

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİNDE TEKNOLOJİK YENİLİKLER



Editörler
Doç. Dr. Faruk KILIÇ
Dr. Öğr. Üyesi Burak AKTEKELİ

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Aralık 2025

ISBN • 978-625-8682-73-1

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruyenyayinevi.com

e-mail: seruyenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 42488

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİNDE TEKNOLOJİK YENİLİKLER

EDİTÖRLER

Doç. Dr. Faruk KILIÇ

Dr. Öğr. Üyesi Burak AKTEKELİ

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

ENERJİ SİSTEMLERİNDE EKOLOJİK TASARIM VE YAŞAM DÖNGÜSÜ
DEĞERLENDİRME YAZILIMLARI 1

Veysel ÖZDEMİR

Ahmet TAŞKESEN

BÖLÜM 2

BEYAZ EŞYALARDA HAPTİK GERİ BİLDİRİMLİ KONTROLLER:
KULLANICI DENEYİMİ VE ENERJİ VERİMLİLİĞİ..... 27

Deniz ÖZTÜRK

Ahmet TAŞKESEN

BÖLÜM 3

GÜNEŞ DESTEKLİ HAVA ISITICI TASARIMINDA MAKİNE
ÖĞRENMESİ YÖNTEMLERİNİN ÖNEMİ..... 45

Abdulkadir KOÇER

Faruk KILIÇ

BÖLÜM 4

YENİLENEBİLİR ENERJİ TEKNOLOJİLERİNDE GÜNEŞ ENERJİSİ
YAKLAŞIMLARI..... 61

Burak AKTEKELİ

BÖLÜM 5

FOTOVOLTAİK VE FOTOVOLTAİK TERMAL SİSTEMLERDE YAPAY
ZEKÂ UYGULAMALARI 83

Meltem KOŞAN

BÖLÜM 6

ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARI İÇİN BİYOMİMETİK SOĞUTMA
ENTEĞRELİ TOPLU PARAMETRE ELEKTRO-TERMAL MODEL
GELİŞTİRİLMESİ.....99

Halil İbrahim VARİYENLİ

Mert ÖKTEN

BÖLÜM 7

KARBON AYAK İZİNİ AZALTMADA YENİLENEBİLİR
ENERJİNİN ROLÜ 117

Merve ERDAL

Adem YILMAZ

BÖLÜM 8

MODERN RÜZGÂR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ:
KÜRESEL GÖRÜNÜM, AERODİNAMİK ESASLAR VE ŞEBEKE
ENTEGRASYONU 135

Tufan Volkan KÜÇÜK

BÖLÜM 9

MÜHENDİSLİK ETİĞİNİN ÖNEMİ: İLKELER, SORUMLULUKLAR
VE ÖRNEK VAKALAR..... 163

Aslı ABDULVAHİTOĞLU

Adnan ABDULVAHİTOĞLU

BÖLÜM 10

GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİNİN TASARIM VE
DEĞERLENDİRMESİNDE ETKİN ALBEDONUN ROLÜ 189

Emrah DENİZ

BÖLÜM 11

MAKİNE VE ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİNDE ÇOK
KRİTERLİ KARAR VERME (ÇKKV) UYGULAMALARI215

Ash ABDULVAHİTOĞLU

Adnan ABDULVAHİTOĞLU

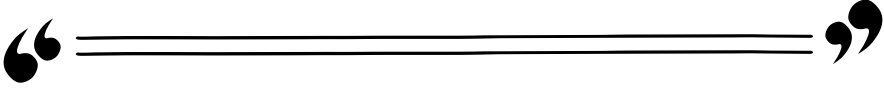
BÖLÜM 12

DÜZLEMSEL GÜNEŞ ENERJİ SİSTEMLERİNDE UZUN DÖNEM
İSTATİSTİKLER KULLANILARAK OPTİMUM EĞİM AÇISININ
HESAPLANMASI.....243

Emrah DENİZ



ENERJİ SİSTEMLERİNDE EKOLOJİK TASARIM VE YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRME YAZILIMLARI



Veysel ÖZDEMİR¹
Ahmet TAŞKESEN²

¹ Prof. Dr. Veysel ÖZDEMİR, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Ankara, vozdemiir@gazi.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9806-9599>

² Prof. Dr. Ahmet TAŞKESEN, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Ankara, taskesen@gazi.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2479-1607>

1. Giriş

Yirmi birinci yüzyılın en belirleyici küresel meydan okumalarından biri olan iklim değişikliği ve çevresel bozulma, enerji sektöründe köklü bir dönüşümü zorunlu kılmaktadır. Fosil yakıtlara dayalı geleneksel enerji üretim modellerinin neden olduğu sera gazı emisyonları, ekosistemler üzerindeki baskıyı artırmakta ve sürdürülebilir bir gelecek için ciddi tehditler oluşturmaktadır. Bu bağlamda, dünya genelinde hükümetler, endüstri liderleri ve sivil toplum kuruluşları, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı, daha temiz, verimli ve dayanıklı enerji sistemleri inşa etme hedefine yönelmiştir. Enerji sistemleri mühendisliği, bu dönüşümün merkezinde yer alarak, yalnızca teknolojik olarak gelişmiş değil, aynı zamanda çevresel ve sosyal açıdan da sorumlu çözümler geliştirme misyonunu üstlenmiştir. Bu misyonun başarıya ulaşması, mühendislik tasarım süreçlerine yeni paradigmaların entegre edilmesini gerektirmektedir.

Bu paradigmaların başında Ekolojik Tasarım (Ekotasarım) ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) gelmektedir. Ekotasarım, bir ürünün veya sistemin çevresel etkilerini, tasarım aşamasından başlayarak tüm yaşam döngüsü boyunca en aza indirmeyi hedefleyen proaktif bir yaklaşımdır. Geleneksel tasarım süreçleri genellikle maliyet, performans ve güvenlik gibi kriterlere odaklanırken, ekotasarım bu kriterlere çevresel performansı da ekleyerek bütüncül bir bakış açısı sunar. Enerji sistemleri gibi uzun ömürlü ve büyük ölçekli altyapılar için ekotasarım prensiplerinin uygulanması, hammadde çıkarımından üretime, işletmeden ömür sonu yönetimine kadar her aşamada kaynak verimliliğini artırma ve çevresel ayak izini küçültme potansiyeli taşır.

Ekotasarım yaklaşımının bilimsel temelini ve nicel değerlendirme aracını ise Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) oluşturur. YDD, bir ürünün, sürecin veya hizmetin “beşikten mezara” (cradle-to-grave) veya “beşikten beşiğe” (cradle-to-cradle) tüm yaşam evreleriyle ilişkili çevresel etkileri sistematik olarak analiz eden standartlaştırılmış bir metodolojidir (SimaPro, 2024). Bu metodoloji, bir enerji santralının sadece işletme sırasında ürettiği emisyonlara odaklanmak yerine, santralin inşası için gereken malzemelerin üretiminden, ekipmanların taşınmasına, bakım faaliyetlerine ve hizmet ömrü sonunda sökülüp bertaraf edilmesine kadar uzanan geniş bir perspektif sunar. Bu bütüncül yaklaşım, çevresel yüklerin bir yaşam döngüsü aşamasından diğerine veya bir etki kategorisinden diğerine kaydırılması gibi istenmeyen durumların önüne geçilmesini sağlar. Örneğin, bir güneş panelinin işletme sırasında sıfır emisyona sahip olması, onun tamamen “temiz” olduğu anlamına gelmez; üretiminde kullanılan enerjinin ve malzemelerin çevresel maliyeti de hesaba katılmalıdır. YDD, bu tür gizli etkileri ortaya çıkararak daha adil ve doğru karşılaştırmalar yapılmasına olanak tanır.

Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, karmaşık YDD analizlerini gerçekleştirmek için güçlü yazılım araçları geliştirilmiştir. Bu yazılımlar, devasa veri setlerini yönetmeyi, karmaşık ürün sistemlerini modellemeyi, uluslararası standartlara uygun etki değerlendirmeleri yapmayı ve sonuçları anlaşılır bir şekilde görselleştirmeyi mümkün kılarak, YDD'nin mühendislik ve karar alma süreçlerine entegrasyonunu büyük ölçüde kolaylaştırmıştır. Enerji sistemleri mühendisleri için bu yazılımlar, farklı teknoloji alternatiflerini (örneğin, rüzgar, güneş, biyokütle, jeotermal) yaşam döngüsü perspektifinden karşılaştırmak, sistem tasarımlarını çevresel performansı optimize edecek şekilde iyileştirmek ve geliştirilen projelerin sürdürülebilirlik iddialarını doğrulamak için vazgeçilmez araçlar haline gelmiştir.

Bu kitap bölümünün temel amacı, enerji sistemleri mühendisliğinde ekolojik tasarım ve yaşam döngüsü değerlendirmesi kavramlarını tanıtmak ve bu analizlerin uygulanmasında kullanılan başlıca yazılım araçlarını derinlemesine incelemektir. Bölüm, öncelikle YDD metodolojisinin temel prensiplerini ve enerji sistemlerine özgü uygulama alanlarını ele alacaktır. Ardından, piyasada mevcut olan YDD ve ekotasarım yazılımlarının genel bir kategorizasyonu ve teknik özellikleri sunulacaktır. Bölümün ana odağını oluşturan dördüncü kısımda ise, openLCA, SimaPro, GaBi/Sphera ve Umberto gibi önde gelen YDD yazılımları ile HOMER gibi enerji sistemi optimizasyon araçları, teknik yetenekleri, güçlü yönleri ve enerji sektöründeki pratik uygulamaları üzerinden detaylı bir şekilde analiz edilecektir. Son olarak, bu yazılımların gelecekteki rolü ve enerji sistemlerinin sürdürülebilir dönüşümüne katkıları üzerine bir değerlendirme ile bölüm tamamlanacaktır. Bu çalışma, enerji mühendisliği alanındaki akademisyenlere, araştırmacılara, öğrencilere ve endüstri profesyonellerine, modern enerji sistemlerinin çevresel performansını değerlendirme ve iyileştirme konusunda kapsamlı bir rehber sunmayı hedeflemektedir.

2. Yaşam Döngüsü Değerlendirme Yöntemi ve Enerji Sistemlerinde Uygulaması

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD), bir ürün, hizmet veya sürecin tüm yaşam evreleri boyunca neden olduğu potansiyel çevresel etkileri değerlendirmek için kullanılan sistematik ve bütüncül bir yöntemdir. Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) tarafından ISO 14040 ve ISO 14044 standartları ile çerçevesi çizilen bu metodoloji, çevresel karar verme süreçlerine bilimsel bir temel sağlamayı amaçlar (SimaPro, 2024). YDD'nin temel gücü, odak noktasını tek bir süreçten veya aşamadan alıp, hammadde eldesinden başlayarak üretim, kullanım, geri dönüşüm ve nihai bertarafa kadar uzanan tüm yaşam döngüsünü kapsayacak şekilde genişletmesidir. Bu yaklaşım, “problem kaydırma” olarak bilinen, bir çevresel sorunu çözerken farkında olmadan başka bir yerde veya başka bir türde yeni bir sorun yaratma

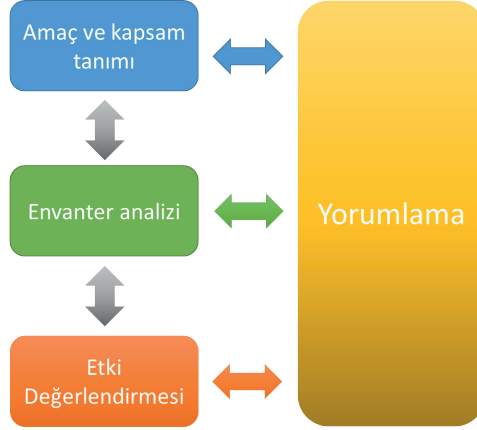
riskini en aza indirir. Enerji sistemleri gibi karmaşık ve uzun ömürlü altyapılar söz konusu olduğunda, YDD'nin bu bütüncül perspektifi, teknolojilerin gerçek çevresel ayak izini anlamak için kritik bir öneme sahiptir.

YDD metodolojisi, birbiriyle ilişkili dört temel aşamadan oluşur. İlk aşama, Amaç ve Kapsam Tanımı'dır. Bu aşamada çalışmanın hedefi, ulaşılmak istenen kitle, sistemin sınırları ve karşılaştırmaların temelini oluşturacak olan “fonksiyonel birim” net bir şekilde belirlenir. Örneğin, bir rüzgar türbini ile bir fotovoltaik (PV) santrali karşılaştıran bir YDD çalışması için fonksiyonel birim, “25 yıllık işletme ömrü boyunca şebekeye 1 kWh net elektrik enerjisi sağlamak” olarak tanımlanabilir. Sistem sınırları ise analize hangi yaşam döngüsü aşamalarının dahil edileceğini belirtir. “Beşikten kapıya” (cradle-to-gate) bir analiz, hammadde eldesinden ürünün fabrika çıkışına kadar olan süreçleri kapsarken, “beşikten mezara” (cradle-to-grave) bir analiz, kullanım ve ömür sonu aşamalarını da içerir.

İkinci aşama, Yaşam Döngüsü Envanter Analizi (YDE)'dir. Bu, çalışmanın en veri yoğun ve meşakkatli kısmıdır. Bu aşamada, tanımlanan sistem sınırları içindeki her bir birim süreç için tüm girdiler (hammadde, su, enerji vb.) ve çıktılar (ürünler, yan ürünler, hava/su/toprak emisyonları, atıklar vb.) nicel olarak derlenir ve toplanır. Örneğin, bir PV panelinin YDE'si, silikon madenciliği, saflaştırma, külçe ve gofret üretimi, hücre ve modül montajı gibi süreçlerin her biri için gereken enerji ve malzeme miktarlarını, ayrıca bu süreçler sırasında ortaya çıkan tüm emisyon ve atıkları içerecektir. Bu veriler, birincil (saha ölçümleri, üretici verileri) veya ikincil (literatür, ticari veritabanları) kaynaklardan elde edilebilir.

Üçüncü aşama, Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi (YDED)'dir. Bu aşamada, envanter analizinde toplanan uzun girdi ve çıktı listesi, potansiyel çevresel etkilerle ilişkilendirilir. Bu, iki ana adımda gerçekleştirilir: sınıflandırma ve karakterizasyon. Sınıflandırmada, her bir envanter kalemi (örneğin, karbondioksit, metan) ilgili çevresel etki kategorilerine (örneğin, küresel ısınma potansiyeli) atanır. Karakterizasyon adımı ise, her bir maddenin ilgili etki kategorisine olan potansiyel katkısı, bilimsel olarak belirlenmiş karakterizasyon faktörleri kullanılarak ortak bir birime dönüştürülür. Örneğin, metanın küresel ısınma potansiyeli, karbondioksitin potansiyelinin belirli bir katı olarak ifade edilir ve tüm sera gazları “kg CO₂ eşdeğeri” cinsinden toplanır. Başlıca etki kategorileri arasında küresel ısınma, ozon tabakası incilmesi, asidifikasyon, ötrofikasyon, insan toksisitesi ve ekotoksisite yer alır. ReCiPe, TRACI, CML ve Çevresel Ayak İzi (EF) gibi farklı YDED metodolojileri, farklı coğrafi ve bilimsel önceliklere göre çeşitli etki kategorileri ve karakterizasyon faktörleri sunar (GreenDelta, 2023; SimaPro, 2024).

Son aşama olan Yorumlama, YDD sürecinin tamamına yayılan ve sonuçların analiz edildiği, değerlendirildiği ve raporlandığı bir faza karşılık gelir. Bu aşamada, envanter ve etki değerlendirme sonuçları, çalışmanın başlangıcında tanımlanan amaç ve kapsam doğrultusunda yorumlanır. Önemli etki kaynakları (“sıcak noktalar”) belirlenir, sonuçların güvenilirliğini test etmek için duyarlılık ve belirsizlik analizleri yapılır ve bulgulara dayalı olarak sonuçlar ve öneriler formüle edilir (SimaPro, 2024).



Şekil 1: LCA Metodolojisi Akış Diyagramı (ISO 14040/44)

Enerji sistemleri alanında YDD uygulaması, geleneksel analizlerin ötesinde derinlemesine bir anlayış sunar. Geleneksel bir analiz, bir kömür santralinin bacasından çıkan emisyonlara odaklanırken, bir YDD çalışması kömürün madenden çıkarılması ve taşınması, santralin inşası için gereken çelik ve betonun üretimi, işletme ömrü sonunda sökülmesi ve atıkların yönetimi gibi tüm süreçleri hesaba katar. Benzer şekilde, yenilenebilir enerji teknolojileri için YDD, bu sistemlerin çevresel avantajlarını doğrulamak ve iyileştirme alanlarını belirlemek için vazgeçilmezdir. Örneğin, rüzgar türbinleri için yapılan YDD çalışmaları, çevresel etkilerin büyük bir kısmının, özellikle çelik, beton ve fiberglas gibi malzemelerin yoğun olarak kullanıldığı üretim aşamasında yoğunlaştığını göstermektedir (Das ve Nandi, 2022). PV sistemlerinde ise en büyük çevresel yük, genellikle yüksek enerji gerektiren polisilikon üretiminden kaynaklanır. Bu bulgular, mühendisleri ve politika yapımcıları, üretim süreçlerinde daha temiz enerji kaynakları kullanmaya, malzeme verimliliğini artırmaya ve ömür sonu geri dönüşüm altyapılarını geliştirmeye teşvik eder.

ISO 14040 ve 14044 standartlarına göre LCA metodolojisi dört temel aşamadan oluşmaktadır. Şekil 1’de bu aşamalar ve aralarındaki ilişkiler gösterilmektedir. İlk aşama olan “Amaç ve Kapsam Belirleme”de çalışmanın hedefleri ve sistem sınırları tanımlanır. Ardından “Envanter Analizi (LCI)” aşamasında enerji tüketimi, hammadde kullanımı ve emisyonlar gibi veriler

toplanır. “Etki Değerlendirmesi (LCIA)” aşamasında bu veriler çevresel etki kategorilerine dönüştürülür ve son olarak “Yorumlama” aşamasında sonuçlar analiz edilerek iyileştirme önerileri geliştirilir. Bu döngüsel yapı, LCA çalışmalarının iteratif bir süreç olduğunu vurgulamaktadır.

Enerji sistemlerinin YDD’inde kullanılan temel performans metrikleri, teknolojiler arasında anlamlı karşılaştırmalar yapılmasına olanak tanır. Bunların en yaygını, yaşam döngüsü boyunca üretilen birim enerji başına (genellikle kWh) salınan Sera Gazı (GHG) Emisyonları’dır ve genellikle kg CO₂-eşdeğeri/kWh olarak ifade edilir. Diğer önemli metrikler ise enerji performansını ölçer. Enerji Geri Ödeme Süresi (EPBT - Energy Payback Time), bir enerji üretim sisteminin, kendi yaşam döngüsü (üretim, kurulum, bakım vb.) boyunca tüketilen toplam enerjiyi üretmesi için ne kadar süre çalışması gerektiğini gösterir. Yatırılan Enerjinin Geri Dönüşü (EROEI - Energy Returned on Energy Invested) ise, sistemin kullanım ömrü boyunca ürettiği toplam enerjinin, yaşam döngüsü boyunca tüketilen toplam enerjiye oranıdır. Yüksek bir EROEI değeri, sistemin enerji açısından daha verimli olduğunu gösterir (Dale vd., 2020).

Farklı çalışmaların farklı varsayımlar ve sistem sınırları kullanması, YDD sonuçlarının karşılaştırılmasını zorlaştırabilir. Bu sorunu ele almak için, ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) gibi kurumlar tarafından yürütülen harmonizasyon çalışmaları büyük önem taşır (NREL, 2021). NREL’in kapsamlı projesi, binlerce yayınlanmış YDD çalışmasını gözden geçirmiş ve sonuçları tutarlı bir metodolojik çerçeveye göre ayarlayarak, farklı elektrik üretim teknolojilerinin yaşam döngüsü sera gazı emisyonlarına ilişkin merkezi eğilimleri ve değişkenlik aralıklarını netleştirmiştir. Bu çalışmalar, rüzgar, güneş ve nükleer gibi düşük karbonlu teknolojilerin yaşam döngüsü emisyonlarının, karbon yakalama teknolojisi olmayan fosil yakıtlı santrallere göre önemli ölçüde daha düşük olduğunu tutarlı bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu tür standartlaştırılmış veriler, enerji politikalarının şekillendirilmesinde ve uzun vadeli stratejik planlamada güvenilir bir temel oluşturur (NREL, 2021).

3. Ekotasarım Yazılımlarının Kategorizasyonu ve Teknik Özellikleri

Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi’nin (YDD) karmaşıklığı ve veri yoğun doğası, bu analizlerin manuel olarak yapılmasını neredeyse imkansız kılmaktadır. Bu nedenle, YDD metodolojisinin endüstriyel ve akademik pratikte yaygınlaşması, büyük ölçüde bu süreci otomatikleştiren, standartlaştıran ve kolaylaştıran özel yazılım araçlarının geliştirilmesiyle mümkün olmuştur. Bu yazılımlar, ekotasarım süreçlerinin ayrılmaz bir parçası haline gelmiş olup, mühendislerin ve tasarımcıların farklı tasarım alternatiflerinin çevresel sonuçlarını hızla değerlendirmelerine ve en

sürdürülebilir çözümleri belirlemelerine olanak tanır. Enerji sistemleri gibi karmaşık ürün-hizmet sistemlerinin analizi için geliştirilen bu yazılımlar, genel olarak üç ana kategoride sınıflandırılabilir (Devela, 2025).

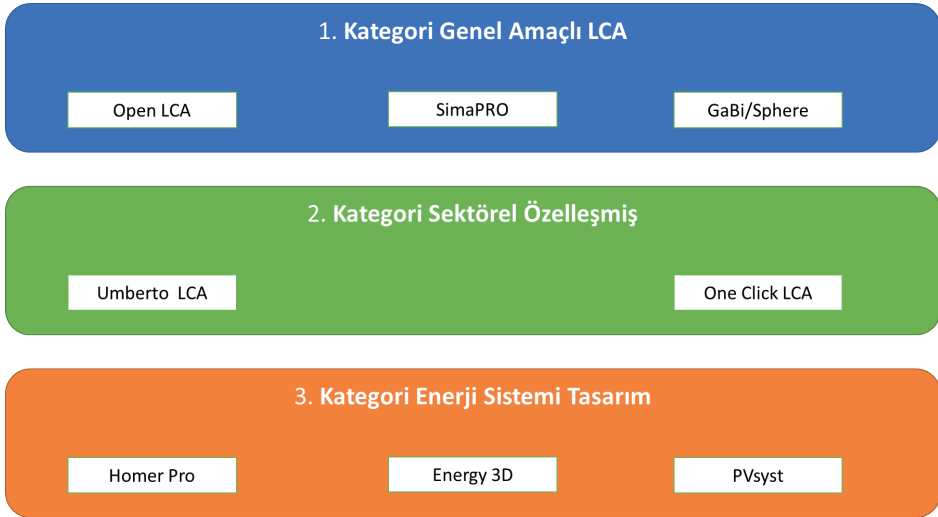
Birinci kategori, Genel Amaçlı YDD Yazılımları'dır. Bu kategori, herhangi bir ürün, süreç veya hizmetin YDD'sini yapmak için tasarlanmış, esnek ve kapsamlı araçları içerir. Bu yazılımlar, belirli bir sektöre veya ürüne özgü olmayıp, kullanıcının kendi modelini sıfırdan oluşturmaya veya mevcut şablonları kendi ihtiyaçlarına göre uyarlamasına olanak tanır. Bu gruptaki en bilinen yazılımlar arasında openLCA, SimaPro ve GaBi/Sphera LCA for Experts bulunmaktadır (openLCA, 2024; SimaPro, 2024; Sphera, 2023). Bu araçlar, geniş veritabanı desteği, çeşitli etki değerlendirme metodolojileri ve gelişmiş analiz yetenekleri sunarak hem akademik araştırmalar hem de kurumsal danışmanlık hizmetleri için endüstri standardı haline gelmiştir. Enerji sistemleri mühendisleri, bu yazılımları kullanarak bir rüzgar türbininden bir batarya depolama sistemine, bir biyoyakıt üretim tesisinden bütün bir ülkenin elektrik şebekesine kadar çok çeşitli sistemleri modelleyebilirler.

İkinci kategori, Sektörel Özelleşmiş Yazılımlar'dır. Bu yazılımlar, belirli bir endüstrinin veya ürün grubunun özel ihtiyaçlarına yönelik olarak geliştirilmiştir. Örneğin, inşaat sektörü için geliştirilen yazılımlar, yapı malzemeleri ve inşaat süreçlerine özgü veritabanları ve modüller içerirken, elektronik sektörü için geliştirilenler elektronik bileşenlerin ve üretim süreçlerinin çevresel etkilerine odaklanır. Bu araçlar, genellikle daha basitleştirilmiş bir arayüze sahiptir ve o sektördeki kullanıcıların YDD konusunda derinlemesine uzman olmasalar bile hızlı ve standartlara uygun analizler yapmalarını hedefler. Enerji sektörü özelinde, örneğin bina enerji verimliliği veya belirli yenilenebilir enerji bileşenleri için geliştirilmiş niş yazılımlar bu kategoriye dahil edilebilir.

Üçüncü kategori ise Sistem Tasarım ve Optimizasyon Yazılımları'dır. Bu yazılımların birincil amacı tam bir YDD yapmak değil, bir sistemin teknik ve ekonomik performansını optimize etmektir. Ancak, sürdürülebilirliğe olan ilginin artmasıyla birlikte, bu araçların birçoğu çevresel metrikleri veya basitleştirilmiş YDD modüllerini de içermeye başlamıştır. Enerji sistemleri mühendisliğinde bu kategorinin en belirgin örneği HOMER Energy yazılımıdır (HOMER Energy, 2024). HOMER, bir mikro şebekenin veya hibrit enerji sisteminin en düşük maliyetli bileşen kombinasyonunu (güneş panelleri, rüzgar türbinleri, dizel jeneratörler, bataryalar vb.) bulmak için tekno-ekonomik simülasyonlar yapar. Doğrudan bir YDD aracı olmasa da, HOMER tarafından üretilen optimize edilmiş sistem konfigürasyonu (örneğin, kurulacak panel sayısı, batarya kapasitesi), daha sonra genel amaçlı bir YDD yazılımına girdi olarak aktarılarak sistemin tam yaşam

döngüsü çevresel etkilerinin hesaplanması için temel oluşturabilir. Bu entegre yaklaşım, hem ekonomik hem de çevresel açıdan optimize edilmiş sistemlerin tasarlanmasında güçlü bir sinerji yaratır.

Ekotasarım yazılımları işlevselliklerine ve hedef kullanıcı gruplarına göre üç ana kategoriye ayrılmaktadır (Şekil 2). Birinci kategoride yer alan genel amaçlı LCA yazılımları (openLCA, SimaPro, GaBi) geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir ve farklı sektörlerde kullanılabilir. İkinci kategorideki sektörel özelleşmiş yazılımlar belirli endüstrilerin ihtiyaçlarına yönelik geliştirilmiştir. Üçüncü kategoride yer alan enerji sistemi tasarım ve optimizasyon yazılımları (HOMER, Energy3D, PVsyst) ise özellikle yenilenebilir enerji projelerinin planlanması ve analizi için özelleştirilmiştir.



Şekil 2: Yazılım Kategorileri Sınıflandırması

Bu farklı kategorilerdeki yazılımlar, bir dizi ortak teknik özelliği paylaşır. Bu özellikler, bir YDD çalışmasının kalitesini, verimliliğini ve güvenilirliğini doğrudan etkiler. Bu özelliklerin başında Modelleme Arayüzü gelir. Bazı yazılımlar, süreçlerin ve akışların kutular ve oklarla görsel olarak temsil edildiği grafik tabanlı bir modelleme ortamı sunar. Umberto gibi yazılımlar bu konuda oldukça gelişmiştir ve özellikle Sankey diyagramları ile madde ve enerji akışlarının sezgisel olarak anlaşılmasını sağlar (iPoint, 2024). Diğer yazılımlar ise süreçlerin ve parametrelerin tablolar veya matrisler aracılığıyla tanımlandığı daha soyut bir yaklaşım benimseyebilir.

Veritabanı Entegrasyonu, bir YDD yazılımının belki de en kritik bileşenidir. YDD analizleri, binlerce farklı süreç (örneğin, çelik üretimi, elektrik üretimi, taşımacılık) için envanter verilerine ihtiyaç duyar. Bu veriler,

Yaşam Döngüsü Envanteri (YDE) veritabanlarında saklanır. Ecoinvent, GaBi/Sphera Managed LCA Content ve USLCI gibi uluslararası kabul görmüş veritabanları, bu yazılımların bel kemiğini oluşturur (openLCA Nexus, 2024; SimaPro, 2024; Sphera, 2023). Yazılımın bu veritabanlarına ne kadar kolay erişim sağladığı, verileri ne kadar güncel tuttuğu ve farklı veritabanları arasında geçiş veya birleştirme imkanı sunup sunmadığı, aracın kullanılabilirliğini belirleyen önemli faktörlerdir.

Etki Değerlendirme Metodolojileri (YDED) de bir diğer temel özelliktir. Yazılımlar, toplanan envanter verilerini çevresel etkilere dönüştürmek için çeşitli YDED metodolojilerini (ReCiPe, TRACI, CML, IPCC GWP faktörleri, EF 3.1 vb.) bünyesinde barındırmalıdır (GreenDelta, 2023; SimaPro, 2024; Sphera, 2023). İyi bir yazılım, kullanıcının farklı metodolojiler arasında kolayca geçiş yapmasına, sonuçları karşılaştırmasına ve hatta kendi özel etki kategorilerini veya karakterizasyon faktörlerini tanımlamasına olanak tanımalıdır.

Analiz ve Görselleştirme Araçları, YDD sonuçlarının yorumlanması aşamasında hayati rol oynar. Katkı analizi, toplam etkinin hangi yaşam döngüsü aşamalarından, süreçlerden veya maddelerden kaynaklandığını belirleyerek “sıcak noktaları” ortaya çıkarır. Belirsizlik analizi, genellikle Monte Carlo simülasyonu kullanılarak, girdi verilerindeki belirsizliklerin nihai sonuçlar üzerindeki etkisini değerlendirir ve sonuçların ne kadar güvenilir olduğu hakkında bir fikir verir (GreenDelta, 2023; SimaPro, 2024). Senaryo analizi, farklı tasarım seçeneklerinin, malzeme seçimlerinin veya ömür sonu stratejilerinin çevresel sonuçlarını karşılaştırma imkanı sunar. Sankey diyagramları gibi görselleştirme araçları ise, karmaşık madde ve enerji akışlarını ve bunların çevresel etkilerle ilişkisini paydaşlara etkili bir şekilde iletmek için güçlü bir yöntemdir (iPoint, 2024).

Son olarak, modern iş akışları için İşbirliği ve Entegrasyon yetenekleri giderek daha önemli hale gelmektedir. SimaPro Synergy veya openLCA Collaboration Server gibi çözümler, birden fazla kullanıcının aynı proje üzerinde eş zamanlı olarak çalışmasına, veri tabanlarını senkronize etmesine ve değişiklikleri izlemesine olanak tanır (openLCA, 2024; SimaPro, 2024). Ayrıca, Uygulama Programlama Arayüzleri (API’ler), YDD yazılımlarının Kurumsal Kaynak Planlaması (ERP), Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) veya Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) gibi diğer kurumsal sistemlerle entegre olmasını sağlayarak, sürdürülebilirlik değerlendirmelerinin tasarım ve üretim süreçlerine daha derinlemesine yerleşmesine yardımcı olur (GreenDelta, 2023; Devela, 2025). Bu entegrasyon, ekotasarımın reaktif bir kontrol mekanizması olmaktan çıkıp, proaktif bir tasarım ilkesi haline gelmesini sağlar.

4. Enerji Sistemlerinde Kullanılan Başlıca Yazılımlar ve Uygulamaları

Enerji sistemlerinin çevresel performansını değerlendirmek ve ekotasarım prensiplerini uygulamak için kullanılan yazılım araçları, metodolojik derinlik, kullanım kolaylığı ve uygulama alanı açısından farklılık gösterir. Bu bölümde, sektörde öne çıkan dört ana YDD yazılımı (openLCA, SimaPro, GaBi/Sphera, Umberto) ve bir tekno-ekonomik optimizasyon aracı (HOMER), teknik özellikleri ve enerji sistemlerindeki pratik uygulamalarıyla birlikte detaylı bir şekilde incelenecektir.

openLCA

openLCA, Alman GreenDelta firması tarafından 2006 yılından beri geliştirilen, ücretsiz, açık kaynak kodlu ve profesyonel düzeyde bir Yaşam Döngüsü Değerlendirme yazılımıdır (GreenDelta, 2023; openLCA, 2024). Açık kaynak felsefesi sayesinde dünya çapında, özellikle akademik çevreler, araştırma kurumları ve küçük-orta ölçekli işletmeler tarafından yaygın bir şekilde benimsenmiştir. Yazılımın ücretsiz olması, YDD analizlerine erişimi demokratikleştirirken, modüler yapısı ve esnekliği, onu son derece güçlü bir araştırma ve geliştirme aracı haline getirmektedir. Mayıs 2023'te yayınlanan 2.0 sürümü, kullanıcı arayüzü, kullanılabilirlik ve özellik seti açısından önemli iyileştirmeler getirerek yazılımı modern bir platforma taşımıştır (GreenDelta, 2023).

