce sistemlerinin mühendislik pratiklerine entegre edilmesini de içeren süreçler gerekmektedir. Çevre dostu mühendislik çözümleri, çevresel etkilerin

minimize edilmesini hedefleyen; malzeme seçiminden üretim süreçlerine, enerji kullanımından atık yönetimine kadar geniş bir yelpazede uygulanan tasarım, süreç ve teknoloji bütünü ifade etmektedir (Nwulu, Elete, Omomo, ve Ayotunde, 2023).

Bu kültür, yalnızca farklı mühendislik disiplinlerinin değil, aynı zamanda sosyal bilimler, ekonomi ve politika yapıcı aktörlerin de sürece entegre edilmesini sağlayarak daha geniş ve kapsayıcı çözümler üretilmesine olanak tanır. Paydaşlar arasında geliştirilecek ortak dil ve anlayış, çevre dostu mühendislik çözümlerinin toplum tarafından benimsenmesini kolaylaştıracak; böylece yalnızca teknik değil, aynı zamanda toplumsal olarak da sürdürülebilir sistemlerin inşasına katkı sağlayacaktır (Kapucu, Ge, Rott, ve Isgandar, 2024).

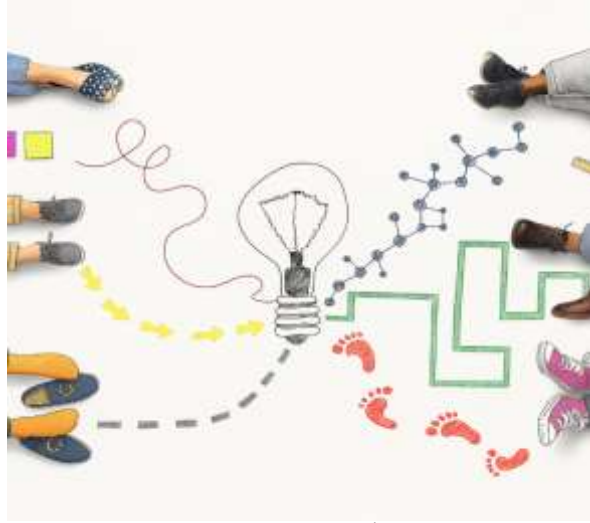
Çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada, mühendislik sistemlerinin iyileştirilmesi yeterli olmamakla beraber bu sistemlerin arkasındaki düşünce biçimlerinin, iş yapma şekillerinin ve etkileşim ağlarının yeniden yapılandırılmasıyla mümkün hale gelebilmektedir. Disiplinler arası iş birliği temelli bu yeni mühendislik anlayışı, çevresel sorunlara karşı daha dirençli, daha kapsayıcı ve daha adil çözümler üretmenin anahtarı olarak ön plana çıkmaktadır.

İŞBİRLİĞİ VE ÇOK DİSİPLİNLİ YAKLAŞIMLAR

Günümüzün karmaşık çevresel sorunları karşısında, farklı mühendislik alanlarının uzmanlıklarından bütüncül bir yaklaşımla yararlanmak, çözüm süreçlerinin daha yaratıcı, yenilikçi ve etkili hale gelmesini sağlamaktadır. Çevre dostu mühendislik çözümlerinin etkin biçimde geliştirilebilmesi, yalnızca teknik bilgiye dayalı bireysel çabalarla değil, mühendislik disiplinleri arasında kurulacak güçlü ve sürdürülebilir iş birlikleriyle mümkündür. Bu bağlamda, disiplinler arası iş birliği, yalnızca teknik kapasiteyi artırmakla kalmayıp, aynı zamanda çevresel etkileri daha geniş ölçekte değerlendiren, ekonomik ve toplumsal yönleri de kapsayan kapsamlı çözümlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Shrivastava, Stafford Smith, O'Brien, ve Zsolnai, 2020).

Her mühendislik disiplini, farklı bilgi alanları, yöntemsel yaklaşımlar ve uygulama pratikleriyle çevresel sorunlara farklı açılardan katkı sunmaktadır. Örneğin, malzeme mühendisliği sürdürülebilir ve geri dönüştürülebilir malzeme çözümleri geliştirirken; çevre mühendisliği atık yönetimi ve doğal kaynakların korunması üzerine odaklanmakta, inşaat mühendisliği ise sürdürülebilir yapı tasarımlarını uygulamaya koymaktadır. Bu farklı uzmanlıkların bir araya gelmesiyle ortaya çıkan etkileşim, hem mühendislik projelerinin etki alanını genişletmekte hem de projelerin yalnızca çevresel değil, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik hedeflerine de

hizmet etmesini sağlamaktadır (Sukla, Jakhar, Begum, Jasmine, ve Sundaram, 2024).



Şekil 1: Çok Disiplinli Çalışma İllüstrasyon

Disiplinler arası iş birliği aynı zamanda, mühendislik projelerinin toplumun gerçek ihtiyaçlarını ve önceliklerini dikkate alan daha kapsayıcı ve katılımcı çözümler üretmesini mümkün kılmaktadır. Bu tür iş birlikleri, mühendisliği sadece teknik bir faaliyet alanı olarak değil, aynı zamanda toplumla doğrudan etkileşim içinde olan bir sorumluluk alanı olarak yeniden konumlandırmaktadır. Böylece çevre dostu mühendislik, yalnızca doğa dostu teknolojiler üretmekle kalmayıp, aynı zamanda toplumsal refahı gözeten, ekonomik sürdürülebilirliği destekleyen ve insan merkezli bir dönüşümün aracı haline gelmektedir (Barker Scott ve Manning, 2024).

Tablo 1. Disiplinler Arası İşbirliği Gerekltiren Mühendislik Uygulamaları

Uygulama Alanı	Gerekli Disiplinler	Ortak Çıktı	Çevresel Etki
Akıllı şehir altyapıları	İnşaat + Enerji + Çevre + Yazılım	Akıllı ulaşım, enerji yönetimi	Düşük karbon
Sıfır enerjili binalar	Mimarlık + İnşaat + Malzeme + Enerji	Net sıfır tüketim	Enerji verimliliği
Su geri kazanım sistemleri	Su + Çevre + İnşaat	Gri su, yağmur suyu	Su tasarrufu
Geri dönüştürülebilir kompozit tasarımı	Malzeme + Kimya	Hafif kompozit	Kaynak korunumu
Atık yönetim tesisleri	Çevre + Makine + Endüstri	Verimli süreçler	Atık azaltımı

Sektörel farklılıklar göz önünde bulundurulduğunda, disiplinler arası iş birliği, evrensel mühendislik anlayışının gelişmesini destekleyen bir yapı sunar. Enerji, ulaşım, altyapı, üretim ve su yönetimi gibi farklı sektörlerde, mühendislik çözümlerinin başarısı, çeşitli disiplinlerin bir araya gelerek oluşturduğu sinerjiye bağlıdır. Bu çerçevede disiplinler arası çalışma kültürü, hem mühendislik eğitiminde hem de uygulamalı projelerde teşvik edilmesi gereken temel bir ilke olarak öne çıkmaktadır.

Çevre dostu mühendislik uygulamalarının kalıcılığı ve etkinliği, yalnızca teknik mükemmeliyetle değil; aynı zamanda disiplinler arası iş birliğine dayanan, insan ve doğa odaklı, sürdürülebilirlik eksenli bir mühendislik vizyonunun benimsenmesiyle sağlanabilir. Bu vizyon, geleceğin mühendisliğini şekillendirecek temel yapı taşlarından biridir.

Enerji Verimliliği ve Yenilenebilir Enerji Sistemleri

Enerji verimliliği ve sürdürülebilir yapı tasarımı, günümüzün çevresel ve toplumsal zorluklarına yanıt arayan mühendislik ve mimarlık disiplinlerinin ortak sorumluluğu hâline gelmiştir. Bu hedeflerin hayata geçirilebilmesi için enerji mühendisliği, inşaat mühendisliği, çevre mühendisliği ve mimarlık gibi alanlar arasında bütüncül ve koordineli bir iş birliği gerekmektedir. Her bir disiplin, kendi uzmanlık alanına özgü teknik bilgi birikimi ve yaklaşımlarını bu ortak paydada bir araya getirerek, yalnızca enerji tüketimini azaltmaya değil, aynı zamanda çevresel etkilerin en aza indirilmesine katkıda bulunur (Hafez vd., 2023).



Şekil 2: Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Özellikle pasif ev tasarımları gibi enerji etkin yapı konseptlerinin geliştirilmesi, bu disiplinler arası sinerjinin en somut örneklerinden birini oluşturur. Pasif evler, doğal kaynaklardan (güneş ışıınımı, rüzgâr, yer sıcaklığı vb.) maksimum düzeyde yararlanmayı hedefleyen ve minimum düzeyde dış enerjiye ihtiyaç duyan yapılardır. Bu tür yapılarda mimarlar, binanın yönelimi, konumu, formu ve malzeme seçimi gibi parametreleri enerji kazanımı ve doğal aydınlatma açısından optimize ederken; inşaat mühendisleri, yapının statik bütünlüğünü koruyacak şekilde enerji kayıplarını minimize eden yalıtım sistemleri geliştirir. Aynı zamanda çevre mühendisleri, yapıların çevresel etkilerini değerlendirerek hava kalitesi, su yönetimi ve atık azaltımı gibi konularda sürdürülebilirliği destekleyen çözümler üretir (Priyasad, Don, Priyasad, ve Don, 2022).

Yenilenebilir enerji teknolojilerinin yapı sistemlerine entegrasyonu da disiplinler arası iş birliğinin önemini bir kez daha ortaya koyar. Güneş panelleri ve rüzgâr türbinleri gibi sistemlerin entegre edilmesi yalnızca enerji mühendislerinin teknik hesaplamalarıyla sınırlı değildir. Mimarların bu sistemleri yapının estetik ve işlevselliğini bozmadan yerleştirmesi, inşaat mühendislerinin yapısal güvenliği garanti altına alması ve çevre mühendislerinin bu sistemlerin çevresel etkilerini göz önünde bulundurarak entegrasyonu yönlendirmesi gerekir. Örneğin, güneş paneli sistemlerinin verimliliğini artırmak için doğru açı ve yön tayini, sistemin yapıya entegrasyonunda yapısal dayanıklılığın sağlanması ve panellerin uzun vadede çevresel etkilerinin değerlendirilmesi birlikte ele alınmalıdır. Benzer şekilde, rüzgâr enerjisi sistemlerinde yer seçimi, rüzgâr potansiyeli analizi, gürültü kontrolü ve altyapı gereklilikleri tüm bu disiplinlerin ortak çabasını gerektirir (Orikpete, Ikemba, ve Ewim, 2023).

Tablo 2. Yenilenebilir Enerji Teknolojilerinin Karşılaştırılması

Teknoloji	Verimlilik (%)	Yaşam Döngüsü Karbon Ayak İzi (g CO₂/kWh)	Avantajları
Güneş PV	17–22	40–60	Bakım düşük, her bölgede uygulanabilir
Rüzgâr Türbini	25–45	12	Uzun ömür, yüksek verim
Biyokütle	20–30	40–80	Atık değerlendirir
Jeotermal	10–20	5–20	Kesintisiz üretim
Hidroelektrik	30–60	4–15	Uzun ömür, stabil enerji

Tüm bu süreçlerin başarısı, yalnızca teknik yeterliliklere değil, aynı zamanda farklı disiplinler arasında geliştirilen sağlıklı iletişim, karşılıklı saygı ve ortak bir hedef doğrultusunda çalışma kültürüne bağlıdır. Disiplinler arası iş birliği, tasarım sürecinin her aşamasında karşılaşılan sorunlara kolektif çözüm geliştirme olanağı sunar. Bu iş birliği sayesinde, yalnızca mühendislik sistemlerinin verimliliği artmakla kalmaz; aynı zamanda daha yaşanabilir, çevreyle uyumlu ve uzun ömürlü yapılar ortaya çıkar.

Sürdürülebilir yapıların tasarımı ve yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu, disiplinler arası bir yaklaşımı zorunlu kılar. Bu yaklaşım, hem mühendislikte hem de mimarlıkta teknik uzmanlıkların bir araya gelerek enerji verimliliğini artırdığı, çevresel etkileri azalttığı ve yapıların kullanıcılar açısından daha yaşanabilir kılındığı çok katmanlı bir başarı modeline işaret eder. Geleceğin sürdürülebilir kentleri, ancak bu tür çok disiplinli iş birliklerinin yaygınlaşmasıyla mümkün olacaktır.

Sürdürülebilir İnşaat ve Malzeme Seçimi

Sürdürülebilir inşaat uygulamaları, yalnızca enerji verimliliği ve yapısal dayanıklılıkla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda çevresel etkilerin azaltılması, kaynakların verimli kullanımı ve uzun vadeli çevresel sorumluluk ilkeleriyle de şekillenmektedir. Bu doğrultuda, inşaat mühendisliği, çevre mühendisliği ve malzeme bilimleri disiplinleri arasında kurulacak etkili bir işbirliği, sürdürülebilir yapıların tasarımı ve inşasında

temel bir rol üstlenmektedir. Disiplinler arası bu bütüncül yaklaşım, yapıların yalnızca teknik performansını değil, aynı zamanda çevreyle olan etkileşimini de optimize etmeyi mümkün kılmaktadır.