Teknik Özellikler ve Yetenekler:

openLCA, standart bir YDD çalışması için gerekli tüm temel özelliklerin yanı sıra birçok gelişmiş yetenek sunar. Yazılım, ürün sistemlerinin karmaşık ve büyük ölçekli modellerinin oluşturulmasına olanak tanır. Güçlü veri yönetimi özellikleri sayesinde, kullanıcılar kendi veritabanlarını oluşturabilir, güncelleyebilir ve farklı formatlardaki verileri (örneğin, EcoSpold, ILCD) içe veya dışa aktarabilir (GreenDelta, 2023). openLCA'nın en büyük avantajlarından biri, openLCA Nexus web sitesi (bir nevi uygulama marketi) üzerinden hem ücretsiz hem de ticari olan çok sayıda Yaşam Döngüsü Envanteri (YDE) veritabanına doğrudan erişim sağlamasıdır. Bu veritabanları arasında ecoinvent, GaBi, USLCI ve Agribalyse gibi endüstri standartları bulunmaktadır (openLCA Nexus, 2024).

Yazılım, standart YDD'nin ötesine geçerek Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi (LCSA) yapılmasına da olanak tanır. Bu kapsamda, çevresel etkilerin yanı sıra Yaşam Döngüsü Maliyetlendirmesi (LCC) ve Sosyal Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (S-LCA) için de modelleme yetenekleri sunar (GreenDelta, 2023). Analiz tarafında, katkı ağaçları, süreç sonuçları ve gruplama gibi standart araçların yanı sıra, girdi verilerindeki

belirsizliklerin sonuçlara etkisini değerlendirmek için Monte Carlo simülasyonu gibi gelişmiş istatistiksel analizler de yapılabilir (GreenDelta, 2023). Ayrıca, coğrafi olarak farklılaşan etkileri modellemek için bölgeselleştirilmiş YDD yeteneği de sunmaktadır (GreenDelta, 2023). openLCA'nın en ayırt edici özelliklerinden biri, Python veya SQL dillerini kullanarak uygulama içinde betik (scripting) yazma imkanı tanımasıdır (GreenDelta, 2023). Bu özellik, tekrarlayan modelleme görevlerini otomatikleştirmek, karmaşık hesaplamalar yapmak veya diğer yazılımlarla özel entegrasyonlar geliştirmek için ileri düzey kullanıcılara büyük bir esneklik sağlar. Kurumsal kullanıcılar ve ekipler için geliştirilen LCA Collaboration Server, birden fazla kullanıcının aynı veritabanları üzerinde eş zamanlı çalışmasına olanak tanırken, API (Uygulama Programlama Arayüzü), openLCA'nın diğer bilişim sistemleriyle entegre edilmesini kolaylaştırır (GreenDelta, 2023; openLCA, 2024).

Enerji Sistemlerinde Uygulamaları:

openLCA'nın ücretsiz ve esnek yapısı, onu özellikle yenilenebilir enerji teknolojileri üzerine yapılan akademik araştırmalar ve kamu destekli projeler için popüler bir seçenek haline getirmiştir. ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL), bu alandaki en önemli aktörlerden biridir. NREL, Federal LCA Commons (FLCAC) platformu aracılığıyla, ABD'deki konut tipi fotovoltaik (PV) sistemlerin yaşam döngüsü envanter verilerini openLCA'nın formatlarıyla uyumlu bir şekilde kamuya sunmaktadır (FLCAC, 2024; NREL, 2024). Bu veri setleri, farklı montaj yapıları, inverter tipleri ve diğer elektriksel bileşenleri içeren detaylı modelleri kapsar (FLCAC, 2024). Bu sayede araştırmacılar, ABD koşullarına özgü PV sistemlerinin çevresel etkilerini standart ve şeffaf bir şekilde analiz edebilirler. openLCA, bu tür büyük ve detaylı modelleri yönetme ve analiz etme kapasitesine sahiptir.

Yazılım, sadece PV sistemleri için değil, aynı zamanda rüzgar, biyokütle, jeotermal ve diğer enerji teknolojilerinin YDD çalışmalarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, farklı coğrafi bölgelerde üretilen ve kurulan bir rüzgar türbininin yaşam döngüsü analizinde, openLCA'nın bölgeselleştirme yetenekleri, üretim ve kullanım aşamalarındaki elektrik şebekesi karışımlarının ve yerel çevresel koşulların etkisini daha doğru bir şekilde modellemeye olanak tanır. Betik yazma özelliği, araştırmacıların enerji sistemlerinin dinamik davranışlarını (örneğin, bir bataryanın zaman içindeki degradasyonu veya bir PV panelinin performansının iklim koşullarına göre değişimi) modele dahil eden daha sofistike analizler yapmalarını sağlar. openLCA, aynı zamanda Çevresel Ürün Beyanları (EPD) oluşturma sürecini de destekleyerek, enerji ekipmanı üreticilerinin ürünlerinin çevresel performansını standartlara uygun bir şekilde beyan etmelerine yardımcı olur (GreenDelta, 2023).

SimaPro

SimaPro, Hollandalı PRé Sustainability firması tarafından geliştirilen, dünyanın en eski ve en köklü ticari YDD yazılımlarından biridir. 1990’ların başından beri piyasada olan SimaPro, özellikle profesyonel YDD danışmanları, büyük kurumsal sürdürülebilirlik departmanları ve akademisyenler arasında güçlü bir itibara sahiptir (SimaPro, 2024; ESU-services, 2024). Yazılım, metodolojik sağlamlığı, şeffaflığı ve güçlü analiz yetenekleriyle tanınır. SimaPro, kullanıcı ihtiyaçlarına göre farklılaşan iki ana çözüm sunmaktadır: SimaPro Craft ve SimaPro Synergy (SimaPro, 2024).

Teknik Özellikler ve Yetenekler:

SimaPro Craft, geleneksel masaüstü yazılımı olup, detaylı ve uzman düzeyinde YDD modellemesi için tasarlanmıştır. En ayırt edici özelliklerinden biri, bir ürün sisteminin süreçlerini ve akışlarını grafiksel olarak gösteren Ağaç (Network) Görünümü’dür (SimaPro, 2024). Bu görünüm, modeldeki bağlantıları, malzeme akışlarını ve çevresel etki dağılımını (çizgi kalınlıklarıyla gösterilir) sezgisel olarak anlamayı kolaylaştırır. SimaPro Craft, farklı tasarım senaryolarını veya varsayımları karşılaştırmak için güçlü parametre setleri oluşturma yeteneği sunar (SimaPro, 2024). Bu, ekotasarım süreçlerinde “eğer-öyleyse” analizleri yapmak için son derece kullanışlıdır. Yazılım, ecoinvent veritabanındaki belirsizlik verilerini kullanarak kapsamlı Monte Carlo belirsizlik analizleri yapabilir ve sonuçların istatistiksel dağılımını sunar (SimaPro, 2024). Ayrıca, sonuçları sadece süreçlere veya yaşam döngüsü aşamalarına göre değil, aynı zamanda “ulaşım”, “enerji” gibi işlevsel gruplara göre analiz etme imkanı da tanır. Çok kullanıcıli versiyonları, ekiplerin aynı veritabanı üzerinde işbirliği içinde çalışmasını sağlar.

SimaPro Synergy, SimaPro Craft’ın uzman modelleme yeteneklerini kurumsal ölçeğe taşıyan, bulut tabanlı bir platformdur. Synergy’nin temel amacı, YDD’yi bir şirketin daha geniş karar alma süreçlerine entegre etmektir. API’ler aracılığıyla diğer iş sistemleriyle (örneğin, PLM, ERP) entegre olabilir, bu da ürün geliştirme ekiplerinin veya tedarik zinciri yöneticilerinin kendi arayüzlerinden çıkmadan çevresel metrikleri görmelerini ve kullanmalarını sağlar (SimaPro, 2024; Devela, 2025). Bu platform, YDD hesaplamalarını ölçeklendirmek ve otomatikleştirmek için tasarlanmıştır, böylece bir şirket yüzlerce veya binlerce ürününün çevresel ayak izini sürekli olarak izleyebilir.

Her iki SimaPro sürümü de, dünyanın en kapsamlı YDE veritabanı olan ecoinvent başta olmak üzere Agri-footprint gibi birçok önemli veritabanını bünyesinde barındırır (SimaPro, 2024; SimaPro, 2024). Ayrıca, ReCiPe, EF 3.1, TRACI gibi en güncel ve yaygın kullanılan tüm YDED metodolojilerini içerir (SimaPro, 2024).

Enerji Sistemlerinde Uygulamaları:

SimaPro, sağlamlığı ve güvenilirliği sayesinde enerji sektöründeki YDD çalışmalarında, özellikle de endüstriyel projeler ve karşılaştırmalı analizlerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Rüzgar enerjisi alanında yapılan çok sayıda vaka çalışması, SimaPro'nun bu teknolojinin çevresel etkilerini değerlendirmedeki rolünü göstermektedir. Örneğin, Polonya'da yapılan bir çalışmada SimaPro, 2 MW'lık bir rüzgar santrali ile 2 MW'lık bir PV santralinin 22 farklı etki kategorisi üzerinden karşılaştırmalı bir YDD'sini yapmak için kullanılmıştır (Zakrzewski ve Pietracho, 2022). Bu tür analizler, politika yapıcılara farklı yenilenebilir enerji alternatiflerinin çevresel ödünleşimlerini anlama konusunda değerli veriler sunar.

Benzer şekilde, Hindistan'da yapılan çalışmalarda SimaPro, farklı rüzgar türbini jeneratör teknolojilerinin (örneğin, Asenkron ve Senkron jeneratörler) çevresel performansını karşılaştırmak ve rüzgar hızının çevresel etkilere olan duyarlılığını analiz etmek için kullanılmıştır (Das ve Nandi, 2022; Kumar vd., 2022). SimaPro'nun parametrik modelleme ve senaryo analizi yetenekleri, bu tür teknolojik ve operasyonel değişkenlerin etkisini modellemek için idealdir. Bir rüzgar çiftliğinin YDD'sinde, türbin modeli, temel tipi, coğrafi konum ve şebeke bağlantı mesafesi gibi parametreler değiştirilerek farklı senaryolar oluşturulabilir ve en çevre dostu konfigürasyon belirlenebilir.

SimaPro ayrıca, hibrit enerji sistemlerinin analizinde de kullanılmaktadır. Örneğin, bir PV sistemi ile batarya depolama ünitesini birleştiren bir sistemin YDD'sinde, her iki bileşenin de üretim, kullanım ve ömür sonu aşamaları SimaPro'da modellenir. Belirsizlik analizi özelliği, batarya ömrü veya PV panel verimliliği gibi belirsiz parametrelerin genel çevresel etki üzerindeki potansiyel aralığını tahmin etmek için kullanılabilir (SimaPro, 2024). Bu, yatırımcılara ve sistem tasarımcılarına projenin çevresel riskleri hakkında daha net bir resim sunar.

GaBi / Sphera LCA for Experts

GaBi, başlangıçta Alman PE International (daha sonra thinkstep) tarafından geliştirilen ve günümüzde küresel sürdürülebilirlik yazılım ve danışmanlık lideri Sphera'nın bir parçası olan, önde gelen bir ticari YDD yazılımıdır. GaBi, özellikle büyük endüstriyel kuruluşlar ve kurumsal müşteriler arasında güçlü bir pazar payına sahiptir. Sphera'nın portföyüne entegre olmasıyla birlikte, yazılım "Sphera LCA for Experts (LCA FE)" olarak yeniden adlandırılmış ve veritabanları "Sphera Managed LCA Content (MLC)" olarak markalaştırılmıştır (Sphera, 2023). GaBi'nin temel felsefesi, YDD'yi kurumsal süreçlere (ürün geliştirme, tedarik zinciri yönetimi, stratejik planlama) entegre ederek sürdürülebilirliği bir iş değeri haline getirmektir.

Teknik Özellikler ve Yetenekler:

GaBi'nin en büyük gücü, kendi kapsamlı ve titizlikle yönetilen Yaşam Döngüsü Envanteri (YDE) veritabanı olan Sphera Managed LCA Content'tir. 2023.1 güncellemesi itibarıyla yaklaşık 18.500 yüksek kaliteli veri seti içeren bu veritabanı, enerji, metaller, kimyasallar, plastikler ve ulaşım gibi birçok endüstriyel sektörü kapsayan özel ve güncel veriler sunar (Sphera, 2023). Sphera, bu veritabanını en son endüstriyel veriler, teknolojik gelişmeler ve standartlarla (örneğin, HBEFA 4.2 yol taşımacılığı emisyon faktörleri) sürekli olarak günceller (Sphera, 2023). Bu, özellikle endüstriyel üretim süreçlerini doğru bir şekilde modellemek isteyen kurumsal kullanıcılar için büyük bir avantajdır.

Yazılım, süreçlerin ve ürün sistemlerinin görsel olarak oluşturulduğu, esnek ve güçlü bir grafiksel modelleme arayüzü sunar. Kullanıcılar, planları (süreçleri) ve akışları sürükleyip-bırak yöntemiyle birleştirerek karmaşık yaşam döngüsü modelleri oluşturabilirler. GaBi, parametrik modellemeyi ve senaryo analizini güçlü bir şekilde destekler. Bu, kullanıcıların farklı malzeme seçeneklerinin, tedarikçilerin veya üretim rotalarının çevresel etkilerini kolayca karşılaştırmasına olanak tanır. Yazılım, YDD sonuçlarını analiz etmek için gösterge tabloları (dashboards), zayıf nokta analizleri ve karşılaştırma araçları gibi çeşitli görselleştirme özellikleri sunar.

GaBi'nin kurumsal odaklı bir diğer önemli özelliği, diğer iş sistemleriyle olan entegrasyon yetenekleridir. Sphera, GaBi'nin SAP gibi ERP sistemleri ve çeşitli PLM platformları ile entegre olmasını sağlayan çözümler sunar (Devela, 2025). Bu entegrasyon, tasarım mühendislerinin veya satın alma uzmanlarının, kullandıkları yazılım ortamından ayrılmadan, kararlarının çevresel etkilerini anında görmelerini sağlar. Bu, ekotasarımın reaktif bir analizden proaktif bir tasarım kriterine dönüşmesine yardımcı olur. Yazılım, ISO 14040/44'e uygun YDD'lerin yanı sıra, Çevresel Ürün Beyanları (EPD), Ürün Çevresel Ayak İzi (PEF) ve kurumsal karbon ayak izi raporlaması gibi çeşitli standartlara ve yönetmeliklere uyumu destekler.

Enerji Sistemlerinde Uygulamaları:

GaBi/Sphera, enerji sektöründe faaliyet gösteren büyük ekipman üreticileri (örneğin, türbin, trafo, kablo üreticileri), enerji şirketleri ve mühendislik firmaları tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu şirketler, GaBi'yi ürünlerinin çevresel performansını iyileştirmek, müşteri taleplerine yanıt vermek, EPD'ler oluşturmak ve kurumsal sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için kullanırlar.

Örneğin, bir rüzgar türbini üreticisi, GaBi'yi kullanarak farklı kanat tasarımlarının veya kule malzemelerinin (örneğin, çelik vs. beton) yaşam

döngüsü etkilerini karşılaştırabilir. GaBi'nin kapsamlı veritabanı, üretimde kullanılan spesifik çelik alaşımlarının, kompozit malzemelerin veya elektronik bileşenlerin çevresel ayak izini doğru bir şekilde modellemeye olanak tanır (Sphera, 2023). Senaryo analizi özelliği, farklı tedarikçilerden gelen bileşenlerin etkisini değerlendirmek veya üretim tesisinde yenilenebilir enerji kullanımının getireceği çevresel faydayı hesaplamak için kullanılabilir.

Hibrit enerji sistemleri gibi karmaşık sistemlerin analizinde de GaBi güçlü bir araçtır. Örneğin, yenilenebilir enerji kaynakları ile hidrojen üretimini (örneğin, elektroliz) ve depolamayı birleştiren bir sistemin YDD'si, GaBi kullanılarak modellenabilir (Sayed vd., 2021). Bu analiz, sadece sistemin işletme sırasındaki performansını değil, aynı zamanda elektrolizörün, depolama tanklarının ve diğer altyapı bileşenlerinin üretim ve ömür sonu aşamalarını da kapsayacaktır. GaBi'nin detaylı kimyasal ve malzeme veritabanları, bu tür ileri teknoloji sistemlerin envanter analizini yapmak için kritik öneme sahiptir. Her ne kadar kamuya açık spesifik vaka çalışmaları sınırlı olsa da, GaBi'nin endüstriyel odaklı yapısı ve kapsamlı veritabanı, onu enerji sektöründeki karmaşık tedarik zincirlerinin ve üretim süreçlerinin modellenmesi için vazgeçilmez bir araç haline getirmektedir.

Umberto

Umberto, Alman iPoint-systems firması tarafından geliştirilen ve temel ayırt edici özelliği Madde Akış Analizi (MFA) ve görsel modelleme üzerine odaklanması olan bir ticari YDD yazılımıdır (iPoint, 2024). Umberto, bir üretim tesisinin veya ürün yaşam döngüsünün içindeki malzeme ve enerji akışlarını şeffaf bir şekilde görselleştirmeyi ve optimize etmeyi hedefler. Bu yaklaşımı, YDD'yi kaynak verimliliği ve maliyet azaltma hedefleriyle doğrudan ilişkilendirir. Bu nedenle, Umberto özellikle üretim süreçlerinde eko-verimliliği artırmak isteyen endüstriyel kullanıcılar için güçlü bir araçtır.

Teknik Özellikler ve Yetenekler:

Umberto'nun en belirgin özelliği, grafik tabanlı modelleme ve Sankey diyagramlarının entegre kullanımıdır (iPoint, 2024; iPoint, 2024). Kullanıcılar, üretim sistemlerini veya yaşam döngüsü aşamalarını, süreçleri temsil eden kutular (yerler) ve aralarındaki malzeme/enerji akışlarını temsil eden oklar (geçişler) ile görsel olarak oluştururlar. Model hesaplandığında, bu oklar otomatik olarak akışın büyüklüğüyle orantılı kalınlıkta bir Sankey diyagramına dönüşür. Bu diyagramlar, bir sistemdeki en büyük malzeme ve enerji akışlarının, kayıpların ve atıkların nerede meydana geldiğini bir bakışta anlamayı sağlar. Bu görsel yaklaşım, sonuçların teknik olmayan paydaşlara iletilmesinde son derece etkilidir.

Umberto'yu diğer YDD yazılımlarından ayıran bir diğer önemli özellik, ISO 14051 standardına uygun olarak Madde Akış Maliyet Muhasebesi (MFCA) yapabilmesidir (iPoint, 2024). Bu özellik, sadece malzeme ve enerji akışlarının fiziksel miktarını değil, aynı zamanda bu akışlarla ilişkili maliyetleri de modellemeye olanak tanır. Özellikle, atık veya emisyon olarak sistemden çıkan “kayıp” malzemelerin gizli maliyetlerini (hammadde, işleme, bertaraf maliyetleri) ortaya çıkarır. Bu, çevresel iyileştirmelerin ekonomik faydalarını doğrudan göstermeyi ve kaynak verimliliği projeleri için bir iş gereksesi oluşturmayı kolaylaştırır.

Bu temel özelliklerin yanı sıra Umberto, standart bir YDD yazılımının yeteneklerini de sunar. Ecoinvent ve GaBi gibi harici YDE veritabanlarını entegre edebilir, ReCiPe ve TRACI gibi standart YDED metodolojilerini kullanarak çevresel etki değerlendirmeleri yapabilir. Hiyerarşik modelleme, kullanıcıların karmaşık sistemleri alt modellere ayırarak daha yönetilebilir hale getirmesine olanak tanır. Ayrıca, birincil verileri entegre etmek için Microsoft Excel ile canlı bağlantılar kurabilir ve senaryo analizleri yaparak farklı optimizasyon stratejilerini karşılaştırabilir.

Enerji Sistemlerinde Uygulamaları:

Umberto'nun madde ve enerji akışlarına odaklanması, onu enerji sistemlerinin fiziksel altyapısının ve üretim süreçlerinin analizinde özellikle değerli kılar. Örneğin, bir biyoyakıt (örneğin, biyoetanol veya biyodizel) üretim tesisinin modellenmesinde Umberto, son derece etkili bir araçtır (iPoint, 2024). Tesisin tüm süreçleri (hammadde hazırlama, fermantasyon, distilasyon vb.) görsel olarak modellenebilir ve Sankey diyagramları, ana ürün, yan ürünler, su kullanımı, enerji tüketimi ve atık akışlarının dağılımını net bir şekilde gösterebilir. MFCA özelliği, süreçteki verimsizliklerin (örneğin, düşük reaksiyon verimi veya malzeme kayıpları) ekonomik maliyetini ortaya koyarak, proses mühendislerinin optimizasyon çabalarını nereye odaklayacaklarını belirlemelerine yardımcı olur.

Benzer şekilde, bir PV panel üretim hattının veya bir batarya geri dönüşüm tesisinin modellenmesinde de Umberto kullanılabilir. Batarya geri dönüşümünde, Umberto, gelen atık bataryalardaki değerli metallerin (lityum, kobalt, nikel) hidrometalurjik veya pirometalurjik süreçler boyunca nasıl ayrıştırıldığını, ne kadarının geri kazanıldığını ve ne kadarının kaybolduğunu görselleştirebilir. Bu, geri dönüşüm verimliliğini artırmak ve süreçleri optimize etmek için kritik bilgiler sağlar.

Enerji sistemlerinin ömür sonu yönetimi de Umberto'nun güçlü olduğu bir başka alandır. Hizmet ömrünü tamamlamış bir rüzgar türbini kanadının sökülmesi, taşınması ve farklı bertaraf veya geri dönüşüm senaryolarına (örneğin, çimento fırınlarında yakma, mekanik geri dönüşüm, kimyasal

geri dönüşüm) yönlendirilmesi modellenebilir. Her bir senaryonun malzeme akışları, enerji gereksinimleri, maliyetleri ve çevresel etkileri karşılaştırılarak en sürdürülebilir ömür sonu stratejisi belirlenebilir. Umberto'nun bu yeteneği, döngüsel ekonomi prensiplerini enerji sistemleri tasarımına entegre etmek için güçlü bir zemin oluşturur.

HOMER ve Diğerleri

Bu kategorideki yazılımlar, geleneksel YDD araçlarından farklı bir amaca hizmet eder. Birincil odakları çevresel etki hesaplamak değil, enerji sistemlerinin teknik ve ekonomik tasarımını optimize etmektir. Ancak, sürdürülebilir enerji sistemleri tasarımında oynadıkları kritik rol nedeniyle bu bölümde ele alınmaları önemlidir.

HOMER Energy:

HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources), NREL tarafından geliştirilen ve daha sonra ticarileştirilen, mikro şebekeler ve hibrit enerji sistemleri için endüstri standardı haline gelmiş bir tekno-ekonomik optimizasyon yazılımıdır (HOMER Energy, 2024). HOMER'ın temel işlevi, belirli bir elektrik yükünü karşılamak için farklı enerji kaynaklarının (güneş, rüzgar, dizel jeneratör, şebeke, bataryalar vb.) en düşük maliyetli kombinasyonunu bulmaktır. Yazılım, binlerce farklı sistem konfigürasyonunu bir yıl boyunca saatlik (veya daha kısa) zaman adımlarıyla simüle eder ve her bir konfigürasyonun net bugünkü maliyetini (kurulum, işletme, bakım, yakıt, değiştirme maliyetleri dahil) hesaplar. Sonuç olarak, kullanıcıya teknik olarak uygulanabilir ve ekonomik olarak en uygun sistem tasarımlarının bir listesini sunar.

HOMER, üç ana ürün sunar: HOMER Pro (şebekeden bağımsız, izole sistemler için), HOMER Grid (şebekeye bağlı, talep ücreti yönetimi ve esneklik odaklı sistemler için) ve HOMER Front (şebeke ölçeğinde enerji depolama ve yenilenebilir enerji santralleri için) (HOMER Energy, 2024).

HOMER doğrudan bir YDD yazılımı değildir ve yaşam döngüsü çevresel etkilerini hesaplamaz. Ancak, sürdürülebilir enerji sistemi tasarımında iki aşamalı bir iş akışının ilk ve en önemli adımını oluşturur (HOMER Energy, 2024). Bir mühendis, öncelikle HOMER'ı kullanarak bir hibrit enerji sistemini maliyet ve güvenilirlik açısından optimize eder. HOMER'ın çıktısı, sistemin tam bir envanterini içerir: örneğin, 50 kW PV paneli, 20 kW rüzgar türbini, 100 kWh batarya bankası ve 15 kW dizel jeneratör. Bu detaylı bileşen listesi, daha sonra openLCA veya SimaPro gibi tam teşekküllü bir YDD yazılımına girdi olarak aktarılır. YDD yazılımında, bu bileşenlerin her birinin üretim, taşıma, bakım ve ömür sonu süreçleri modellenerek, HOMER tarafından ekonomik olarak optimize edilmiş sistemin yaşam döngüsü çevresel ayak izi

hesaplanır. Bu entegre yaklaşım, hem ekonomik verimliliği hem de çevresel sürdürülebilirliği gözeten bütüncül bir tasarım süreci sağlar.

Diğer Yazılımlar:

Enerji sistemleri analizinde kullanılan başka birçok özel araç da bulunmaktadır. Örneğin, EnergyPLAN gibi yazılımlar, ulusal veya bölgesel düzeyde enerji sistemlerinin (elektrik, ısıtma, soğutma, ulaşım dahil) saatlik simülasyonunu yaparak farklı yenilenebilir enerji entegrasyon senaryolarının teknik ve ekonomik analizini yapar. Bu tür araçların çıktıları da benzer şekilde YDD analizleri için değerli bir girdi sağlayabilir. Bu yazılımlar, ekotasarım ve YDD sürecinin farklı aşamalarında, optimizasyondan detaylı çevresel analize kadar uzanan bir araç zinciri oluşturarak mühendislere kapsamlı bir karar destek sistemi sunar.

Tablo 1’de LCA yazılımlarının karşılaştırmalı özellikleri sunulmaktadır. Tabloda görüldüğü gibi, openLCA açık kaynak yapısı sayesinde ücretsiz erişim imkanı sunmaktadır ve geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından tercih edilmektedir. SimaPro ve GaBi/Sphera ise ticari yazılımlar olarak daha kapsamlı teknik destek ve kurumsal çözümler sunmaktadır. Umberto’nun graf tabanlı modelleme yaklaşımı, özellikle madde ve enerji akış analizlerinde avantaj sağlarken, HOMER hibrit enerji sistemleri için özelleşmiş bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Farklı enerji teknolojilerinin yaşam döngüsü performans metrikleri Tablo 3’te karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Tabloda görüldüğü üzere, yenilenebilir enerji teknolojileri (PV ve rüzgar) fosil yakıtlara kıyasla önemli ölçüde daha düşük sera gazı emisyonlarına sahiptir. PV sistemlerin yaşam döngüsü emisyonları 11-50 g CO₂-eşd./kWh aralığında iken, kömür santrallerinde bu değer 800-1200 g CO₂-eşd./kWh seviyesindedir. Enerji geri ödeme süreleri açısından da yenilenebilir teknolojiler avantajlıdır; rüzgar türbinleri 0.3-1.0 yıl içinde üretimlerinde kullanılan enerjiyi geri kazanırken, PV sistemler 0.5-2.5 yıl içinde bu noktaya ulaşmaktadır.

Tablo 1: LCA Yazılımlarının Karşılaştırmalı Özellikleri

Yazılım	Lisans Tipi	Başlıca Veritabanı Desteği	Başlıca LCIA Metotları	Güçlü Yönleri	Hedef Kitle
openLCA	Açık Kaynak (Ücretsiz)	ecoinvent, GaBi, USLCl, Agribalyse	ReCiPe, TRACI, EF 3.1, CML, ILCD	Esneklik, ücretsiz erişim, betik yazma, akademik kullanım	Akademisyenler, Araştırmacılar, KOBİ'ler
SimaPro	Ticari (Abonelik)	ecoinvent, Agri-footprint, USLCl	ReCiPe, TRACI, EF 3.1, CML, ILCD	Güçlü analiz (belirsizlik, senaryo), şeffaflık, kurumsal entegrasyon (Synergy)	YDD Danışmanları, Kurumsal Sürdürülebilirlik Departmanları
GaBi/Sphera	Ticari (Abonelik)	Sphera Managed LCA Content (MLC), ecoinvent	ReCiPe, TRACI, CML, ILCD, EF 3.1	Kapsamlı özel veritabanı, endüstri entegrasyonu (ERP/PLM), kurumsal çözümler	Büyük Endüstriyel Kuruluşlar, Üreticiler
Umberto	Ticari (Abonelik/ Kalıcı)	ecoinvent, GaBi	ReCiPe, TRACI, CML	Madde/ enerji akış modellemesi, Sankey diyagramları, maliyet muhasebesi (MFCA)	Üretim ve Proses Mühendisleri, Kaynak Verimliliği Uzmanları
HOMER	Ticari (Abonelik)	- (Bileşen Kütüphaneleri)	- (Çevresel Etki Hesaplamaz)	Hibrit enerji sistemi teknolojik optimizasyonu, maliyet minimizasyonu	Enerji Sistemi Tasarımcıları, Proje Geliştiriciler

Tablo 2: Enerji Sistemleri Vaka Çalışmaları ve Kullanılan Yazılımlar

Enerji Sistemi	Vaka Çalışması Özeti	Kullanılan Yazılım	Temel Bulgular/ Amaç	Kaynak (Örnek)
PV Solar	ABD'deki konut tipi PV sistemlerinin yaşam döngüsü envanter verilerinin geliştirilmesi ve kamuya sunulması.	openLCA	Standartlaştırılmış ve şeffaf YDD analizlerini mümkün kılmak.	NREL / LCA Commons (FLCAC, 2024; NREL, 2024)
Rüzgar Enerjisi	Polonya'daki bir rüzgar santralının yaşam döngüsü değerlendirmesi ve bir PV santrali ile karşılaştırılması.	SimaPro	Farklı yenilenebilir teknolojilerin çevresel etkilerini çoklu kategoride karşılaştırmak.	PMC (2022) (Zakrzewski ve Pietracho, 2022)
Rüzgar Enerjisi	Hindistan'daki bir rüzgar çiftliğinin YDD'si ve kömür santrali ile karşılaştırılması.	SimaPro	Rüzgar enerjisinin küresel ısınma potansiyelindeki önemli düşüşü (%98.8) göstermek.	MDPI (2022) (Kumar vd., 2022)
Hibrit Sistem	Bir ofis binası için Yenilenebilir Enerji Kaynakları (RES) ve hidrojen tabanlı hibrit bir sistemin performans ve YDD analizi.	Belirtilmemiş (Ancak SimaPro/GaBi uygun)	Sistemin Küresel Isınma Potansiyelini (GWP) ve diğer çevresel metriklerini hesaplamak.	ResearchGate (2021) (Sayed vd., 2021)
Biyokütle	Bir biyoyakıt üretim tesisinin madde ve enerji akışlarının optimizasyonu.	Umberto	Sankey diyagramları ve MFCA ile süreç verimsizliklerini ve maliyet kayıplarını belirlemek.	iPoint-systems (iPoint, 2024)

Enerji sistemlerinde kullanılan yazılımların vaka çalışmaları Tablo 2'de özetlenmektedir. Tabloda görüldüğü üzere, openLCA ve SimaPro fotovoltaiik güneş enerjisi sistemlerinin yaşam döngüsü değerlendirmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. NREL'in 2024 yılında yayınladığı güncellenmiş PV sistem LCA çalışması openLCA ile gerçekleştirilmiş olup, sera gazı emisyonlarının düşük seviyelerde olduğunu göstermiştir. Rüzgar enerjisi sistemlerinde ise SimaPro ve GaBi/Sphera'nın kapsamlı analiz yetenekleri tercih edilmektedir. Umberto ise biyokütle sistemlerinde madde akış analizi için güçlü bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Tablo 3: YDD Metrikleri ve Enerji Teknolojileri için Tipik Değerler

Metrik	Tanım	Güneş PV (Tipik Aralık)	Rüzgar (Tipik Aralık)	Fosil Yakıtlar (Kömür)
Yaşam Döngüsü GHG Emisyonları (g CO ₂ -eşd./kWh)	Beşikten mezara kadar olan tüm yaşam döngüsü boyunca salınan toplam sera gazı emisyonları.	11 - 50	4 - 25	800 - 1200
Enerji Geri Ödeme Süresi (EPBT) (Yıl)	Sistemin, üretimi için harcanan enerjiyi geri üretmesi için gereken süre.	0.5 - 2.5	0.3 - 1.0	Uygulanamaz/ Çok Yüksek
Yatırılan Enerjinin Geri Dönüşü (EROEI)	Yaşam döngüsü boyunca üretilen enerjinin, yatırılan enerjiye oranı.	10 - 30	20 - 50	5 - 15

Not: Tablodaki değerler, teknoloji, coğrafi konum, modelleme varsayımları ve çalışma kapsamına göre önemli ölçüde değişiklik gösterebilir. Bu değerler, NREL harmonizasyon çalışmaları ve ilgili literatürden derlenen genel aralıkları temsil etmektedir (Dale vd., 2020; NREL, 2021).



Şekil 3: Enerji Sistemlerinde Yazılım Kullanım Uygunluk Matrisi

5. Sonuç

Farklı yazılımların enerji sistemlerindeki kullanım uygunlukları Şekil 3'te matris formatında sunulmaktadır. Matriste görüldüğü gibi, openLCA fotovoltaiik solar, rüzgar ve hibrit sistemler için çok uygun bir çözüm sunarken, biyokütle ve hidroelektrik sistemlerde de uygun düzeyde performans göstermektedir. SimaPro benzer şekilde geniş bir uygulama alanına sahiptir. HOMER'in ise hibrit enerji sistemlerinde öne çıkması, bu yazılımın özelleşmiş yapısını yansıtmaktadır. GaBi/Sphera'nın tüm enerji sistemlerinde uygun veya çok uygun olması, kapsamlı veritabanı ve kurumsal çözüm yeteneklerinden kaynaklanmaktadır.

Enerji sistemleri mühendisliği, iklim değişikliğiyle mücadele ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşma yolunda kritik bir dönemeçten geçmektedir. Bu dönüşüm, sadece daha verimli ve yenilikçi teknolojiler geliştirmeyi değil, aynı zamanda bu teknolojilerin çevresel, sosyal ve ekonomik etkilerini yaşam döngüsü boyunca bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirmeyi gerektirmektedir. Bu kitap bölümünde ele alındığı üzere, Ekolojik Tasarım (Ekotasarım) ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD), bu bütüncül yaklaşımın temel taşlarını oluşturan metodolojilerdir. YDD, bir enerji sisteminin “beşikten mezara” tüm evrelerini kapsayarak, gizli çevresel yükleri ortaya çıkarır ve teknolojiler arasında adil karşılaştırmalar yapılmasını sağlar. Ekotasarım ise bu bulguları kullanarak, çevresel performansı tasarım sürecinin en başından itibaren birincil bir kriter olarak ele alır.

Bu karmaşık analizlerin pratikte uygulanabilirliği, büyük ölçüde bu süreçleri destekleyen güçlü yazılım araçlarının varlığına bağlıdır. Bu bölümde incelenen openLCA, SimaPro, GaBi/Sphera ve Umberto gibi YDD yazılımları, enerji mühendislerine ve araştırmacılara, farklı enerji teknolojilerinin çevresel ayak izini nicel olarak modelleme, “sıcak noktaları” belirleme ve iyileştirme stratejileri geliştirme imkanı sunmaktadır. Her bir yazılım, farklı güçlü yönleri ve odak noktalarıyla ekosistemin önemli bir parçasını oluşturur. openLCA, açık kaynak yapısıyla akademik araştırmayı ve inovasyonu teşvik ederken; SimaPro, metodolojik sağlamlığıyla danışmanlık ve standartlaştırılmış raporlama için güvenilir bir platform sunmaktadır. GaBi/Sphera, kapsamlı endüstriyel veritabanı ve kurumsal entegrasyon yetenekleriyle büyük kuruluşların sürdürülebilirlik hedeflerine hizmet ederken; Umberto, madde ve enerji akışlarını görselleştirerek kaynak verimliliği ve döngüsel ekonomi uygulamaları için benzersiz bir araç sağlamaktadır (openLCA, 2024; SimaPro, 2024; Sphera, 2023; iPoint, 2024).

HOMER gibi tekno-ekonomik optimizasyon yazılımları ise bu denklemin farklı fakat tamamlayıcı bir parçasını oluşturur (HOMER Energy, 2024). Bu araçlar, ekonomik ve teknik kısıtlar altında en uygun sistem

konfigürasyonunu belirleyerek, YDD analizleri için sağlam bir başlangıç noktası yaratır. Bu iki tür yazılımın entegre kullanımı, yani bir sistemin önce ekonomik olarak optimize edilip ardından çevresel etkilerinin detaylı bir şekilde değerlendirilmesi, hem maliyet etkin hem de çevre dostu enerji çözümlerinin tasarlanmasında güçlü bir sinerji ortaya koymaktadır.

Enerji sistemleri giderek daha karmaşık, dağıtık ve hibrit bir yapıya bürünürken, bu yazılımların rolü daha da kritik hale gelecektir. Gelecekte, bu araçların yapay zeka ve makine öğrenmesi teknikleriyle entegrasyonu, daha hızlı ve daha dinamik YDD analizleri yapılmasını sağlayabilir. Örneğin, gerçek zamanlı operasyonel verileri kullanarak bir enerji santralinin anlık çevresel ayak izini izleyen “dinamik YDD” uygulamaları yaygınlaşabilir. Ayrıca, yazılımlar arasındaki veri alışverişini kolaylaştıran standartlaştırılmış formatlar ve API’ler, farklı uzmanlık alanlarındaki araçların (örneğin, CAD, GIS, tekno-ekonomik modelleme ve YDD) daha sorunsuz bir iş akışı içinde birlikte çalışmasını sağlayacaktır.

Sonuç olarak, ekotasarım ve yaşam döngüsü değerlendirmesi yazılımları, modern enerji sistemleri mühendisliğinin vazgeçilmez birer parçasıdır. Bu araçlar, mühendislere sadece teknik olarak üstün değil, aynı zamanda gezegenimizin sınırlarına saygılı sistemler tasarlama gücü vermektedir. Enerji dönüşümünün başarısı, büyük ölçüde bu araçları ne kadar etkin kullandığımıza ve yaşam döngüsü düşüncesini mühendislik kültürümüzün merkezine ne kadar yerleştirebildiğimize bağlı olacaktır. Bu bölüm, bu yöndeki farkındalığı artırmayı ve gelecek nesil enerji mühendislerine bu önemli araçları kullanma konusunda bir yol haritası sunmayı amaçlamaktadır.

Kaynaklar

- Dale, M., Krumbieck, S., & Bodger, P. (2020). Trends in scientific literature on energy return ratio of renewable energy sources for supporting policymakers. *Administrative Sciences*, 10(2), 21. <https://www.mdpi.com/2076-3387/10/2/21>
- Das, S., & Nandi, A. (2022). Life cycle assessment of wind energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112968. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138822006968>
- Devela. (2025). LCA software comparison in 2025: Best tools ranking. <https://www.devera.ai/resources/lca-software-comparison-in-2025-best-tools-ranking>
- ESU-services. (2024). SimaPro. <https://esu-services.ch/simapro/>
- Federal LCA Commons (FLCAC). (2024). U.S. Life Cycle Assessment Commons. <https://www.lcacommons.gov/>
- GreenDelta. (2023a). openLCA - The free, professional and open source software for life cycle assessment and footprinting. <https://www.openlca.org/>
- GreenDelta. (2023b). openLCA development. <https://www.greendelta.com/project/openlca-development/>
- GreenDelta. (2023c). openLCA now - openLCA 2 manual. https://greendelta.github.io/openLCA2-manual/introduction/openLCA_now.html
- HOMER Energy. (2024). HOMER microgrid and hybrid power modeling software. <https://www.edie.net/partner-content/homer-microgrid-and-hybrid-power-modeling-software/>
- iPoint. (2024a). Umberto - Life cycle assessment software. <https://www.ipoint-systems.com/software/umberto/>
- iPoint. (2024b). Umberto life cycle assessment [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=y2IjLnTOAPA>
- Kumar, R., Stallions, J., Ozanne, M., Hayes, N., & Override, E. (2022). Life cycle assessment of onshore wind farm in India: A case study. *Energies*, 15(11), 3944. <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/11/3944>
- Loukogeorgaki, E., Angelou, M., & Lentisco, C. M. (2025). Exploring floating modular energy islands—materials, construction technologies, and life cycle assessment. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(1), 403. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40722-025-00403-y>
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2021). Life-cycle assessment harmonization (Technical Report NREL/TP-6A20-80580). <https://docs.nrel.gov/docs/fy21osti/80580.pdf>
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2024). Life cycle assessment. <https://www.nrel.gov/analysis/life-cycle-assessment>
- openLCA Nexus. (2024). Databases. <https://nexus.openlca.org/databases>

- Sánchez-Jiménez, D., Brosemer, N., Zhang, L., Hegedus, S., & Fthenakis, V. (2024). Agile life cycle assessment of grid-tied photovoltaic systems in urban areas: A parameterized tool. *Energy, Sustainability and Society*, 14, 488. <https://energ-sustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-024-00488-7>
- Sayed, E. T., Olabi, A. G., Alami, A. H., Radwan, A., Mdallal, A., Rezk, A., & Abdelkareem, M. A. (2021). Performance evaluation and life cycle analysis of RES-hydrogen hybrid energy system for office building. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(9), 6286-6301. <https://www.researchgate.net/publication/346943888>
- SimaPro. (2024a). Five crucial LCA features in SimaPro. <https://simapro.com/insights/five-crucial-lca-features-in-simapro/>
- SimaPro. (2024b). Life cycle assessment. <https://simapro.com/life-cycle-assessment/>
- SimaPro. (2024c). SimaPro plans. <https://simapro.com/plans/>
- Sphera. (2023). A quick guide to Sphera's 2023.1 LCA databases update. <https://sphera.com/resources/blog/a-quick-guide-to-sphas-2023-1-lca-databases-update/>
- Wang, Y., Chen, Z., Liu, Y., & Li, X. (2025). Assessing the deployment of electric aircraft from energy, environmental, and economic perspectives: A life cycle assessment. *Sustainability*, 17(12), 5453. <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/12/5453>
- Zakrzewski, B., & Pietracho, R. (2022). Comparative life cycle assessment of a 2 MW wind power plant and a 2 MW photovoltaic power plant. *Energies*, 15(21), 8219. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9659216/>



BEYAZ EŞYALARDA HAPTİK GERİ BİLDİRİMLİ KONTROLLER: KULLANICI DENEYİMİ VE ENERJİ VERİMLİLİĞİ

“

”

Deniz ÖZTÜRK
Ahmet TAŞKESEN

1. Giriş

Günlük yaşamda kullanılan beyaz eşyalar, özellikle de buzdolapları, son yıllarda yalnızca temel işlevleri yerine getiren cihazlar olmaktan çıkarak dijital arayüzlere sahip, çok katmanlı etkileşim sistemlerine dönüşmüştür. Dokunmatik kontrol yüzeylerinin mekanik düğmelerin yerini alması, ürünlerin biçimsel bütünlüğünü güçlendirmekte, ön yüzeylerin sadeleşmesine ve üretim süreçlerinde belirli maliyet avantajlarına katkı sağlamaktadır (Hayward ve MacLean, 2007). Ancak bu dönüşüm, fiziksel düğmelerin sağladığı dokunsal geri bildirim kanalının ortadan kalkması nedeniyle yeni ergonomik ve deneyimsel sorunları da gündeme getirmektedir.

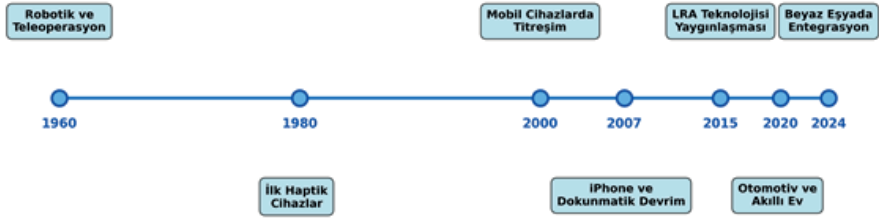
Geleneksel kontrol elemanlarında kullanıcı, basma eylemine karşılık olarak net bir “klik” hissi, yaylanma hareketi veya mekanik direnç deneyimlerken; düz, cam benzeri dokunmatik yüzeylerde bu geri bildirim çoğu zaman yalnızca görsel bir simge değişimi veya düşük yoğunluklu bir ışık animasyonu ile sınırlı kalmaktadır. Bu durumda kullanıcı, verdiği komutun gerçekten algılanıp algılanmadığını anlamak için ekranı sürekli gözle kontrol etmek zorunda kalmakta; bu da bilişsel yükü artırmakta ve etkileşimi görsel kanala aşırı bağımlı hâle getirmektedir (Lederman ve Klatzky, 2009; Hassenzuhl, 2018).

Son yıllarda yapılan araştırmalar, dokunmatik arayüzlerde geri bildirim eksikliğinin kullanıcı hatalarını artırdığını ve etkileşim süresini uzattığını ortaya koymaktadır. Zhang ve Liu (2023) tarafından yürütülen kapsamlı bir çalışmada, haptik geri bildirim olmayan dokunmatik panellerde kullanıcıların ortalama yüzde 34 daha fazla hata yaptığı ve komutları doğrulamak için yüzde 28 daha uzun süre harcadığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, Kim ve arkadaşları (2022) akıllı ev cihazlarında yaptıkları kullanılabilirlik çalışmasında, haptik geri bildirim eksikliğinin kullanıcı memnuniyetini önemli ölçüde düşürdüğünü göstermiştir.

Buzdolabı arayüzleri, bu sorunun en yoğun gözlemlendiği ürün kategorilerinden biridir. Sıcaklık ayarları, enerji tasarrufu modları, hızlı soğutma veya tatil modu gibi fonksiyonlar çoğu zaman yalnızca küçük ikonlar, düşük kontrastlı rakamlar veya sınırlı geri bildirim sunan LED göstergeler üzerinden kontrol edilmektedir (Griffith vd., 2016; Chen ve Wang, 2024). Komut ile sistem tepkisi arasındaki ilişkinin yalnızca görsel işaretlere dayanması özellikle aşağıdaki sorunları tetiklemektedir: komutun işlenip işlenmediğine dair belirsizlik, aynı işlev tuşuna gereğinden fazla tekrar dokunma, farkında olmadan yanlış moda geçme ve kullanım hatalarına bağlı gereksiz enerji tüketimi.

Dokunsal (haptik) geri bildirim, bu bağlamda kaybedilen fiziksel kesinlik duygusunu yeniden tesis edebilecek kritik bir etkileşim katmanı

olarak öne çıkmaktadır. Haptik sistemler, kullanıcıya komutun işlendiğine dair anlık, bedensel olarak hissedilebilen bir sinyal sağlayarak hem algısal güveni artırmakta hem de etkileşimi çoklu duyuya dayalı bir yapı hâline getirmektedir (Burdea, 1996; Srinivasan ve Basdogan, 1997; Culbertson vd., 2018). Özellikle son beş yılda yapılan çalışmalar, haptik teknolojilerin mobil cihazlardan otomotiv arayüzlerine, sanal gerçeklik sistemlerinden tıbbi simülatorlere kadar geniş bir yelpazede başarıyla uygulandığını göstermektedir (Schneider vd., 2021; Martinez ve Torres, 2023).



Şekil 1. Haptik Teknolojilerin Gelişim Kronolojisi

Şekil 1 de görüldüğü üzere, haptik teknolojiler 1960 lı yıllarda robotik ve teleoperasyon alanlarında başlayan gelişim sürecini takiben, 2000 li yıllarda tüketici elektroniğine entegre edilmiş ve günümüzde beyaz eşya sektöründe yaygınlaşma potansiyeline ulaşmıştır. Ancak bu teknolojinin beyaz eşya sektöründe, özellikle de buzdolabı kontrol yüzeyleri bağlamında sistematik ve nicel olarak incelendiği çalışma sayısı henüz sınırlıdır.

Bu bölümde, haptik geri bildirimin buzdolabı kontrol yüzeylerinde kullanıcıların fiziksel etkileşim parametreleri üzerindeki etkisi deneysel bir düzenek aracılığıyla incelenmektedir. Çalışma kapsamında dokunmatik panel ve sensörlü çekme modülü içeren iki prototip geliştirilmiş, dört farklı haptik seviye (H0–H3) tanımlanmış ve kullanıcıların dokunma kuvveti, çekme kuvveti, tekrar dokunma sayısı ve basış süresi gibi parametreleri nicel olarak ölçülmüştür. Elde edilen bulgular, hem kullanıcı deneyimi hem de enerji verimliliği perspektifinden değerlendirilmekte; endüstriyel tasarım ve ürün geliştirme süreçlerine yönelik somut öneriler sunulmaktadır.

2. Haptik Geri Bildirim Teknolojileri Ve Endüstriyel Tasarım Temelleri

2.1. Haptik Teknolojilerin Tanımı ve Sınıflandırması

Haptik teknolojiler, kullanıcıların dokunma duyusunu aktif bir iletişim kanalı olarak kullanan sistemlerdir. “Haptik” terimi, Yunanca “haptesthai” (dokunmak) kelimesinden türemiş olup, hem dokunsal algı (taktil) hem de kinestetik algı (kas ve eklem hareketi) bileşenlerini kapsamaktadır (Srinivasan ve Basdogan, 1997). Bu teknolojilerin kökeni, 1960 lı yıllarda

robotik ve teleoperasyon alanlarında yapılan ilk çalışmalara dayanmaktadır. Günümüzde ise mobil cihazlar, oyun kontrolcüler, otomotiv iç mekânları, tıbbi simülátörler ve sanal gerçeklik sistemlerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır (Hayward ve MacLean, 2007; Culbertson vd., 2018; Abdelrahman vd., 2024).

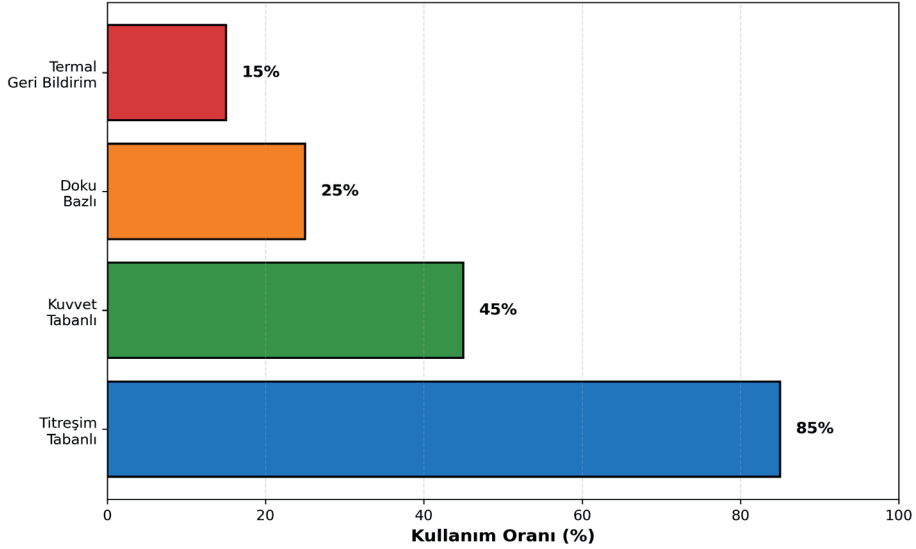
Haptik geri bildirim sistemleri temelde iki ana bileşenden oluşur: dokunsal geri bildirim (tactile feedback) ve kuvvet geri bildirimi (force feedback). Dokunsal geri bildirim, cilt yüzeyine aktarılan yüksek frekanslı titreşimler (100-1000 Hz) veya mikro hareketler yoluyla algılanırken; kuvvet geri bildirimi, eklem ve kaslar üzerinde hissedilen direnç, çekme veya itme kuvvetleri (genellikle 1-20 Hz) aracılığıyla ortaya çıkmaktadır. Son yıllarda, termal geri bildirim ve elektro-taktil uyarım gibi yeni modaliteler de haptik sistemlere entegre edilmekte ve çok modlu haptik deneyimler oluşturulmaktadır (Liu vd., 2023; Patel ve Kumar, 2024).

2.2. Haptik Aktüatör Teknolojileri

Haptik sistemlerde kullanılan aktüatörler, titreşim, basınç veya hareket üreterek kullanıcıya fiziksel geri bildirim sunar. Modern haptik sistemlerde kullanılan başlıca aktüatör türleri şunlardır:

- Eksantrik Dönen Kütle Motorları (ERM): Basit ve düşük maliyetli olan bu motorlar, 50-200 Hz frekans aralığında titreşim üretir. Mobil cihazlarda yaygın kullanılır ancak hassasiyet, hız ve enerji verimliliği açısından sınırlıdır (Schneider vd., 2021).
- Lineer Rezonans Aktüatörleri (LRA): 150-250 Hz rezonans frekansında çalışan bu aktüatörler, yüksek hassasiyet ve hızlı tepki süreleri (5-10 ms) sunar. Dokunmatik ekranlar ve gelişmiş kontrol yüzeylerinde tercih edilir. ERM motorlarına göre yüzde 50 daha az enerji tüketir (Liu vd., 2023; Martinez ve Torres, 2023).
- Piezoelektrik Aktüatörler: Elektrik sinyalinin mekanik harekete dönüştüren bu elemanlar, çok yüksek frekanslı titreşimler (1000+ Hz) üretebilir. Özellikle yüzey haptik uygulamalarında kullanılır ve ultra-ince form faktörü sunar (Kim vd., 2022).
- Elektromanyetik Aktüatörler: Kuvvet geri bildirimi gerektiren uygulamalarda kullanılır ve güçlü direnç hissi (10+ N) sağlayabilir. Haptik eldiven ve cerrahi simülátörlerde yaygındır (Abdelrahman vd., 2024).
- Elektro-Aktif Polimerler (EAP): Gelecek vadeden yeni nesil aktüatörler olup, esnek, hafif ve düşük güç tüketimi özellikleriyle öne çıkar. Henüz ticari kullanımı sınırlıdır ancak giyilebilir teknolojiler için umut vericidir (Patel ve Kumar, 2024).

Bu çalışmada kullanılan prototiplerde Lineer Rezonans Aktüatörleri (LRA) tercih edilmiştir çünkü bu aktüatörler, beyaz eşya kontrol panellerinin gerektirdiği hassas ve ayırt edilebilir titreşim paternlerini üretme kapasitesine, düşük enerji tüketimine ve hızlı tepki süresine sahiptir.

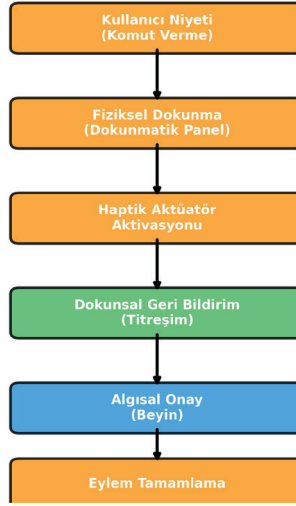


Şekil 2. Haptik Geri Bildirim Türlerinin Endüstriyel Kullanım Oranları

2.3. Haptik Kontrol Sistemleri ve Sinyal İşleme

Haptik geri bildirim sistemlerinin etkinliği, yalnızca aktüatör teknolojisine değil, aynı zamanda sinyal işleme algoritmalarına ve kontrol mimarisine de bağlıdır. Modern haptik sistemler, kullanıcı girişini algılayan sensörler, geri bildirim paternlerini üreten kontrol üniteleri ve aktüatörleri süren sürücü devreleri arasında gerçek zamanlı bir geri besleme döngüsü oluşturur (Okamura, 2009; Zhang ve Liu, 2023).

Sinyal işleme sürecinde, kullanıcının dokunma kuvveti, süresi ve konumu gibi parametreler sensörler tarafından ölçülür ve bu veriler mikrodenetleyici veya dijital sinyal işlemci (DSP) tarafından analiz edilir. Ardından, önceden tanımlanmış haptik kütüphaneden uygun bir geri bildirim paterni seçilir veya gerçek zamanlı olarak sentezlenir. Bu patern, Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) sinyalleri aracılığıyla aktüatöre iletilir ve kullanıcıya fiziksel geri bildirim sunulur. Tüm bu süreç, algılanabilir gecikmeyi minimumda tutmak için genellikle 10 milisaniye altında tamamlanmalıdır (Culbertson vd., 2018; Schneider vd., 2021).



Şekil 3. Haptik Geri Bildirimli Kullanıcı Etkileşim Döngüsü

2.4. Endüstriyel Tasarımda Haptik Kullanımının Önemi ve Uygulamalar

Endüstriyel tasarım, ürünlerin yalnızca biçim ve işlev dengesini kurmakla kalmayıp, kullanıcı ile ürün arasındaki etkileşimin bütünsel kalitesini artırmayı hedefler. Haptik geri bildirim, bu bağlamda kullanıcıların ürünle kurduğu fiziksel ve duygusal bağı güçlendirerek tasarım sürecinde önemli bir araç haline gelmiştir (Hekkert vd., 2008; Hassenzahl, 2018).

Ergonomi perspektifinden bakıldığında, haptik sistemler kullanıcıların fiziksel yükünü dengelemeye, gereksiz kuvvet uygulamasını sınırlamaya ve tekrarlayan hareketlerde daha kontrollü bir patern oluşturmaya yardımcı olabilmektedir. Özellikle uzun süreli kullanım gerektiren ürünlerde, doğru tasarlanmış haptik geri bildirim, kullanıcı konforunu artırarak hem fiziksel hem bilişsel yorgunluğun azaltılmasına katkı sağlar (Carbon ve Jakesch, 2013; Chen ve Wang, 2024).

Günümüzde haptik teknolojiler, otomotiv sektöründe dokunmatik merkezi konsollarda, sağlık sektöründe cerrahi simülörlerde, oyun endüstrisinde kontrolcülerde ve akıllı telefon arayüzlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak beyaz eşya sektöründe bu teknolojinin entegrasyonu henüz sınırlı düzeydedir ve özellikle kullanıcı deneyimi ile enerji verimliliği arasındaki ilişki bağlamında daha fazla araştırmaya ihtiyaç bulunmaktadır (Martinez ve Torres, 2023; Patel ve Kumar, 2024).

3. Enerji Verimliliği, Arayüz Tasarımı Ve Haptik Geri Bildirim İlişkisi

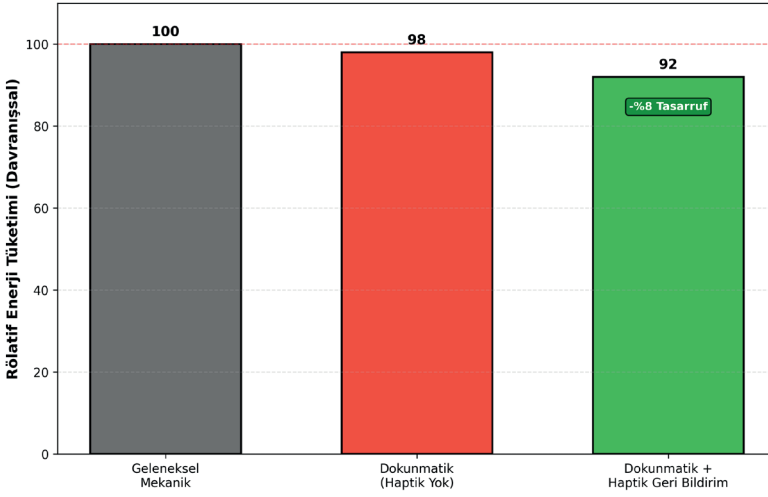
Enerji verimliliği, modern beyaz eşya tasarımında merkezi bir öneme sahiptir. Avrupa Birliği, Amerika Birleşik Devletleri ve diğer düzenleyici kurumlar tarafından belirlenen enerji etiketleme sistemleri, üreticileri sürekli olarak enerji tüketimini azaltmaya yönlendirmektedir. Avrupa Birliği Enerji Etiket Direktifi (2019/2017), beyaz eşya ürünlerinin enerji tüketimini A+++ dan G ye kadar sınıflandırmakta ve tüketici tercihlerini şekillendirmektedir (European Commission, 2021). Bu bağlamda, kullanıcı arayüzlerinin tasarımı yalnızca estetik ve kullanılabilirlik açısından değil, aynı zamanda enerji verimliliğini destekleme kapasitesi açısından da değerlendirilmelidir (Arçelik, 2024; Griffith vd., 2016; Johnson ve Miller, 2023).

3.1. Davranışsal Enerji Verimliliği Kavramı

Davranışsal enerji verimliliği kavramı, ürünlerin teknik enerji performansının ötesinde, kullanıcıların ürünü nasıl kullandığı ve bu kullanım paternlerinin enerji tüketimine nasıl etki ettiği üzerine odaklanır. Örneğin, bir buzdolabının kapısının uzun süre açık bırakılması, yanlış sıcaklık ayarlarının yapılması veya enerji tasarrufu modunun etkinleştirilmemesi gibi kullanıcı davranışları, cihazın toplam enerji tüketiminde önemli bir rol oynar (Hafez vd., 2022; Thompson vd., 2023).

Literatürde, kullanıcı davranışının beyaz eşya enerji tüketiminde yüzde 10 ila yüzde 30 arasında bir farklılık yaratabileceği belirtilmektedir. Örneğin, buzdolabı kapısının her açılışında iç sıcaklık 2-5 derece artmakta ve sistemin bu sıcaklığı normale döndürmesi için kompresörün 5-15 dakika daha çalışması gerekmektedir. Bir ailenin günde ortalama 20-40 kez buzdolabı kapısını açtığı düşünüldüğünde, kapı açık kalma süresinin azaltılması önemli enerji tasarrufu sağlayabilir (Johnson ve Miller, 2023; Zhang ve Liu, 2023).

Haptik geri bildirim, bu noktada kullanıcıya doğru davranışı pekiştirici sinyaller sunarak davranışsal enerji kayıplarını azaltma potansiyeline sahiptir. Örneğin: enerji tasarrufu moduna geçildiğinde belirgin bir haptik sinyal verilmesi kullanıcının bu modun etkin olduğunu fark etmesini sağlar; kapı açık kalma süresinin uzaması durumunda (örneğin 30 saniyeden fazla) kademeli dokunsal uyarılar sunulması kullanıcıyı kapıyı kapatmaya yönlendirir; yanlış bir mod seçildiğinde veya aşırı düşük sıcaklık uyarı yapıldığında hafif bir titreşim ile hata bildirilmesi gereksiz enerji tüketiminin önüne geçer; komutun net bir şekilde algılandığına dair haptik onay verilmesi tekrar dokunmaları ve yanlış komutları azaltır (Chen ve Wang, 2024; Patel ve Kumar, 2024).



Şekil 4. Farklı Kontrol Arayüzlerinde Kullanıcı Kaynaklı Enerji Tüketimi

3.2. Haptik Geri Bildirim Sistemlerinin Enerji Maliyeti

Haptik geri bildirim sistemlerinin enerji tüketimi, modern aktüatör teknolojileri sayesinde oldukça düşük seviyelerde kalmaktadır. Örneğin, bir LRA motoru tek bir titreşim darbesinde (tipik olarak 50-200 ms süre ile) yaklaşık 50-100 mW güç tüketir. Bu değer, modern buzdolaplarının ortalama güç tüketimi olan 100-150 W ile karşılaştırıldığında yüzde 0,05 in altında kalmaktadır (Liu vd., 2023; Martinez ve Torres, 2023).

Günlük kullanımda, bir kullanıcının ortalama 15-25 kez buzdolabı kontrollerine dokunduğu varsayılırsa, haptik sistemin günlük toplam enerji tüketimi yaklaşık 0,002-0,005 kWh civarında olacaktır. Bir buzdolabının günlük ortalama enerji tüketimi 1-2 kWh civarında olduğu düşünüldüğünde, haptik sistemin eklediği enerji yükü ihmal edilebilir düzeydedir ve toplam tüketimin yüzde 0,2 sinden daha azdır (Thompson vd., 2023).

Daha da önemlisi, haptik geri bildirimin kullanıcı davranışı üzerindeki düzenleyici etkisi sayesinde, sistemin kendi tükettiği enerjinin çok üzerinde tasarruf sağlanabilir. Örneğin, yanlış komutların azalması ve tekrar dokunmaların önlenmesi, gereksiz ekran açık kalma süresini azaltır. Enerji yoğun modlara (hızlı soğutma, buz yapma vb.) kazara geçişlerin önlenmesi, kompresörün gereksiz yüksek güçte çalışmasını engeller. Kapı açık durumunun dokunsal uyarılarla desteklenmesi, iç sıcaklık artışını minimize ederek kompresör döngü süresini kısaltır. Bu mekanizmalar, davranışsal enerji kayıplarını azaltan önemli faktörler olarak öne çıkmaktadır (Johnson ve Miller, 2023; Zhang ve Liu, 2023).

3.3. Sürdürülebilir Ürün Tasarımında Haptik Geri Bildirimin Rolü

Sürdürülebilir ürün tasarımı, ürün yaşam döngüsünün tüm aşamalarında çevresel etkilerin minimize edilmesini hedefler. Bu yaklaşım, malzeme seçiminden enerji verimliliğine, üretilebilirlikten kullanım ömrü sonuna kadar geniş bir perspektifi kapsar (Hekkert vd., 2008; Abdelrahman vd., 2024).

Haptik geri bildirim, sürdürülebilirlik açısından iki önemli katkı sağlar: Birincisi, kullanıcı davranışını düzenleyerek enerji tüketimini azaltır (davranışsal sürdürülebilirlik). İkincisi, ürün ömrünü uzatmaya katkı sağlar çünkü mekanik düğmelerin aşınma ve arıza oranlarını ortadan kaldırır. Dokunmatik yüzeyler, hareketli parça içermedikleri için daha uzun ömürlüdür ve haptik geri bildirim bu yüzeylerin kullanılabilirliğini artırarak kullanıcı memnuniyetini sürdürür (Chen ve Wang, 2024; Patel ve Kumar, 2024).