İnşaat mühendisliği, yapıların güvenliği, dayanımı ve uzun ömürlülüğü ile ilgili kritik kararları yönlendirirken; çevre mühendisliği, yapıların çevreye olan zararlı etkilerini en aza indirmek üzere yaşam döngüsü analizleri, atık yönetimi ve doğal kaynak kullanımı gibi parametreleri entegre eder. Malzeme bilimleri ise yapı malzemelerinin mekanik, termal ve çevresel performansını değerlendirerek, uygun malzeme seçiminde belirleyici bir rol oynar. Bu disiplinlerin ortak katkısı, yalnızca yapıların enerji tüketimini azaltmaya yönelik değil, aynı zamanda karbon salınımını düşüren ve çevresel ayak izini minimize eden çözümler geliştirilmesini sağlar (Barbhuiya, Das, ve Adak, 2024).

Özellikle geri dönüştürülmüş ve yeniden kullanılabilir malzemelerin inşaat sektöründe kullanımına yönelik artan ilgi, sürdürülebilirlik hedefleri açısından önemli bir stratejik açılım sunmaktadır. Bu tür malzemeler, hem doğal kaynak tüketiminin azaltılması hem de atık yönetiminin daha etkin hale getirilmesi açısından çift yönlü bir kazanım sağlar. Örneğin, geri dönüştürülmüş çelik, beton, cam ve plastik malzemeler, hem yapıların çevresel etkilerini hem de toplam maliyetlerini düşüren alternatifler olarak öne çıkmaktadır. Bu süreçte inşaat mühendisleri, bu malzemelerin yapısal bütünlüğe etkilerini değerlendirirken; malzeme bilimcileri, performans ve dayanıklılık testleriyle teknik uygunluğu sağlar; çevre mühendisleri ise bu malzemelerin yaşam döngüsündeki çevresel yüklerini analiz eder (Popescu, Dissanayake, Mansi, ve Stancu, 2024).

Tablo 3 – Sürdürülebilir İnşaat Malzemelerinin Karşılaştırılması

Malzeme	Kaynak Türü	Karbon Ayak İzi (kg CO ₂ /kg)	Avantajlar	Dezavantajlar
Geri dönüştürülmüş beton	İnşaat atığı	0.2–0.4	Maliyet düşük, atık azalır	Dayanım değişken
Ahşap	Yenilenebilir	-1 ile 0.1	Karbon depolar	Yangın riski
Geri dönüştürülmüş çelik	Metal atığı	0.4–1.2	Yüksek dayanım	Enerji yoğun üretim
Biyokompozit	Doğal lif	0.1–0.3	Hafif, ekolojik	Nem hassas
Aerogel izolasyon	Kimyasal üretim	0.2–0.6	En yüksek yalıtım	Maliyet yüksek

Benzer şekilde, yapıların enerji performansını artırmaya yönelik olarak kullanılan ısı yalıtım malzemeleri de bu disiplinler arası işbirliğinin bir başka örneğini sunar. Etkili bir ısı yalıtımı, yalnızca enerji tüketimini düşürerek ekonomik fayda sağlamakla kalmaz, aynı zamanda karbon emisyonlarını da azaltarak küresel iklim hedeflerine katkıda bulunur. Ancak bu sistemlerin başarılı bir şekilde entegre edilmesi, malzeme dayanıklılığı, yapısal bütünlük ve çevresel uygunluk gibi birçok değişkenin birlikte değerlendirilmesini gerektirir. Malzeme bilimcilerinin yeni nesil yalıtım malzemeleri üzerine yaptığı araştırmalar, çevre mühendislerinin bu malzemelerin çevresel etkilerini analiz etmesiyle birleştiğinde, inşaat mühendislerinin yapı ölçeğinde daha bütüncül çözümler geliştirmesine olanak tanır (Ali, Issa, ve Elshaer, 2024).

Doğal kaynaklardan türemeyen alternatif malzemelerin kullanımı da sürdürülebilirlik bağlamında kritik bir yaklaşımdır. Bu malzemelerin seçiminde yalnızca çevresel uygunluk değil, aynı zamanda taşınabilirlik, yerel erişilebilirlik ve lojistik gereksinimler de dikkate alınmalıdır. Malzeme bilimciler, bu tür malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini analiz ederken; çevre mühendisleri üretim süreçlerinin ekolojik etkilerini değerlendirir; inşaat mühendisleri ise yapıların performansına olan katkısını inceler. Bu tür çok yönlü değerlendirmeler, sürdürülebilir üretim ve tedarik zincirlerinin yapı sektörüyle uyumlu hale getirilmesine katkı sağlar (Bontempi vd., 2021).

Sürdürülebilir inşaat uygulamalarında başarı, yalnızca teknik yeterliliklere değil, farklı mühendislik ve bilim alanları arasındaki etkili bilgi paylaşımına ve ortak hedefler doğrultusunda çalışmaya bağlıdır. Malzeme ömrü, geri dönüştürülebilirlik, enerji verimliliği, maliyet etkinliği ve çevresel sürdürülebilirlik gibi çok boyutlu kriterler, bu disiplinlerin birlikte çalışmasını zorunlu kılar. Bu sinerji sayesinde, yalnızca çevreye duyarlı değil, aynı zamanda ekonomik olarak da rasyonel çözümler geliştirilebilir. Böylece, inşa edilen yapılar yalnızca bugünün değil, geleceğin ihtiyaçlarına da cevap verebilecek nitelikte olur; sürdürülebilir kalkınma hedeflerine somut katkılar sunan örnekler hâline gelir.

Atık Yönetimi ve Döngüsel Ekonomi

Günümüzde yapı sektörünün karşı karşıya kaldığı en büyük sorunsallardan biri, artan enerji talebi ve inşaat faaliyetlerinin çevresel etkileridir. Bu bağlamda, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda geliştirilen yeni nesil inşaat uygulamaları, yalnızca yapıların fiziksel dayanıklılığını değil, aynı zamanda çevresel duyarlılığı da gözeten bütüncül yaklaşımlar gerektirmektedir. İnşaat mühendisliği, çevre mühendisliği ve malzeme bilimleri gibi farklı fakat tamamlayıcı mühendislik disiplinlerinin etkileşim hâlinde çalışması, bu dönüşümün temel yapı taşlarından biridir.



Şekil 3: Döngüsel Ekonominin şematik gösterimi

Disiplinlerarası iş birliği sayesinde, sürdürülebilir inşaat projelerinde enerji verimliliği ve çevresel etki azaltımı birlikte ele alınmakta; yapı malzemelerinin seçimi, kullanım ömrü, geri dönüştürülebilirlik özellikleri ve üretim süreçleri bütüncül olarak değerlendirilmektedir. Bu çerçevede, inşaat mühendisliği yapıların statik ve dinamik dayanıklılığını sağlayarak güvenli ve uzun ömürlü yapılar inşa ederken; çevre mühendisliği, doğal kaynakların yönetimi, atık kontrolü ve karbon ayak izinin azaltılması gibi konularda sürdürülebilirlik odaklı çözümler sunmaktadır. Malzeme bilimleri ise yapı bileşenlerinin kimyasal, mekanik ve termal performanslarına odaklanarak, çevresel etkisi düşük, yüksek verimli malzeme alternatiflerinin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır (Emma, 2024).

Tablo 4. Döngüsel Ekonomi Uygulamaları ve Kazanımlar

Döngüsel Ekonomi Uygulaması	Açıklama	Sektör	Sağladığı Fayda
Geri dönüşüm	Malzemelerin yeniden işlenmesi	İnşaat, plastik, metal	Atık azalması
Yeniden kullanım	Malzeme/ürün tekrar kullanımı	Yapı sektörü	Kaynak tasarrufu
Yeniden üretim	Ürün yenileme	Otomotiv	Enerji tasarrufu
Enerji geri kazanımı	Atığın enerjiye dönüşmesi	Endüstri	Emisyon düşüşü
Paylaşımli ekonomi	Kaynak paylaşımı	Ulaşım	Karbon azaltımı

Özellikle geri dönüştürülmüş malzemelerin yapı sektöründe kullanımı, hem kaynak tüketiminin azaltılması hem de çevreye olan olumsuz etkilerin en aza indirilmesi açısından kritik bir stratejidir. Bu bağlamda, inşaat mühendisliği alanında, geri dönüştürülmüş malzemelerin yapı performansına

etkilerini değerlendirirken; malzeme bilimcileri bu malzemelerin dayanıklılığı, fiziksel bütünlüğü ve uzun vadeli performansı üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Çevre mühendisliğinde ise geri dönüşüm süreçlerinin çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerini analiz edilerek, uygulamaların doğa dostu standartlarla uyumlu olması sağlanır. Örneğin, geri dönüştürülmüş beton, çelik, cam ve plastik gibi malzemeler, hem yapı maliyetlerini düşürmekte hem de karbon salınımını önemli ölçüde azaltmaktadır.

Çevre mühendislerinin malzeme yaşam döngüsü analizleri ile elde ettiği veriler, inşaat mühendislerinin yapı sistemleri üzerindeki teknik değerlendirmeleri ve malzeme bilimcilerinin ısı iletkenliği, dayanım ve sürdürülebilirlik konularındaki katkıları ile entegre edilmelidir. Bu tür bir iş birliği, yalnızca yapıların enerji verimliliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda sera gazı emisyonlarının azaltılmasına da önemli katkılar sunar (Aditya vd., 2017).

Doğal kaynaklardan türemeyen, sentetik ya da yenilikçi yöntemlerle geliştirilen malzemeler de sürdürülebilir yapı sektöründe giderek daha fazla tercih edilmektedir. Bu malzemelerin değerlendirilmesinde sadece fiziksel ve yapısal özellikler değil, aynı zamanda tedarik zinciri, lojistik kolaylık, geri dönüşüm potansiyeli ve üretim süreçlerinin çevresel etkileri de dikkate alınmalıdır. Malzeme bilimcileri, bu tür malzemelerin davranışlarını laboratuvar ortamında detaylı biçimde incelerken; çevre mühendisleri üretim süreçlerinin ekolojik ayak izini değerlendirir; inşaat mühendisleri ise söz konusu malzemelerin sahadaki uygulanabilirliğini test eder. Bu tür disiplinlerarası değerlendirmeler, malzeme seçiminde sürdürülebilirlik kriterlerini bilimsel temellere dayandırarak yapıların genel çevresel performansını artırır (Zhao vd., 2023).

Sürdürülebilir üretim süreçlerinin entegre edilmesiyle, malzeme seçiminin yalnızca teknik değil, aynı zamanda çevresel ve ekonomik boyutları da dikkate alınarak çok kriterli bir değerlendirme yapılması sağlanır. İnşaat mühendisliği, çevre mühendisliği ve malzeme bilimleri arasındaki etkili iş birliği, sürdürülebilir yapıların planlanmasından uygulamaya kadar olan tüm süreçlerde merkezi bir rol oynar. Dolayısıyla, sürdürülebilir inşaat yalnızca bir mühendislik hedefi değil, aynı zamanda disiplinler arası etkileşimle şekillenen bütüncül bir toplumsal sorumluluk anlayışı olarak da değerlendirilmektedir.

Su Kaynakları Yönetimi ve Sıfır Su Tüketimi Teknolojileri

Küresel ölçekte artan nüfus, iklim değişikliği ve kentleşmenin hız kazanmasıyla birlikte su kaynakları üzerindeki baskıyı her geçen gün artırmaktadır. Özellikle su kıtlığı, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde toplumsal refahı ve ekonomik sürdürülebilirliği tehdit eden temel sorunlardan biri hâline gelmiştir. Bu bağlamda, suyun sürdürülebilir ve etkin

bir şekilde yönetilmesi yalnızca teknik değil, aynı zamanda sosyal, çevresel ve ekonomik boyutları içeren çok boyutlu bir yaklaşımı zorunlu kılmaktadır. Bu tür bir yaklaşımın başarısı ise yalnızca tek bir disiplinin çabasıyla değil; su mühendisliği, çevre mühendisliği, inşaat mühendisliği ve veri analitiği gibi alanların entegre biçimde çalışmasıyla mümkündür.



Şekil 4: Su Tüketim Oranları

Disiplinlerarası iş birliği sayesinde, su yönetimi alanında daha bütüncül ve etkili çözümler geliştirilebilmekte; her bir disiplinin sağladığı uzmanlık, karmaşık su sorunlarının farklı boyutlarını eş zamanlı olarak ele almayı mümkün kılmaktadır. Su mühendisliği, suyun fiziksel davranışlarını, akışını ve dağıtım sistemlerini optimize ederken; çevre mühendisliği su kalitesini, kirlilik kontrolünü ve ekosistem sağlığını gözeterek sürdürülebilir yaklaşımlar geliştirmektedir. İnşaat mühendisliği, bu süreçlerin uygulanabilirliğini sağlayacak altyapı sistemlerini tasarlayıp inşa ederken, veri analitiği ise elde edilen büyük veri kümelerinden anlamlı sonuçlar çıkararak karar alma süreçlerine bilimsel temel kazandırmaktadır. Bu disiplinlerin birlikte çalışması, yalnızca suyun etkin kullanımını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda su kaynaklarının uzun vadeli korunmasına yönelik stratejik yaklaşımlar üretir (Loucks ve Van Beek, 2017).