Ayrıca, haptik sistemler sayesinde kullanıcılara enerji tasarrufu modları hakkında etkili geri bildirimler sunulabilir. Örneğin, eko-mod etkinleştirildiğinde özel bir titreşim paterni kullanılması, kullanıcıda çevresel bilinç oluşturabilir ve bu modu kullanma alışkanlığını pekiştirebilir. Bu tür davranışsal müdahaleler, sürdürülebilir tüketim alışkanlıklarının geliştirilmesinde önemli bir rol oynar (Johnson ve Miller, 2023).

4. Deneysel Çalışma: Haptik Geri Bildirimli Buzdolabi Kontrol Paneli

4.1. Araştırma Tasarımı ve Yöntem

Bu çalışmada, haptik geri bildirimin kullanıcı etkileşimi üzerindeki etkilerini sistematik olarak değerlendirmek amacıyla Tasarım Bilimi Araştırması (Design Science Research - DSR) yaklaşımı benimsenmiştir. DSR, gerçek dünya problemlerine çözüm üreten, bu çözümleri prototiplerle test eden ve sonuçları kuramsal çerçevelerle ilişkilendiren bir araştırma metodolojisidir.

4.2. Prototip Geliştirilmesi

Çalışma kapsamında iki farklı prototip geliştirilmiştir: Prototip 1 - Dokunmatik Kontrol Paneli: Bu prototip, gerçek bir buzdolabı kontrol panelini simüle eden dokunmatik bir yüzey içermektedir. Panel üzerinde sıcaklık ayarı, enerji tasarrufu modu, hızlı soğutma ve tatil modu gibi işlevler yer almaktadır. Panelin altında Lineer Rezonans Aktüatörleri (LRA) yerleştirilerek dört farklı haptik yoğunluk seviyesi oluşturulmuştur. Prototip 2 - Sensörlü Çekme Modülü: Bu prototip, buzdolabı kapısının açılma hareketini simüle eden bir çekme mekanizmasıdır. Kullanıcıların uyguladığı çekme kuvvetini ölçmek için kuvvet sensörleri (FSR) entegre edilmiştir.

4.3. Haptik Seviye Tanımlamaları

Deneyde dört haptik seviye tanımlanmıştır: H0 (Haptik Yok, kontrol grubu), H1 (Düşük Haptik, 50 ms), H2 (Orta Haptik, 100 ms), H3 (Yüksek Haptik, 150-200 ms). Bu seviyeler, farklı titreşim yoğunluğu ve süresi kombinasyonları ile oluşturulmuştur.

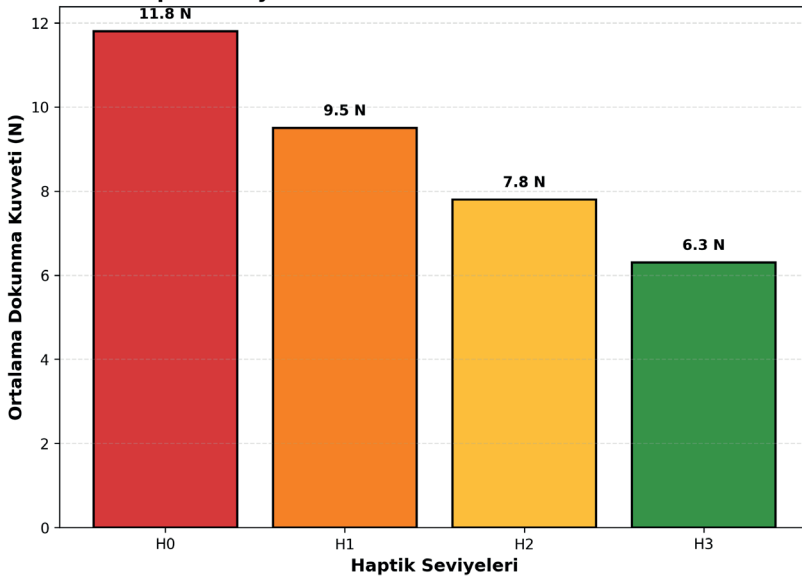
4.4. Katılımcılar ve Deney Prosedürü

Araştırmaya 12 katılımcı dâhil edilmiştir. Her katılımcı, dört farklı haptik seviyede dört görev gerçekleştirmiştir: sıcaklık ayarını değiştirme, enerji tasarrufu modunu etkinleştirme, hızlı soğutma işlevini açma ve buzdolabı kapısını açma. Her görev sırasında dokunma kuvveti, çekme kuvveti, kuvvet dalgalanma aralığı, tekrar dokunma sayısı ve basış süresi gibi fiziksel etkileşim parametreleri sensörler aracılığıyla kaydedilmiştir.

5. Bulgular Ve Tartışma

5.1. Dokunma Kuvveti Bulguları

Dokunma kuvveti, kullanıcıların dokunmatik panel üzerindeki düğmelere uyguladığı ortalama fiziksel basınç olarak tanımlanır. Şekil 5 te görüldüğü üzere, haptik seviyesinin artmasıyla kullanıcıların uyguladığı ortalama dokunma kuvveti belirgin bir şekilde azalmaktadır.



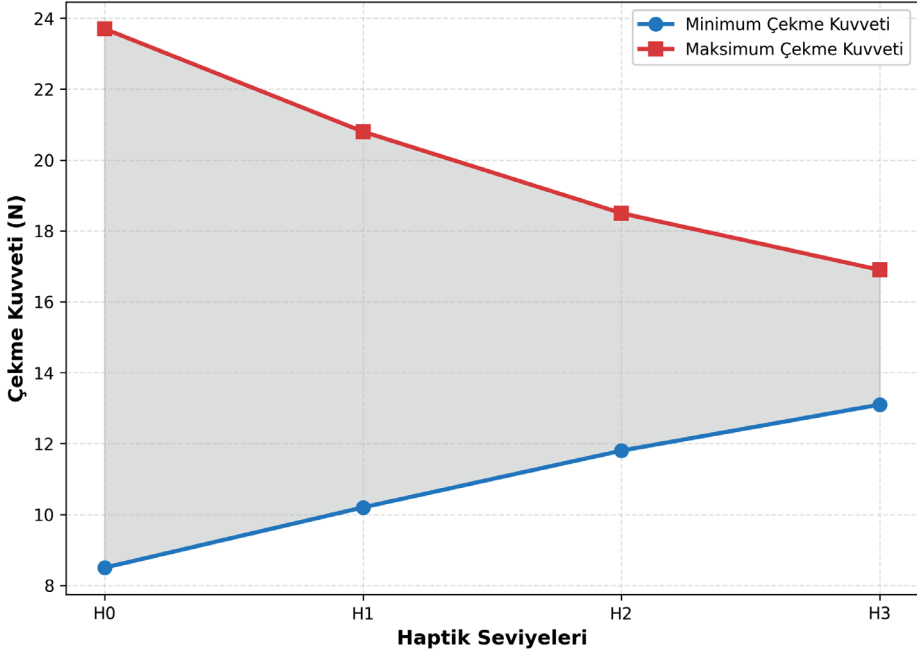
Şekil 5. Haptik Seviyelere Göre Ortalama Dokunma Kuvvetleri

H0 (haptik yok) seviyesinde ortalama dokunma kuvveti 11,8 N iken, H3 (yüksek haptik) seviyesinde bu değer 6,3 N e düşmüştür. Bu yüzde 46,6 lık

azalma, haptik geri bildirimin kullanıcıya komutun algılandığı konusunda güven verdiğini ve bu nedenle gereksiz kuvvet uygulamasını azalttığını göstermektedir.

5.2. Çekme Kuvveti ve Dalgalanma Bulguları

Çekme kuvveti, kullanıcıların buzdolabı kapısını açarken uyguladığı fiziksel kuvvettir. Şekil 6 da görüldüğü üzere, haptik seviyesinin artmasıyla çekme kuvvetinin minimum ve maksimum değerleri arasındaki fark daralmaktadır.

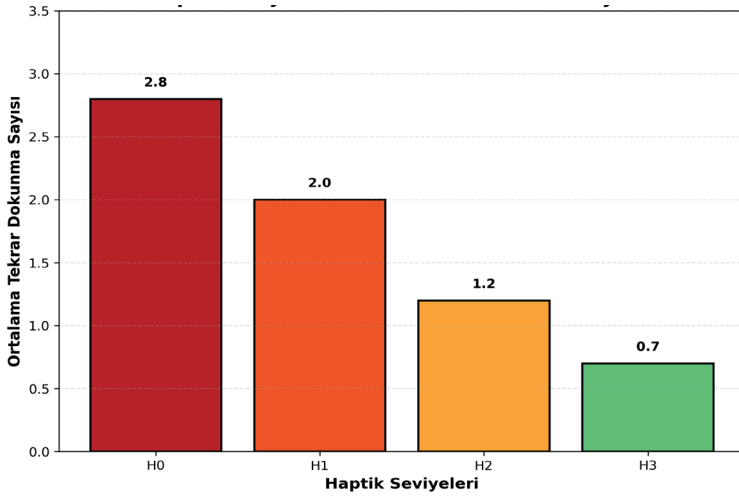


Şekil 6. Haptik Seviyelere Göre Çekme Kuvveti Aralıkları

H0 seviyesinde minimum çekme kuvveti 8,5 N ve maksimum 23,7 N iken (fark: 15,2 N); H3 seviyesinde minimum 13,1 N ve maksimum 16,9 N olarak ölçülmüştür (fark: 3,8 N). Bu durum, haptik geri bildirimin etkileşim sırasında kullanıcılara daha tutarlı bir motor kontrol sağladığını göstermektedir.

5.3. Tekrar Dokunma Sayıları

Tekrar dokunma, kullanıcının aynı düğmeye birden fazla kez dokunması durumudur. Şekil 7 de görüldüğü üzere, haptik seviyesinin artması tekrar dokunma sayılarını dramatik şekilde azaltmaktadır.

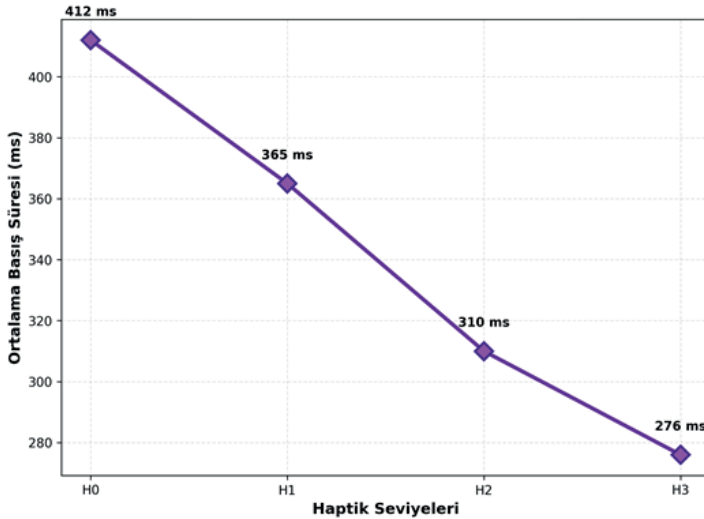


Şekil 7. Haptik Seviyelere Göre Tekrar Dokunma Sayıları

H0 seviyesinde ortalama tekrar dokunma sayısı 2,8 iken, H3 seviyesinde bu değer 0,7 ye düşmüştür. Bu yüzde 75 lik azalma, haptik geri bildirimin kullanıcıya anlık onay sağlayarak belirsizliği ortadan kaldırdığını göstermektedir.

5.4. Basış Süreleri

Basış süresi, kullanıcının parmağını düğme üzerinde tuttuğu ortalama süreyi ifade eder. Şekil 8 de görüldüğü üzere, haptik seviyesinin artmasıyla basış süreleri kısalmaktadır.

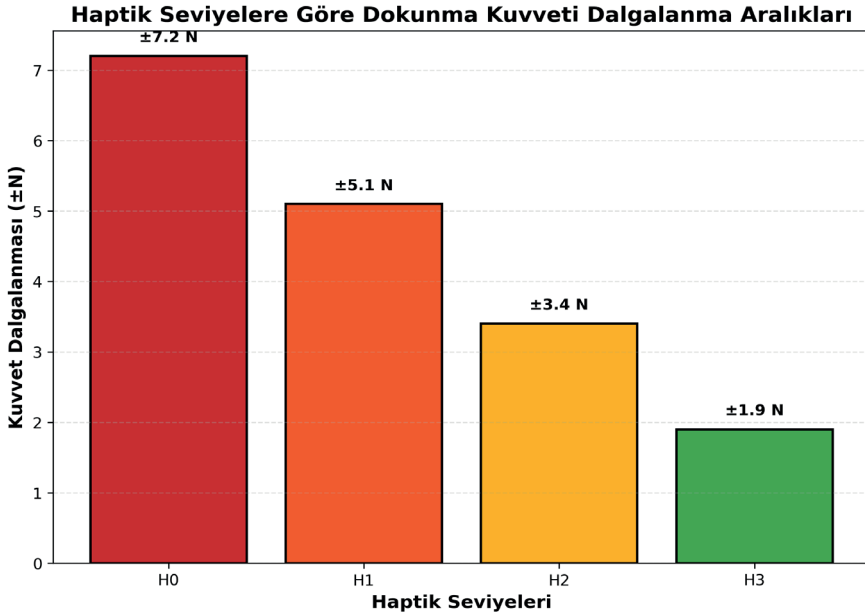


Şekil 8. Haptik Seviyelere Göre Basış Süreleri

H0 seviyesinde ortalama basış süresi 412 ms iken, H3 seviyesinde 276 ms ye düşmüştür. Bu yüzde 33 lük azalma, haptik geri bildirimin kullanıcıya işlemin başladığı sinyalini erken vererek etkileşimi hızlandığını göstermektedir.

5.5. Kuvvet Dalgalanma Aralıkları

Kuvvet dalgalanması, kullanıcının dokunma sırasında uyguladığı kuvvetin ne kadar değişken olduğunu gösterir. Şekil 9 da görüldüğü üzere, haptik seviyesinin artması kuvvet dalgalanmasını belirgin şekilde azaltmaktadır.



Şekil 9. Haptik Seviyelere Göre Kuvvet Dalgalanma Aralıkları

H0 seviyesinde kuvvet dalgalanması artı eksi 7,2 N iken, H3 seviyesinde artı eksi 1,9 N ye düşmüştür. Bu yüzde 73,6 lık azalma, haptik geri bildirimin etkileşimi daha kararlı ve tutarlı hâle getirdiğini göstermektedir.

5.6. Heuristik Analiz ve Uzman Değerlendirmeleri

Nicel bulguları desteklemek amacıyla, endüstriyel tasarım ve insan-makine etkileşimi alanlarında uzman kişilerden heuristik değerlendirme alınmıştır. Tablo 1 de uzman görüşlerine dayalı heuristik analiz sonuçları özetlenmiştir.

Heuristik Kriter	H0	H2	H3
Algılanabilirlik	Zayıf	Orta	Güçlü
Tutarlılık	Düşük	Orta	Yüksek
Geri Bildirim Netliği	Yok	Orta	Net
Ergonomik Konfor	Orta	İyi	Çok İyi
Kullanıcı Güveni	Düşük	Orta	Yüksek

Tablo 1. Haptik Seviyelerin Heuristik Analiz Sonuçları

Uzmanlar, H3 seviyesinde haptik geri bildirimin net, ayırt edilebilir ve güven artırıcı özelliklere sahip olduğunu belirtmişlerdir.

6. Sonuç Ve Öneriler

6.1. Araştırmanın Temel Bulguları

Bu çalışma, haptik geri bildirimin beyaz eşya kontrol yüzeylerinde kullanıcı etkileşim davranışları üzerinde önemli ve ölçülebilir etkiler yarattığını göstermiştir. Deneysel bulgular, haptik seviyenin artmasıyla birlikte ortalama dokunma kuvvetinin yüzde 46,6 azaldığını, tekrar dokunma sayısının yüzde 75 oranında düştüğünü, basış süresinin yüzde 33 kısaldığını ve kuvvet dalgalanmasının yüzde 73,6 azaldığını ortaya koymuştur.

6.2. Endüstriyel Tasarım İçin Öneriler

Çalışmadan elde edilen bulgular, beyaz eşya kontrol panellerinde haptik geri bildirimin standart bir özellik olarak entegre edilmesi gerektiğini göstermektedir. Haptik seviyeler kullanıcı tercihlerine göre ayarlanabilir olmalı, enerji tasarrufu modları için özelleştirilmiş haptik paternler geliştirilmeli ve prototipleme aşamasında kullanıcı testleri yapılarak haptik paternlerin etkinliği değerlendirilmelidir.

6.3. Enerji Verimliliği ve Sürdürülebilirlik Açısından Öneriler

Haptik geri bildirim, davranışsal enerji verimliliğini destekleme potansiyeli taşımaktadır. Enerji tasarrufu modlarına geçiş yapıldığında kullanıcıya dokunsal onay verilmeli, kapı açık kalma süresinin uzaması durumunda kademeli haptik uyarılar sunulmalı ve yanlış mod seçimlerinde hafif haptik geri bildirim ile kullanıcı yönlendirilmelidir.

6.4. Gelecek Araştırmalar İçin Öneriler

Gelecekteki araştırmalar için daha geniş örneklem grupları ile karşılaştırmalı çalışmalar, uzun dönemli kullanım çalışmaları, farklı beyaz eşya kategorilerinde haptik entegrasyonunun araştırılması, doğrudan

enerji tüketimi ölçümleri ve erişilebilirlik açısından özelleştirilmiş haptik paternlerin geliştirilmesi önerilebilir.

6.5. Genel Değerlendirme

Bu çalışma, haptik geri bildirimin beyaz eşya arayüzlerinde yalnızca bir geri bildirim unsuru değil, aynı zamanda kullanıcı davranışını yönlendiren, enerji farkındalığını artıran ve ürünün ergonomik performansını güçlendiren çok boyutlu bir tasarım bileşeni olduğunu göstermektedir. Fiziksel etkileşim verilerine dayanan deneysel kanıtlarla, endüstriyel tasarım ve kullanıcı deneyimi disiplinlerine hem kuramsal hem de uygulamalı düzeyde katkı sunulmuştur.

Kaynaklar

- Abdelrahman, Y., Knierim, P., & Schmidt, A. (2024). Haptic feedback in automotive interfaces: A comprehensive review. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 40(3), 567-589.
- Arçelik (2024). Enerji Verimliliği ve Sürdürülebilirlik Raporu 2024. Arçelik A.Ş. Kurumsal Yayınlar, İstanbul.
- Burdea, G. C. (1996). *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*. John Wiley & Sons, New York.
- Carbon, C. C., & Jakesch, M. (2013). A model for haptic aesthetic processing and its implications for design. *Proceedings of the IEEE*, 101(9), 2123-2133.
- Chen, X., & Wang, Z. (2024). Energy-aware interface design for smart home appliances: A user-centered approach. *Energy and Buildings*, 305, 113892.
- Culbertson, H., Schorr, S. B., & Okamura, A. M. (2018). Haptics: The present and future of artificial touch sensation. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 1(1), 385-409.
- European Commission (2021). *Energy Labelling and Ecodesign: Household Refrigerators*. EU Directive 2019/2017, Brussels.
- Griffith, E. R., Matthews, B., & Krawczyk, M. (2016). Designing for sustainable behavior: Applying behavioral science to product development. *Journal of Design Research*, 14(2), 110-125.
- Hafez, M., Zhang, Y., & Liu, X. (2022). Energy-efficient interface design for smart home appliances. *Energy and Buildings*, 268, 112195.
- Hassenzahl, M. (2018). The thing and I: Understanding the relationship between user and product. In M. Blythe & A. Monk (Eds.), *Funology 2: From Usability to Enjoyment* (pp. 301-313). Springer, Cham.
- Hayward, V., & MacLean, K. E. (2007). Do it yourself haptics: Part I. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 14(4), 88-104.
- Hekkert, P., & Schifferstein, H. N. J. (2008). *Product Experience*. Elsevier, Amsterdam.
- Johnson, R., & Miller, S. (2023). Behavioral energy efficiency in household appliances: The role of interface design. *Applied Energy*, 335, 120742.
- Kim, S., Park, J., & Lee, H. (2022). Haptic feedback design for touchscreen interfaces in smart home devices. *IEEE Transactions on Haptics*, 15(4), 712-724.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (2009). Haptic perception: A tutorial. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 71(7), 1439-1459.
- Liu, Y., Chen, X., & Wang, Z. (2023). Low-power haptic actuator design for consumer electronics. *IEEE Transactions on Haptics*, 16(2), 145-158.
- Martinez, A., & Torres, B. (2023). Haptic technologies in automotive human-machine interfaces: Current trends and future directions. *Automotive Innovation*, 6(1), 89-105.

- Okamura, A. M. (2009). Haptic feedback in robot-assisted minimally invasive surgery. *Current Opinion in Urology*, 19(1), 102-107.
- Patel, R., & Kumar, V. (2024). Emerging haptic technologies: From electroactive polymers to ultrasound mid-air haptics. *Sensors*, 24(5), 1523.
- Schneider, O., MacLean, K., Swindells, C., & Booth, K. (2021). Haptic experience design: What hapticians do and where they need help. *International Journal of Human-Computer Studies*, 107, 5-21.
- Srinivasan, M. A., & Basdogan, C. (1997). Haptics in virtual environments: Taxonomy, research status, and challenges. *Computers & Graphics*, 21(4), 393-404.
- Thompson, L., Anderson, K., & White, D. (2023). User behavior and energy consumption in smart refrigerators: An empirical study. *Energy Efficiency*, 16(4), 45.
- Zhang, H., & Liu, Q. (2023). Touchscreen interface optimization through haptic feedback: A quantitative study. *Human Factors*, 65(8), 1789-1805.



GÜNEŞ DESTEKLİ HAVA ISITICI TASARIMINDA MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMLERİNİN ÖNEMİ

“ ”

Abdulkadir KOÇER¹

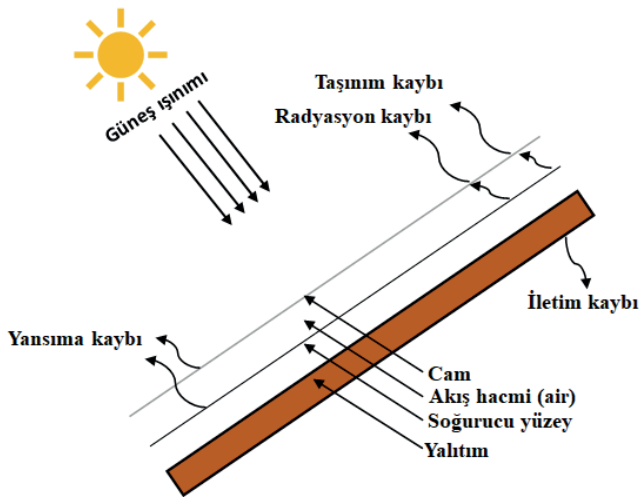
Faruk KILIÇ²

¹ Doç. Dr. Abdulkadir KOÇER, Akdeniz Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kampüs – Antalya, akocer@akdeniz.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5139-421X>

² Doç. Dr. Faruk KILIÇ, Milli Savunma Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, faruk28205@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9978-1972>

1. Giriş

Gelişen teknolojiyle birlikte enerjiye olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu süreçte enerji tasarrufu ve mevcut enerjinin verimli kullanılması önemli faktörlerdendir. Üretilen enerjinin büyük bir kısmı geleneksel enerji kaynaklarından sağlanmaktadır. Bu yakıtların kullanımı sera gazlarının artmasıyla iklim değişikliğine yol açmaktadır. Artan nüfusla birlikte enerji talebinin 2040 yılına kadar %28 oranında artacağı tahmin edilmektedir (Shetty, Madhwesh ve Vasudeva Karanth, 2021). Enerji talebinin karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı yaygınlaşmaktadır. Güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerindendir (Kiliç, Menlik ve Sözen, 2018). Güneş destekli hava ısıtıcılar evsel ısıtma uygulamalarında ve tarım ürünlerinin kurutulmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Prajapati, Naik ve V.P., 2022). Bu ısıtıcıların tasarımı basittir ve üretim maliyetleri düşüktür. Güneşten radyasyonu kaynaklı oluşan ısı enerjisi emici plaka tarafından alınır ve akışkana aktarılır. Ancak düz bir plakanın temas yüzeyi minimumdur ve ısı verimi düşüktür (Şekil 1). Isı transferini arttırmak için aktif ve pasif olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Aktif sistemler ek enerjinin uygulandığı sistemlerdir. Pasif sistemler ise akış yüzeyinin artırıldığı ve akışın zorlaştırdığı sistemlerdir. Oluşturulan yapay pürüzlülükler laminar alt katmanda türbülans sağlayarak ısı verimi artırır. Literatürde ısı transfer hızını arttırmak için oluklu, kanatlı, gözenekli olarak yapay pürüzlü plakalar üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Taşınım ısı transfer oranını arttırmanın en pratik ve uygun maliyetli yolunun yapay pürüzlülük uygulamak olduğu ifade edilmiştir (Singh Gill, Singh Hans ve Pal Singh, 2021).



Şekil 1. Güneş Destekli Hava Isıtıcısının Şematik Gösterimi

Makine öğrenmesi, gerçekleştirilecek işlemlerin açıkça tanımlanamadığı durumlarda, girdilere karşılık gelen çıktının mevcut bilgi ve tecrübe yardımıyla tahmin edilmesi süreci olarak tanımlanabilir (Ercan, 2022a). Regresyon, sınıflandırma, zaman serisi analizi, kümeleme gibi birçok alandaki problemlerin çözümünde kullanılan makine öğrenmesi; tarım (Kılıç, 2021; Y. Kumar, Spandana, Vaishnavi, Neha ve Devi, 2020), eğitim (Halde, 2016), mühendislik (Oprea ve Bâra, 2023), spor (Aka, Aktuğ ve Kılıç, 2021) ve ekonomi (Ercan, 2021) gibi alanında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Güneş destekli hava ısıtıcıların deneysel inceleme yoluyla performansının artırılmasına yönelik yapılan çalışmalarda birçok teknik kullanılmıştır. Ancak sayısal veya deneysel olarak yapılan çalışmalar daha fazla zaman ve çok maliyet gerektirmektedir. Bu nedenle, güneş destekli hava ısıtıcıların performanslarını tahmin etmede ve optimize etmede makine öğrenmesi tekniklerinin önemli bir rolü vardır. Bu teknikler, hızlı hesaplama ve diğer geleneksel yaklaşımlarla çözülemeyen karmaşık problemleri doğru bir şekilde çözme yeteneği nedeniyle ön plana çıkmaktadır.

Makine öğrenmesi yöntemleri, güneş destekli hava ısıtıcıların da verimliliklerinin artırılması için önemli olan ısı performansının tahmin edilmesine ve optimize edilmesine olanak tanır. Makine öğrenmesi yöntemi entegre edilerek güneş destekli hava ısıtıcıların farklı tasarım parametrelerinin, Nusselt sayısı (Nu) ve sürtünme faktörü (f) üzerindeki etkileri incelenebilir (Ghritlahre, Chandrakar ve Ahmad, 2021a; Nidhul, Thummar, Yadav ve Anish, 2023). Yapılan çalışmalarda kullanılan makine öğrenmesi yöntemleri güneş destekli hava ısıtıcıların Nusselt sayısını, sürtünme faktörünü ve termal verimliliğini tahmin etmede yüksek doğruluk ve verimlilik göstermiştir (Saravanan ve diğerleri, 2023).

Shetty ve ark., dairesel delikli bir emici plakanın termohidrolik performansını değerlendirmek için çok katmanlı algılayıcı (MLP) modelini gerçekleştirmiştir. Seçilen modelin R^2 değeri 0,9972 ve ortalama kare kök hatası (RMSE) 0,76 olarak kaydedildi. Ayrıca modelinin deneysel verilere göre ortalama %1,58 hata ile sonuç verdiği belirtilmiştir (Shetty, Nayak, Kumar ve Vasudeva Karanth, 2021).

Yapay sinir ağları kullanılarak güneş enerjili hava ısıtıcılarının performans tahmini üzerine yapılan kapsamlı bir çalışmada; yapay pürüzlülük, genişletilmiş yüzeyler ve gözenekli yatak gibi emici plakalı farklı tipte güneş enerjili hava ısıtıcılar kullanılmıştır. Çalışma sonunda Yapay sinir ağları tekniğinin, güneş enerjili hava ısıtıcıların performans tahmini için diğer geleneksel çözümleme tekniklerinden daha iyi olduğu ve hesaplama süresini kısalttığı vurgulanmıştır (Ghritlahre, Chandrakar ve Ahmad, 2021b).

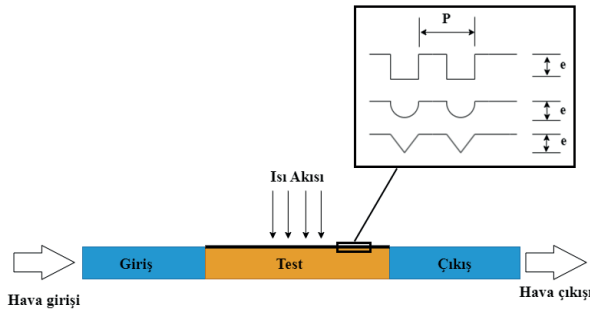
Bhattacharyya ve ark., sarmal oluklu delikli dairesel diskli güneş enerjili hava ısıtıcı tüplerinin ısı transferini ve termal performansını tahmin etmek için bir makine öğrenme modeli kullanmıştır. Çalışma sonunda Nusselt sayısı ve termohidrolik verim için regresyon analizi bulguları, görünmeyen test verileri için %97 doğruluk gösterdiği, yapılan çalışma ile deney süresinin ve maliyetinin azaltılabileceği vurgulanmıştır (Bhattacharyya ve diğerleri, 2021).

Kwon ve ark., değişken kaburga pürüzlülüğünü göz önünde bulundurarak taşınımla ısı transferi katsayılarını tahmin etmek için bir rastgele orman algoritması kullanmıştır. Makine öğrenimi modeli, test veri kümesi için yüksek bir belirleme katsayısı ($R^2 > 0,966$) göstererek sayısal simülasyon verilerini doğru bir şekilde tahmin etmiştir (Kwon, Ejaz ve Hwang, 2020).

Güneş destekli hava ısıtıcıların performansını arttırmak için deneysel ya da sayısal yapılan çalışmalar farklı tasarım parametreleri ile yapılmıştır. Özellikle deneysel çalışmalarda zaman ve maliyet açısından sınırlı parametreler kullanılmıştır. Makine öğrenmesi kullanılarak yapılan çalışmalar, tasarım parametrelerinin seçimine esneklik getirmekte ve daha doğru sonuca ulaşmayı kolaylaştırmaktadır. Bu çalışmada güneş destekli hava ısıtıcıların ısı verimlerinin artırılmasında makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanımının önemi vurgulanmıştır.

2. Güneş Destekli Hava Isıtıcı Test Parametreleri

Güneş destekli hava ısıtıcılarla yapılan deneysel veya sayısal çalışmalarda kanal farklı geometrilerde pürüzlülük eklenerek test işlemleri yapılır, sonuçlar düz yüzeyli ısıtıcılar ile karşılaştırılır. Güneş destekli ısıtıcı geometrik modeli üç bölümden oluşmaktadır: Giriş (L1), Test (L2) ve Çıkış (L3) bölümü. ASHRAE Standardı 93 GA30329'a göre giriş ve çıkış uzunlukları için minimum değerler Denklem 2 ve 3 yardımıyla hesaplanır. Giriş bölümünün amacı test bölümünden önce akışın tam olarak gelişmesini sağlamaktır. Test bölümü üzerindeki nihai etkiyi azaltmak için ise çıkış bölümü eklenir (Şekil 2).



Şekil 2. Güneş Destekli Hava Isıtıcısının Geometrik Modeli

Ortam sıcaklığında havanın kanala düzgün bir hızla girdiği varsayılmaktadır. Hava giriş hızları denklem 1 ile Reynolds sayısına göre hesaplanır. Genellikle kanal çıkışında sabit atmosferik basınçta ($1,013 \times 10^5$ Pa) basınç çıkış koşulu (pressure outlet) uygulanır (A. Kumar ve Khan, 2022).

$$v = \frac{Re\mu}{\rho D_h} \quad (1)$$

$$L_1 = 5\sqrt{HW} \quad (2)$$

$$L_3 = 2.5\sqrt{HW} \quad (3)$$

$$D_h = \frac{4A}{P_w} \quad (4)$$

Yapılan çalışmalarda hava ısıtıcısının üst test duvarına sabit bir ısı akısı uygulanır. Diğer duvarlar yalıtımlı tasarlanır ve genellikle radyasyon ısı transferi ve çevre etkileşiminden kaynaklanan ısı kayıpları ihmal edilir (Yadav ve Bhagoria, 2013). Farklı geometrik şekillerde pürüzlü kanallar için pürüzlülük oranı (P/e) ve bağlı pürüzlülük yüksekliği (e/D) iki önemli tasarım parametresidir.