Bu iş birliğinin somut çıktılarından biri olan *akıllı sulama sistemleri*, suyun yalnızca ihtiyaç duyulan miktarda ve uygun zamanda kullanılmasını sağlayarak hem su hem de enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu sistemlerde kullanılan sensörler, hava durumu verileri ve toprak nem ölçümleri gibi çeşitli veri kaynakları, veri analitiği algoritmalarıyla yorumlanarak sulama sistemlerine gerçek zamanlı geri bildirimler sunar. Sulamanın bu şekilde optimize edilmesi, su israfını önlerken aynı zamanda bitki sağlığını da olumlu yönde etkiler. Bu sistemlerin altyapısal planlaması ve uygulaması ise inşaat mühendisliği uzmanlığına dayanmaktadır. Diğer yandan, çevre mühendisliği sulama süreçlerinin ekosistem üzerindeki etkilerini değerlendirerek doğaya zarar vermeyecek çözümler üretir. Böylece, akıllı sulama sistemleri teknik, çevresel ve ekonomik boyutlarıyla entegre bir çözüm haline gelir.

Tablo 5. Su Yönetimi Teknolojileri Karşılaştırması

Teknoloji	Su Tasarrufu (%)	Enerji Kullanımı	Uygulama Alanı	Avantaj
Akıllı sulama	30–60	Düşük	Tarım	Su israfını önler
Gri su geri kazanımı	%40	Orta	Konut/oteller	Yeniden kullanım sağlar
Yağmur suyu hasadı	Bölgeye bağlı	Çok düşük	Kent altyapısı	Yerel su üretimi
Membran arıtma	%90	Yüksek	Endüstri	Yüksek arıtma verimi
Doğal arıtma sistemleri	%50–70	Çok düşük	Kırsal	Düşük maliyet

Su arıtma teknolojileri, sürdürülebilir su yönetiminin bir diğer temel bileşenidir. Bu teknolojiler sayesinde kirli su kaynakları yeniden kullanıma kazandırılabilenmekte, böylece doğal su kaynakları üzerindeki baskı azaltılmaktadır. Bu süreçte, çevre mühendisliği suyun kirletici maddelerden arındırılması için gerekli olan biyolojik, kimyasal ve fiziksel arıtma tekniklerini geliştirirken; su mühendisliği bu süreçlerin verimliliğini ve maliyet etkinliğini artıracak optimizasyon stratejileri sunmaktadır. İnşaat mühendisliği ise bu teknolojilerin uygulanabileceği dayanıklı ve sürdürülebilir altyapı sistemlerini tasarlamakta; veri analitiği ise arıtma tesislerinden elde edilen performans verilerini analiz ederek süreçlerin sürekli iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Özellikle gri suyun yeniden kullanımı, endüstriyel suyun arıtılması ve döngüsel su sistemlerinin geliştirilmesi gibi konular, bu disiplinler arası çalışmanın doğrudan ürünüdür (Tom ve Pawels, 2022).

Yağmur suyu hasadı, suyun yerel olarak elde edilmesini ve kullanılmasını sağlayan yenilikçi bir yaklaşımdır. Bu sistemler, kentlerde çatı, yol ve diğer yüzeylerden toplanan yağmur sularının depolanarak sulama, temizlik gibi ikincil kullanım alanlarında değerlendirilmesine imkân tanır. Yağmur suyu hasadı sistemlerinin tasarımı ve uygulanması, inşaat mühendislerinin yapısal dayanıklılık ve sistem verimliliğine yönelik bilgi birikimi ile mümkün olurken; çevre mühendisleri bu suların kalitesini, kullanım potansiyelini ve çevresel etkilerini değerlendirmektedir. Su mühendisleri, sistemin bölgesel hidrolik dengesine ve yer altı su kaynakları üzerindeki etkilerine dair analizler gerçekleştirirken; veri analitiği sayesinde yağış tahminleri, su toplama kapasitesi ve kullanım verileri üzerinden dinamik sistem planlamaları yapılabilmektedir (Silva, 2023).

Tüm bu sistemlerin geliştirilmesi yalnızca çevresel fayda sağlamakla kalmaz, aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirliğe de katkı sunar. Suyun

daha verimli kullanılması, enerji tüketiminin ve operasyonel maliyetlerin azaltılması, arıtma ve taşıma süreçlerinin daha az kaynakla gerçekleştirilmesi gibi avantajlar sayesinde, hem kamu kurumları hem de özel sektör için uzun vadeli tasarruf olanakları doğar. Aynı zamanda suyun yeniden kullanımı, iklim değişikliğinin etkilerini azaltma ve doğal kaynakların korunması gibi daha geniş çaplı çevresel hedeflere ulaşılmasında da kritik bir rol oynar.

Su mühendisliği, çevre mühendisliği, inşaat mühendisliği ve veri analitiği gibi disiplinlerin entegre şekilde çalışması, yalnızca teknik bir zorunluluk değil, aynı zamanda sürdürülebilir kalkınmanın temelini oluşturan etik bir sorumluluktur. Bu disiplinler arası iş birliği sayesinde, günümüzün ve geleceğin en kritik çevresel sorunlarından biri olan su kıtlığına karşı uzun vadeli, yenilikçi ve uygulanabilir çözümler geliştirilebilir. Suyun yalnızca bugünkü ihtiyaçlara değil, gelecek nesillerin haklarına da saygı gösterilerek yönetilmesi için bilimsel temelli, bütüncül ve insan odaklı yaklaşımlara her zamankinden daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır.

SOSYAL VE EKONOMİK ETKİLERİN ENTEGRE EDİLMESİ

Günümüz dünyasında çevresel sorunlar, yalnızca teknik müdahalelerle çözülebilecek meseleler olmaktan çıkmış; çok katmanlı, disiplinler arası çözümleri zorunlu kılan karmaşık yapılar haline gelmiştir. Özellikle çevre dostu mühendislik çözümleri, doğrudan çevre üzerinde olumlu etkiler yaratmayı hedeflemelerinin yanı sıra, bu çözümlerin uygulandığı toplumların sosyoekonomik yapılarıyla da yakından ilişkilidir. Bu nedenle, mühendislik uygulamalarının başarısını yalnızca teknik doğruluk ya da çevresel etkiler temelinde değerlendirmek yetersiz kalmakta; toplumsal kabul, ekonomik sürdürülebilirlik ve kültürel uyum gibi daha geniş çerçevelerde de analiz edilmesi gerekmektedir.

Çevre dostu mühendislik çözümleri, yalnızca çevreye olan duyarlılıklarıyla değil, aynı zamanda bireylerin ve toplumların yaşam kalitelerine, sosyal yapısına ve ekonomik refahına sağladığı katkılarla da değerlendirildiğinde bütüncül bir anlam kazanır. Bu bağlamda sürdürülebilirlik, yalnızca doğal kaynakların korunması anlamına gelmemekte; sosyal adalet, ekonomik istikrar ve kültürel uyum gibi bileşenleri de içeren çok boyutlu bir kavram olarak ele alınmalıdır. Bu tür bir yaklaşım, mühendislik disiplininin geleneksel sınırlarının ötesine geçerek; sosyal bilimciler, ekonomi uzmanları ve politika yapımcılar gibi farklı alanlardan aktörlerin katılımını gerektirir.

Tablo 6. Sosyoekonomik Etki Analizi İçin Değerlendirme Kriterleri

Kriter	Açıklama	Ölçüm Göstergeleri
Ekonomik sürdürülebilirlik	Maliyet, geri dönüş süresi	Payback period, LCOE
Sosyal kabul	Halkın projeye yaklaşımı	Anket, odak grup
Çevresel etki	Emisyon, atık, su kullanımı	CO ₂ değeri, su tüketimi
İş gücü katkısı	Yerel istihdam	İstihdam oranı
Politika uyumu	Yönetmelik ve standartlar	ISO 14001 uyumu

Mühendislik çözümlerinin *toplumsal etkileri*, projenin teknik başarısından bağımsız olarak uygulamanın kabul görmesini ve sürdürülebilirliğini doğrudan etkileyebilir. Yerel toplulukların ihtiyaçları, değer yargıları ve yaşam biçimleri, geliştirilen mühendislik uygulamalarının başarısında belirleyici rol oynamaktadır. Bu nedenle, sosyal bilimcilerin katkısı, mühendislik projelerinin yerel halk üzerindeki sosyal etkilerini anlamada ve bu projelere yönelik toplumsal katılımın artırılmasında kritik öneme sahiptir. Katılımcı yaklaşımların benimsenmesi, mühendislik uygulamalarının yalnızca “doğru” teknik çözümler olmasından öte, “uygun” ve “benimsenmiş” çözümler olmasını sağlar. Toplumsal duyarlılık ve yerel ihtiyaçlara uyum, mühendisliğin daha kapsayıcı ve etik bir zeminde uygulanmasını mümkün kılar (Franquesa vd., 2010).

Diğer yandan, *ekonomik sürdürülebilirlik*, çevre dostu mühendislik çözümlerinin uzun vadeli başarısında önemli bir belirleyicidir. Bu tür çözümler, başlangıç maliyetleri yüksek olabilse de, zamanla enerji verimliliği, kaynak tasarrufu, atık azaltımı ve bakım maliyetlerinin düşmesi gibi unsurlarla ekonomik avantajlar sunar. Bu ekonomik faydalar, yalnızca bütçesel anlamda değil, aynı zamanda sosyal maliyetlerin azaltılması ve yerel istihdam olanaklarının artırılması gibi toplumsal etkiler açısından da değerlidir. Ekonomi uzmanlarının katkısı, projelerin maliyet-yarar analizlerinin gerçekleştirilmesi, yatırım geri dönüş süresinin değerlendirilmesi ve sürdürülebilir finansman modellerinin geliştirilmesi açısından vazgeçilmezdir. Özellikle yeşil ekonomiye geçiş sürecinde, mühendislik projeleri yalnızca teknik çözümler üretmekle kalmamakta; yeni iş alanları yaratmak, yerel ekonomiyi canlandırmak ve çevre odaklı pazarlarda rekabet avantajı sağlamak gibi çok yönlü katkılar sunmaktadır (Rosário ve Figueiredo, 2024).

Bu çerçevede, mühendislik, sosyal bilimler ve ekonomi disiplinleri arasında kurulacak *etkileşimli ve eşitlikçi işbirlikleri*, çevre dostu çözümlerin toplumlar üzerinde kalıcı ve olumlu etkiler bırakmasını sağlayacak şekilde tasarlanmasını mümkün kılar. Böyle bir multidisipliner yaklaşım, çevresel sürdürülebilirliği toplumsal adalet ve ekonomik dayanıklılıkla bütünleştirerek, projelerin yalnızca bugün için değil, gelecek nesiller için de değer üretmesini sağlar. Mühendislik yalnızca çevreyi korumakla değil, aynı zamanda insanların yaşamlarını iyileştirmek ve ekonomik sistemleri daha adil ve dirençli hale getirmekle yükümlüdür. Bu sorumluluk, mühendisliği teknik bir meslekten ziyade, etik, sosyal ve ekonomik boyutları olan bir toplumsal pratik haline getirir.

Çevre dostu mühendislik çözümleri, başarılı ve sürdürülebilir olabilmek için çevresel hedeflerin ötesine geçmeli; bu çözümlerin toplumsal ve ekonomik etkileri de gözetilmelidir. Disiplinler arası işbirliği, yalnızca bilimsel etkinliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda mühendislik çözümlerinin daha kapsayıcı, uygulanabilir ve toplumsal olarak benimsenebilir hale gelmesini sağlar. Mühendislik projelerinin toplum yararını önceleyen, ekonomik anlamda sürdürülebilir ve çevresel sorumluluk taşıyan bir yaklaşımla tasarlanması, geleceğin dayanıklı ve adil altyapılarının temelini oluşturacaktır. Bu nedenle, çevre dostu mühendislik uygulamaları, yalnızca doğaya değil, aynı zamanda insan onuruna, toplumsal adalete ve ekonomik eşitliğe de hizmet etmelidir.

İş birliği Kültürünün Oluşması

Farklı mühendislik alanlarının yanı sıra sosyal bilimler, ekonomi ve çevre politikaları gibi disiplinlerin katkılarıyla şekillenen projelerde, işbirliği kültürünün yapısal ve etik temeller üzerine inşa edilmesi zorunludur. Başarılı bir işbirliği ortamı, yalnızca teknik çıktıları iyileştirmekle kalmaz; aynı zamanda proje ekiplerinin karşılıklı anlayış, güven ve ortak hedefler doğrultusunda birlikte üretme kapasitesini artırarak toplumsal ve çevresel etkiyi güçlendirir (Chou, Ngo, ve Tran, 2023).

İşbirliği kültürünün inşasında benimsenmesi gereken ilkeler, bireylerin mesleki yeterliliklerinin ötesinde, topluluk bilinciyle hareket etmelerini sağlayacak değerleri içermesi gerekmektedir. Bu bağlamda, açık iletişim, karşılıklı saygı, şeffaflık, sorumluluk paylaşımı ve ortak hedeflere bağlılık gibi prensipler, disiplinler arası sinerjinin sürdürülebilirliğini sağlamaktadır. Bu iletişim biçimi, yalnızca teknik dili değil, aynı zamanda ortak bir anlayış ve empati zeminini de içerir. Farklı bakış açılarıyla gelen katkılar, yenilikçiliği teşvik ederken aynı zamanda problemlerin daha bütüncül bir çerçevede ele alınmasına olanak tanımaktadır.

İkinci olarak, güven temelli ilişkilerin kurulması ve sürdürülmesi, işbirliği kültürünün olmazsa olmaz bileşenlerinden biridir. Mühendislik ekipleri ve diğer paydaşlar arasında oluşacak güven ortamı, bireylerin

katkılarını açıkça sunabilmelerini, hata yapma riskini alarak yaratıcı çözümler üretebilmelerini ve eleştirileri yapıcı bir biçimde değerlendirebilmelerini sağlamaktadır. Bu güven ortamı, aynı zamanda proje süreçlerinde karşılaşılan çatışmaların çözümünü kolaylaştırır ve ekip dinamiklerini olumlu yönde etkilemektedir.

Üçüncü olarak, disiplinler arası eşitlik ilkesi çerçevesinde, tüm paydaşların katkılarının değerli olduğu ve hiçbir uzmanlık alanının diğerine üstün olmadığı bir işbirliği anlayışı geliştirilmelidir. Bu anlayış, özellikle çevre dostu mühendislik projelerinde sosyal bilimcilerin, ekonomi uzmanlarının ve yerel topluluk temsilcilerinin katkılarının teknik uzmanlık kadar kıymetli olduğunun kabul edilmesini içerir. Farklı bilgi türlerinin eşit düzeyde değerlendirilmesi, projelerin hem teknik hem de sosyal olarak uygulanabilirliğini artırır.

Son olarak, sürekli öğrenmeye ve adaptasyona açık bir kültürün benimsenmesi, dinamik mühendislik projelerinin değişen koşullarına uyum sağlayabilme becerisini geliştirir. Bu prensip, hatalardan öğrenmeyi, deneyim paylaşımını ve ekip içi bilgi birikiminin kolektif şekilde artmasını destekleyen bir ortam yaratır. Esnekliğe dayalı bu yaklaşım, çevresel, sosyal ve teknolojik değişkenlikleri göz önünde bulunduran sürdürülebilir mühendislik çözümleri geliştirme noktasında belirleyici rol oynamaktadır. Mühendislik ekiplerinin ve diğer paydaşların yukarıda belirtilen ilkeler doğrultusunda hareket etmesi, hem proje çıktılarının kalitesini artıracak hem de sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılmasında önemli bir zemin oluşturacaktır.

Açık İletişim ve Şeffaflık: Mühendislik projelerinin sürdürülebilir başarısı, yalnızca teknik yeterlilik ya da yenilikçi çözümlerin üretimi ile değil, aynı zamanda bu çözümlerin geliştirilme sürecinde yer alan bireyler arasındaki sağlıklı iletişim, güvene dayalı işbirliği ve açık bilgi paylaşımı ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle çok disiplinli ekiplerle yürütülen çevre dostu mühendislik uygulamalarında, farklı uzmanlık alanlarından gelen paydaşların bir arada ve uyum içinde çalışabilmesi, ancak etkili bir iletişim kültürünün inşa edilmesiyle mümkündür.

İletişimin etkinliği kadar, iletişim süreçlerinin şeffaf bir biçimde yürütülmesi de mühendislik projelerinde güvenin tesis edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Şeffaflık; proje kapsamının, hedeflerinin, karşılaşılan zorlukların ve alınan kararların açık bir şekilde ifade edilmesini, tüm paydaşların bu süreçlere erişim hakkına sahip olmasını ve sürecin ilerleyişine dair düzenli bilgilendirmelerin yapılmasını kapsar. Bu yaklaşım, sadece yönetsel bir tercih değil; aynı zamanda etik bir sorumluluk olarak da değerlendirilmeli ve projeye katılan her bireyin bilgiye erişim ve katılım hakkı olduğu ilkesiyle hareket edilmelidir.

Şeffaf bir iletişim ortamı, proje sürecinde ortaya çıkabilecek risklerin ve belirsizliklerin erken evrede fark edilmesine imkân tanıyarak, hızlı ve etkili müdahalelerin gerçekleştirilmesine olanak sağlar. Aynı zamanda,

yanlış anlamaların, bilgi eksikliklerinin ya da rol çatışmalarının önüne geçilerek iş süreçlerinin verimliliği artırılır. Bu durum, özellikle karmaşık altyapı projelerinde ya da çevresel sürdürülebilirlik hedefi taşıyan girişimlerde büyük önem taşımaktadır. Zira, bu tür projelerde başarının anahtarı, yalnızca bireysel uzmanlıklar değil, bu uzmanlıkların birlikte anlamlı ve koordineli bir biçimde çalışabilme kapasitesidir.

Disiplinler arası mühendislik projelerinde etkili iletişim ve şeffaflık, yalnızca operasyonel kolaylık sağlamakla sınırlı kalmayan; aynı zamanda etik, sosyal ve stratejik düzeyde projeye değer katan temel unsurlar arasında yer almaktadır. Bu nedenle, mühendislik ekipleri ve proje yöneticileri, iletişim süreçlerini yapılandırırken katılımı, açıklığı ve karşılıklı güveni önceleyen bir yaklaşımı benimsemeli; bu kültürü, projenin her aşamasına entegre edecek mekanizmalar geliştirmelidir. Bu sayede, çevresel, toplumsal ve ekonomik açılardan sürdürülebilir mühendislik çözümlerinin temelleri çok daha sağlam bir biçimde inşa edilebilir.

Ortak Hedefler ve Değerler: Çevresel sürdürülebilirliğe hizmet eden mühendislik çözümlerinin başarısı, yalnızca teknik tasarımın doğruluğuna ya da teknolojik yeniliklere bağlı değildir. Bu tür projelerin uzun vadeli etkili ve kalıcı olabilmesi, proje sürecine dâhil olan tüm paydaşların ortak çevresel hedeflere ve sürdürülebilirlik değerlerine sahip olmasıyla doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda, çok disiplinli mühendislik projelerinde yer alan profesyonellerin yalnızca kendi uzmanlık alanları doğrultusunda değil; aynı zamanda ortak bir çevresel vizyon çerçevesinde hareket etmeleri, işbirliğinin niteliğini ve çıktılarının bütünselliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

Farklı mühendislik disiplinlerinden gelen bireylerin, çevresel sürdürülebilirlik ilkelerinde birleşmeleri, proje sürecinde karar alma mekanizmalarının uyum içinde işlemesini sağlar. Ortak hedefler, bireysel önceliklerin ya da kurumsal çıkarların ötesine geçilerek, kolektif fayda ekseninde bir birliktelik oluşturur. Bu da hem stratejik kararların daha hızlı alınmasını hem de uygulama süreçlerinin daha etkin yönetilmesini mümkün kılar. Ayrıca, ortak vizyonun varlığı, ekip üyeleri arasında güven, aidiyet ve sorumluluk duygularını pekiştirerek, projenin yalnızca teknik başarısını değil, aynı zamanda sosyal kabulünü de güçlendirir.

Ortak çevresel vizyonun oluşturulması süreci, aynı zamanda bir öğrenme ve uyumlanma pratiğidir. Farklı mesleki disiplinlerden gelen bireylerin, kendi bilgi birikimlerini çevresel hedeflerle yeniden şekillendirmeleri, hem bireysel hem de kurumsal düzeyde sürdürülebilirlik bilincinin gelişmesini sağlar. Bu süreç, yalnızca mühendislik alanındaki teknik başarıları değil; aynı zamanda toplumsal dönüşüm süreçlerini de destekleyen bir yapı oluşturur. Zira çevre dostu mühendislik çözümleri, yalnızca mühendislerin çabasıyla değil; bu çözümlerin toplumsal bağlamda anlaşılması, benimsenmesi ve desteklenmesi ile sürdürülebilir hale gelir.

İnovasyon ve Yaratıcılık: Çağımızın karmaşık çevresel sorunları, tek bir mühendislik disipliniyle çözülebilecek sınırların çok ötesine geçmiştir. Bu nedenle, sürdürülebilir ve çevre dostu mühendislik çözümlerinin geliştirilmesinde disiplinler arası işbirliği kaçınılmaz bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır. Farklı uzmanlık alanlarından gelen mühendislerin ve diğer paydaşların bilgi, deneyim ve perspektiflerini bir araya getirmeleri; yalnızca teknik sorunların daha hızlı çözülmesini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda yaratıcı düşüncenin ve inovasyonun gelişimini de doğrudan destekler. Bu işbirlikçi yaklaşım, mühendislik uygulamalarının daha bütüncül, verimli ve uzun ömürlü hale gelmesini mümkün kılar. Örneğin, malzeme bilimindeki gelişmelerle birlikte üretilen yeni nesil hafif ve yüksek performanslı malzemeler, yenilenebilir enerji sistemlerinde enerji kayıplarını azaltmakta; bu da enerji mühendisliğinin verimlilik hedeflerine doğrudan katkı sağlamaktadır. Benzer şekilde, mimarlık disiplininin estetik, fonksiyonellik ve sürdürülebilirlik ilkelerini birleştiren tasarım anlayışı, mühendislik projelerine yalnızca yapısal değil, aynı zamanda toplumsal kabul açısından da değer kazandırmaktadır.

İşbirliğine dayalı bir mühendislik kültürünün oluşturulması, yalnızca fikir alışverişiyle sınırlı kalmamalı; aynı zamanda proje süreçlerinin bütün aşamalarına yayılan bir koordinasyon ve entegrasyon anlayışıyla desteklenmelidir. Tasarımdan uygulamaya kadar olan tüm süreçlerde, mühendislik ekiplerinin ortak bir hedef doğrultusunda uyum içinde çalışması, çevresel etkilerin azaltılması, kaynakların etkin kullanımı ve sistemlerin sürdürülebilir şekilde işlemesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu tür bir işbirliği kültürü, yalnızca çevresel faydaları değil, aynı zamanda sosyal kapsayıcılığı ve ekonomik istikrarı da gözeten projelerin geliştirilmesini mümkün kılar.

Disiplinler arası işbirliği ve inovasyon, sürdürülebilir mühendislik çözümlerinin temel yapı taşları arasında yer almaktadır. Bu yaklaşımlar, mühendisliğin çevresel sınırların ötesinde, sosyal ve ekonomik düzeyde de dönüşüm yaratma kapasitesini güçlendirir. Ortaya çıkan çözümler, yalnızca günümüz sorunlarına yanıt vermekle kalmaz, aynı zamanda gelecek nesillerin yaşam kalitesini güvence altına alacak bir mühendislik anlayışının temellerini oluşturur. Dolayısıyla, disiplinler arası işbirliği yalnızca bir tercih değil, sürdürülebilir kalkınma için stratejik bir zorunluluktur.

BAŞARI ÖRNEKLERİ: İŞBİRLİĞİ İLE ÇEVRE DOSTU MÜHENDİSLİK ÇÖZÜMLERİ

Birçok çevre dostu mühendislik projesi, disiplinler arası işbirliği ve entegrasyon sayesinde başarılı sonuçlanmıştır. Bu projelerde farklı mühendislik dallarından gelen uzmanlar, çevresel, ekonomik ve sosyal

sürdürülebilirliği hedefleyen yenilikçi çözümler geliştirmek için ortak bir vizyon etrafında toplanmışlardır.

Büyükşehirlerde Sürdürülebilir Altyapı Projeleri: Dünya genelindeki büyük metropoller, çevresel etkileri en aza indirme ve yaşam kalitesini artırma amacıyla sürdürülebilir altyapı projelerine yönelmektedir. Örneğin, New York, Londra ve Tokyo gibi şehirlerde, belediyeler, mühendislik firmaları, çevre uzmanları ve sosyal bilimciler, sürdürülebilir ulaşım sistemleri, enerji verimliliği projeleri ve yeşil alanların artırılması gibi çeşitli uygulamalar üzerinde birlikte çalışmışlardır. Bu projeler, şehirlerdeki karbon ayak izini azaltmak, hava kalitesini iyileştirmek ve enerji tüketimini optimize etmek gibi çevresel hedeflere ulaşmayı amaçlarken, aynı zamanda sosyal faydalar da sağlamaktadır. *Yeşil çatılar, bisiklet yolları, yenilenebilir enerji altyapıları ve sürdürülebilir atık yönetim sistemleri* gibi unsurlar, mühendislik disiplinlerinin koordineli bir şekilde çalışmasıyla hayata geçirilmiştir. Bu tür projeler, çevresel etkilerin azaltılmasının yanı sıra, şehirlerdeki yaşam kalitesinin yükselmesine, yerel ekonomilerin güçlenmesine ve toplumsal katılımın artmasına da katkı sağlamaktadır (Report, 2020).

Güneş Enerjisi Santralleri: Birçok ülkede, enerji mühendisleri, inşaat mühendisleri, çevre bilimcileri ve teknoloji uzmanları, büyük ölçekli güneş enerjisi santralleri kurarak karbon emisyonlarını azaltma hedeflerine ulaşmayı başarmışlardır. Bu projelerde, mühendislik disiplinleri güneş enerjisinin verimli bir şekilde üretilmesi ve dağıtılması için birlikte çalışmış, inşaat mühendisliği, fotovoltaik sistemler ve enerji depolama teknolojileri gibi alanlarda uzmanlaşmış profesyoneller, enerji üretim verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için ortak bir çaba göstermiştir. Güneş enerjisi santralleri, fosil yakıtlara dayalı enerji üretiminden kaynaklanan çevresel zararları azaltırken, aynı zamanda ekonomik anlamda sürdürülebilir bir enerji kaynağının sağlanmasına katkıda bulunmaktadır. Bu tür projeler, yenilikçi mühendislik çözümleri ve işbirliği sayesinde, global enerji pazarında önemli bir dönüşümü tetiklemiş ve birçok ülkede temiz enerjiye geçişi hızlandırmıştır (Turney ve Fthenakis, 2011).