Isı transferini arttırmak için kullanılan bu yöntemlerin sonuçlarını değerlendirirken kullanılan Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü değerleri Denklem 5 ve 6 yardımıyla hesaplanır.

$$Nu_r = h \frac{D_h}{k} \quad (5)$$

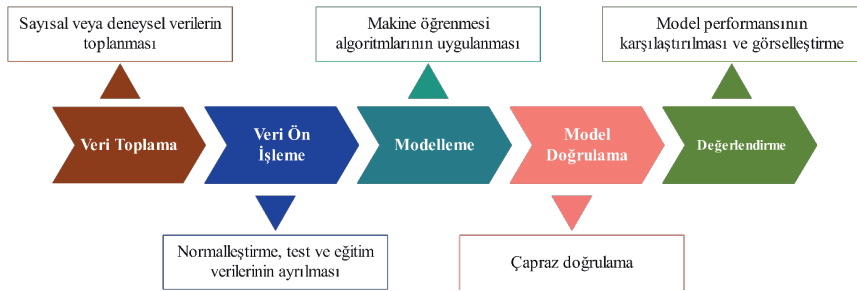
$$f_r = \frac{(\Delta P/L) D_h}{2\rho v^2} \quad (6)$$

Güneş enerjili hava ısıtıcıda ısı transferini arttırmak için kullanılan yapay pürüzlülük, sürtünme kayıplarında önemli bir artışa dolayısıyla ilave pompalama maliyetine neden olur (Koçer, 2022). Isı transferi ve sürtünme kayıpları Webb ve Eckert (Webb ve Eckert, 1972) tarafından önerilen yöntemle birlikte değerlendirilebilmektedir. Bu yöntem termohidrolik performans parametresi olarak tanımlanır ve denklem 7 ile hesaplanır.

$$THPP = \frac{(Nu_r/Nu_s)}{(f_r/f_s)^{\frac{1}{3}}} \quad (7)$$

2. Makine Öğrenmesi Yöntemleri

Makine öğrenmesi; hesaplamalı, matematiksel ve istatistiksel teknikleri kullanarak verilerden sonuçlar çıkaran modelleme sistemlerini içerir. DeneySEL veya sayısal yöntemlerden elde edilen veriler makine öğrenmesi modelinin veri setini oluşturur. Genellikle veri setinin %70'i eğitim verileri olarak belirlenir ve model eğitilir. Modelin eğitim aşamasında görmediği %30'luk bölüm test verisi olarak kullanılarak modelin başarısı test edilir. Literatürde bu oranı belirlemek için bazı çalışmalar yapılmıştır (Ercan, 2022b). Rasgele orman (Random forest), Destek vektör makineleri (Support vector machine), Karar ağaçları (Decision tree) ve Çok katmanlı algılayıcı (Multi-Layer Perceptron) yaygın olarak kullanılan makine öğrenmesi yöntemlerindendir. Makine öğrenmesi uygulama aşamaları Şekil 3 'de verilmiştir.



Şekil 3. Makine Öğrenmesi Aşamaları

Bir makine öğrenmesi çalışmasında, veri kümesinin parametreleri ayarlanarak modelin performansı artırılır. Modellerin tahmin başarısı, istatistiksel metriklerle belirlenir. Belirleme katsayısı (R^2), ortalama karekök hata (RMSE) ve ortalama mutlak yüzde hatası (MAPE) yaygın olarak kullanılan metriklerdendir. Denklem 8-10 ile ifade edilir (Ercan, 2022b).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (9)$$

$$MAPE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - \hat{Y}_i|}{|Y_i|} \right) * 100 \quad (10)$$

burada, Y gerçek değeri, $\hat{Y}$ tahmin edilen değeri, $\bar{Y}$ gerçek değerlerin ortalamasını ve n örnek sayısını temsil eder.

3.1. Rasgele orman (Random Forest)

Breiman tarafından geliştirilen rastgele orman modeli, bir topluluk olarak birlikte çalışan birkaç karar ağacından oluşur (Breiman, 2001). Bu model önyükleme toplamayı kullanır. Önyükleme örnekleme, eğitim veri kümesinden rastgele seçilen özelliklerin yedek örneklerini alır ve ardından her ağacın bireysel tahminlerinin ortalamasını alarak bir araya getirir. Denklem 11 'de Rasgele orman yaklaşımının bir ifadesi yer almaktadır (Ramadhan, Heatubun, Tan ve Lee, 2021).

$$f_{RF}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i(x) \quad (11)$$

burada $T_i(x)$ girdi verilerinin yalnızca bir kısmı kullanılarak oluşturulan tek bir regresyon ağacını temsil eder.

3.2. Destek vektör makineleri (Support Vector Machine)

Destek vektör makineleri başlangıçta sınıflandırma problemlerini çözmek için tasarlanmış, daha sonraları ise regresyon problemlerinde kullanılarak Destek Vektör Regresyon adını almışlardır. Sürekli bir değişken değerini tahmin etmek için yapılan çalışmalarda regresyon yöntemi kullanılır. Yöntem, yüzey çevresinde ortalanmış, aynı anda regresyon hatasını en aza indiren ve eğitim örneklerinin çoğunu içeren en dar tüpü arayan bir optimizasyon problemi olarak formüle edilmiştir (Ercan, 2022b). SVR hiperdüzlem (hyperplane) düzleminin genel denklemi, denklem 12'da verilmiştir (Bamisile ve diğerleri, 2022).

$$y = wX + b; W \in R^n, b \in R \quad (12)$$

burada b , $X = 0$ ' daki kesişme noktasıdır ve w ağırlıktır.

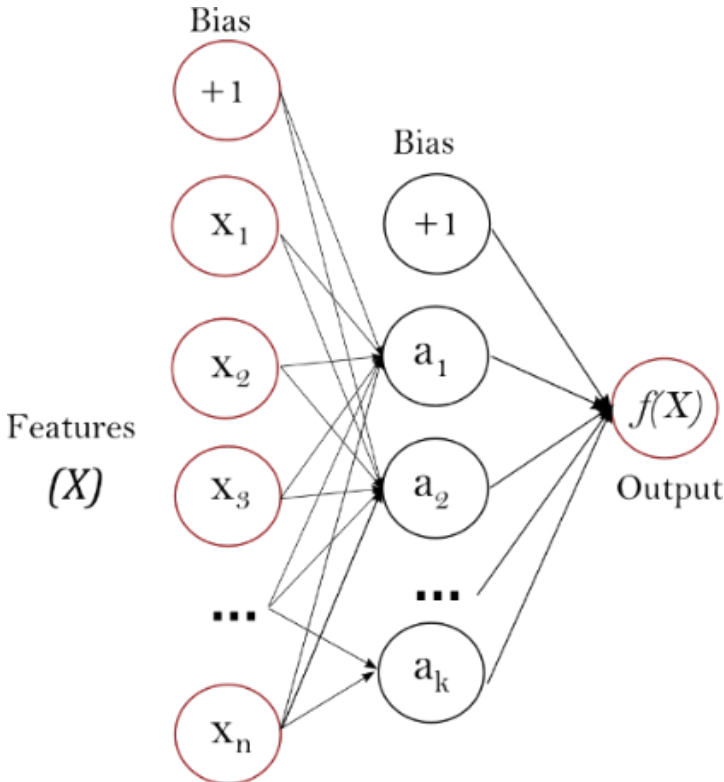
3.3. Karar ağaçları (Decision Tree)

Karar ağaçları hem regresyon hem de sınıflandırma problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan bir makine öğrenme algoritmasıdır. Karar ağaçları, algoritmanın ağacın her iç düğümünde kararlar vererek girdi

verilerini çıktı etiketleriyle eşlemeyi öğrendiği denetimli makine öğrenmesinin bir parçasıdır. Algoritma, veri kümesini en önemli özelliklere göre bölerek hedef değişken açısından daha homojen olan alt kümeler oluşturur. Karar ağaçları hem sayısal hem de kategorik verileri etkili bir şekilde işleme yetenekleri sayesinde tutarlı sonuçlar sağlamaktadır (Ahmad, Reynolds ve Rezgui, 2018; Pedregosa Fabianpedregosa ve diğerleri, 2011).

3.4. Çok katmanlı algılayıcı (Multi-Layer Perceptron)

Bir yapay sinir ağı, her düğüme girişi sınıflandırabilen ve ardından sonuçları tahmin edebilen doğrusal olmayan bir işlev vererek verileri ilişkilendirir. Bir yapay sinir ağının yapısı giriş katmanı, düğüm adresi, görevi gören gizli katman ve çıkış katmanından oluşur. Çok katmanlı algılayıcı model ileri beslemeli çok katmanlı bir yapay sinir ağı modelidir (Kamsuwan ve diğerleri, 2023). Çok katmanlı algılayıcının gizli bir katmanına ait şematik gösterimi Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4. Çok Katmanlı Algılayıcının Gizli Bir Katmanı (Pedregosa Fabianpedregosa ve diğerleri, 2011)

4. Bulgular ve Tartışma

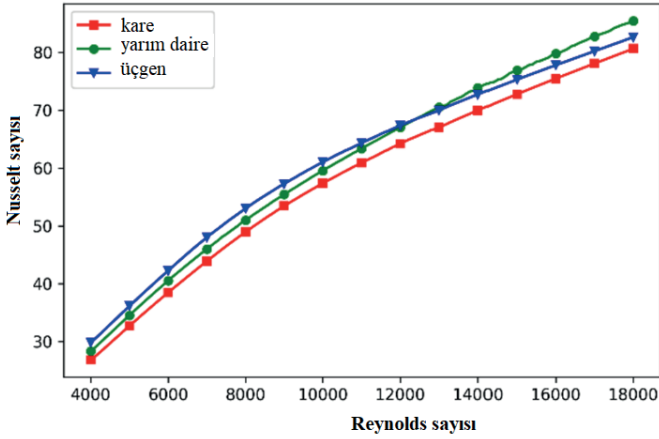
Güneş destekli hava ısıtıcılarda, ısı transferini arttırmak için uygulanan yapay pürüzlülüklerin analizinde Nusselt sayısının artışı gözlemlenir, bu durum aynı zamanda sürtünme kayıplarına neden olur. Her ikisinin göz önüne alınarak hesaplanan termohidrolik performans parametresi doğru değerlendirme açısından önem arz etmektedir. Literatürde bu değerin 1'den büyük olması, güneş destekli hava ısıtıcıların pratik kullanıma uygun olduğunu ifade etmektedir (Bezbaruah ve diğerleri, 2019). Tablo 1'de literatürdeki bazı çalışmaların özeti verilmiştir.

Tablo 1. Güneş Destekli Hava Isıtıcılar Üzerine Yapılan Bazı Çalışmalar

Geometri	Nur/Nu _s	f _r /f _s	THPP	Referans
Kare	2,73	3,73	1,82	(Singh Yadav ve Bhagoria, 2015)
Eşkenar	3,07	3,36	2,11	(Yadav ve Bhagoria, 2014a)
Yarım daire	2,34	1,92	1,88	(Yadav ve Bhagoria, 2014b)
Kare	2,89	3,96	1,80	(Singh Yadav ve Bhagoria, 2013)
Yarım daire	2,08	2,01	1,74	(Yadav ve diğerleri, 2021)

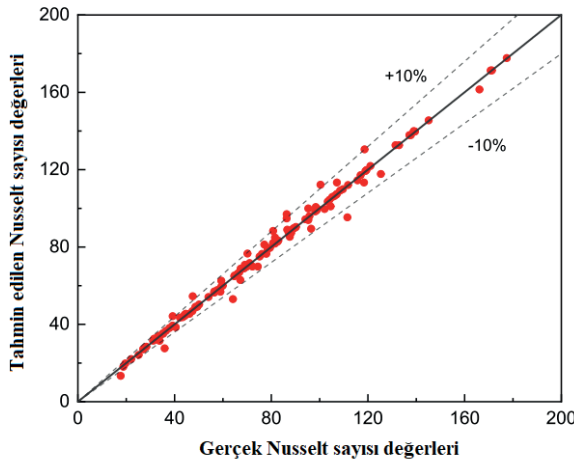
Yapılan bir çalışmada optimum termohidrolik performansın bağlı pürüzlülük yüksekliğinin $e/D=0,042$ olduğunda elde edildiği ifade edilmiştir. Ayrıca Nusselt sayısının ve sürtünme faktörünün bağlı pürüzlülük yüksekliğinden önemli ölçüde etkilendiği belirtilmektedir (Yadav ve Bhagoria, 2014b). Performansı etkileyen diğer bir faktör de pürüzlülük oranıdır. Yapılan çalışmalarda pürüzlülük oranının 7 ile 35 arasında değişmektedir ve bu oranın artması sürtünme faktöründe artışa neden olmaktadır (Kocer, 2024; Yadav ve Bhagoria, 2014a; Yadav ve Thapak, 2016).

Farklı geometrilerin karşılaştırıldığı bir çalışmada, Nusselt sayısı geometri türüne göre incelendiğinde $P/e=10,71$ için maksimum değer yarım daire kesitte, minimum değer ise kare kesitte görüldüğü ifade edilmiştir (Şekil 5) (Kocer, 2024).

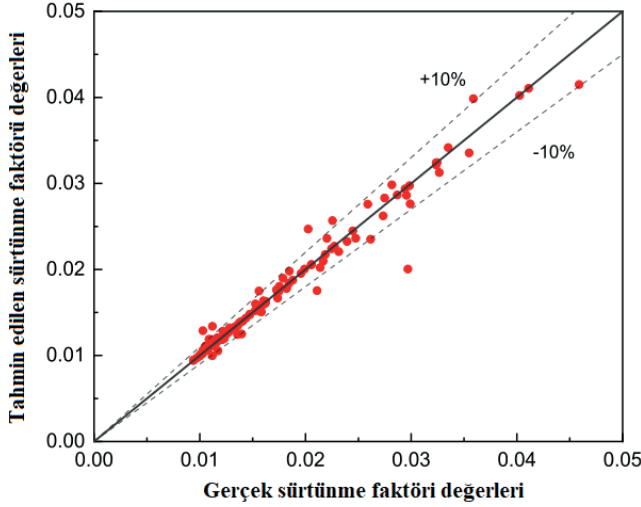


Şekil 5. Farklı Geometri Türleri İçin Reynolds Sayısı İle Nusselt Sayısı Değişimi (Kocer, 2024)

Üçgen geometrili yapay pürüzlülüğe sahip güneş destekli hava ısıtıcının termal ve hidrolik performansını makine öğrenmesi modeli kullanılarak tahmin eden bir çalışmada, test durumu için Nusselt sayısı ve sürünme faktörünün gerçek ve tahmin edilen değerleri arasındaki sapma Şekil 6 ve Şekil 7’da gösterilmiştir. Nusselt sayısı için model tarafından tahmin edilen 136 veri noktasından 127 verinin %10 içerisinde yer aldığı görülmektedir. Ayrıca sürünme faktörü için 136 veri noktasından 124’ü %10’luk bir sapma dahilindedir. Tahmin edilen Nusselt sayısı ve sürünme faktörü için ortalama mutlak sapma sırasıyla %2,39 ve %2,92 olarak elde edilmiştir (Nidhul ve diğerleri, 2023).



Şekil 6. Nusselt Sayısı İçin Gerçek ve Tahmin Değerlerin Karşılaştırılması (Nidhul ve diğerleri, 2023)



Şekil 7. Sürtünme Faktörü İçin Gerçek ve Tahmin Değerlerin Karşılaştırılması (Nidhul ve diğerleri, 2023)

Destek vektör regresyonu (SVR) ve çok katmanlı algılayıcı (MLP) makine öğrenmesi yöntemi ile Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü değerlerinin tahmin için kurulan bir modelde gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmiştir (Kocer, 2024). Bu modellerin R^2 , RMSE ve MAPE performans metrik sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde her iki modelinde yüksek doğrulukta sonuçlar ürettiği görülmektedir.

Tablo 2. Modellerin Performans Parametreleri (Kocer, 2024)

		Nusselt sayısı			Sürtünme faktörü		
		R^2	RMSE	MAPE	R^2	RMSE	MAPE
SVR	Eğitim	0,9969	0,8747	0,1152	0,9696	0,00042	0,1424
	Test	0,9968	0,9068	0,1175	0,9727	0,00037	0,1367
MLP	Eğitim	0,9737	2,5401	0,2002	0,8628	0,00089	0,2099
	Test	0,9710	2,7173	0,2116	0,8574	0,00085	0,2081

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

5. Sonuç

Güneş destekli hava ısıtıcıların performansını arttırmada kullanılan pasif yöntemlerin başında yapay pürüzlülük uygulamaları gelmektedir. Oluşturulan yapay pürüzlülük ile birlikte yüzey alanının artırılması, dolayısıyla ısıl verimin artırılması amaçlanmaktadır. Bu uygulamalarda birçok tasarım parametresi kullanılmaktadır. Zaman ve maliyet açısından

oluşabilecek kısıtlamaların önüne geçmek için makine öğrenmesi yöntemleriyle modellenmesi etkili bir yöntemdir. Özellikle Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü gibi ısı verimi doğrudan etkileyen parametrelerin optimizasyonunda makine öğrenmesi yöntemleri başarılı sonuçlar vererek kullanımının önemini ortaya koymaktadır. Yaygın olarak kullanılan Rasgele orman, Destek vektör makineleri, Karar ağaçları ve Çok katmanlı algılayıcı gibi makine öğrenmesi yöntemlerinin yüksek doğrulukta tahmin ettiği birçok çalışmada belirtilmiştir. Gelişen teknoloji ile birlikte birçok makine öğrenmesi yöntemi ortaya çıkmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalar bu yöntemlerin kullanılarak ısı verimin artırılmasına katkı sağlayacaktır.

Kısaltmalar

A	Kanal kesit alanı
ΔP	Basınç farkı
μ	Vizkozite
D_h	Hidrolik çap
f	Sürtünme faktörü
H	Kanal yüksekliği
h	Konveksiyon ısı transfer katsayısı
k	Isıl iletkenlik
Nu	Nusselt sayısı
P_w	Kanal çevresi
Re	Reynolds sayısı
v	Akışkan hızı
W	Kanal genişliği

Kaynaklar

- Ahmad, M. W., Reynolds, J. ve Rezgui, Y. (2018). Predictive modelling for solar thermal energy systems: A comparison of support vector regression, random forest, extra trees and regression trees. *Journal of Cleaner Production*, 203, 810–821. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2018.08.207
- Aka, H., Aktuğ, Z. B. ve Kılıç, F. (2021). Estimating the England Premier League Ranking with Artificial Neural Network. *Applied Artificial Intelligence*, 35(5), 393–402. doi:10.1080/08839514.2021.1901030
- Bamisile, O., Oluwasanmi, A., Ejayi, C., Yimen, N., Obiora, S. ve Huang, Q. (2022). Comparison of machine learning and deep learning algorithms for hourly global/diffuse solar radiation predictions. *International Journal of Energy Research*, 46(8), 10052–10073. doi:10.1002/ER.6529
- Bezbaruah, P. J., Rajat, &, Das, S., Kumar Sarkar, B., Parag, *, Bezbaruah, J. ve In, A. (2019). Thermo-hydraulic performance augmentation of solar air duct using modified forms of conical vortex generators. *Heat and Mass Transfer*, 55, 1387–1403. doi:10.1007/s00231-018-2521-1
- Bhattacharyya, S., Sarkar, D., Roy, R., Chakraborty, S., Goel, V. ve Almatrafi, E. (2021). Application of New Artificial Neural Network to Predict Heat Transfer and Thermal Performance of a Solar Air-Heater Tube. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 7477, 13(13), 7477. doi:10.3390/SU13137477
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. doi:10.1023/A:1010933404324
- Ercan, U. (2021). Investigation of Determinants of Household Health Expenditures in Turkey Using Simultaneous Quantile Regression Method. *Bingöl Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Bingöl*, 141–172. doi:10.33399/biibfad.835976
- Ercan, U. (2022a). Determining Airline Customer Satisfaction with Ensemble Learning Methods. *Alanya Academic Review*, 6(3), 2763–2774. doi:10.29023/ALANYAAKADEMİK.1095574
- Ercan, U. (2022b). Konut Kira Fiyatlarının Makine Öğrenmesi Yöntemleriyle Tahmin Edilmesi: Destek Vektör Regresyonu ve Yapay Sinir Ağları Karşılaştırması. *Ampirik Yöntemlerle İktisadi ve Finansal Çözümler* içinde (ss. 373–390).
- Ghritlahre, H. K., Chandrakar, P. ve Ahmad, A. (2021a). A Comprehensive Review on Performance Prediction of Solar Air Heaters Using Artificial Neural Network. *Annals of Data Science*, 8(3), 405–449. doi:10.1007/S40745-019-00236-1/FIGURES/19

- Ghritlahre, H. K., Chandrakar, P. ve Ahmad, A. (2021b). A Comprehensive Review on Performance Prediction of Solar Air Heaters Using Artificial Neural Network. *Annals of Data Science*, 8(3), 405–449. doi:10.1007/S40745-019-00236-1/TABLES/11
- Halde, R. R. (2016). Application of Machine Learning algorithms for betterment in education system. *International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT)* içinde (ss. 1110–1114). <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7877759/> adresinden erişildi.
- Kamsuwan, C., Wang, X., Seng, L. P., Xian, C. K., Piemjaiswang, R., Piumsomboon, P., ... Chalermssinsuwan, B. (2023). Simulation of nanofluid micro-channel heat exchanger using computational fluid dynamics integrated with artificial neural network. *Energy Reports*, 9, 239–247. doi:10.1016/J.EGYR.2022.10.412
- Kiliç, F., Menlik, T. ve Sözen, A. (2018). Effect of titanium dioxide/water nanofluid use on thermal performance of the flat plate solar collector. *Solar Energy*, 164, 101–108. doi:10.1016/J.SOLENER.2018.02.002
- Kılıç, F. (2021). Effects of three drying methods on kinetics and energy consumption of carrot drying process and modeling with artificial neural networks. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 43(12), 1468–1485. doi:10.1080/15567036.2020.1832163
- Kocer, A. (2024). Numerical investigation of heat transfer and thermo-hydraulic performance of solar air heater with different ribs and their machine learning-based prediction. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 46(2), 1–16. doi:10.1007/S40430-023-04663-3
- Koçer, A. (2022). KARE KESİT YAPAY PÜRÜZLÜ GÜNEŞ DESTEKLİ HAVA ISITICI TASARIMININ SAYISAL ANALİZİ. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 10(3), 504–518. doi:10.29109/GUJSC.1089224
- Kumar, A. ve Khan, S. (2022). CFD Simulation of a Curved Solar Air Heater with Various Shaped Down Turbulators. *International Journal of Research Publication and Reviews Journal homepage: www.ijrpr.com*, 3, 3033–3043. www.ijrpr.com adresinden erişildi.
- Kumar, Y., Spandana, V., Vaishnavi, V., Neha, K. ve Devi, V. G. R. . (2020). Supervised machine learning approach for crop yield prediction in agriculture sector. *Proceedings of the Fifth International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES 2020)* içinde (ss. 736–741). <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9137868/> adresinden erişildi.
- Kwon, B., Ejaz, F. ve Hwang, L. K. (2020). Machine learning for heat transfer correlations. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 116, 104694. doi:10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2020.104694

- Nidhul, K., Thummar, D., Yadav, A. K. ve Anish, S. (2023). Machine learning approach for optimization and performance prediction of triangular duct solar air heater: A comprehensive review. *Solar Energy*, 255, 396–415. doi:10.1016/J.SOLENER.2023.02.022
- Oprea, S. V. ve Bâra, A. (2023). A stacked ensemble forecast for photovoltaic power plants combining deterministic and stochastic methods. *Applied Soft Computing*, 147, 110781. doi:10.1016/J.ASOC.2023.110781
- Pedregosa Fabianpedregosa, F., Michel, V., Grisel Oliviergrisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., ... Duchesnay Edouardduchesnay, Fré. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.
- Prajapati, S., Naik, N. ve V.P., C. (2022). Numerical solution of solar air heater with triangular corrugations for indirect solar dryer: Influence of pitch and an optimized pitch of corrugation for enhanced performance. *Solar Energy*, 243, 1–12. doi:10.1016/J.SOLENER.2022.07.044
- Ramadhan, R. A. A., Heatubun, Y. R. J., Tan, S. F. ve Lee, H. J. (2021). Comparison of physical and machine learning models for estimating solar irradiance and photovoltaic power. *Renewable Energy*, 178, 1006–1019. doi:10.1016/J.RENENE.2021.06.079
- Saravanan, A., Parida, S., Murugan, M., Reddy, M. S., Elumalai, P. V. ve Kumar Dash, S. (2023). Thermal performance prediction of a solar air heater with a C-shape finned absorber plate using RF, LR and KNN models of Machine learning. *Thermal Science and Engineering Progress*, 38, 101630. doi:10.1016/J.TSEP.2022.101630
- Shetty, S. P., Madhwesh, N. ve Vasudeva Karanth, K. (2021). Numerical analysis of a solar air heater with circular perforated absorber plate. *Solar Energy*, 215, 416–433. doi:10.1016/j.solener.2020.12.053
- Shetty, S. P., Nayak, S., Kumar, S. ve Vasudeva Karanth, K. (2021). Thermo-hydraulic performance prediction of a solar air heater with circular perforated absorber plate using Artificial Neural Network. *Thermal Science and Engineering Progress*, 23, 100886. doi:10.1016/J.TSEP.2021.100886
- Singh Gill, R., Singh Hans, V. ve Pal Singh, R. (2021). Optimization of artificial roughness parameters in a solar air heater duct roughened with hybrid ribs. *Applied Thermal Engineering*, 116871. doi:10.1016/j.applthermaleng.2021.116871
- Singh Yadav, A. ve Bhagoria, J. L. (2013). Modeling and Simulation of Turbulent Flows through a Solar Air Heater Having Square-Sectioned Transverse Rib Roughness on the Absorber Plate. *The Scientific World Journal*, 2013, 12. doi:10.1155/2013/827131

- Singh Yadav, A. ve Bhagoria, J. L. (2015). Numerical investigation of flow through an artificially roughened solar air heater. *International Journal of Ambient Energy*, 36(2), 87–100. doi:10.1080/01430750.2013.823107
- Webb, R. ve Eckert, E. (1972). Application of rough surfaces to heat exchanger design. *International journal of heat and mass transfer*, 15(9), 1647–1658. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0017931072900956> adresinden erişildi.
- Yadav, A. S. ve Bhagoria, J. L. (2013). A CFD (computational fluid dynamics) based heat transfer and fluid flow analysis of a solar air heater provided with circular transverse wire rib roughness on the absorber plate. *Energy*, 55, 1127–1142. doi:10.1016/j.energy.2013.03.066
- Yadav, A. S. ve Bhagoria, J. L. (2014a). A CFD based thermo-hydraulic performance analysis of an artificially roughened solar air heater having equilateral triangular sectioned rib roughness on the absorber plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 70, 1016–1039. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.11.074
- Yadav, A. S. ve Bhagoria, J. L. (2014b). A Numerical Investigation of Turbulent Flows through an Artificially Roughened Solar Air Heater. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 65(7), 679–698. doi:10.1080/10407782.2013.846187
- Yadav, A. S., Shrivastava, V., Chouksey, V. K., Sharma, A., Sharma, S. K. ve Dwivedi, M. K. (2021). Enhanced solar thermal air heater: A numerical investigation. *Materials Today: Proceedings*, 47, 2777–2783. doi:10.1016/j.matpr.2021.03.385
- Yadav, A. S. ve Thapak, M. K. (2016). Artificially roughened solar air heater: A comparative study. *International Journal of Green Energy*, 13(2), 143–172. doi:10.1080/15435075.2014.917419



YENİLENEBİLİR ENERJİ TEKNOLOJİLERİNDE GÜNEŞ ENERJİSİ YAKLAŞIMLARI

“ ”

Burak AKTEKELİ¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi Burak AKTEKELİ, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Osmaneli Meslek Yüksekokul, İş Sağlığı ve Güvenliği Programı, Bilecik, 11500, Türkiye, burak.aktekeli@bilecik.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4600-5942>

1. Giriş

Yenilenebilir enerji teknolojileri, son yıllarda hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik faydalar açısından giderek daha fazla önem kazanmıştır. İklim değişikliği ile mücadelede ve enerji güvenliğinin sağlanmasında yenilenebilir kaynakların kullanımı hayati bir rol oynamaktadır. Güneş, rüzgar, su, biyokütle ve jeotermal kaynaklar gibi birçok yenilenebilir enerji biçimi, fosil yakıtların aşırı kullanımının neden olduğu çevresel sorunları hafifletmede etkili çözümler sunmaktadır (Turchetti, 2025; Chen & Chong, 2020; Alizadeh, 2025).

Son yıllarda yenilenebilir enerji teknolojilerine dair önemli gelişmeler gözlemlenmiştir. Örneğin, güneş enerjisi sistemlerinin maliyetleri son derece düşmüş ve bu da daha fazla kullanıcı tarafından benimsenmelerine yol açmıştır. Güneş enerjisi ve rüzgar gücü, artık birçok bölgede enerji üretiminde rekabetçi bir pozisyona gelmiştir ve birçok ülkede yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji üretim içindeki payının %30'a ulaşması beklenmektedir (Chen & Chong, 2020; Alizadeh, 2025). Bunun yanı sıra, devlet politikaları ve teşvikleri, yenilenebilir enerji yatırımlarının artmasında önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle vergi indirimleri ve sübvansiyonlar, yenilenebilir teknolojilerin benimsenmesini hızlandırmakta ve enerji sektörü için yeni pazarlar açmaktadır Alizadeh, 2025; Abolhosseini & Heshmati, 2014).

Mikro şebekeler ve akıllı enerji sistemleri, yenilenebilir kaynakların entegrasyonunu kolaylaştırarak elektrik şebekelerinin esnekliğini artırmaktadır. Bu tür sistemler, özellikle kırsal alanlarda enerji erişimini artırmak için yenilikçi çözümler sunmaktadır (Bong ve ark., 2022). Ayrıca, elektrikli araçların ve yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu, enerji yönetiminde daha etkili ve sürdürülebilir yöntemler geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Bong ve ark., 2022).

Gelecekte, hidrojen teknolojileri ve enerji depolama sistemlerinin entegrasyonu, yenilenebilir enerji sistemlerinin verimliliğini artırmada büyük bir potansiyele sahip görünmektedir. Hidrojen, yüksek enerji yoğunluğu ve çevre dostu olması nedeniyle bir enerji taşıyıcısı olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır (Stepanenko ve ark., 2023). Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen fazla enerjinin depolanması, talep dalgalanmalarını dengelemek için önemli bir strateji olarak öne çıkmaktadır (Sornek, 2025; Ferdous & Barman, 2025).

Bunun yanı sıra, toplumsal farkındalık ve kamu politikalarının yanı sıra, özel sektörün yenilenebilir enerjiye yönelik yatırımları da önem kazanmaktadır. Yüksek yatırım maliyetleri ve teknolojik zorluklar gibi engellerin aşılması için kamu-özel ortaklıklarının teşvik edilmesi gerektiği önerilmektedir (Хоменко ve ark., 2024; Haripuddin ve ark., 2025). Bu

yaklaşım, hem mevcut hem de gelecekteki yenilenebilir enerji projelerinin sürdürülebilirliği açısından kritik bir faktördür (Ferdous & Barman, 2025).

Sonuç olarak, yenilenebilir enerji teknolojileri, ekonomik kalkınma ile çevresel sürdürülebilirlik arasında kritik bir denge oluşturarak geleceğin enerji sistemlerinin dönüşümünde belirleyici bir konumda yer almaktadır. Bu bağlamda özellikle güneş enerjisi sistemleri—fotovoltaik (PV), fototermal (ST) ve fotovoltaik-thermal (PVT) hibrit yapılar—yüksek verimlilik potansiyelleri, modüler yapıları ve geniş uygulama alanları sayesinde enerji arz güvenliğinin sağlanmasına ve fosil yakıt bağımlılığının azaltılmasına önemli katkı sunmaktadır. Güneş enerjisi teknolojilerinde kaydedilen sürekli gelişmeler ve yenilikçi tasarım yaklaşımları, sistemlerin performansını iyileştirirken aynı zamanda enerji üretimini daha ekonomik ve sürdürülebilir hale getirmektedir. Dolayısıyla, güneş enerjisi başta olmak üzere tüm yenilenebilir enerji çözümlerinin küresel ölçekte yaygınlaşması, düşük karbonlu enerji dönüşümünün hızlandırılmasına ve çevresel etkilerin minimize edilmesine yönelik stratejik bir gereklilik hâline gelmiştir. (Turchetti, 2025; Alizadeh, 2025; Ayorinde & Olasebikan, 2020).

2. Güneş Enerjisi Teknolojileri

Güneş enerjisi teknolojileri, sürdürülebilir enerji üretimi açısından önemli bir alternatif sunan yenilikçi çözümlerdir. Güneş enerjisinin doğrudan elektriğe dönüştürülmesi, fotovoltaik (PV) sistemler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Bu bölümde, fotovoltaik sistemlerin temel özellikleri, bileşenleri, performansını etkileyen faktörler, güncel gelişmeler ve yenilikçi uygulamalar üzerinde durulacaktır.