Akıllı Su Yönetim Sistemleri: Su kıtlığı ve iklim değişikliği ile birlikte, su kaynaklarının verimli kullanımı, daha da önemli hale gelmiştir. Bu alanda, çevre mühendisliği ve bilgi teknolojileri uzmanları, suyun daha verimli kullanılması amacıyla akıllı sensörler ve veri analiz tekniklerini kullanarak çeşitli projeler geliştirmiştir. Akıllı su yönetim sistemleri, suyun tüketimi, dağıtımı ve arıtılması süreçlerinde verimliliği artırmak için sensörler aracılığıyla gerçek zamanlı veri toplar ve bu veriler üzerinden analizler yaparak su yönetimini optimize eder. Bu sistemler, suyun daha verimli kullanılmasını sağlarken, su kaynaklarının korunmasına ve israfın önlenmesine de katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, su arıtma ve dağıtım altyapılarının iyileştirilmesi, çevresel etkilerin azaltılmasını ve sürdürülebilir su yönetimini mümkün kılmaktadır. Bu tür projeler, mühendislik

disiplinlerinin birleşimiyle, hem çevresel faydalar sağlamakta hem de suyun daha verimli ve ekonomik kullanımı noktasında toplumsal ve ekonomik kazançlar elde edilmektedir (Palermo vd., 2022).

Çevre dostu mühendislik projelerinin disiplinler arası işbirliğiyle nasıl daha verimli ve etkili hale geldiğini yapılan projeler açıkça göstermektedir. Her bir proje, mühendislik alanlarının ve diğer paydaşların uzmanlık alanlarını birleştirerek çevresel sorunlara çözüm bulma noktasında önemli adımlar atmıştır. Bu projelerin başarısı, farklı disiplinlerin birbirini tamamlayıcı bir şekilde çalışması, yaratıcı çözümler üretmesi ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada sinerji yaratmasıyla mümkün olmuştur. Bu tür işbirlikleri, mühendislik uygulamalarının toplumsal refah, ekonomik büyüme ve çevresel sürdürülebilirlik gibi faktörleri dengeleyerek başarılı sonuçlar doğurmasını sağlamaktadır.

SONUÇ

Çevresel sürdürülebilirliğe yönelik hedeflerin gerçekleştirilmesi, disiplinler arası işbirliğini zorunlu kılmaktadır. Dolayısıyla da, mühendislik disiplinleri arasında kurulan yapıcı iş birlikleri; yenilikçi düşünce biçimlerinin ortaya çıkmasını, kaynakların daha etkin kullanılmasını ve uzun vadeli sürdürülebilirlik hedeflerine daha sağlam adımlarla ilerlenmesini mümkün kılmaktadır.

Bu doğrultuda, teknolojik gelişmelerin sunduğu olanakların mühendislik süreçlerine entegrasyonu, çevre dostu uygulamaların etkinliğini ve yaygınlığını önemli ölçüde artırmaktadır. Yenilenebilir enerji üretimi ve depolanmasına yönelik sistemlerden sürdürülebilir yapı malzemelerine, atık yönetimi teknolojilerinden su arıtma ve geri kazanım sistemlerine kadar pek çok alanda geliştirilen yenilikçi çözümler, çevresel sürdürülebilirliği destekleyen mühendislik stratejilerinin temel yapı taşlarını oluşturmaktadır.

Toplumsal ihtiyaçların ve kültürel dinamiklerin gözetilmesi, geliştirilen mühendislik çözümlerinin yalnızca teknik açıdan değil, aynı zamanda sosyal kabul düzeyi açısından da sürdürülebilir olmasını sağlamaktadır. Çevre dostu mühendislik uygulamalarının başarıya ulaşmasında, bu çözümlerin ekonomik olarak erişilebilir, kültürel olarak uyumlu ve toplumsal açıdan kabul gören nitelikler taşıması büyük önem arz etmektedir. Toplumsal katılımın ve yerel paydaşların sürece dâhil edilmesinin, mühendislik projelerinin benimsenmesi ve uzun ömürlü olması açısından belirleyici bir unsur olduğu açıktır.

Sonuç olarak, çevresel sürdürülebilirliğe ulaşma çabaları, mühendislik disiplinlerinin yalnızca teknik bilgi ve beceri temelinde değil; aynı zamanda çok disiplinli işbirlikleri, etik sorumluluk ve toplumsal duyarlılık ekseninde yeniden yapılanmasını zorunlu kılmaktadır. Gelecekte bu işbirliklerinin daha da güçlenmesi; hem çevresel etkilerin azaltılması, hem ekonomik büyümenin sürdürülebilir kılınması hem de sosyal adaletin sağlanması bakımından kritik

öneme sahiptir. Mühendislik alanında teknoloji odaklı yaklaşımlarla birlikte gelişen bu bütüncül anlayış, sürdürülebilir bir gelecek için gerekli olan dönüşümün temel dinamiklerinden birini oluşturmaktadır.

REFERANSLAR

- Aditya, L., Mahlia, T. M. I., Rismanchi, B., Ng, H. M., Hasan, M. H., Metselaar, H. S. C., ... Aditya, H. B. (2017). A review on insulation materials for energy conservation in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73(August 2015), 1352–1365. doi:10.1016/j.rser.2017.02.034
- Ali, A., Issa, A., & Elshaer, A. (2024). A Comprehensive Review and Recent Trends in Thermal Insulation Materials for Energy Conservation in Buildings. *Sustainability (Switzerland)*, 16(20). doi:10.3390/su16208782
- Barbhuiya, S., Das, B. B., & Adak, D. (2024). A comprehensive review on integrating sustainable practices and circular economy principles in concrete industry. *Journal of Environmental Management*, 370(July), 122702. doi:10.1016/j.jenvman.2024.122702
- Barker Scott, B. A., & Manning, M. R. (2024). Designing the Collaborative Organization: A Framework for how Collaborative Work, Relationships, and Behaviors Generate Collaborative Capacity. *Journal of Applied Behavioral Science*, 60(1), 149–193. doi:10.1177/00218863221106245
- Bontempi, E., Sorrentino, G. P., Zanoletti, A., Alessandri, I., Depero, L. E., & Caneschi, A. (2021). Sustainable materials and their contribution to the sustainable development goals (SDGs): A critical review based on an italian example. *Molecules*, 26(5). doi:10.3390/molecules26051407
- Chou, C.-H., Ngo, S. L., & Tran, P. P. (2023). Renewable Energy Integration for Sustainable Economic Growth: Insights and Challenges via Bibliometric Analysis. *Sustainability*, 15(20), 15030. doi:10.3390/su152015030
- Emma, L. (2024). Sustainable Construction Practices: Incorporating Green Materials and Technologies in Civil Engineering Projects, (December).
- Franquesa, D., Cruz, J. L., Álvarez, C., Sánchez, F., Fernández, A., & López, D. (2010). The social and environmental impact of engineering solutions: From the Lab to the Real World. *International Journal of Engineering Education*, 26(5), 1144–1155.
- Hafez, F. S., Sa'di, B., Safa-Gamal, M., Taufiq-Yap, Y. H., Alrifaeey, M., Seyedmahmoudian, M., ... Mekhilef, S. (2023). Energy Efficiency in Sustainable Buildings: A Systematic Review with Taxonomy, Challenges, Motivations, Methodological Aspects, Recommendations, and Pathways for Future Research. *Energy Strategy Reviews*, 45(November 2022), 101013. doi:10.1016/j.esr.2022.101013
- Hariram, N. P., Mekha, K. B., Suganthan, V., & Sudhakar, K. (2023). Sustainalism: An Integrated Socio-Economic-Environmental Model to Address Sustainable Development and Sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, 15(13). doi:10.3390/su151310682

- Kapucu, N., Ge, Y., Rott, E., & Isgandar, H. (2024). Urban resilience: Multidimensional perspectives, challenges and prospects for future research. *Urban Governance*, 4(April), 162–179. doi:10.1016/j.ugj.2024.09.003
- Loucks, D. P., & Van Beek, E. (2017). *Water resource systems planning and management: An introduction to methods, models, and applications*. Springer.
- Nwulu, E. O., Elete, T. Y., Omomo, K. O., & Ayotunde, O. (2023). The importance of interdisciplinary collaboration for successful engineering project completions: A strategic framework The importance of interdisciplinary collaboration for successful engineering project completions: A strategic framework, (October). doi:10.53346/wjetr.2023.2.3.0048
- Orikpete, O. F., Ikemba, S., & Ewim, D. R. E. (2023). Integration of Renewable Energy Technologies in Smart Building Design for Enhanced Energy Efficiency and Self-Sufficiency. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 9(9), 16423-01e. doi:10.18540/jcecvl9iss9pp16423-01e
- Palermo, S. A., Maiolo, M., Brusco, A. C., Turco, M., Pirouz, B., Greco, E., ... Piro, P. (2022). Smart Technologies for Water Resource Management: An Overview. *Sensors*, 22(16). doi:10.3390/s22166225
- Popescu, C., Dissanayake, H., Mansi, E., & Stancu, A. (2024). Eco Breakthroughs: Sustainable Materials Transforming the Future of Our Planet. *Sustainability (Switzerland)*, 16(23). doi:10.3390/su162310790
- Priyasad, L., Don, H., Priyasad, L., & Don, H. (2022). Energy Efficiency Improvements on the Passive House Concept in Wooden House Construction in Sweden, (June).
- Report, W. C. (2020). *Unpacking the Value of Sustainable Urbanization*. doi:10.18356/c41ab67e-en
- Rosário, A. T., & Figueiredo, J. (2024). Sustainable entrepreneurship and corporate social responsibility: Analysing the state of research. *Sustainable Environment*, 10(1). doi:10.1080/27658511.2024.2324572
- Shrivastava, P., Stafford Smith, M., O'Brien, K., & Zsolnai, L. (2020). Transforming Sustainability Science to Generate Positive Social and Environmental Change Globally. *One Earth*, 2(4), 329–340. doi:10.1016/j.oneear.2020.04.010
- Silva, J. A. (2023). Wastewater Treatment and Reuse for Sustainable Water Resources Management: A Systematic Literature Review. *Sustainability (Switzerland)*, 15(14). doi:10.3390/su151410940
- Sukla, B., Jakhar, M. R., Begum, D. S., Jasmine, M. M., & Sundaram, S. (2024). Innovations In Sustainable Engineering: A Review Of Green Technologies. *Educational Administration: Theory and Practice*, 30(5), 3667–3675. doi:10.53555/kuey.v30i5.3511
- Tom, A. P., & Pawels, R. (2022). Sustainable water treatment technologies: a review. *Tecnologías sustentables de tratamiento de aguas: una revisión*, 10(X), 2022. Retrieved from <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/>
- Turney, D., & Fthenakis, V. (2011). Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 3261–3270. doi:10.1016/j.rser.2011.04.023
- Zhao, X., Wang, Y., Chen, X., Yu, X., Li, W., Zhang, S., ... Zhu, H. (2023). Sustainable bioplastics derived from renewable natural resources for food packaging. *Matter*, 6(1), 97–127. doi:10.1016/j.matt.2022.11.006

Güneş Enerjisi Sistemleri: Tarihsel Gelişim, Fotovoltaik Tasarım ve Ekonomik Analiz

Umut ERCAN¹

1- Dr. Öğr. Üyesi; Batman Üniversitesi, Beşiri OSB Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü,
umutercan@batman.edu.tr – ORCID: 0000-0003-1063-4480

ÖZET

Artan küresel enerji talebi, fosil yakıt rezervlerinin sınırlı oluşu ve iklim değişikliği kaynaklı çevresel sorunlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji sistemleri içerisindeki önemini her geçen gün artırmaktadır. Bu bağlamda güneş enerjisi; yüksek potansiyeli, çevre dostu yapısı ve sürdürülebilir enerji dönüşümündeki stratejik rolüyle öne çıkan yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Bu kitap bölümünde güneş enerjisi, tarihsel gelişiminden başlayarak fiziksel temelleri, kullanılan teknolojiler, fotovoltaik sistem tasarım esasları, uygulama örnekleri ve ekonomik değerlendirmeleri ile bütüncül bir bakış açısıyla ele alınmıştır. Çalışmada öncelikle güneş enerjisinin Antik Çağ'dan günümüze uzanan tarihsel gelişimi incelenmiş, fotovoltaik etkinin keşfi ve modern güneş teknolojilerinin ortaya çıkışı açıklanmıştır. Ardından güneş ışıının fiziksel özellikleri ve enerji üretim süreçleri ele alınarak ısı güneş sistemleri, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santralleri ve fotovoltaik teknolojiler ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir. Fotovoltaik sistemler için kurulu güç belirleme, yıllık enerji üretimi hesabı, performans oranı, panel yönlenmesi ve alan ihtiyacı gibi temel tasarım esasları analitik ifadelerle sunulmuştur. Bunun yanı sıra, 10 kWp kurulu güce sahip çatı tipi bir fotovoltaik sistem örneği üzerinden yıllık enerji üretimi, karbon emisyonu azaltım potansiyeli ve ekonomik fizibilite analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, fotovoltaik sistemlerin Türkiye koşullarında hem teknik hem de ekonomik açıdan uygulanabilir ve sürdürülebilir bir enerji çözümü sunduğunu göstermektedir. Son olarak, güneş enerjisinin geleceğine yönelik teknolojik eğilimler ile politika ve Ar-Ge önerileri değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, Fotovoltaik sistemler, Yenilenebilir enerji, Enerji üretimi, Ekonomik analiz, Karbon emisyonu, Çatı tipi fotovoltaik sistemler

GİRİŞ

Dünya genelinde artan enerji talebi, fosil yakıt rezervlerinin sınırlı oluşu ve iklim değişikliği kaynaklı çevresel sorunlar, enerji üretiminde sürdürülebilir ve çevre dostu alternatiflerin önemini her geçen gün artırmaktadır. Sanayileşme, nüfus artışı ve kentleşme süreçleri; enerji arz güvenliği, ekonomik sürdürülebilirlik ve çevresel etkiler gibi çok boyutlu sorunları beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynakları, yalnızca çevresel kaygıların giderilmesi açısından değil, aynı zamanda uzun vadeli enerji politikalarının şekillendirilmesinde de stratejik bir rol üstlenmektedir (Özbay ve Sarıışık, 2020).

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan güneş enerjisi, yeryüzüne sürekli ve bol miktarda ulaşabilen, tükenme riski bulunmayan ve sera gazı emisyonu oluşturmada enerji üretimine olanak sağlayan bir kaynak olarak öne çıkmaktadır. Güneşten yeryüzüne ulaşan ışınlam enerjisinin etkin şekilde değerlendirilmesi, küresel ölçekte enerji ihtiyacının önemli bir bölümünün karşılanabilmesine olanak tanımaktadır. Bu nedenle güneş enerjisi, günümüzde hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerin enerji dönüşüm stratejilerinin temel bileşenlerinden biri hâline gelmiştir (Ceylan, 2012).

Güneş enerjisinin enerji üretiminde kullanılmasına yönelik çalışmalar tarihsel olarak Antik Çağ'a kadar uzanmakla birlikte, modern anlamda teknolojik gelişmeler özellikle 19. yüzyılın sonları ve 20. yüzyılın ortalarından itibaren hız kazanmıştır. Fotovoltaik etki prensibinin keşfi, yarı iletken teknolojilerindeki ilerlemeler ve malzeme bilimi alanındaki gelişmeler, güneş enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesini mümkün kılmıştır (Becquerel, 1839; Einstein, 1905). Bunun yanı sıra, ısı güneş teknolojileri ve yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri de yüksek sıcaklıklarda enerji üretimi açısından önemli uygulama alanları sunmaktadır.

Son yıllarda güneş paneli verimlerinin artması, üretim maliyetlerinin düşmesi ve enerji depolama teknolojilerindeki gelişmeler, güneş enerjisi sistemlerinin ekonomik açıdan da rekabetçi hâle gelmesini sağlamıştır. Özellikle fotovoltaik sistemlerin modüler yapısı, farklı ölçeklerde uygulanabilmesi ve şebeke bağlantılı veya şebekeden bağımsız sistem çözümleri sunabilmesi, bu teknolojinin konutlardan sanayi tesislerine kadar geniş bir kullanım alanı bulmasına olanak tanımaktadır (Ghazali ve Rahman, 2012).

Türkiye, coğrafi konumu itibarıyla yüksek güneşlenme süresi ve ışınlam potansiyeline sahip ülkeler arasında yer almaktadır. Buna karşın güneş enerjisinden elektrik üretimi uzun yıllar boyunca sınırlı düzeylerde kalmış; ancak son yıllarda yapılan yasal düzenlemeler, teşvik mekanizmaları ve teknolojik yatırımlar sayesinde önemli bir gelişim göstermiştir. Bu durum, güneş enerjisinin Türkiye enerji sistemindeki payının artırılabilceğini ve özellikle yerli üretim, akademik araştırmalar ve mühendislik uygulamalarıyla desteklenmesi hâlinde önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Karamanav, 2007; Kapluhan, 2015).

Bu kitap bölümünde güneş enerjisinin tarihsel gelişimi, fiziksel temelleri, güneş enerjisi teknolojileri, fotovoltaik sistem tasarım esasları, uygulama örnekleri ve ekonomik değerlendirmeleri bütüncül bir bakış açısıyla ele alınmaktadır. Çalışmanın temel amacı; güneş enerjisi teknolojileri konusunda akademisyenler, lisansüstü öğrenciler ve mühendisler için hem kuramsal bir altyapı sunmak hem de uygulamaya yönelik hesaplama ve değerlendirme yöntemlerini sistematik biçimde ortaya koymaktır.

2. GÜNEŞ ENERJİSİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Güneş enerjisi, insanlık tarihinin en eski dönemlerinden itibaren doğrudan veya dolaylı biçimde yararlanılan temel enerji kaynaklarından biridir. Güneş ışınımının ısı ve aydınlatma amacıyla kullanımı, modern enerji teknolojilerinin ortaya çıkışından çok önce başlamış; bilimsel keşifler ve mühendislik uygulamalarıyla birlikte zaman içerisinde sistematik bir teknoloji alanına dönüşmüştür. Bu bölümde güneş enerjisinin tarihsel gelişimi, Antik Çağ'dan günümüze uzanan kronolojik bir yaklaşımla ele alınmaktadır.

2.1. Antik Çağdan Sanayi Devrimine Kadar Güneş Enerjisi Kullanımı

Güneş enerjisinin bilinen en eski kullanımları Antik Yunan ve Roma dönemlerine dayanmaktadır. Antik yerleşimlerde yapıların güneşe yönlendirilmesi, doğal ısıtma ve aydınlatma ihtiyacının karşılanmasına yönelik pasif güneş mimarisinin erken örneklerini oluşturmaktadır. Bu dönemde güneş ışınımının yoğunlaştırılması yoluyla yüksek sıcaklık elde edilmesine yönelik uygulamalar da dikkat çekmektedir. Literatürde, güneş ışınlarının yansıtıcı yüzeylerle odaklanarak ısı enerjisinin artırılmasına ilişkin erken örnekler, güneş enerjisinin potansiyeline yönelik farkındalığın tarihsel kökenlerini ortaya koymaktadır (Kaplukan, 2015).

Orta Çağ boyunca güneş enerjisinin kullanımı ağırlıklı olarak pasif sistemlerle sınırlı kalmış; ancak 17. yüzyılda optik bilimin gelişmesi ve mercek teknolojilerindeki ilerlemeler, güneş ışınımının kontrollü biçimde yönlendirilmesine olanak sağlamıştır. Bu gelişmeler, güneş enerjisinin yalnızca mimari bir unsur değil, aynı zamanda deneysel bir enerji kaynağı olarak ele alınmasının önünü açmıştır.

2.2. İlk Isıl Güneş Sistemleri ve Mekanik Uygulamalar

18. yüzyıl, güneş enerjisinin ısı amaçlı sistematik kullanımının başladığı dönem olarak kabul edilmektedir. 1767 yılında Horace de Saussure tarafından geliştirilen ilk güneş kolektörü, güneş enerjisinin ölçülebilir ve depolanabilir bir ısı kaynağı olarak değerlendirilmesine yönelik önemli bir adımdır. Bu dönemi takiben, güneş ışınımının yoğunlaştırılmasıyla buhar elde edilmesi ve mekanik sistemlerin çalıştırılması üzerine çeşitli deneyler yapılmıştır (Ceylan, 2012).

19. yüzyılın ortalarında Auguste Mouchout tarafından geliştirilen güneş enerjili buhar makineleri, güneş enerjisinin mekanik enerji üretiminde kullanılabileceğini göstermiştir. Bu çalışmalar, daha sonra yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemlerinin (CSP) temelini oluşturacak olan ısı prensiplerinin gelişmesine katkı sağlamıştır.

2.3. Fotovoltaik Etkinin Keşfi ve Elektrik Üretimine Geçiş

Güneş enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesi, 19. yüzyılın ikinci yarısında gerçekleştirilen bilimsel keşiflerle mümkün hâle gelmiştir. 1839 yılında Alexandre Edmond Becquerel tarafından tanımlanan

fotovoltaik etki, ışığın belirli malzemeler üzerinde elektriksel bir gerilim oluşturabileceğini ortaya koymuştur (Becquerel, 1839). Bu keşif, güneş enerjisi teknolojileri açısından temel bir dönüm noktasıdır.

Fotovoltaik olayın fiziksel temelleri ise 1905 yılında Albert Einstein tarafından açıklanan fotoelektrik etki kuramı ile bilimsel olarak ortaya konulmuştur. Bu çalışma, daha sonraki yarı iletken tabanlı güneş hücrelerinin geliştirilmesine teorik bir zemin hazırlamış ve modern fotovoltaik teknolojilerin temelini oluşturmuştur (Einstein, 1905).

2.4. Yirminci Yüzyılda Fotovoltaik Teknolojilerin Gelişimi

20. yüzyılın ortalarına kadar güneş enerjisi teknolojilerinin yaygınlaşması, düşük verimlilik ve yüksek maliyetler nedeniyle sınırlı kalmıştır. Ancak silikon tabanlı güneş hücrelerinin geliştirilmesiyle birlikte fotovoltaik teknolojilerde önemli bir ilerleme sağlanmıştır. Özellikle uzay uygulamalarında güneş pillerinin güvenilir bir enerji kaynağı olarak kullanılması, bu teknolojilerin olgunluğu ve dayanıklılığını ortaya koymuştur (Upadhyaya, Yelundur ve Rohatgi, 2006).

1970’li yıllarda yaşanan küresel petrol krizleri, fosil yakıtlara alternatif enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmış ve güneş enerjisi araştırmalarına ivme kazandırmıştır. Bu süreçte fotovoltaik sistemlerin maliyetleri düşmeye başlamış, araştırma–geliştirme faaliyetleri hızlanmıştır. 1980’li ve 1990’lı yıllarda ise büyük ölçekli fotovoltaik santraller ve yoğunlaştırılmış güneş enerjisi tesisleri hayata geçirilmiştir (Girgin, 2011).

2.5. Türkiye’de Güneş Enerjisinin Tarihsel Gelişimi

Türkiye, coğrafi konumu itibarıyla yüksek güneşlenme süresi ve ışıınım potansiyeline sahip ülkeler arasında yer almaktadır. Türkiye’de güneş enerjisinin ilk yaygın uygulamaları, 1970’li yıllarda güneş enerjili su ısıtma sistemleri ile başlamış ve özellikle Ege ile Akdeniz bölgelerinde hızla yaygınlaşmıştır. Bu durum, Türkiye’nin güneş enerjisiyle sıcak su üretiminde öncü ülkelerden biri hâline gelmesini sağlamıştır (Karamanav, 2007).

Buna karşın fotovoltaik sistemlerin yüksek maliyetleri ve sınırlı teknolojik altyapı nedeniyle güneş enerjisinden elektrik üretimi uzun yıllar boyunca sınırlı düzeylerde kalmıştır. Son yıllarda ise yasal düzenlemeler, teşvik mekanizmaları ve yerli üretim kapasitesindeki artış sayesinde güneş enerjisi yatırımları önemli ölçüde hız kazanmıştır (Kaplukan, 2015).

2.6. Bölüm Değerlendirmesi

Güneş enerjisinin tarihsel gelişimi incelendiğinde, bu enerji kaynağının bilimsel keşifler, teknolojik ilerlemeler ve ekonomik koşullarla doğrudan ilişkili olarak evrildiği görülmektedir. Antik dönemlerde pasif kullanımlarla başlayan süreç, modern fotovoltaik ve ısı teknolojileriyle birlikte küresel ölçekte stratejik bir enerji alanına dönüşmüştür. Bu tarihsel birikim, güneş enerjisinin gelecekte de enerji sistemlerinin temel bileşenlerinden biri olacağını göstermektedir.

3. FOTOVOLTAİK SİSTEM TASARIM ESASLARI VE HESAPLAMALAR

Fotovoltaik (PV) sistem tasarımı, güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde teknik, çevresel ve ekonomik parametrelerin birlikte değerlendirilmesini gerektiren çok disiplinli bir süreçtir. Doğru bir tasarım yaklaşımı, yalnızca maksimum enerji üretimini değil; sistemin uzun ömürlü, güvenilir ve ekonomik olarak sürdürülebilir olmasını da hedeflemektedir. Bu bölümde fotovoltaik sistemlerin temel bileşenleri, tasarım esasları ve yaygın olarak kullanılan hesaplama yöntemleri sistematik bir biçimde ele alınmaktadır.

3.1. Fotovoltaik Sistem Bileşenleri

Tipik bir fotovoltaik sistem; fotovoltaik paneller, inverter, montaj ve taşıyıcı sistemler, doğru akım (DC) ve alternatif akım (AC) kablolama elemanları ile koruma ekipmanlarından oluşmaktadır. Şebekeye bağlı sistemlerde enerji, inverter aracılığıyla şebekeye aktarılırken; şebekeden bağımsız sistemlerde enerji depolama birimleri ve şarj kontrol cihazları önemli bir rol üstlenmektedir. Bu bileşenlerin teknik uyumu, sistem performansını doğrudan etkilemektedir (Girgin, 2011).

3.2. Kurulu Güç ve Panel Sayısının Belirlenmesi

Bir fotovoltaik sistemin kurulu gücü, sistemden beklenen enerji üretimi ve kurulacağı alanın potansiyeli dikkate alınarak belirlenir. Kurulu güç, panel sayısı ve panel anma gücü kullanılarak denklem (1) ile hesaplanır:

$$P_{kurulu} = N_{panel} \times P_{panel} \quad (1)$$

Burada, Toplam kurulu güç (kWp) P_{kurulu} , Panel sayısını N_{panel} Tek bir panelin anma gücü (kWp) P_{panel} ise tek bir panelin anma gücünü (kWp)

ifade etmektedir. Bu hesaplama, sistemin ön fizibilite aşamasında temel bir belirleyici olarak kullanılmaktadır (Ceylan, 2012).