2.1 Fotovoltaik (PV) sistemler

Fotovoltaik hücreler, güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürmek için kullanılan temel bileşenlerdir. PV sistemleri, güneş radyasyonunu elektrik enerjisine çevirmek için bir araya getirilmiş hücrelerden oluşan modüllerden meydana gelir. Güneş sistemlerinin performansı, panel konumu, açısı, iklim koşulları, coğrafi konum ve kullanılan teknolojilerin özellikleri gibi birçok faktörden etkilenmektedir (Geliş ve ark., 2020). Optimal güneş paneli yerleşimi, verimliliği artırmak için kritik bir rol oynamaktadır. Geliş ve ark. (2020), panelin yönü ve eğim açısının fotovoltaik hücrelerin karakteristikleri üzerindeki etkilerini ortaya koyarak, doğru montajın verimliliği artırabileceğini göstermiştir.

PV sistemlerinin güvenilirliği ve ekonomik cazibesi, bu sistemlerin yaygınlaştırılmasında önemli bir etkidir. Aslay Aslay (2021) tarafından yapılan çalışmalarda, farklı güneş pili türlerinin ve yapılandırmalarının geniş

alanlı PV modülleri üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Ayrıca, bu sistemlerin tüketici tarafında kurulum esnekliği sunması, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talebi artırmaktadır.

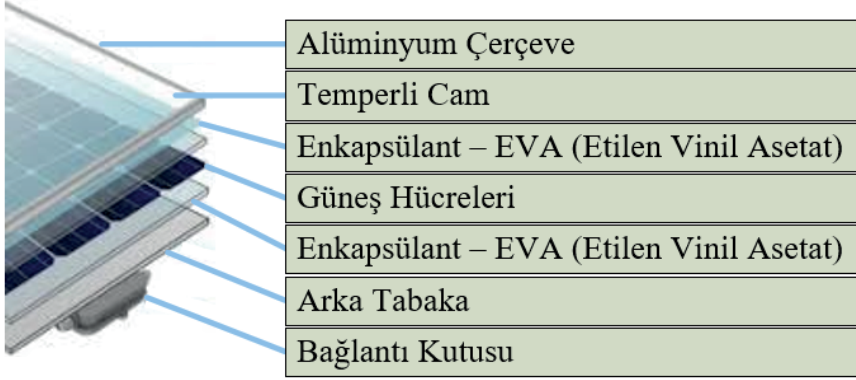
Fotovoltaik sistemlerin verimliliği, aşırı ısınmanın olumsuz etkilerinden kaçınmak için geliştirilen fotovoltaik termal (PV-T) sistemlerle artırılmaktadır. Bu sistemler, PV hücrelerinde ortaya çıkan fazla ısının hava veya su kullanılarak dışarı atılmasını sağlar, böylece güneş pillerinin elektrik üretim performansı önemli ölçüde iyileşmektedir (Atız, 2023). Yeniliğin başka bir örneği, taşınabilir ve güneşi takip eden şarj sistemlerinin geliştirilmesidir. Bu tür sistemler, enerji depolamada ve kullanımda esneklik sağlamaktadır (İsmatli & Gören, 2017).

PV sistemlerinin potansiyeli, net sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda dünya genelinde hızla artmaktadır. Carvalho ve diğerleri Carvalho ve ark. (2024) tarafından yapılan çalışmalara göre, PV sistemlerinin 2050 yılına kadar küresel enerji arzının büyük bir kısmını karşılaması beklenmektedir. Güneş enerjisi, çeşitli sektörlerde enerji verimliliğini artırması, sera gazı emisyonlarını azaltması ve ekonomik istikrar sağlaması bakımından büyük bir öneme sahiptir.

Sonuç olarak, fotovoltaik sistemlerin gelişimi ve entegrasyonu, yenilenebilir enerji çözümlerinin etkinliğini artırmak adına büyük bir potansiyel taşımaktadır. Gelecekte, bu teknolojilerin daha fazla benimsenmesi, çevresel sürdürülebilirlik ve enerji güvenliği açısından kritik bir rol oynamaya devam edecektir.

2.2 PV modüllerin yapısı

Fotovoltaik (PV) modüller, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken cihazlardır. Günümüzde en yaygın kullanılan modül teknolojileri üç ana grupta toplanmaktadır: monokristal silikon, polikristal silikon ve ince film (thin-film) modüller. Bu teknolojiler, hammadde yapısı, üretim süreci, verimlilik, maliyet, dayanıklılık ve kullanım alanlarına göre belirgin farklılıklar gösterdiği bilinmektedir. (Renewables4Today, 2024).



Şekil 1: Fotovoltaik Panel Yapısı (GüneşDükkan, t.y.).

Monokristal silikon (c-Si) modüller:

Monokristal (c-Si) modüller, tek bir kristal yapıdan üretilmiş yüksek saflıkta silisyumdan oluşur. Bu yapı, elektron hareketi için daha düzenli bir yol sağladığından yüksek verimlilik elde edilir. Ticari monokristal PV modüllerinin verimliliği %19–23 aralığındadır; bazı modern modüller ise %24’ü aşabilmektedir (Tongwei Solar, 2024).



**Monokristalline
Solar Panel**



Şekil 2: Monokristal Modüller

Monokristal modüller düşük ışıma koşullarında bile yüksek performans gösterirken aynı zamanda estetik açıdan koyu renkte homojen bir görünüme sahiptir. Ancak üretim süreçlerinin maliyetli olması nedeniyle diğer modüllere kıyasla daha yüksek yatırım maliyeti gerektirir (Euro Teknik, 2024).

Polikristal silikon modüller:

Polikristal modüller, birden fazla silisyum kristalinin eritilip kalıba dökülmesiyle üretilir. Bu üretim yöntemi, monokristale kıyasla daha düşük maliyetlidir. Verimlilikleri genellikle %15–18 seviyesindedir (Euro Teknik, 2024).



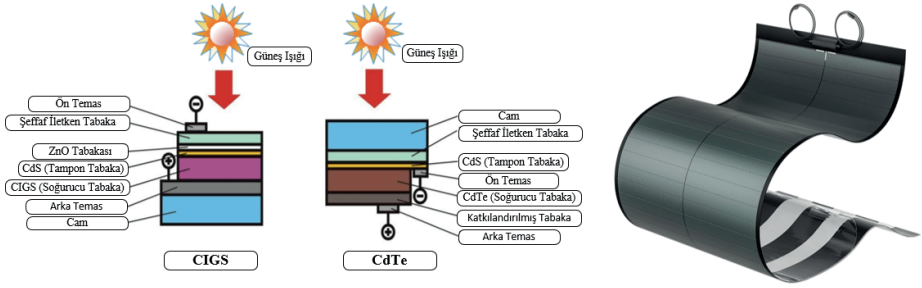
**Polykristalline
Solar Panel**

Şekil 3: Polykristal Modüller

Yüzey yapısı mavi renkli ve kristal parçalarının belirgin olduğu bir görünüme sahiptir. Daha ekonomik olmaları nedeniyle geniş yüzeyli arazi uygulamalarında veya maliyet öncelikli projelerde tercih edilmektedir (XPower Solar, 2023).

İnce film (Thin-Film) modüller

İnce film teknolojileri, amorf silikon (a-Si), kadmiyum tellürür (CdTe) ve bakır-indiyum-galyum-selenür (CIGS) gibi yarı iletken malzemelerin mikrometre ölçeğinde ince tabakalar halinde bir yüzeye kaplanmasıyla üretilir.



Şekil 4:İnce Film Modüller

Bu modüller hafiflik, esneklik ve yüzey uyumu gibi kritik avantajlar sunar (Electrical Academia, 2023). Bununla birlikte, ince film modüllerin verimlilikleri genellikle %10–13 aralığındadır ve uzun dönem bozulmaları kristal silikon modüllere kıyasla daha yüksektir. Ancak düşük maliyetli üretimleri ve mimari entegrasyona uygun olmaları nedeniyle özel uygulamalarda önemli bir alternatif oluşturmaktadır (SolarTiger, 2023).

Tablo 1’de üç farklı PV modül yapısının teknik açıdan karşılaştırması sunulmuştur. Bu göstergeler değerlendirildiğinde, monokristal yapıya sahip PV panellerin uygulanmasının sistem verimliliğini artırdığı görülmektedir. Ayrıca monokristal modüllerin uzun hizmet ömrü, sistemin genel kârlılığını yükseltmekte ve buna bağlı olarak yatırımın geri ödeme süresini daha da kısaltmaktadır.

Tablo 1: Teknik ve uygulama açısından karşılaştırma

Modül Tipi	Verimlilik	Maliyet	Alan Kullanımı	Dayanıklılık / Ömür	Uygun Uygulamalar
Monokristal c-Si	~ %19–23	Yüksek	En verimli (az alan)	Uzun ömür, yüksek performans	Çatı kurulumları, alan kısıtı olan projeler
Polikristal Si	~ %15–18	Orta / Düşük	Orta–yüksek alan gerektirir	Orta–yüksek dayanıklılık	Geniş alanlı çatı / arazi sistemleri
İnce film (CdTe, CIGS, a-Si)	~ %10–13	Düşük	En fazla alan gerekebilir	Daha kısa ömür, hızlı bozunma	BIPV (binaya entegre), hafif / esnek yüzeyler, büyük ölçekli santraller

2.3 Fotovoltaik (PV) sistemlerin bileşenleri

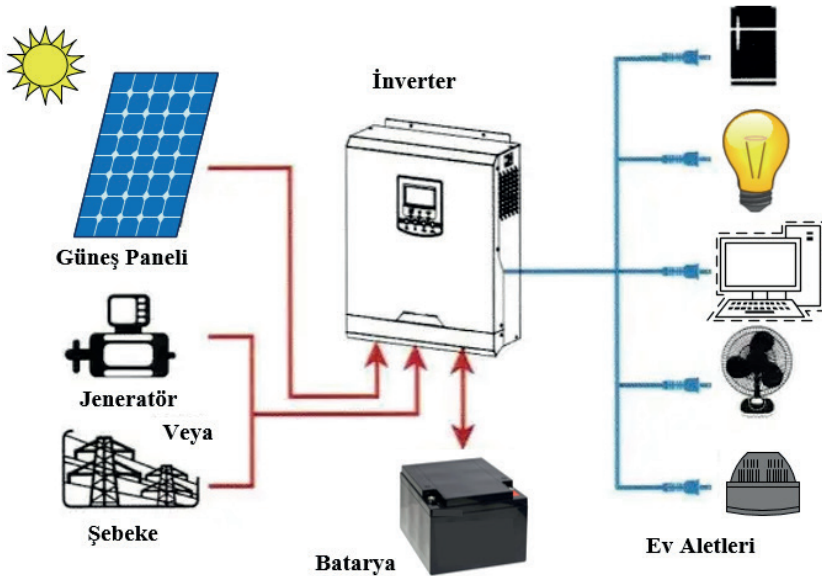
Tipik bir fotovoltaik (PV) sistem; PV modülleri, inverter(ler), kablolama, akü depolama birimleri, izleme sistemleri ve koruma ekipmanlarından oluşur. Bu bileşenlerin her biri, sistemin verimliliği, güvenilirliği ve sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir (Sark, 2012; Aghaei ve ark., 2020; Eddine ve ark., 2023; Yang ve ark., 2024).

PV modülleri:

PV modülleri, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren temel enerji üretim birimleridir. Modüller, seri ve/veya paralel bağlantılarla diziler (stringler) oluşturur ve sistemin toplam güç kapasitesini belirler. Modül verimliliği, güneş ışınımı ve sıcaklık gibi çevresel faktörlere bağlı olarak değişir (Sark, 2012; Aghaei ve ark., 2020; Eddine ve ark., 2023).

İnverterler:

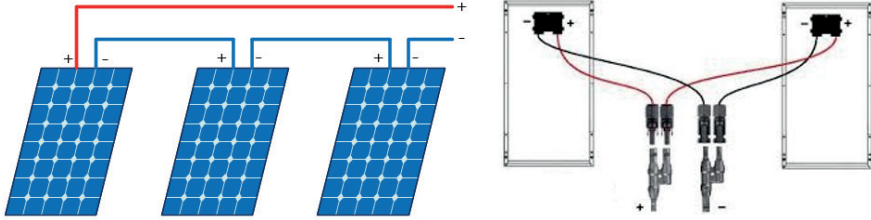
İnverterler, PV modüllerinden elde edilen doğru akımı (DC), şebekeye veya yüke uygun alternatif akıma (AC) çevirir. Modern inverterler, maksimum güç noktası izleme (MPPT), şebeke senkronizasyonu, reaktif güç desteği ve harmonik kompanzasyonu gibi gelişmiş fonksiyonlara sahiptir. Farklı tipte inverterler (string, merkezi, mikro) sistem ölçeğine ve uygulama alanına göre seçilir (Khan ve ark., 2020; Gavli ve ark., 2025; Soares ve ark., 2023; Hariri ve ark., 2020).



Şekil 5: İnverter bağlantı şeması

Kablolama ve montaj yapıları:

Kablolama, modüller, inverterler ve diğer bileşenler arasında güvenli ve verimli enerji iletimini sağlar. Montaj yapıları ise modüllerin uygun eğim ve yönelimle yerleştirilmesini, rüzgar ve çevresel etkilere karşı dayanıklılığını garanti eder (Sark, 2012; Aghaei ve ark., 2020).



Şekil 6: Elektrik bağlantısı

Akü depolama birimleri:

Akü sistemleri, üretilen enerjinin depolanmasını ve talep anında kullanılmasını sağlar. Özellikle şebekeden bağımsız (off-grid) veya hibrit sistemlerde kritik öneme sahiptir. Lityum-iyon ve kurşun-asit gibi farklı akü teknolojileri kullanılabilir. Akü yönetim sistemleri (BMS), şarj/deşarj kontrolü ve güvenlik için gereklidir (Hasan & Altinoluk, 2023; Maleczek ve ark., 2020; Soares ve ark., 2023).

İzleme ve kontrol sistemleri:

İzleme sistemleri, PV sisteminin performansını, arıza tespitini ve enerji üretimini gerçek zamanlı olarak takip eder. Gelişmiş izleme, bakım maliyetlerini azaltır ve sistem ömrünü uzatır (Aghaei ve ark., 2020; Yang ve ark., 2024).

Koruma ekipmanları:

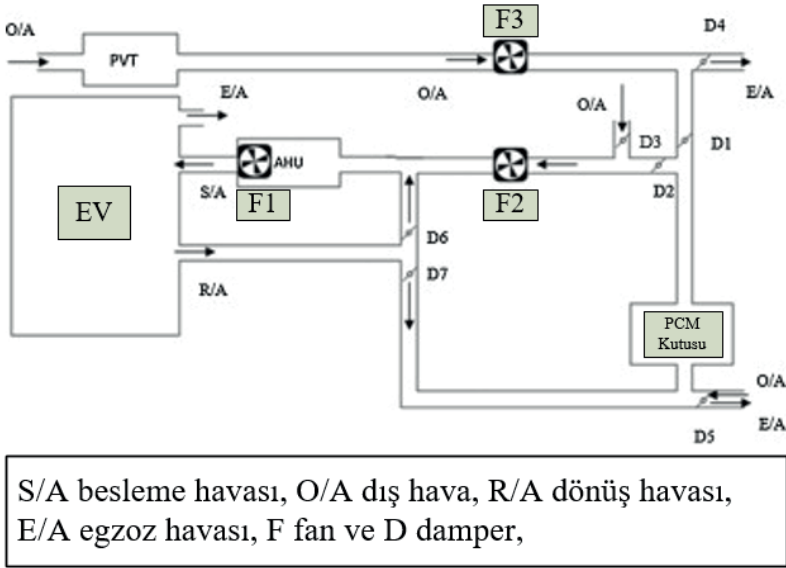
Koruma ekipmanları; aşırı akım, kısa devre, yıldırım ve topraklama gibi risklere karşı sistemi güvence altına alır. Sigortalar, devre kesiciler, parafudrlar ve topraklama sistemleri bu kapsamda yer alır (Sark, 2012; Obatola, 2024; Yang ve ark., 2024).

2.4 PVT sistemler

Fotovoltaik termal (PVT) sistemler, güneş enerjisinden hem elektrik hem de ısıl enerji elde etmeyi mümkün kılan hibrit bir yaklaşım sunmakta olup, fotovoltaik modüllerin elektrik üretim işlevi ile termal enerji toplama süreçlerini bir arada gerçekleştirmektedir. Bu literatür taraması, son beş yıl içinde gerçekleştirilen araştırmalar ışığında PVT sistemlerinde kullanılan

farklı soğutma tekniklerini ve atık ısının değerlendirilmesine yönelik uygulamaları incelemektedir.

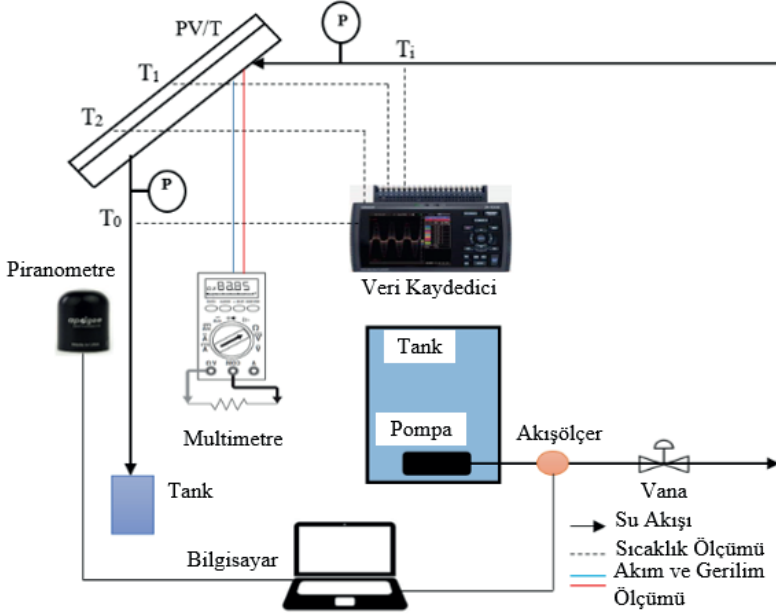
Güncel çalışmalar, PVT sistemlerinin hem elektriksel hem de termal verimliliklerinin artırılmasında yüksek bir potansiyel ortaya koyduğunu göstermektedir. Özellikle faz değişimli malzemelerin (PCM) PVT sistemlerine entegrasyonu, ısı depolama ve ısı dağıtım kabiliyetlerini geliştiren en dikkat çekici yeniliklerden biridir. Bu tür sistemler, depolanan ısı enerjisiyi kullanarak düşük güneş ışıması dönemlerinde dahi enerji üretiminin sürdürülebilmesini sağlamanın yanı sıra, konut ve endüstriyel uygulamalar için daha geniş bir kullanım potansiyeli sunmaktadır (Jabar ve ark., 2023; Alaskaree, 2025). PVT tasarımında PCM kullanımı, enerji kullanımını ve depolama performansını optimize ederek daha sürdürülebilir bir uygulama ortaya koymaktadır (Fiorentini ve ark., 2015; Abed & Ghaydh, 2024).



Şekil 7: PVT entegreli konut ısıtma uygulaması

Soğutma teknikleri, fotovoltaik modüllerin işletme verimliliğinin korunması açısından kritik öneme sahiptir; zira yüksek çalışma sıcaklıkları modül performansını önemli ölçüde düşürebilmektedir (Durez ve ark., 2023; Harmailil ve ark., 2024). Literatürde yer alan çeşitli soğutma yöntemleri pasif, aktif ve hibrit sistemler olarak sınıflandırılmaktadır. Örneğin, hava kanalları veya sıvı soğutma borularının kullanılması, PV modüllerinin sıcaklığını belirgin ölçüde azaltarak elektriksel çıktıyı artırmaktadır. Choi ve Choi tarafından yapılan araştırma, üçgen bloklarla entegre edilmiş PVT hava kollektörlerinin yalnızca ısı performansını iyileştirmekle kalmayıp aynı zamanda enerji kullanımını da optimize ettiğini ortaya koymuştur (Choi &

Choi, 2022; Abed & Ghaydh, 2024). Nanotanecikli akışkanlar gibi aktif soğutma sistemleri ise termal iletkenlik ve ısı transfer hızlarında anlamlı artışlar sağlayarak modül verimliliğini yükseltmiştir (Das ve ark., 2022; Husain ve ark., 2023).



Şekil 8: PVT performans testi için deneysel kurulumun şematik gösterimi.

Enerji geri kazanım sistemlerinin bu hibrit yapılara entegrasyonu, sistem performansının optimize edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Jacob ve Demir ile Aktacir tarafından yürütülen çalışmalar, etkili ısı geri kazanım mekanizmalarının yüksek sıcaklık koşullarında kritik bir sorun olan ısı birikimini azaltarak elektriksel verimliliği artırabildiğini göstermiştir (Jacob ve ark., 2023; Demir & Aktacir, 2024). Ayrıca, çeşitli araştırmalarda kullanılan matematiksel modelleme yaklaşımları, sistem iyileştirmeleri için değerli bilgiler sağlamakta; simülasyon çıktıları ise farklı iklim koşullarında geleneksel tasarımların daha yüksek performans sergilemesi için yol gösterici olmaktadır (Durez ve ark., 2023; Rezvani ve ark., 2022).

$$\eta_{PVT} = \eta_{PV} + \eta_{th} \quad (1)$$

PV panel verimi, panelin çıkış gücünün (P_{PVout}) giriş gücüne (P_{PVin}) oranıyla bulunur. Bu verim, PVT sisteminin elektrik üretme kapasitesini değerlendirmektedir. PV panel verimi aşağıdaki eşitlikle hesaplanır (Karaca ve ark., 2019):

$$\eta_{PV} = \frac{P_{PVout}}{S_{irr} \times A_{PV}} \times 100 \quad (2)$$

Termal verim, PVT sistemindeki termal bileşenlerin gelen güneş enerjisini ne kadar etkin kullandığını göstermektedir. Termal verim şu şekilde ifade edilir (Fang ve ark., 2024):

$$\eta_{TH} = \frac{\dot{Q}_{th}}{S_{irr} \times A_{PV}} \quad (3)$$

burada $\dot{Q}_{th}$ toplanan termal güçtür; S_{irr} gelen güneş ışımasını, A_{PV} ise PV kollektör yüzey alanını temsil etmektedir.

PVT sisteminin termal gücü Eşitlik (4) ile hesaplanır. Özgül ısı kapasitesi, sistemdeki akışkanın belirli bir sıcaklık artışı başına ne kadar enerji taşıyabildiğini gösterir. Bu değer termal tasarım açısından kritik olup Eşitlik (5) ile hesaplanır (Fang ve ark., 2024; Aktaş ve ark., 2012):

$$\dot{Q}_{th} = \dot{m} \times c \times (T_{out} - T_{in}) \quad (4)$$

$$c = \frac{\dot{Q}_{th}}{\dot{m} \times (T_{out} - T_{in})} \quad (5)$$

Burada $\dot{m}$ akışkanın kütleli debisini, T_{out} ve T_{in} ise PVT sistemin çıkış ve giriş hava sıcaklıklarını, c ise sabit basınçtaki havanın özgül ısısını temsil eder.

PVT sistemine giren havanın yoğunluğu, akışkan dinamiğini anlamak için gereklidir ve Eşitlik (6) ile hesaplanır (Zare ve ark., 1966):

$$\rho_{air} = \frac{P_{air}}{R \times (T_{in} + 273.15)} \quad (6)$$

burada; P_{atm} atmosferik basınçtır ve çalışmada 101325 N/m^2 olarak kullanılmıştır, R ise havanın gaz sabitidir ve çalışmada 287 J/kg K olarak kullanılmıştır.

Deneyssel çalışmalarda, ölçümlerden veya ölçüm cihazlarından kaynaklanan belirsizlikler belirlenmelidir. R ölçülecek miktardır, R miktarını etkileyen bağımsız değişkenler $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, olarak ifade edilir ve her bir bağımsız değişkenin hata oranları $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ olarak ifade edilir. Belirsizlik (W_R) aşağıdaki denklemle hesaplanabilir (Holman J.P., 1966):

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

Güneş enerjisinden elde edilen ekserji girişi ($E_{x,in}, W$) ve ekserji çıkışı ($\dot{E}_{x,out}, W$) aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{E}_{x,in} = AS_{irr} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4 \right] \quad (8)$$

$$\dot{E}_{x,out} = \dot{Q}_{loss} \left(1 - \frac{T_a}{T_{cell}} \right) \quad (9)$$

Denklemden, T_s (K) güneşin sıcaklığını (5770 K) temsil ederken, T_{cell} (K), PVT toplayıcının hücresinin sıcaklığını belirtir. Ek olarak, $\dot{Q}_{loss}$ (W) ısı kaybını ifade eder. Ekserjiye denge denklemleri aşağıdaki ifadelerde verilmiştir (Akteş ve ark., 2024):

$$\sum \dot{E}_{x,d} = \sum E_{x,in} - \sum E_{x,out} \quad (10)$$

$$\sum \dot{E}_{x,d} = \sum E_{x,in} - \sum (E_{x,th} + E_{x,PV}) \quad (11)$$

$$\dot{E}_{x,th} = \dot{Q}_u \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{out}} \right) \quad (12)$$

$$\dot{E}_{x,PV} = \eta_{el} AG \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_s} \right)^4 \right] \quad (13)$$

$$\dot{E}_{x,PVT} = E_{x,th} + E_{x,PV} \quad (14)$$

$\dot{E}_{x,d}$ (W) ekserji kaybını temsil ederken, PVT toplayıcının ekserji verimliliği verilmiştir (Aktaş ve ark., 2024):

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{\dot{E}_{x,d}}{\dot{E}_{in}} = \frac{\dot{E}_{x,out}}{\dot{E}_{x,in}} \quad (15)$$

Bu kapsamlı analizler, PV ve PVT sistemlerinin tasarımında hem elektriksel hem de ısı performansın bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesini sağlayarak sistem optimizasyonu açısından kritik bir rol oynamaktadır. I–V ve P–V karakteristiklerinin incelenmesi, sıcaklık ve ışıyım değişimleri gibi çevresel faktörlerin panel davranışı üzerindeki etkilerini nicel olarak ortaya koymakta; böylece daha yüksek verimlilik için uygun malzeme seçimi, soğutma stratejileri ve geometri tasarımı yapılmasına imkân tanımaktadır. Termal ve elektriksel verim hesaplamaları ile ekserji analizleri ise sistemdeki enerji dönüşümlerinin ne ölçüde kullanılabilir işe dönüştürülebildiğini belirleyerek performans kayıplarının kaynaklarını tanımlamaya yardımcı olmaktadır. Ek olarak, belirsizlik analizleri ölçüm güvenilirliğinin değerlendirilmesini mümkün kılarak deneysel sonuçların doğruluğunu artırmaktadır. Dolayısıyla, bu performans parametrelerinin ayrıntılı olarak hesaplanması ve yorumlanması, PVT sistemlerinin gerçek çalışma koşullarına uygun şekilde tasarlanması, verim kayıplarının minimize edilmesi ve ekonomik açıdan sürdürülebilir çözümler geliştirilmesi açısından vazgeçilmezdir.

3. Sonuç Ve Öneriler

Gelişen teknolojiler ile birlikte, Fotovoltaik Termal (PVT) sistemleri, güneş enerjisinin elektriksel ve termal enerjiye dönüşümünde önemli bir rol oynamaktadır. PVT sistemlerinin etkinliği, hem elektrik verimliliğini hem de termal enerjinin verimli kullanılmasını sağlamak için bir dizi tasarım ve optimizasyon yöntemiyle artırılmaktadır. Son yıllarda yapılan araştırmalar, PVT sistemlerinin hem çevresel sürdürülebilirliği artırmak hem de enerji maliyetlerini düşürmek için geniş bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

PVT sistemlerinde karşılaşılan en büyük zorluklardan biri, PV hücrelerinin çalışma sıcaklıklarının yükselmesidir; bu durum verimliliği düşürmektedir. Bu nedenle, aktif soğutma yöntemleri ve yerel tasarım iyileştirmeleri, PVT sistemlerinin performansını artırmada temel bir rol

oynamalıdır. Örneğin, su ve hava soğutma sistemleri ile gerçekleştirilen çalışmalar, bu sistemlerin verimliliklerini önemli ölçüde artırmıştır. Ayrıca, nanofluid kullanımı gibi alternatif soğutma yöntemlerinin PVT sistemlerinde uygulanması önerilmektedir.

PVT sistemlerinin ekonomik sürdürülebilirliğini artırmak için maliyet analizi ve enerji elde etme miktarlarının değerlendirilmesi kritik öneme sahiptir. Çeşitli çalışmalar, bu sistemlerin başlangıç maliyetlerine ve enerji geri kazanımına dayalı olarak ekonomik fayda sağladığını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, PVT sistemlerinin tasarımında yüksek verimliliği sağlamak için kullanılan bileşenlerin maliyetlerini düşürmeye yönelik yenilikçi çözümler araştırılmalıdır.

PVT sistemlerinin entegre edildiği yapılar için binaların ısıtma, soğutma ve enerji ihtiyacının karşılanmasında sunduğu sinerji oldukça dikkat çekicidir. Bununla birlikte, bu sistemlerin yaygın entegrasyonu için piyasa vasıtasıyla artırılacak farkındalık ve politikaların geliştirilmesi önemlidir.

Sonuç olarak, PVT sistemlerinin başarısı; derinlemesine araştırmalara, mühendislikte yenilikçi tasarımlara ve optimal enerji yönetim stratejilerine bağlıdır. Gelecekteki çalışmalarda, sistem bileşenlerinin ve tasarım parametrelerinin optimize edilmesi ile birlikte yenilikçi termal yönetim çözümlerinin entegrasyonu büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, güneş enerjisi kullanımını artırmak için daha fazla teşvik ve finansal destek sağlanması önerilmektedir.

Kaynaklar

- Abed, R. and ghaydh, n. (2024). Investigation of hybrid photovoltaic /thermal solar system performance under iraq's climate conditions. Kufa Journal of Engineering, 15(1), 1-18. <https://doi.org/10.30572/2018/kje/150101>
- Abolhosseini, S. and Heshmati, A. (2014). The main support mechanisms to finance renewable energy development. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 40, 876-885. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.013>
- Aghaei, M., Kumar, N., Eskandari, A., Ahmed, H., De Oliveira, A., & Chopra, S. (2020). Solar PV systems design and monitoring., 117-145. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819610-6.00005-3>
- Aktaş, A., Koşan, M., Aktekeli, B., Güven, Y., Arslan, E., Aktaş, M. (2024). PVT using a variable air volume control algorithm. Energy, 307, 132793.
- Aktaş, M., Şevik, S., Doğan, H., Öztürk, M. (2012). Drying of tomato in a photovoltaic and thermal solar-powered continuous dryer. Journal of Agricultural Sciences, 18, 287–298.
- Alaskaree, E. (2025). Integrated heat transfer management and policy-oriented design of photovoltaic systems in hot climates using pcm and hybrid pv/t strategies.. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7945461/v1>
- Alizadeh, T. (2025). Economic effects of renewable energy: impact on consumer welfare and industry. Journal of Economics, 2(2), 10-14. <https://doi.org/10.36719/3104-4727/3/10-14>
- Allahseh, D., Böttner, J., Al-Addous, M., & Lenz, V. (2025). Advancements in hybrid heating systems for residential applications. Energy Exploration & Exploitation, 43(5), 2221-2275. <https://doi.org/10.1177/01445987251336405>
- Almeida, A. and Moura, P. (2020). Off-grid appliances and smart controls for energy access. Energy Efficiency, 13(2), 193-195. <https://doi.org/10.1007/s12053-020-09848-6>
- Ayorinde, T. and Olasebikan, Y. (2020). Renewable energy source adoption., 1-11. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71057-0_33-1
- Bong, C., Hashim, H., Ho, W., Muis, Z., Yunus, N., Demoral, A., ... & Rosalia, S. (2022). Integration of variable renewable energy, electric vehicle, and smart microgrid in asean: a focus group discussion approach. Iop Conference Series Earth and Environmental Science, 997(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/997/1/012013>

- Chen, W. and Chong, W. (2020). Editorial for the special issue on sustainable energy and green technologies. *International Journal of Energy Research*, 44(12), 9244-9245. <https://doi.org/10.1002/er.5688>
- Chen, X., Chen, Y., Zhang, M., Jiang, S., Gou, H., Pang, Z., ... & Shen, B. (2021). Hospital-oriented quad-generation (hoqg)—a combined cooling, heating, power and gas (cchpg) system. *Applied Energy*, 300, 117382. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117382>
- Choi, H. and Choi, K. (2022). Performance evaluation of pvt air collector coupled with a triangular block in actual climate conditions in korea. *Energies*, 15(11), 4150. <https://doi.org/10.3390/en15114150>
- Das, L., Aslfattahi, N., Habib, K., Saidur, R., Irshad, K., Yahya, S., ... & Kadirgama, K. (2022). Improved thermophysical characteristics of a new class of ionic liquid + diethylene glycol/al₂o₃ + cuo based ionanofluid as a coolant media for hybrid pv/t system. *Thermal Science and Engineering Progress*, 36, 101518. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101518>
- Demir, Y. and Aktacir, M. (2024). Experimental investigation of bipv/t application in winter season under şanlıurfa's meteorological conditions. *Iet Renewable Power Generation*, 18(9-10), 1626-1645. <https://doi.org/10.1049/rpg2.13014>
- Durez, A., Ali, M., Waqas, A., Nazir, K., & Sudhakar, K. (2023). Modelling and optimization of phase change materials (pcm)-based passive cooling of solar pv panels in multi climate conditions. *Frontiers in Energy Research*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1121138>
- Eddine, T., Zidane, K., Aziz, A., Zahraoui, Y., Kotb, H., AboRas, K., , K., Jember, A., & Jember, Y. (2023). Grid-Connected Solar PV Power Plants Optimization: A Review. *IEEE Access*, 11, 79588-79608. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3299815>
- Electrical Academia. (2023). Photovoltaic (PV) cell types: Monocrystalline, polycrystalline, thin-film. Retrieved from <https://electricalacademia.com>
- Environmental Science and Pollution Research, 30(55), 116934-116951. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27641-7>
- Euro Teknik. (2024). Güneş enerjisi teknolojileri ve PV panel verimlilikleri. Retrieved from <https://euro-teknik.com>
- Fang, H., Zhang, N., Cai, G., Chen, H., Ma, J., Wu, D., Du, T., Wang, Y. (2024). Operation strategy optimization and heat transfer characteristic analysis of photovoltaic/thermal module series connected with flat plate solar collector: System experimental study. *Renewable Energy*, 229, 120770.
- Ferdous, Z. and Barman, S. (2025). A systematic review of sustainable renewable energy applications, procedures, challenges, and limitations.. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5740831/v1>

- Fiorentini, M., Cooper, P., & Ma, Z. (2015). Development and optimization of an innovative hvac system with integrated pvt and pcm thermal storage for a net-zero energy retrofitted house. *Energy and Buildings*, 94, 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.018>
- Gavli, S., Patil, V., Jong, A., Patil, S., Thorat, P., & Gosavi, D (2025). Solar Power Inverter. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*. <https://doi.org/10.48175/ijarsct-24805>
- GüneşDükkan. (t.y.). *Güneş paneli nedir, ne işe yarar?* Güneş Dükkan. Erişim adresi: <https://www.gunesdukkan.com/blog/gunes-paneli-nedir-ne-ise-yara>, Erişim tarihi: 21 Aralık 2025.
- Haripuddin, H., Imran, A., Sari, D., Zulhajji, Z., & Yantahin, M. (2025). Mentoring program on solar power plant design for pkbm ingin maju community in bantaeng. *Gandrung Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 6(1), 2206-2212. <https://doi.org/10.36526/gandrung.v6i1.4580>
- Hariri, M., Desa, M., Masri, S., & Zainuri, M. (2020). Grid-Connected PV Generation System—Components and Challenges: A Review. *Energies*, 13, 4279. <https://doi.org/10.3390/en13174279>
- Harmailil, I., Sultan, S., Tso, C., Fudholi, A., Mohammad, M., & Ibrahim, A. (2024). The state of the art of photovoltaic module cooling techniques and performance assessment methods. *Symmetry*, 16(4), 412. <https://doi.org/10.3390/sym16040412>
- Hasan, M., & Altinoluk, S. (2023). Current and future prospective for battery controllers of solar PV integrated battery energy storage systems., 11. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1139255>
- Holman, J.P. (1966). Experimental methods for engineers. New York, McGraw-Hill, USA.
- Husain, A., Al-Rawahi, N., Al-Azri, N., Al-Naabi, M., & El-Tahir, M. (2023). Performance characterization of a novel pv/t panel with nanofluids under the climatic conditions of muscat, oman. *International Journal of Renewable Energy Development*, 12(5), 959-967. <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.53287>
- Jabar, M., Srivastava, R., Manaf, N., Thangalazhy-Gopakumar, S., Latif, F., Luu, M., ... & Abbas, A. (2023). The solar end game: bibliometric analysis, research and development evolution, and patent activity of hybrid photovoltaic/thermal—phase change material.
- Jacob, J., Paul, J., Selvaraj, J., & Kadirgama, K. (2023). Economic analysis of phase change material integrated photovoltaic thermal systems: a short communication. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 1261(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1261/1/012010>

- Karaca, G., Dolgun, E. C., Koşan, M., Aktaş, M. (2019). Photovoltaic-Thermal solar energy system design for dairy industry. *Journal of Energy Systems*, 3(2), 86–95.
- Khan, M., Liu, H., Yang, Z., & Yuan, X. (2020). A Comprehensive Review on Grid Connected Photovoltaic Inverters, Their Modulation Techniques, and Control Strategies. *Energies*, 13, 4185. <https://doi.org/10.3390/en13164185>
- Lebedeva, K., Borodinecs, A., & Odiņeca, T. (2023). The potential of multiapartment rooftop pv systems as citizen' energy communities in latvia. *Frontiers in Energy Research*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1297297>
- Maleczek, S., Drabczyk, K., Bogdanowicz, K., & Iwan, A. (2020). Engineering Concept of Energy Storage Systems Based on New Type of Silicon Photovoltaic Module and Lithium Ion Batteries. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en13143701>
- Nijmeh, S., Yaseen, A., Ashhab, M., & Juaidy, M. (2022). Numerical investigation of a solar pv/t air collector under the climatic conditions of zarqa, jordan. *International Journal of Renewable Energy Development*, 11(4), 963-972. <https://doi.org/10.14710/ijred.2022.45306>
- Obatola, S. (2024). Reliability Overview of Grid-Connected Solar PV System: A Review. *Archives of Advanced Engineering Science*. <https://doi.org/10.47852/bonviewaaes42023083>
- Renewables4Today. (2024). Comparison of monocrystalline, polycrystalline and thin-film solar panels. Retrieved from <https://renewables4today.com>
- Rezvani, Z., Morteza pour, H., Ameri, M., Akhavan, H., & Arslan, S. (2022). Energy and exergy analysis of a water bed-infrared dryer coupled with a photovoltaic-thermal collector. *Journal of Food Process Engineering*, 45(8). <https://doi.org/10.1111/jfpe.14058>
- Sark, W. (2012). Design and components of photovoltaic systems., 1, 679-695. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-087872-0.00136-0>
- Sornek, K. (2025). Power-to-heat and seasonal thermal energy storage: pathways toward a low-carbon future for district heating. *Energies*, 18(21), 5577. <https://doi.org/10.3390/en18215577>
- Soares, L., De Souza, A., Silva, W., Pugliese, L., & Alves, G. (2023). Grid-Connected Photovoltaic Systems with Energy Storage for Ancillary Services. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en16217379>
- SolarTiger. (2023). Types of solar panels. Retrieved from <https://solartiger.in>

- Stepanenko, S., Koskin, A., Кукушкин, P., & Yeletsky, P. (2023). State-of-art of liquid hydrogen carriers: trends in the selection of organic molecules. *Current Organic Chemistry*, 27(19), 1677-1682. <https://doi.org/10.2174/0113852728252151231013054148>
- Tongwei Solar. (2024). High-efficiency monocrystalline module technologies. Retrieved from <https://en.tongwei.cn>
- Turchetti, L. (2025). Preface: solarpaces 2024, 30th international conference on concentrating solar power, thermal, and chemical energy systems. *SolarPACES Conf Proc*, 3. <https://doi.org/10.52825/solarpaces.v3i.2884>
- Udo, W., Toromade, A., & Chiekezie, N. (2024). Data-driven decision-making model for renewable energy. *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*, 6(8), 2684-2707. <https://doi.org/10.51594/ijmer.v6i8.1414>
- Wu, Y., Cui, J., & Liu, C. (2024). State-of-the-art review on energy management systems, challenges and top trends of renewable energy based microgrids. *Eai Endorsed Transactions on Energy Web*, 10. <https://doi.org/10.4108/ew.4124>
- Хоменко, Л., Касьяненко, Т., Prykhodko, O., & Sukhostavets, S. (2024). Stakeholder conflict resolution mechanism in the process of acceleration of technological development and digitalization of energy markets and services. *ES&BP*, 1(1), 56-63. <https://doi.org/10.21272/esbp.2024.3-07>
- XPower Solar. (2023). Differences between photovoltaic module types. Retrieved from <https://www.xpowersolar.com>
- Yang, B., Zheng, R., Han, Y., Huang, J., Li, M., Shu, H., Su, S., & Guo, Z. (2024). Recent advances in fault diagnosis techniques for photovoltaic systems: A critical review. *Protection and Control of Modern Power Systems*. <https://doi.org/10.23919/pcmp.2023.000583>
- Zare, D., Minaei, S., Zadeh, M. M., Khoshtaghaza, M. H. (2006). Computer simulation of rough rice drying in a batch dryer. *Energy Conversion and Management*, 47(18–19), 3241–3254.



FOTOVOLTAİK VE FOTOVOLTAİK TERMAL SİSTEMLERDE YAPAY ZEKÂ UYGULAMALARI

“ ”

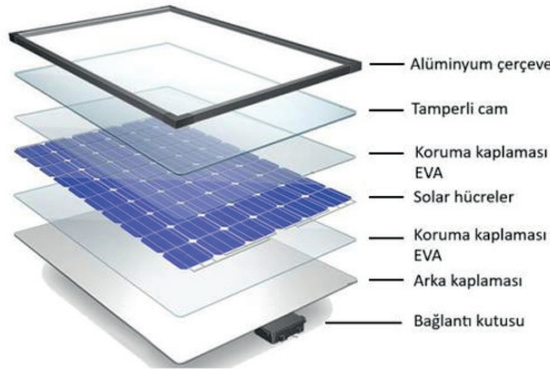
Meltem KOŞAN¹

¹ Doç. Dr. Meltem KOŞAN, Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, Elbistan Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 46300 Elbistan, KAHRAMANMARAŞ, meltem.kosan@istiklal.edu.tr, Orcid: 0000-0001-7311-9342

1. Giriş

Küresel enerji perspektifinde, iklim değişikliği etkilerini hafifletme, sınırlı fosil yakıt rezervlerine olan bağımlılığı azaltma ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına geçiş yönündeki acil bir ihtiyaçtan dolayı önemli bir dönüşüm geçirmektedir. Bu kritik geçişin merkezinde, yenilenebilir enerji kaynakları yer almaktadır ve bunlar arasında güneş enerjisi, dünyanın en bol, temiz ve yaygın enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Güneş enerjisi, Dünya'ya her saat, küresel yıllık enerji tüketiminin tamamını karşılamaya yetecek kadar enerji yaymaktadır. Bu muazzam potansiyel, güneş enerjisi teknolojilerini sürdürülebilir bir enerji geleceğinin temel direği haline getirmiştir.

Güneş enerjisinin bu potansiyelini elektriğe dönüştürmede en başarılı teknoloji, Fotovoltaik (PV) sistemlerdir. PV paneller, yarı iletken malzemelerin fotovoltaik etkisini kullanarak güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine (DC akım) dönüştürür. Şekil 1'de bir PV panelin katmanları gösterilmiştir. Son yıllarda, teknolojik ilerlemeler ve üretim ölçeklendirmesi sayesinde PV maliyetleri önemli ölçüde azalmış, bu da onları konutlardan büyük ölçekli santrallere kadar geniş bir uygulama yelpazesi için ekonomik olarak rekabetçi bir seçenek haline getirmiştir. PV kurulumlarındaki hızlı büyüme, dünya çapında elektrik şebekelerinin karbonsuzlaştırılmasında hayati bir rol oynamaktadır (Margoum vd., 2024).

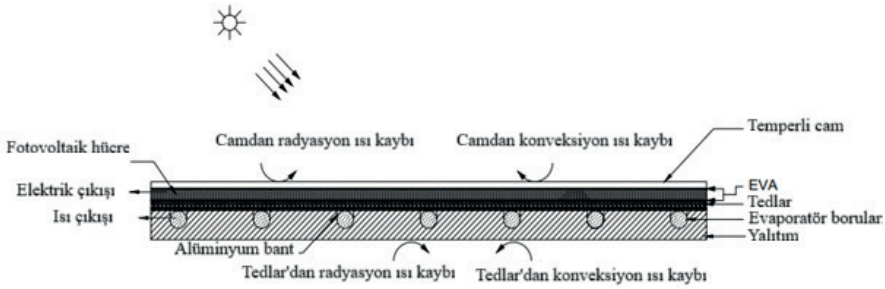


Şekil 1. Bir PV panelin katmanları (Margoum vd., 2024)

Güneş ışınlamını doğrudan elektriğe dönüştüren PV sistemlerde kayda değer ilerlemeler kaydedilmiş ve benimsenmiştir. PV panellere ulaşan güneş radyasyonunun yalnızca küçük bir kısmı elektriğe dönüştürülürken, büyük bir kısmı ısıya dönüşür. Bu biriken ısı, bu da hücre sıcaklığının artmasına ve ardından elektrik verimliliğinde bir düşüşe yol açmaktadır. PV hücrelerinin elektrik verimliliği, sıcaklıkları arttıkça doğrusal olarak azalır. Aşırı ısınma sadece elektrik üretimini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda panelin ömrünü ve güvenilirliğini de kısaltabilir. Uygulanabilirliğini, sistemin genel enerji yoğunluğunu ve ekonomik uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Geleneksel

PV sistemlerinin doğasında olan bu sınırlama, fotovoltaik termal (PVT) sistemlerin geliştirilmesini teşvik etmiştir (Jia vd. 2019).

PVT sistemleri, aynı güneş kolektöründen aynı anda hem elektrik hem de termal enerji üreterek bu zorluğun üstesinden gelir. PVT sistemleri, fazla ısıyı PV modüllerinden aktif olarak uzaklaştırarak, elektrik verimliliğini korumakla veya artırmakla kalmaz, aynı zamanda su ısıtma veya ortam ısıtma gibi çeşitli uygulamalar için değerli bir termal enerji kaynağı da sağlar. Bu ikili enerji çıkışı, sistemin genel enerji verimliliğini önemli ölçüde artırarak PVT'yi sürdürülebilir enerji çözümleri için gelecek vaat eden bir teknoloji haline getirir (Joshi ve Dhoble, 2018). Örnek bir sıvı akışkanlı PVT kolektörünün şematik gösterimi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. PVT kolektörün şematik gösterimi (Joshi ve Dhoble, 2018)

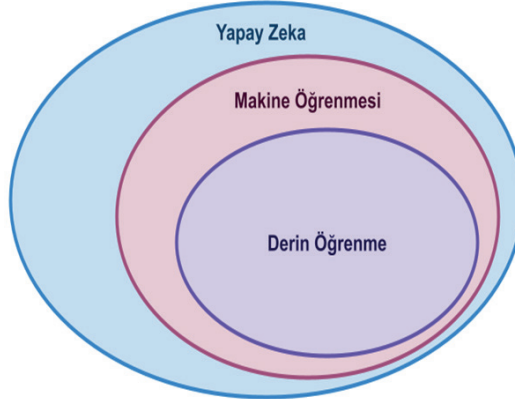
Pekçok avantajlarına rağmen, PVT sistemleri benzersiz operasyonel karmaşıklıklar sunar. Performansları, güneş ışınımı, ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı ve nem gibi çok sayıda dinamik çevresel değişkene büyük ölçüde bağlıdır. Dahası, elektriksel ve termal bileşenler arasındaki karmaşık etkileşim, optimum enerji verimine ulaşma gerekliliğiyle birleşince, geleneksel kontrol ve optimizasyon yöntemleri genellikle yetersiz kalmaktadır. Bu geleneksel yaklaşımlar, PVT sistemlerinin doğasında bulunan gerçek zamanlı dalgalanmalara ve doğrusal olmayan davranışlara uyum sağlamakta sıklıkla zorlanmakta ve bu da optimum olmayan performansa ve düşük güvenilirliğe yol açmaktadır (Mostakim ve Hasanuzzaman, 2022).

Bu bağlamda, yapay zekâ (YZ) tekniklerinin entegrasyonu, bu zorlukların üstesinden gelmek için dönüştürücü bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. YZ'nin karmaşık verilerden öğrenme, karmaşık örüntüleri belirleme ve bilinçli kararlar alma yeteneği, PV ve PVT sistemlerinin tasarımını, işletimini ve bakımını değiştirmek için fırsatlar sunmaktadır. Bu çalışma, YZ uygulamalarının YZ sistemlerindeki artan önemini vurgulamakta ve literatürdeki PV ve PVT sistemleri ile ilgili mevcut çalışmaların bir incelemesini sunmaktadır. Makine öğrenimi algoritmaları (yapay sinir ağları, destek vektör makineleri ve karar ağaçları gibi), derin öğrenme algoritmaları ve modelleri, bulanık mantık, genetik algoritmalar ve hibrit YZ yaklaşımları

dahil olmak üzere çeşitli YZ metodolojilerinin YZ sistemlerinin farklı yönlerine nasıl uygulandığını incelenmiştir. Bu uygulamalar, güneş radyasyonu tahmini, PV hücre ve kollektör sıcaklıklarının modellenmesi, su veya hava akış hızlarının optimize edilmesi, sistem bileşenlerinde arıza tespiti, kısmi veya sistemik kusur tespiti ve nihayetinde genel enerji üretiminin en üst düzeye çıkarılması gibi kritik alanları kapsamaktadır. YZ yöntemleri incelenerek çeşitli YZ uygulamaları ele alınacak, PV ve PVT sistemlerinin performansını, güvenilirliğini ve uzun ömürlülüğünü artırmadaki etkinlikleri vurgulanacak ve bu hayati alandaki gelecekteki araştırmalar için potansiyel yönler belirlenecektir.

2. Yapay Zekâdan Derin Öğrenmeye Genel Bir Bakış

Yapay zekâ, makinelerin algılama, akıl yürütme, öğrenme ve karar verme gibi insana özgü bilişsel yetenekleri taklit etmesini sağlamayı amaçlayan geniş bir bilgisayar bilimi disiplini. Kapsamı, otonom sistemler oluşturmaktan karmaşık sorunları çözmeye kadar uzanır. Bu hedefe ulaşmanın en önemli yaklaşımlarından biri olan Makine Öğrenimi, YZ'nin bir alt alanıdır. Makine öğreniminin amacı, sistemlerin büyük veri kümelerini analiz ederek istatistiksel modeller oluşturmaları ve bu modeller aracılığıyla belirli görevler için genelleme yapmasıdır. Özetle, açıkça programlanmadan verilerden öğrenerek kendi performansını artırır. Bu alanın en güçlü alt dallarından biri olan Derin Öğrenme, bu öğrenme sürecini çok katmanlı yapay sinir ağları (derin mimariler) aracılığıyla gerçekleştirir. Amacı, özellikle görüntü ve metin gibi yapılandırılmamış verilerde, insan müdahalesine minimum ihtiyaç duyularak hiyerarşik bir yapıda karmaşık ve soyut kalıpları otomatik olarak öğrenmektir. Yukarıda aşamalar halinde açıklanan hiyerarşik kapsam Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Yapay zekâ, makine öğrenmesi ve derin öğrenmenin kapsamı (Mellit ve Soteris 2021)

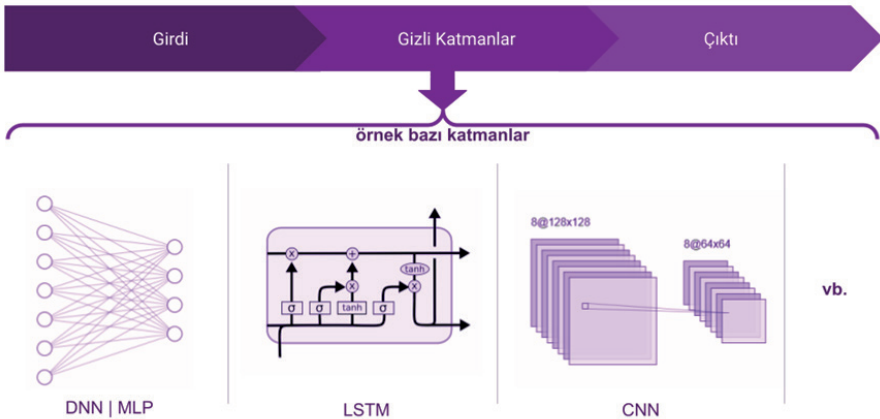
Makine öğrenimi, Şekil 4'te gösterildiği gibi beş ana yaklaşımla verilerden anlam çıkarır. Denetimli (gözetimli) öğrenme, tamamen etiketlenmiş verilerle tahmin yapmayı öğrenirken, denetimsiz (gözetimsiz) öğrenme etiketlenmemiş

verilerdeki gizli kalıpları ve grupları kendi başına keşfeder. Denetimli öğrenme, algoritmanın girdi ve doğru çıktı etiketleri ile eşleştirilmiş, tamamen etiketlenmiş verilerden öğrenmesini içerir; amacı tahmin veya sınıflandırma yapmaktır. Bu yaklaşım, geçmiş verilerdeki doğrudan ilişkileri öğrenir. Tam tersi olan denetimsiz öğrenme, etiketlenmemiş verilerdeki gizli kalıpları, doğal grupları ve içsel yapıları (örneğin kümeleme veya boyut indirgeme) kendi başına keşfetmeyi hedefler. Bu iki yaklaşım arasında, az miktarda etiketlenmiş ve çok miktarda etiketlenmemiş veriyi birleştiren yarı denetimli (yarı gözetimli) öğrenme bulunur. Yarı denetimli öğrenme az miktarda etiketli veri ile çok miktarda etiketsiz verinin gücünü birleştirerek, etiketleme maliyetini düşürürken model performansını artırmaya çalışır. Denetimsiz öğrenmenin zekice bir alt türü olan kendi kendine denetimli (öz-gözetimli) öğrenme, etiketlenmemiş verilerden kendi başına görevler ve cevaplar oluşturarak verilerin iç yapısını öğrenir. Bu yöntem, büyük veri kümelerinden genel temsil yeteneklerini öğrenmek ve daha sonra diğer görevlere aktarmak için çok etkilidir. Bu veri odaklı yöntemlerden tamamen farklı bir kulvarda ise pekiştirmeli (takviyeli) öğrenme yer alır; bu yaklaşımda, bir ajan, tıpkı ödül ve cezalarla eğitilmiş bir canlı gibi, bir ortamda deneme yanılma yoluyla bir hedefe yönelik en doğru eylemleri gerçekleştirmeyi öğrenir. Bu yaklaşım, robotik, strateji oyunları ve otonom kontrol sistemleri gibi karar verme gerektiren dinamik ortamlarda kullanılır (Mellit ve Soteris, 2021).



Şekil 4. Makine öğrenmesinin alt alanları (Mellit ve Soteris, 2021)

Derin öğrenme mimarisi, Şekil 5'te gösterildiği gibi verilerin baştan sona hareket ettiği çok katmanlı bir yapıdır. Her şey, modelin işleyeceği ham verilerin sisteme sunulduğu giriş katmanı ile başlar. Bu veriler daha sonra, ağın beyni olarak kabul edilen ve öğrenme sürecinin çoğunun gerçekleştiği bir veya daha fazla gizli katmana aktarılır. Bu gizli katmanlar, farklı görevler için uzmanlaşmış çeşitli mimariler oluşturur; örneğin, standart bir Derin Sinir Ağı (DNN) genellikle temel özellik çıkarımı için yığılmış yoğun katmanlar kullanır. Görüntü verileri için, nesne tespiti için YOLO gibi modellerin temelini oluşturan Evrimsel Sinir Ağı (CNN) katmanları, görsel hiyerarşiyi öğrenmede uzmanlaşmıştır. Metin veya zaman serileri gibi sıralı verilerle çalışırken, bağlamı ve uzun vadeli bağımlılıkları hatırlama yetenekleriyle bilinen LSTM gibi Tekrarlayan Sinir Ağı (RNN) katmanları devreye girer. Bu çeşitli gizli katmanlarda işlenen ve anlam kazanan bilgiler, sonunda ağın nihai kararını veren çıkış katmanına ulaşır ve burada kategori etiketi, sayısal değer veya konum kutusu gibi somut bir sonuca dönüştürülür. Bu katmanlar arasında bilgi akışı, her katmandaki nöronların bir aktivasyon fonksiyonu (örneğin ReLU) aracılığıyla lineer olmayan dönüşümler uygulamasıyla gerçekleşir. Gizli katmanlar, her seferinde daha karmaşık ve soyut özellikleri (görüntüde kenarlardan şekillere, oradan da nesnelere geçiş gibi) otomatik olarak hiyerarşik bir şekilde öğrenir. Son yıllarda büyük dil modellerinde devrim yaratan Transformer mimarisi, bu mimariye dikkat mekanizmasını ekleyerek, sıralı verilerin tamamını aynı anda işleme ve hangi girdi parçalarına odaklanılacağını dinamik olarak belirleme yeteneği kazandırmıştır. Bu derin ve karmaşık yapılar, ağın geri yayılım algoritmasıyla ağırlıklarını ayarlayarak öğrenmesini sağlar (*El-Banby vd., 2023*).



Şekil 5. Derin öğrenme mimarisi ve bazı gizli katmanlar (*El-Banby vd., 2023*)

3. PV ve PVT Sistemlerinde Yapay Zekâ Yöntemlerinin Analizi

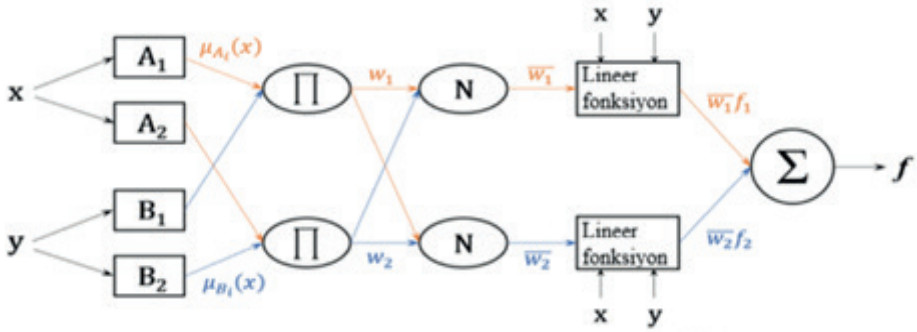
PV ve PVT sistemlerine olan artan ilgi ve bu sistemlerin optimum çalışmasında karşılaşılan zorluklar, özellikle yapay zekâyı içeren gelişmiş kontrol ve optimizasyon tekniklerini araştıran önemli çalışmalara yol açmaktadır. PV ve PVT sistemlerinde yapay zekanın anlaşılmasına ve uygulanmasına katkıda bulunan önemli çalışmalara genel bir bakış sunulmuştur. Literatür taraması, kullanılan yapay zekâ metodolojilerine ve ele alınan PVT sistemlerinin belirli yönlerine göre kategorize edilmiştir.

PV hücrelerinde sürdürülebilir enerji yönetimi için derin takviyeli öğrenme tabanlı bir çözüm Alamro vd. (2023) tarafından önerilmiştir. PV piller artan enerji talebini karşılamak için pratik bir çözüm sunsa da, daha uygun maliyetli ve daha yaygın uygulanabilir hale getirilmesi önemli bir zorluk olmaya devam etmektedir. Bu sorunları ele almak için bu çalışmada, derin takviyeli öğrenme ve derin Q-ağı tekniğini entegre eden sürdürülebilir enerji yönetimi mimarisi (SEMA) adlı yeni bir yaklaşım sunulmaktadır. Araştırmanın temel yeniliği, karar alma süreçlerini optimize etmek ve verimliliği artırmak amacıyla derin Q-ağı'nın yakınsal politika optimizasyonu yöntemleriyle birleştirilmesidir. Sürdürülebilir enerji yönetimi mimarisinin birincil hedefi, pillerin maliyet etkinliğini önemli ölçüde artırmak ve daha geniş çapta benimsenmesini teşvik etmektir (Alamro vd. 2023). Salazar-Pena vd. (2025) değişken hava koşulları nedeniyle yüksek enerji kaybı ve arıza yaşanan PV sistemlerde güvenilir performans değerlendirmesi ve dinamik arıza tespiti yapmayı amaçlamıştır. Çalışmada, meteorolojik, operasyonel ve teknik verileri analiz eden dinamik bir kayıp niceleme algoritması ve yerleşik bir arıza tespit mekanizması içeren yeni bir hesaplama modeli sunulmuştur. YZ yöntemi olarak, beklenen elektrik üretimini tahmin etmek ve kayıp/arıza durumlarını dikkate alarak verileri indirgemek için PyTorch kütüphanesi kullanılarak tasarlanmış bir yapay sinir ağı kullanılmıştır. Modelde, dinamik ve arızasız çalışma eşiklerini tanımlamak ve yanlış alarmları azaltmak için yeni bir metodoloji önerilmiştir. Hesaplama modeli, günlük enerji tahmininde %0,4'lük Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) ile ticari araçlara (PVWatts ve PVsyst) kıyasla daha yüksek doğruluk göstermiştir. Arıza tespit mekanizması, en iyi performansı gösteren alternatifi ile %93.8 doğruluk ve %98.8 geri çağırma oranlarına ulaşmıştır.

Noura vd. (2025) şebekeye bağlı PV sistemlerin arızalara karşı güvenilirliğini ve performansını artırmak amacıyla sağlam bir arıza tespiti ve teşhisi çerçevesi geliştirmeyi amaçlamıştır. Uygulanan yöntem, ikili arıza tespiti ve çok sınıflı arıza teşhisini içeren, ölçeklenebilir ve verimli bir iki aşamalı sistem olarak tasarlanmıştır. Temel YZ tekniği olarak, sınıf dengesizliğini gidermek için aşırı örnekleme ile desteklenen ağaç tabanlı sınıflandırıcılardan, özellikle de Extra Trees algoritması kullanılmıştır.

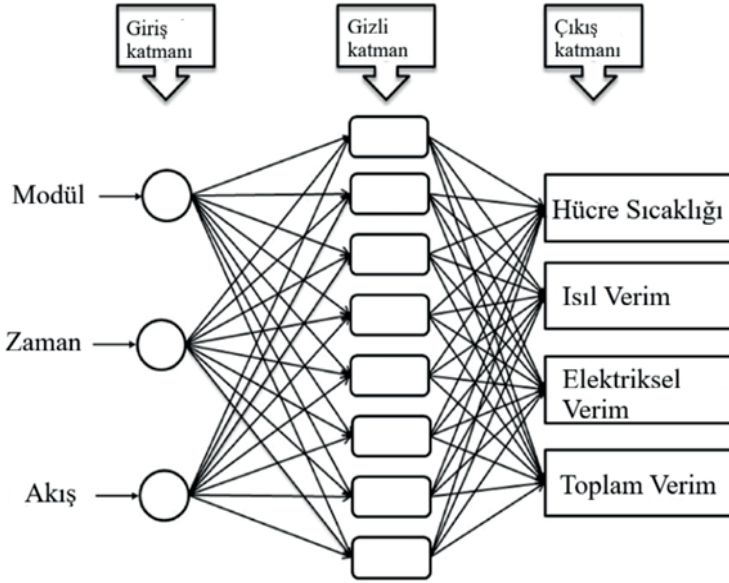
Ayrıca, modelin karar verme süreçlerine şeffaflık ve yorumlanabilirlik katmak için açıklanabilir YZ teknikleri entegre edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, model ikili arıza tespiti aşamasında %99,5 ve çok sınıflı arıza teşhisi aşamasında %98,7 gibi yüksek doğruluk oranlarına ulaşmıştır. Bu çalışmada düşük hesaplama maliyeti sunan bu çerçeveye ile PV sistemlerinin gerçek dünya senaryoları için etkili ve şeffaf bir çözüm sağladığını ortaya koymuştur. Bu çalışmada Chang vd. (2021), akıllı şebekelerde genellikle düzensiz ve yönetilmesi zor olan güneş enerjisi üretimini tahmin etme zorluğunu ele almıştır. Araştırmanın temel amacı, milyonlarca eve ve büyük ölçekli güneş enerjisi santrallerine dağıtılmış üretimi yönetebilecek güvenilir bir tahmin modeli geliştirmektir. Bunu başarmak için araştırmacılar, regresyon teknikleri ve çoklu kısa vadeli fonksiyonlar kullanan geleneksel kodlayıcı tek derin öğrenme yöntemini tanıtmaktadır. Modelin performansı, yaklaşık bir yıl boyunca toplanan geçmiş hava durumu verileri ve güneş yoğunluğu ölçümleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, önerilen yaklaşımının geleneksel tahmin yöntemlerine kıyasla doğrulukta %27'lik bir iyileşme sağladığını göstermektedir. Sonuç olarak, çalışma bu sağlam algoritmanın, gelecekteki fotovoltaik santraller için işletme ve bakım maliyetlerini en aza indirirken şebeke istikrarını önemli ölçüde artırabileceği sonucuna varmaktadır.

Bu çalışmada Ba vd. (2023), tropikal bölgelerdeki değişken hava koşullarında PV sistemlerin güç optimizasyonu ve Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT) süreçlerini iyileştirmeyi amaçlanmıştır. Yapay sinir ağları ve Uyarlamalı Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) tabanlı denetleyicileri karşılaştırarak, düzensiz iklim şartlarında güneş panellerinden elde edilen enerjiyi maksimize edecek en etkili model belirlenmiştir. Senegal Dakar'daki bir mikro santralden alınan gerçek verilerle eğitilen modeller (Şekil 6), kurak ve yağışlı mevsim simülasyonları üzerinden kapsamlı bir şekilde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar her iki yöntemin de başarılı olduğunu gösterse de ANFIS denetleyicisinin, özellikle bulutlu ve değişken hava koşullarında daha düşük hata payıyla daha sağlam ve hassas bir performans sunduğu göstermiştir. Sonuç olarak çalışma, ANFIS'in karmaşık hava koşullarına uyum sağlama yeteneğinin daha yüksek olduğunu ortaya koyarken, yapay sinir ağlarının ise donanım uygulaması ve maliyet açısından daha basit bir alternatif olarak değerlendirilebileceğini vurgulamaktadır.