3.3. Yıllık Enerji Üretimi Hesabı

Bir fotovoltaik sistemin yıllık enerji üretimi, bölgesel güneşlenme koşulları ve sistem performansını yansıtan katsayılar dikkate alınarak hesaplanır. Literatürde en yaygın kullanılan ifade denklem (2)'de verilmiştir:

$$E_{yillik} = P_{kurulu} \times H_{yillik} \times PR \quad (2)$$

Denklem (2)'de E_{yillik} yıllık enerji üretimini (kWh/yıl), P_{kurulu} Toplam Kurulu gücü (kWp), H_{yillik} ise Yıllık toplam yatay veya eğik yüzey ışınlamını (kWh/kWp·yıl), PR ise Performans oranını (Performance Ratio) ifade etmektedir. Türkiye koşullarında çatı tipi fotovoltaik sistemler için performans oranı genellikle 0,75–0,85 aralığında kabul edilmektedir (Ceylan, 2012).

3.4. Performans Oranı (PR)

Performans oranı, bir fotovoltaik sistemin gerçek çalışma koşullarındaki verimini ifade eden boyutsuz bir parametredir. Bu oran; sıcaklık kayıpları, inverter verimi, kablo kayıpları, kirlenme ve gölgeleme gibi sistem kayıplarını bütüncül olarak temsil etmektedir. Denklem (3)'te PR değeri hesaplanması gösterilmiştir. Yüksek PR değeri, sistem tasarımının ve işletme koşullarının uygunluğunu göstermektedir (Girgin, 2011).

$$PR = \frac{E_{gerçek}}{P_{kurulu} \times H_{referans}} \quad (3)$$

PR değeri Sıcaklık kayıpları, İnverter kayıpları, Kablo ve bağlantı kayıpları, Kirlenme (toz, polen vb.), Gölgeleme ve yönlendirme hatalarını ve kayıplarını içermektedir.

3.5. Panel Eğim Açısı ve Yönlendirme

Fotovoltaik panellerin yıllık enerji üretimini maksimize edebilmesi için güney yönelimli yerleştirilmesi ve uygun eğim açısının seçilmesi gerekmektedir. Türkiye için sabit sistemlerde panel eğim açısı, genellikle bulunduğu bölgenin enlemine yakın değerlerde seçilmektedir. Ayrıca sistem için gerekli alan, panel verimliliği ve kurulu güce bağlı olarak değişmekte olup pratikte 1 kWp kurulu güç için yaklaşık 5–7 m² alan gereksinimi bulunmaktadır (Girgin, 2011).

3.6. Alan İhtiyacı Hesabı

Bir fotovoltaik sistem için gerekli alan, panel verimliliği ve panel boyutlarına bağlıdır. Denklem (4)'te yaklaşık hesaplama için formül verilmiştir.

$$A_{toplam} = \frac{P_{kurulu}}{\eta \times G_{STC}} \quad (4)$$

Burada; Toplam panel alanını (m^2) A_{toplam} ile, Panel verimliliği η ile ve Standart test koşullarındaki ışıyım değerini ise (1000 W/m^2) G_{STC} ile ifade edilmiştir.

3.7. Şebekeye Bağlı ve Şebekeden Bağımsız Sistemlerde Tasarım Farkları

Şebekeye bağlı (on-grid) sistemlerde enerji depolama zorunluluğu bulunmazken, şebekeden bağımsız (off-grid) sistemlerde batarya kapasitesi kritik bir tasarım parametresidir. Off-grid sistemlerde batarya kapasitesi denklem (5)'te verilmiştir.

$$C_{batarya} = \frac{E_{günlük} \times N_{otonomi}}{V_{sistem} \times DOD} \quad (5)$$

Burada, Batarya kapasitesini (Ah) $C_{batarya}$ ile, Günlük enerji ihtiyacını (Wh), $E_{günlük}$ ile, Otonomi gününü $N_{otonomi}$ ile, Sistem gerilimini (V) V_{sistem} ile, Deşarj derinliğini ise DOD ile ifade edilmiştir (Ceylan, 2012; Girgin, 2011).

3.8. Bölüm Değerlendirmesi

Bu bölümde fotovoltaik sistemlerin tasarım esasları ve temel hesaplama yöntemleri ele alınmıştır. Kurulu güç belirleme, yıllık enerji üretimi hesabı ve performans değerlendirme; sistemlerin teknik ve ekonomik başarısı açısından kritik öneme sahiptir. Sunulan bu teorik altyapı, bir sonraki bölümde ele alınacak olan örnek fotovoltaik sistem uygulamasının anlaşılması için temel bir çerçeve sunmaktadır.

4. ÖRNEK BİR ÇATI TİPİ FOTOVOLTAİK SİSTEM UYGULAMASI (10 kWp)

Bu bölümde, önceki bölümde sunulan fotovoltaik sistem tasarım esasları ve hesaplama yöntemleri kullanılarak, 10 kWp kurulu güce sahip şebekeye bağlı (on-grid) bir çatı tipi fotovoltaik sistem örnek olarak ele alınmıştır. Çalışmanın amacı, teorik hesaplama yöntemlerinin pratik bir uygulama üzerinden gösterilmesi ve fotovoltaik sistemlerin enerji üretim potansiyelinin somut verilerle ortaya konulmasıdır.

4.1. Proje Tanımı ve Varsayımlar

Örnek sistem, Türkiye koşullarında bir konut veya küçük ölçekli ticari yapının çatısına kurulacak şekilde tasarlanmıştır. Sistem şebekeye bağlı olup enerji depolama birimi içermemektedir. Hesaplamalarda kullanılan temel tasarım varsayımları aşağıda özetlenmiştir:

- Sistem tipi: Şebekeye bağlı (on-grid)
- Kurulu güç: 10 kWp
- Panel türü: Monokristal silikon
- Panel yönelimi: Güney
- Panel eğim açısı: 30°
- Performans oranı (PR): 0,80

Bu varsayımlar, Türkiye’de çatı tipi fotovoltaik sistemler için literatürde yaygın olarak kabul edilen değerlerle uyumludur (Girgin, 2011).

4.2. Kurulu Güç ve Panel Konfigürasyonu

Sistemde kullanılacak panel sayısı, tek bir panelin anma gücü dikkate alınarak belirlenmiştir. Örneğin, 450 Wp gücünde paneller kullanılması durumunda toplam kurulu güç şu şekilde hesaplanmaktadır:

Sistemde kullanılan panel sayısı, panel anma gücü dikkate alınarak denklem (1) kullanılarak belirlenmiştir.

Denklem (1)’den $P_{kurulu} = 23 \times 0,45 = 10,35 \text{ kWp}$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer, sistem tasarımında kayıplar ve inverter seçimi açısından uygun kabul edilerek nominal olarak 10kWp sınıfında değerlendirilmiştir. Bu kapsamda yaklaşık 22–23 adet panel ile 10 kWp seviyesinde bir sistem kurulabilmektedir. Panel sayısının belirlenmesinde çatı alanı, gölgeleme durumu ve montaj düzeni gibi faktörler de dikkate alınmalıdır (Ceylan, 2012)

4.3. Yıllık Enerji Üretimi Hesabı

Yıllık enerji üretimi hesabında, sistemin kurulu gücü, bölgesel yıllık özgül üretim değeri ve performans oranı kullanılmıştır. Güneydoğu ve Akdeniz bölgeleri için yıllık özgül üretim değeri yaklaşık 1600–1700 kWh/kWp.yıl aralığında değişmektedir. Bu çalışmada ortalama bir yaklaşımla 1650 kWh/kWp.yıl değeri esas alınmıştır.

Yıllık enerji üretimi değeri ise denklem (2) kullanılarak 13200 kWh/yıl olarak elde edilmiştir. Bu değer, sistemin yıllık elektrik ihtiyacının önemli bir bölümünü karşılayabileceğini göstermektedir.

4.4. Alan İhtiyacının Belirlenmesi

Fotovoltaik sistem için gerekli çatı alanı, panel verimliliği ve montaj düzenine bağlıdır. Pratik uygulamalarda 1 kWp kurulu güç için yaklaşık 5–7 m² alan

gereksinimi bulunmaktadır. Buna göre 10 kWp gücündeki sistem için yaklaşık 50–70 m² çatı alanı yeterli olmaktadır. Bu alan büyüklüğü, tipik konut ve küçük ticari yapı çatılarında uygulanabilir düzeydedir (Girgin, 2011).

Buna göre sistem için gerekli minimum çatı alanı denklem (4) kullanılırsa: $A_{\text{toplam}} \approx 10 \times 5,5 = 55 \text{ m}^2$ olarak hesaplanmıştır. Bu alan, konut ve ticari yapı çatılarında yaygın olarak bulunabilen bir büyüklüktür.

4.5. Karbon Emisyonu Azaltım Potansiyeli

Fotovoltaik sistemlerin çevresel katkısı, fosil yakıt kaynaklı elektrik üretiminin ikame edilmesiyle sağlanan karbon emisyonu azaltımı üzerinden değerlendirilmektedir. Yıllık karbon azaltım miktarı ise denklem (6) ile hesaplanmaktadır. Burada Karbondioksit azaltım miktarını (kgCO₂/yıl)CO_{2, azaltım}, Yıllık enerji üretimini (kWh/yıl) E_{yıllık}, emisyon faktörünü ise EF ile gösterilmiştir (Özbay ve Sarıışık, 2020). Türkiye elektrik şebekesi için ortalama emisyon faktörü yaklaşık olarak 0,43 kgCO₂/kWh olarak kabul edilmektedir.

$$CO_{2,azaltım} = E_{y\text{ıllık}} \times EF$$

$$(6) \quad CO_{2,azaltım} = 13\,200 \times 0,43 = 5\,676 \text{ kgCO}_2/\text{yıl}$$

olarak hesaplanmaktadır. Bu sonuç, sistemin yılda yaklaşık 5,7 ton CO₂ emisyonunu önlediğini göstermektedir (Özbay ve Sarıışık, 2020).

4.6. Sistem Performansının Değerlendirilmesi

Elde edilen sonuçlar, 10 kWp kurulu güce sahip bir çatı tipi fotovoltaik sistemin:

- Konut veya küçük işletmenin yıllık elektrik tüketiminin önemli bir kısmını karşılayabildiğini,
- Şebeke üzerindeki yükü azalttığını,
- Karbon salımını anlamlı ölçüde düşürdüğünü,
- Modüler ve ölçeklenebilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Performans oranının %80 seviyesinde olması, sistem kayıplarının kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğunu ve tasarımın mühendislik açısından uygun olduğunu ortaya koymaktadır.

4.7. Bölüm Değerlendirmesi

Bu bölümde ele alınan örnek uygulama, çatı tipi fotovoltaik sistemlerin teknik olarak uygulanabilir ve çevresel açıdan faydalı bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır. Hesaplanan enerji üretimi ve karbon azaltım değerleri, fotovoltaik sistemlerin bireysel kullanıcılar ve ulusal enerji sistemi açısından önemli kazanımlar sağlayabileceğini göstermektedir. Bu örnek, bir sonraki bölümde yapılacak olan ekonomik analiz için temel bir altyapı oluşturmaktadır.

5. FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN EKONOMİK ANALİZİ

Fotovoltaik sistemlerin yaygınlaşmasında teknik performans kadar ekonomik fizibilite de belirleyici bir unsurdur. Yatırım maliyeti, yıllık enerji üretimi, işletme giderleri ve sistem ömrü gibi parametrelerin birlikte değerlendirilmesi, sistemlerin uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır. Bu bölümde, 10 kWp kurulu güce sahip çatı tipi fotovoltaik sistem için yatırım maliyeti, geri ödeme süresi ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE) temel göstergeler üzerinden analiz edilmiştir.

5. 1. Yatırım Maliyeti Bileşenleri

Bir fotovoltaik sistemin toplam yatırım maliyeti; fotovoltaik paneller, inverter, montaj ve taşıyıcı sistemler, kablolama ve koruma ekipmanları ile proje ve işçilik giderlerinden oluşmaktadır. Çatı tipi sistemlerde bu maliyetler, sistem kapasitesine ve kullanılan ekipmanların teknik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

10 kWp gücündeki örnek sistem için toplam yatırım maliyeti, güncel piyasa koşulları dikkate alınarak yaklaşık **200.000 TL** olarak kabul edilmiştir. Bu değer, Türkiye’de konut tipi çatı uygulamaları için literatürde belirtilen maliyet aralıklarıyla uyumludur (Ceylan, 2012).

Örnek sistem için kullanılan varsayımsal maliyetler Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. 10 kWp çatı tipi fotovoltaik sistem için yatırım maliyeti

Maliyet kalemi	Toplam
PV paneller	110.000 TL
İnverter	35.000 TL
Montaj & konstrüksiyon	25.000 TL
Kablo, pano, koruma	15.000 TL
Proje & işçilik	15.000 TL
Toplam yatırım maliyeti	200.000 TL

5.2. Yıllık Enerji Üretimi ve Ekonomik Kazanç

Bir önceki bölümde hesaplanan yıllık enerji üretimi değeri 13.200 kWh/yıl olarak belirlenmiştir. Şebekeye bağlı sistemlerde ekonomik kazanç, üretilen elektriğin öz tüketimde kullanılması veya şebekeye verilmesi yoluyla sağlanmaktadır. Bu çalışmada muhafazakâr bir yaklaşımla, üretilen enerjinin tamamının öz tüketimde değerlendirildiği varsayılmıştır. Konut elektrik birim fiyatı ortalama 2,5 TL/kWh olarak kabul edilmiştir. Bölüm 4'te hesaplanan yıllık enerji üretimi: $E_{y\text{ıllık}}=13200 \text{ kWh/yıl}$ 2025 yılı için konut elektrik birim fiyatı ortalama olarak $C_{elektrik}=2,5 \text{ TL/kWh}$ olarak kabul edilmiştir.

Yıllık ekonomik tasarruf (Tasarruf_{yıllık}) denklem (7)'de verilmiştir.

$$Tasarruf_{y\text{ıllık}} = E_{y\text{ıllık}} \times C_{elektrik} \quad (7)$$

$Tasarruf_{y\text{ıllık}}=13\ 200 \times 2,5=33\ 000 \text{ TL/yıl}$ olarak hesaplanmıştır.

5.3. Geri Ödeme Süresi (Payback Period)

Basit geri ödeme süresi, toplam yatırım maliyetinin yıllık net kazanca bölünmesiyle hesaplanır. Denklem (8)'de Geri ödeme süresini (yıl) T_{geri} ile, Yatırım Maliyetini YM (TL/yıl) ve Yıllık Tasarrufu (TL) ise (YT) ile gösterilmiştir (Ceylan, 2012).

$$T_{geri} = YM \times YT \quad (8)$$

$T_{geri}=200000/33000 \approx 6,1$ yıl olarak hesaplanmıştır. Yaklaşık altı yıl olarak hesaplanan geri ödeme süresi, fotovoltaik sistemlerin orta vadede yatırım maliyetini karşılayabildiğini ve uzun vadede net ekonomik kazanç sağladığını ortaya koymaktadır (Ceylan, 2012).

5.4. Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (LCOE)

Seviyelendirilmiş enerji maliyeti (Levelized Cost of Energy – LCOE), bir enerji sisteminin yaşam döngüsü boyunca ürettiği enerjinin birim maliyetini ifade eder ve farklı enerji teknolojilerinin karşılaştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Basitleştirilmiş LCOE ifadesi denklem (9) ile verilmiştir (Ceylan, 2012).

$$LCOE = \frac{C_{toplam}}{E_{toplam}} \quad (9)$$

Burada, C_{toplam} Sistem ömrü boyunca toplam maliyeti, E_{toplam} Sistem ömrü boyunca toplam enerji üretimini ifade etmektedir. Sistem ömrü 25 yıl olarak kabul edilmiştir. Yıllık üretimin sabit kaldığı varsayımıyla toplam enerji üretimi $E_{toplam}=13200 \times 25=330000 \text{ kWh}$ olarak hesaplanmaktadır.

İşletme ve bakım maliyetleri ihmal edilebilir düzeyde kabul edilirse, $LCOE=200\,000/330\,000\approx0,61$ TL/kWh olarak hesaplanmaktadır. Bu değer, mevcut konut elektrik birim fiyatının oldukça altında olup, fotovoltaik sistemlerin uzun vadede ekonomik olarak rekabetçi olduğunu göstermektedir.

5.5. Ekonomik Değerlendirme

Elde edilen ekonomik göstergeler ışığında, 10 kWp kurulu güce sahip çatı tipi fotovoltaik sistemin:

- Orta vadede (≈ 6 yıl) yatırım geri dönüşü sağladığı,
- Uzun vadede düşük birim enerji maliyeti sunduğu,
- Elektrik fiyatlarındaki artışlara karşı kullanıcıyı koruduğu,
- Karbon emisyonu azaltımı ile çevresel fayda sağladığı görülmektedir.

Özellikle enerji fiyatlarındaki artış eğilimi dikkate alındığında, geri ödeme süresinin daha da kısalması mümkündür.

5.6. Bölüm Değerlendirmesi

Bu bölümde gerçekleştirilen ekonomik analiz sonuçları, çatı tipi fotovoltaik sistemlerin yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ekonomik açıdan da uygulanabilir bir yatırım seçeneği sunduğunu ortaya koymaktadır. Geri ödeme süresi ve LCOE değerleri, fotovoltaik sistemlerin Türkiye koşullarında sürdürülebilir ve uzun vadeli bir enerji çözümü olduğunu göstermektedir. Bu ekonomik çerçeve, bir sonraki bölümde ele alınacak olan genel sonuçlar ve gelecek perspektifi için temel oluşturmaktadır.

6. SONUÇLAR VE GELECEK PERSPEKTİFİ

6.1. Genel Değerlendirme

Bu çalışmada güneş enerjisi, tarihsel gelişimi, fiziksel temelleri, kullanılan teknolojiler, fotovoltaik sistem tasarım esasları, örnek uygulamalar ve ekonomik değerlendirmeleri ile bütüncül bir bakış açısıyla ele alınmıştır. Çalışma kapsamında sunulan kuramsal ve uygulamalı analizler, güneş enerjisinin günümüz enerji sistemleri içerisinde teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilir bir seçenek olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır.

Fotovoltaik sistem tasarım esasları ve hesaplama yöntemleri, mühendislik uygulamalarında doğrudan kullanılacak şekilde sunulmuştur. Kurulu güç belirleme, yıllık enerji üretimi hesabı, performans oranı ve alan ihtiyacı gibi temel parametreler, sistem performansını belirleyen kritik unsurlar olarak değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, çalışmanın yalnızca

kavramsal değil, aynı zamanda uygulamaya dönük bir başvuru kaynağı niteliği taşımasını sağlamaktadır.

Ele alınan 10 kWp kurulu güce sahip çatı tipi fotovoltaik sistem örneği, teorik hesaplamaların pratikte nasıl karşılık bulduğunu göstermiştir. Yıllık enerji üretimi ve karbon emisyonu azaltım potansiyeli, fotovoltaik sistemlerin bireysel kullanıcılar açısından çevresel fayda sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca ekonomik analiz sonuçları, geri ödeme süresi ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE) değerleri üzerinden değerlendirildiğinde, çatı tipi fotovoltaik sistemlerin Türkiye koşullarında orta ve uzun vadede ekonomik açıdan sürdürülebilir bir yatırım olduğunu göstermektedir.

Geleceğe yönelik olarak güneş enerjisi teknolojilerinde verim artışı, maliyet düşüşü ve sistem entegrasyonu konularında önemli gelişmeler beklenmektedir. Yeni nesil fotovoltaik hücre teknolojileri, enerji depolama çözümleri ve dijital izleme sistemleri, fotovoltaik sistemlerin performansını ve şebeke uyumunu artıracaktır. Bunun yanı sıra bina entegrasyonlu fotovoltaik sistemler, tarımsal uygulamalar ve elektrikli araç şarj altyapıları ile entegrasyon, güneş enerjisinin kullanım alanlarını daha da genişletecektir.

Politika ve uygulama perspektifinden bakıldığında, dağıtık üretim sistemlerinin desteklenmesi, izin ve bağlantı süreçlerinin sadeleştirilmesi ve yerli üretim kapasitesinin artırılması, güneş enerjisinin enerji sistemindeki payının yükseltilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Üniversiteler, araştırma merkezleri ve sanayi arasındaki iş birliklerinin güçlendirilmesi ise Ar-Ge faaliyetlerinin hızlanmasına ve teknolojik yetkinliğin artmasına katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, bu çalışmada sunulan analizler ve değerlendirmeler, güneş enerjisinin sürdürülebilir enerji dönüşümünde stratejik bir rol üstlendiğini göstermektedir. Güneş enerjisinin teknik, ekonomik ve çevresel avantajları dikkate alındığında, bu enerji kaynağının gelecekte enerji politikalarının temel bileşenlerinden biri olmaya devam edeceği öngörülmektedir.

6.2. PV Teknolojilerinde Güncel Eğilimler

Güncel PV pazarının büyük bölümünü kristal silikon teknolojileri oluşturmakla birlikte, laboratuvar ölçeğindeki yenilikler, orta vadede ticari ürünlere dönüşebilecek potansiyel taşımaktadır. Bu kapsamda öne çıkan eğilimler şunlardır (Upadhyaya, Yelundur ve Rohatgi, 2006):

- **Yüksek verimli silikon hücre mimarileri:** Hücre yapısındaki yüzey pasivasyonu, taşıyıcı kayıplarının azaltılması ve ışık tuzaklama yaklaşımları, silikon tabanlı teknolojilerde verim artışını sürdürmektedir.
- **Tandem (çok eklemli) hücreler:** Farklı bant aralığına sahip iki veya daha fazla yarı iletken katmanın birleştirilmesiyle, güneş spektrumunun daha etkin kullanılması hedeflenmektedir.

- **Perovskit tabanlı hücreler:** Düşük sıcaklıkta üretim, yüksek optik soğurma kabiliyeti ve hızlı verim gelişimi gibi avantajlar, perovskitleri öne çıkarmaktadır. Bununla birlikte uzun dönem kararlılık (stabilite) ve ölçeklenebilir üretim süreçleri, ticari yaygınlaşma için kritik geliştirme alanlarıdır.
- **İnce film teknolojilerinin niş uygulamaları:** Hafiflik, esneklik ve belirli koşullarda avantaj sağlayan üretim yöntemleri; belirli uygulamalarda ince filmleri (ör. bina entegrasyonu, taşınabilir sistemler) önemli bir seçenek hâline getirmektedir.

6.3. Depolama ve Hibrit Sistemler

PV sistemlerin şebeke üzerindeki etkisi, üretimin gün içinde değişken olması nedeniyle **esneklik** gereksinimini artırmaktadır. Bu durum, özellikle dağıtık üretimin arttığı bölgelerde depolama ve hibrit sistemlerin önemini yükseltmektedir.

- **Batarya entegrasyonu:** Öz tüketim oranını artırma, pik saatlerde şebekeden çekişi azaltma ve kesinti dayanımı sağlama gibi faydalar sunar.
- **PV + rüzgâr + depolama hibritleri:** Üretim profillerinin birbirini tamamlaması nedeniyle enerji arz sürekliliğini iyileştirebilir.
- **Şebeke hizmetleri:** Frekans/gerilim desteği, reaktif güç kontrolü ve talep tarafı yönetimi gibi hizmetler, gelecekte PV sistemlerin “yalnızca üretici” değil, “aktif şebeke bileşeni” olarak rol almasını destekleyecektir.

6.4. Dijitalleşme ve Yapay Zekâ Uygulamaları

- Güneş enerjisi yatırımlarında, performansın korunması ve kayıpların azaltılması için veri temelli işletme yaklaşımı giderek standart hâle gelmektedir.
- **SCADA ve uzaktan izleme:** Anlık üretim, arıza tespiti ve bakım planlaması açısından kritik önemdedir.
- **Kestirimci bakım:** İnverter, bağlantı kutusu ve dizi (string) düzeyinde anomalilerin erken saptanması, sürekliliği artırır.
- **Tahminleme (forecasting):** Meteorolojik veri ve makine öğrenmesi tabanlı üretim tahmini, şebeke işletmeciliği için değerli bir girdidir.

6.5. Uygulama Eğilimleri: Çatı GES, Bina Entegrasyonu ve Tarımsal Uygulamalar

Yakın vadede büyümesi beklenen uygulama alanları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- **Çatı tipi sistemler:** Dağıtık üretim, iletim kayıplarını azaltma ve yerinde tüketim avantajı nedeniyle caziptir.

- **Bina entegrasyonlu fotovoltaikler (BIPV):** Cephe, çatı kaplaması ve gölgelik elemanlarıyla enerji üretimini mimari tasarımla bütünleştirir.
- **Tarım-PV (agrivoltaics):** Arazi kullanımının optimize edilmesi, sulama enerji ihtiyacının karşılanması ve mikroiklim etkileriyle verimlilik artışı potansiyeli taşır.
- **Elektrikli araç şarj altyapısı ile entegrasyon:** PV üretiminin gündüz saatlerinde yüksek olması, işyeri/otopark temelli şarj senaryolarını destekler (Girgin, 2011; Özbay ve Sarıışık, 2020).
-

REFERANSLAR

Becquerel, A. E. (1839). Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 9, 561-567.

Ceylan, İ. (2012). *Güneş enerjisi ve uygulamaları*. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.

Einstein, A. (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 17, 132-148.

Erkul, A. (2010). Fotovoltaik güneş pilleri ve elektrik enerjisi üretimi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(3), 45-54.

Ghazali, A. ve Rahman, M. (2012). Performance evaluation of polycrystalline solar modules. *Renewable Energy*, 44, 39-45.

Girgin, M. H. (2011). *Fotovoltaik sistemler ve uygulamaları*. İstanbul: Birsen Yayınevi.

Kapluhan, E. (2015). Güneş enerjisinin tarihsel gelişimi ve Türkiye'deki durumu. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 32, 271-286.

Karamanav, N. (2007). *Türkiye'de güneş enerjisi potansiyeli ve değerlendirilmesi*. Ankara: Elektrik İşleri Etüt İdaresi Yayınları.

Karataş, A. (2009). Güneş pillerinde enerji dönüşüm verimliliği. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 22(1), 13-20.

Köroğlu, T., Yılmaz, S. ve Demirtaş, M. (2010). İnce film güneş pilleri ve uygulamaları. *Enerji Teknolojileri Dergisi*, 4(2), 61-70.

Mahmutoğlu, Y. (2013). Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi santralleri ve uygulamaları. *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Bildirileri*, 85-92.

Özbay, H. ve Sarıışık, M. (2020). Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilir kalkınmadaki rolü. *Enerji, Çevre ve Ekonomi Dergisi*, 5(1), 19-31.

Upadhyaya, A., Yelundur, V. ve Rohatgi, A. (2006). Silicon materials for solar cells. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 17, 821-829.