Şekil 6. Önerilen ANFIS modelin yapısı (Ba vd. 2023)

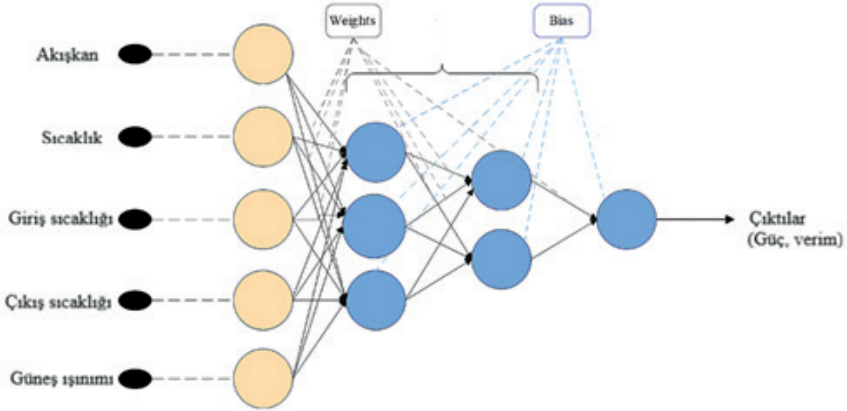
Senthilraja vd. (2025), hibrit PVT güneş kolektörü tabanlı hidrojen üretim sisteminin verimliliğini, akışkan akış hızının ve faz değişim malzemesinin etkilerini araştırmak için bir test düzeneği kurmuş ve farklı çalışma koşulları altında test etmiştir. Çalışmada, termal verimliliği ve hidrojen üretim hızını tahmin etmek için bir yapay sinir ağı modeli geliştirilmiştir. Mayıs ayında üç gün boyunca toplanan deneysel veri setinin %70'i eğitim, %15'i doğrulama ve %15'i test için kullanılmıştır. Yapay sinir ağı modeli olarak Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP) mimarisi tercih edilmiş, Şekil 7'de bu ağın yapısı verilmiştir. Modelin performansını değerlendirmek için Belirleme Katsayısı (R^2), Ortalama Kare Hata (MSE) ve Sapma Marjı (MoD) metrikleri kullanılmıştır. Geliştirilen yapay sinir ağı modelinin, %99,972'lik bir R değeri ve $1,97E-01$ 'lik bir MSE ile sistem performansını yüksek doğrulukla tahmin edebildiği gösterilmiştir. Kazem vd. (2024), tepe dönemlerinde soğutma kapasitesinin daha da azalması sorununa odaklanarak, bir PVT sisteminin akım, gerilim, güç ve verimliliği üzerindeki sıcaklık etkisini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, Umman ve Körfez bölgesi hava koşulları altında PVT sistemlerinin performansını tahmin etmek ve analiz etmek için bir yapay sinir ağı modeli uygulanmıştır. PVT sisteminin çıkış gücünü simüle etmek ve tahmin etmek için MLP, İkinci Dereceden Volterra Modeli (SOVM) ve Destek Vektör Makinesi (SVM) gibi sinir ağı modelleri oluşturulmuştur. Modellerin performansını karşılaştırmak için Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (MAPE), Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE) ve R^2 metrikleri kullanılmıştır. MLP modelinin, sırasıyla %99,67 R^2 , 0,0631 ve 0,2512 MAPE ve RMSE değerleriyle üstün performans sergilediği tespit edilmiştir.



Şekil 7. Geliştirilen MLP ağının yapısı (Senthilraja vd. 2025)

Alhamayani (2024), Riyad'ın sıcak iklim koşullarında yüksek sıcaklıklar nedeniyle geleneksel PV sistemlerinin elektrik üretimindeki azalma sorununu, PVT sistemlerinde nanofluidler kullanarak ve bu sistemlerin optimizasyonu için derin öğrenme modelleri geliştirerek araştırmıştır. Çalışmada, PVT sistem performansı, 1 Mayıs - 30 Eylül 2020 tarihleri arasında Riyad için saatlik tarihsel hava verileri kullanılarak simüle edilmiştir. Veri ön işleme aşamasında, yüksek oranda bağımlı özellikler çıkarılmış ve veri seti %80 eğitim, %10 doğrulama ve %10 test için bölünmüştür. PVT panel sıcaklığını tahmin etmek için evrimsel sinir ağları ve iki katmanlı uzun kısa süreli bellek (CNN-LSTM) entegre eden bir derin öğrenme algoritması kullanılmıştır. Modelin değerlendirilmesinde Ortalama Mutlak Hata (MAE) ve R^2 metrikleri kullanılmıştır. Geliştirilen CNN-LSTM modelinin sırasıyla 0,1865 MAE ve %98,75 R^2 değerleriyle yüksek bir tahmin doğruluğu sergilediği belirtilmiştir. Pour vd. (2025), bir seranın içinde ve dışında nanofluid bazlı fotovoltaik-termal sistemin enerji parametrelerini (çıkış gücü, elektriksel verimlilik, termal verimlilik ve toplam verimlilik) tahmin etmek için çeşitli makine öğrenmesi modelleri kullandı. Bu modeller için giriş ve çıkış parametrelerine dayalı sinir ağlarının genel şematik gösterimi Şekil 8'de verilmiştir. Çalışmada, akışkan türü, ortam sıcaklığı, akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları ve güneş radyasyonu seviyeleri dahil olmak üzere 205 girdi verisi kullanıldı ve bu veriler %70 eğitim, %15 doğrulama ve %15 test olarak bölündü. Modelleme, zaman gecikmeli sinir ağları, MLP ve dış girdili doğrusal olmayan otoregresif yöntemleri kullanılarak logaritmik aktivasyon fonksiyonu ile gerçekleştirildi. Modellerin performansını değerlendirmek için

R^2 ve RMSE metrikleri kullanıldı. Modelleme sonuçları, doğrusal olmayan otoregresif ağının ortalama R^2 değeri 0,9979 ve RMSE değeri 0,1062 ile en yüksek doğruluğa ulaştığını, MLP ağının ise en düşük doğruluğa sahip olduğunu göstermiştir. Safee vd. (2024), nanofluid soğutucular kullanıldığında verimliliği artırılmış PVT sistemlerinin performansını tahmin etmek için mevcut modellerin sınırlı olması sorununu ele almış ve su bazlı bir PVT sisteminin elektriksel ve termal verimliliklerini tahmin etmek için makine öğrenmesi modelleri geliştirmeyi amaçlamıştır. Ocak ve Temmuz 2019 tarihleri arasında Catania Üniversitesi'ndeki bir PVT sisteminden toplanan 15.540 örnekten oluşan bir veri seti kullanılmıştır; bu veri seti %80 eğitim ve %20 test olarak ikiye ayrılmıştır. Denetimli öğrenme yöntemlerinden MLP, Gradyan Artırma Regresörü (GBR) ve Hafif Gradyan Artırma Makinesi (LightGBM) algoritmaları seçilmiştir. Modelleri değerlendirmek için R^2 , RMSE ve MSE metrikleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, MLP algoritması elektrik enerjisi tahmini için 0,9906'lık R^2 değeriyle en iyi performansı gösterirken, LGB algoritması termal enerji tahmini için 0,988'lik R^2 değeriyle etkili bulunmuştur.



Şekil 8. Giriş ve çıkış parametrelerine dayalı sinir ağlarının şematik gösterimi (Pour vd. 2025)

Farahani vd. (2025), gözenekli ortam ve soğutma için hava jeti kullanarak bir PVT sisteminin elektriksel ve termal verimliliğini sayısal olarak iyileştirme sorununu ele aldı. Çalışmada kullanılan veri seti, ANSYS Fluent yazılımı ile gerçekleştirilen sayısal simülasyonlar sonucunda oluşturulmuştur. Veri setinin %85'i eğitim, %15'i ise test için kullanılmıştır. Ön işleme yöntemi olarak, veri setini genişletmenin yanı sıra, aşırı öğrenmeyi önlemek için Gauss Süreç Regresyonu (GPR) modeline 5 katlı çapraz doğrulama uygulanmıştır. Çalışmada, elektriksel verimliliği tahmin etmek için ANFIS ve GPR olmak üzere iki yapay zekâ yöntemi kullanılmıştır. Modellerin performansı RMSE ve R^2 metrikleri ile değerlendirilmiştir. Sayısal performans sonuçlarına göre, GPR modeli ANFIS modeline kıyasla daha yüksek doğruluk göstermiştir;

Genel veri setinde GPR için R^2 değeri 0,9795 iken, ANFIS için 0,9195 olarak bulunmuştur. Test verilerinde GPR 0,9554'lük bir R^2 değerine ulaşırken, ANFIS 0,9053 R^2 değerinde kalmıştır. Gharaee vd. (2024), geleneksel teorik denklemlerin düşük doğruluğundan yola çıkarak, su soğutmalı PVT kolektör sistemlerinin elektriksel verimliliğini güvenilir bir şekilde tahmin etmek için makine öğrenmesi modelleri geliştirme ve karşılaştırma sorununu incelemiştir. Çalışmanın veri seti, literatürdeki farklı deneysel çalışmalardan toplanan, tamamı su bazlı çalışma sıvısına sahip 380'den fazla örnekten oluşmaktadır. Bu veri seti %60 eğitim, %20 test ve %20 doğrulama olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. Ön işleme adımları, verilerin normalleştirilmesi ve temizlenmesi ile rastgele, kaba ve ince ızgara arama yöntemleriyle hiperparametrelerin optimizasyonunu içermiştir. YZ yöntemleri olarak MLP, Rastgele Orman (RF) ve Destek Vektör Regresyonu (SVR) modelleri kullanıldı. Değerlendirme ölçütleri olarak RMSE ve R^2 kullanıldı. Sayısal performans sonuçları, RF modelinin en iyi performansı sergilediğini gösterdi; RF modelinin eğitim R^2 değeri 0,9862 ve test R^2 değeri 0,9480 olarak ölçüldü. MLP modelinin test R^2 değeri 0,8775 ve SVR modelinin test R^2 değeri 0,7639 olarak kaydedildi.

Li vd. (2024), Al_2O_3 -su nanofluid ile doldurulmuş oluklu serpantin emici borulu bir PVT ünitesinin termal, elektriksel ve genel verimliliklerinin sayısal olarak değerlendirilmesi sorununu ele almış ve bu ünitenin genel verimliliğini tahmin etmek için doğru bir model geliştirmiştir. Çalışmada kullanılan veri seti, Ansys Fluent 18.1 yazılımı kullanılarak üç boyutlu sayısal analiz ile oluşturulmuştur. Ön işleme yöntemi olarak, sayısal sonuçların doğruluğunu sağlamak için en uygun ağ yapısını belirlemek amacıyla bir ağ bağımsızlık çalışması yapılmıştır. YZ yöntemi olarak, genel verimliliği tahmin eden bir fonksiyon geliştirmek için grup veri işleme yöntemi ile birleştirilmiş bir yapay sinir ağı modeli kullanılmıştır. Modelin performansı RMSE, korelasyon katsayısı (R) ve ortalama hata metrikleri ile değerlendirilmiştir. Sayısal performans sonuçlarına göre, geliştirilen model genel verimliliği tahmin etmede oldukça başarılı olmuştur; modelin R-kare (R^2) değeri 0,99602, RMSE değeri 0,0077 ve ortalama hata değeri 0,0063 olarak bulunmuştur, bu da modelin yüksek doğruluğunu göstermektedir. Gupta vd. (2024), sayısal ve deneysel bulgular yoluyla yarı saydam PVT kolektörlü karma modlu bir kurutucunun termal ve kurutma performansının değerlendirilmesi sorununu araştırmıştır. Çalışmanın veri seti, Hindistan'daki Silchar Ulusal Teknoloji Enstitüsü'nde kurulu bir prototip PVT güneş kurutucusundan toplanan deneysel verilerden oluşmaktadır; bu veriler, üç farklı hava giriş hızında (Durum 1: 0,048 m/s, Durum 2: 0,096 m/s ve Durum 3: 0,144 m/s) betel yapraklarının kurutulmasıyla elde edilmiştir. Ön işleme yöntemi olarak, sistemin 3 boyutlu geometrisinin oluşturulması, ağ yapısının kurulması ve optimum ağ sayısının (toplayıcı için 34912 ve kurutucu kabini için

62891) belirlenmesi için ağ bağımsızlık testi adımlarını içeren Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) analizi kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan YZ yöntemi, kurutma performansı parametrelerini (nem oranı, nem içeriği, kurutma hızı) tahmin etmek için farklı sayıda (3, 5, 7 ve 9) gizli katmana sahip ağ modelleriyle uygulanan yapay sinir ağıdır. Modelin performansı korelasyon katsayısı (R), MAE ve RMSE metrikleri ile değerlendirilmiştir. Sayısal performans sonuçlarına göre, CFD ile elde edilen simülasyon sonuçları ile deneysel bulgular arasındaki sapma %2,24 ile %4,90 arasında bulunmuştur. Yapay sinir ağı modellemesinde en iyi sonuçlar 3 gizli katmanlı ağ yapısı ile elde edilmiştir; nem oranı ve nem içeriği için R değeri 0,9991, kurutma hızı için ise 0,9902 olarak bulunmuştur.

4. Sonuç

İncelenen literatür çalışmalarında, PV ve PVT sistemlerinde karşılaşılan verimlilik kaybı, arıza tespiti ve enerji tahmini gibi temel zorlukların aşılmasında yapay zekâ yöntemlerinin geleneksel yöntemlere kıyasla belirgin bir üstünlük sağladığını ortaya koymaktadır. Özellikle çok katmanlı algılayıcı ve uyarlamalı nöro-bulanık çıkarım sistemi gibi modellerin, PVT sistemlerinin termal ve elektriksel verimliliklerini %99'u aşan doğruluk oranlarıyla tahmin edebildiği görülmektedir. Literatürde öne çıkan bulgular, yapay zekâ tabanlı denetleyicilerin sadece tahmin gücüyle sınırlı kalmadığını, aynı zamanda dinamik hava koşullarına uyum sağlayarak sistemlerin işletme ve bakım maliyetlerini minimize ettiğini göstermektedir.

Yöntemsel açıdan bakıldığında, yapay sinir ağları ve hibrit modellerin karmaşık ve lineer olmayan çevresel verileri işlemede son derece etkili olduğu anlaşılmaktadır. Nanofluid kullanımı ve faz değişim materyalleri gibi fiziksel iyileştirmelerin yapay zeka optimizasyonu ile birleştirilmesi hem hidrojen üretimi hem de kurutma sistemleri gibi entegre PVT uygulamalarında maksimum performans artışı sağlandığı görülmüştür. Ayrıca, derin öğrenme algoritmalarının arıza tespiti ve enerji yönetiminde sağladığı yüksek geri çağrı ve düşük hata payları, bu teknolojilerin ticari ölçekteki güneş santrallerinin güvenilirliğini artırmak için kritik bir araç haline geldiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, incelenen tüm araştırmalar, yapay zekâ entegrasyonunun PV teknolojilerin geleceğinde vazgeçilmez bir rol oynayacağına işaret etmektedir. Karmaşık veri setleri ve değişken iklim koşulları altında bile yüksek hassasiyet sunan bu modeller, akıllı şebekelerin kararlılığını desteklemekte ve güneş enerjisi yatırımlarının geri dönüş süresini kısaltmaktadır. Gelecekteki çalışmaların, bu modellerin donanım maliyetlerini daha da düşürmeye ve farklı coğrafi bölgelere kolayca ölçeklenebilir, açıklanabilir yapay zeka çerçevelerine odaklanacağı öngörülmektedir.

Kaynaklar

- Alamro, H., Alqahtani, H., Alotaibi, F. A., Othman, K. M., Assiri, M., Alneil, A. A., Prasad, L. V. N. (2023). Deep reinforcement learning based solution for sustainable energy management in photovoltaic systems. *Optik*, 295, 171530. doi:10.1016/j.ijleo.2023.171530
- Alhamayani, A. (2024). Numerical analysis and deep learning algorithm for photovoltaic-thermal systems using various nanofluids and volume fractions at Riyadh, Saudi Arabia. *Case Studies in Thermal Engineering*, 54, 103974. doi:10.1016/j.csite.2024.103974
- Ba, A., Ndiaye, A., Ndiaye, E. H. M., & Mbodji, S. (2023). Power optimization of a photovoltaic system with artificial intelligence algorithms over two seasons in tropical area. *MethodsX*, 10, 101959. doi:10.1016/j.mex.2022.101959
- Chang, R., Bai, L., & Hsu, C. H. (2021). Solar power generation prediction based on deep learning. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101354. doi:10.1016/j.seta.2021.101354
- El-Banby, G.M., Moawad, N.M. & Abouzalm, B.A. (2023). Photovoltaic system fault detection techniques: a review. *Neural Computation and Application*, 35, 24829–24842. doi:10.1007/s00521-023-09041-7
- Farahani, S.D., Zare, M.K. & Alizadeh, A. (2025). Enhancing PVT/air system performance with impinging jet and porous media: A computational approach with machine learning predictions. *Applied Energy*, 377, 124509. doi:10.1016/j.apenergy.2024.124509
- Gharaee, H., Erfanimatin, M. & Bahman, A.M. (2024). Machine learning development to predict the electrical efficiency of photovoltaic-thermal (PVT) collector systems. *Energy Conversion Management*, 315, 118808. doi:10.1016/j.enconman.2024.118808
- Gupta, A., Das, B., Arslan, E., Das, M., Kosan, K. & Can, O.F. (2024). Artificial neural networks based computational and experimental evaluation of thermal and drying performance of partially covered PVT solar dryer. *Process Safety Environment Protection*, 183, 1170-1185. doi:10.1016/j.psep.2024.01.068
- Jia, Y., Alva, G. & Fang, G., (2019). Development and applications of photovoltaic-thermal systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 249-265. doi:10.1016/j.rser.2018.12.030
- Joshi, S.S. & Dhoble, A.S. (2018). Photovoltaic -Thermal systems (PVT): Technology review and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 848-882. doi:10.1016/j.rser.2018.04.067
- Kazem, H.A., Chaichan, M.T., Abd, H.S., Al-Waeli, A.H.A., Mahdi, M.T., Fadhil, H.H., Mohd, I. & Khadom, A.A. (2024). Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal system performance: An experimental and artificial neural network approach., *Case Studies in Thermal Engineering*, 61, 104860. doi:10.1016/j.csite.2024.104860

- Li, L., Hassan, W.H., Mohammed, A.A., Montufar, P., AL-maamori, Z.M., Sultan, A.J., Salahshour, S. & Esmaeili, S. (2024). Prediction of heat transfer characteristics and energy efficiency of a PVT solar collector with corrugated-tube absorber using artificial neural network and group method data handling models. *International Communications Heat Mass Transfer*, 157, 107829. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107829
- Margoum, S., Hajji, B., Aneli, S., Tina, G. M., & Gagliano, A. (2024). Optimizing Nanofluid Hybrid Solar Collectors through Artificial Intelligence Models. *Energies*, 17(10), 2307. doi:10.3390/en17102307
- Mellit, A. & Soteris, K. (2021). Artificial intelligence and internet of things to improve efficacy of diagnosis and remote sensing of solar photovoltaic systems: Challenges, recommendations and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 110889. doi:10.1016/j.rser.2021.110889.
- Mostakim, K. & Hasanuzzaman, M. (2022). Global prospects, challenges and progress of photovoltaic thermal system. *Sustainable Energy Technology Assessment*, 53, 102426. doi:10.1016/j.seta.2022.102426
- Noura, H. N., Allal, Z., Salman, O., & Chahine, K. (2025). Explainable artificial intelligence of tree-based algorithms for fault detection and diagnosis in grid-connected photovoltaic systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 139(Part A), 109503. doi:10.1016/j.engappai.2024.109503
- Pour, S., Motevali, A., Samadi, S.H., Nedamani, R.N., Biparva, P. & Moghaddam, A. (2025). An artificial intelligence approach to predict energy parameters in a photovoltaic-thermal system within a greenhouse. *Solar Energy*, 295, 113544. doi:10.1016/j.solener.2025.113544
- Safae, M., Bekkay, H., Oussama, M., Mellit, A., Aneli, S., Arcidiacono, G., Tina, G.M. & Gagliano, A. (2024). Integrated machine learning models for predictive analysis of thermal and electrical power generation of a photo-thermal system at Catania, Italy. *Case Studies in Thermal Engineering*, 61, 105018. doi:10.1016/j.csite.2024.105018
- Salazar-Peña, N., Tabares, A. & González-Mancera, A. (2025). Performance assessment and dynamic fault detection in photovoltaic systems using artificial intelligence. *Energy*, 330, 136759. doi:10.1016/j.energy.2025.136759
- Senthilraja, S., Çolak, A.B., Gangadevi, R., Baskaran, M. & Awad, M.M. (2025). Experimental investigation and artificial neural network modeling of performance of photovoltaic – Thermal solar collector based hydrogen production system with phase change material. *International Journal of Hydrogen Energy*, 109, 540-550. doi:10.1016/j.ijhydene.2025.02.107



ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARI İÇİN BİYOMİMETİK SOĞUTMA ENTEGRELİ TOPLU PARAMETRE ELEKTRO-TERMAL MODEL GELİŞTİRİLMESİ

“ ”

Halil İbrahim VARİYENLİ¹

Mert ÖKTEN²

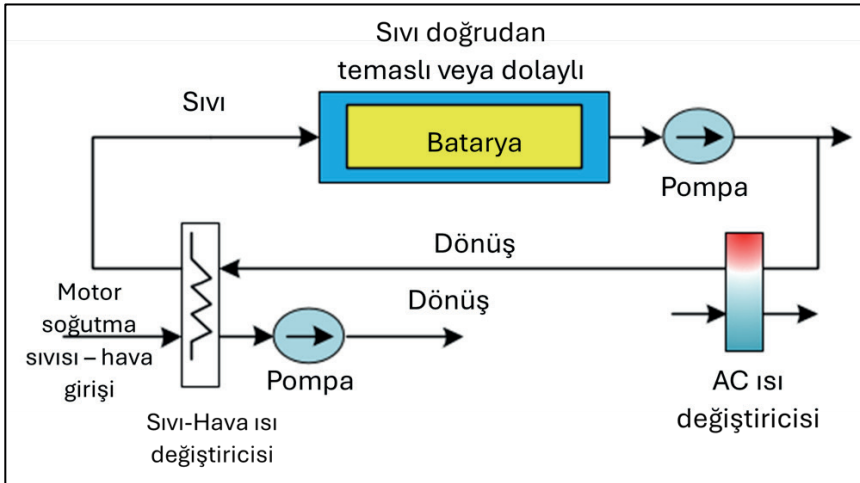
1 Prof. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ankara, 06560, Türkiye, halilv@gazi.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6313-1786

2 Arş. Gör. Dr. Mert ÖKTEN, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Manisa, 45400, Türkiye, dr.mertokten@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0077-4471

1. Giriş

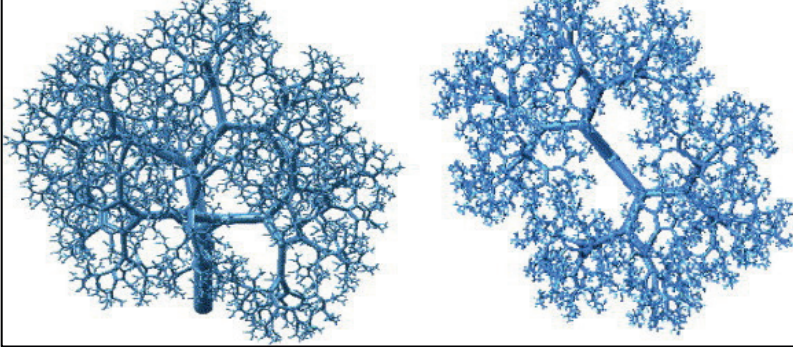
Küresel çapta otomotiv endüstrisinin elektrifikasyona geçişi, sera gazı emisyonlarını azaltma ve enerji verimliliğini artırma hedefleri doğrultusunda enerji depolama sistemlerinde, özellikle lityum-iyon bataryalarda (LİB) yüksek enerji yoğunluğu ve hızlı şarj kabiliyeti taleplerini artırmıştır (Fekri et al., 2025; Leonori et al., 2025). Ancak LİB teknolojisi, performans ve güvenlik açısından dar bir optimum çalışma sıcaklığı aralığına (15°C - 35°C) bağımlıdır (Debbarma et al., 2024; Williams et al., 2025). Bu sıcaklık aralığının aşılması, batarya hücresinde kapasite kaybına, iç direnç artışına ve en kritik senaryoda termal kaçak riskine yol açarak katastrofik sonuçlar doğurabilmektedir (Ouyang et al., 2020; Esmacel Nezhad et al., 2024). Özellikle agresif sürüş döngüleri ve ultra hızlı şarj senaryoları, batarya paketlerinde ani ısı yükleri oluşturarak mevcut termal yönetim sistemlerinin (BTM) sınırlarını zorlamaktadır (Bai et al., 2026).

Geleneksel BTM sistemleri, genellikle basit hava soğutma veya serpentin kanallı sıvı soğutma plakaları kullanmaktadır (Şekil 1) (Deng et al., 2018; Feng et al., 2018; Wu et al., 2019; Chaudhary et al., 2020; Zhao et al., 2020; Falcone et al., 2025). Ancak bu sistemler; soğutma yüzeyi boyunca homojen olmayan sıcaklık dağılımı, sınırlı ısı transfer yüzey alanı ve ani ısı piklerine karşı yavaş termal yanıt verme gibi dezavantajlara sahiptir (Dan et al., 2023; Hwang et al., 2024; Zare et al., 2024; Choudari et al. 2025; Kurkin et al., 2025).



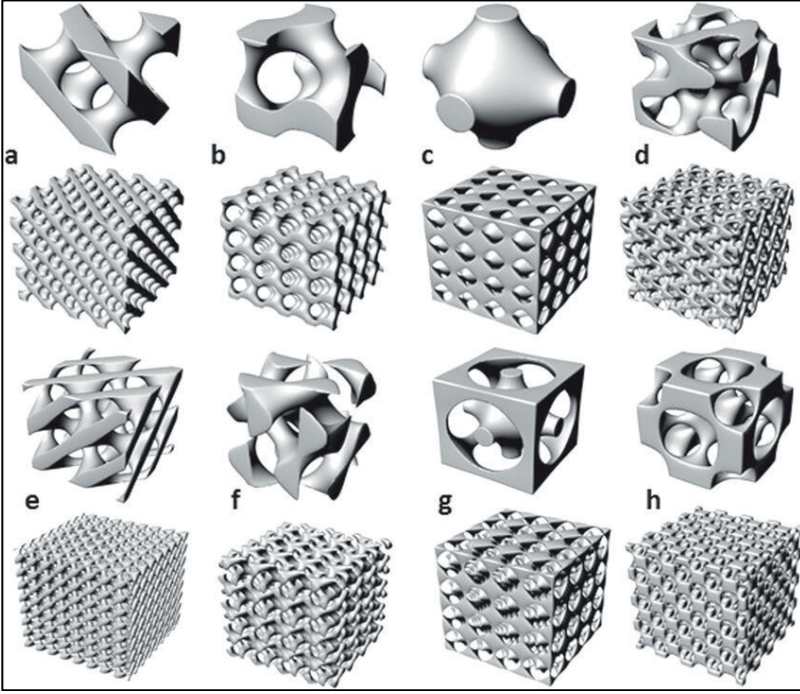
Şekil 1. Batarya termal yönetim sistemleri.

Doğadaki vasküler (damar) sistemler (ağaç yaprakları, akciğerler, Lichtenberg figürleri, vb.), minimum enerji harcayarak (düşük basınç düşüşü) akışkanı geniş bir alana verimli bir şekilde dağıtmak üzere evrimleşmiştir (Şekil 2) (Liu et al., 2007; Zhao et al., 2015; Yu et al., 2023). Fraktal dallanma yapılarının mikrokanal soğutucularda kullanılması, akış direncini azalttığı ve sıcaklık homojenliğini artırdığı gösterilmiştir (Chen & Cheng, 2005; Lu et al., 2023; Iticha & Str k, 2025).



Şekil 2. Fraktal yapılar.

Gyroid, Schwarz-P, Diamond gibi üç boyutlu periyodik minimal yüzeyler (TPMS), sıfır ortalama eğriliğe sahip matematiksel olarak tanımlanmış yüzeylerdir (Al-Ketan et al., 2018; Amara et al., 2025). Metal köpükler gibi rastgele gözenekli yapıların aksine, TPMS pürüzsüz ve sürekli bir yüzey ağı sunar (Şekil 3). Bu yapılar; konvektif ısı transferi için alanı maksimize eder, termal sınır tabakasını kırarak ısı transfer katsayısını (h) artırır (Liu et al., 2024). TPMS yapılı ısı değ ştiricilerin, geleneksel kanatçıklı (  n) tasarımlara göre çok daha yüksek ısı transfer performansı sergilediğini göstermektedir (Men et al., 2025).

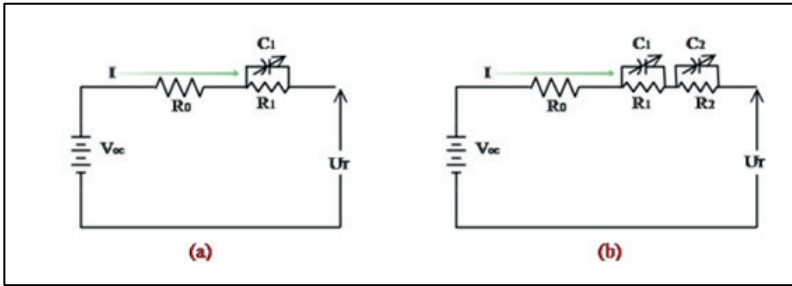


Şekil 3. Üç boyutlu minimal yüzeyler; (a) Diamond (D); (b) Gyroid (G); (c) Schwarz P (P); (d) Fischer-Koch S (S); (e) Double Diamond (DD); (f) Double Gyroid (DG); (g) Double Schwarz P (DP); (h) F-RD .

Faz değiştiren malzemeler (PCM), faz değişimi sırasında sabit bir sıcaklıkta büyük miktarda gizli ısı depolayabilir (Jilte et al., 2019; Kumar & Rao, 2020). Bu, bataryanın ürettiği ani ısı piklerini emmek için ideal bir tampondur. Ancak PCM'lerin düşük termal iletkenlik (k) ve faz değişimi sırasında sızıntı riski olmak üzere iki ana sorunu vardır (Jilte et al., 2019). Çözüm olarak, PCM'leri yapısal bir matris içinde hapsedmek önerilmiştir (Kumar & Rao, 2020). Hidrojeller, yüksek su içerikleri ve esnek polimer ağ yapıları sayesinde PCM'ler için mükemmel bir şekil-stabilize edici konak görevi görebilir (Khan et al., 2023). Ayrıca, hidrojin kendisi de yüksek özgül ısı kapasitesiyle termal yönetime katkıda bulunur. Yapılan araştırmalar, PCM'nin termal iletkenliğini artırmak için bu kompozite grafen veya metalik nanoyapıların eklendiği kompozit PCM (cPCM) çalışmalarına odaklanmaktadır (Kumar & Rao, 2020).

Bu kitap bölümü, bu ileri geometrik ve malzeme tabanlı çözümlerin termal avantajlarını, Toplu parametre (Lumped Parameter) yaklaşımı ve eşdeğer devre modeli (ECM) (Şekil 4) ile kuple ederek analiz etmeyi amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, tam hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) modellemesine kıyasla daha hızlı hesaplama süreleri sunar (Bernardi et al.,

1985; Ma et al., 2022) ve Dijital İkiz uygulamaları için temel oluşturur (Ma et al., 2022). Fraktal yapılar, Murray Yasası prensiplerini kullanarak akışkanın sistem geneline eşit dağılımını sağlarken, TPMS yapıları, karmaşık ve sürekli yüzey ağları sayesinde konvektif ısı transfer katsayısını artırmaktadır. Ayrıca, ani sıcaklık artışlarını sönmölemek amacıyla PCM ve hidrojel kompozitlerin pasif soğutucu olarak kullanımı, hibrit BTM sistemlerinin temelini oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında, önerilen biyomimetik hibrit soğutma sisteminin termal direnç üzerindeki teorik iyileştirmesi modellenmiş ve dinamik yükler altındaki batarya durum tahmini üzerindeki etkisi bir kod çözücü program ile sayısal olarak incelenmiştir.



Şekil 4. Eşdeğer devre modeli; (a) Birinci dereceden RC, (b) İkinci dereceden RC.

2. Metodoloji

Bataryanın dinamik voltaj davranışı, bir gerilim kaynağı (V_{OCV}), bir omik iç direnç (R_0) ve polarizasyon etkilerini temsil eden bir Direnç-Kapasitör (RC) paralel kolu ile modellenmiştir. Terminal voltajı (V_t) Eşitlik 1 ile ifade edilir (Nazari et al., 2018; Ejaz Malik et al., 2025; Pande et al., 2025).

$$V_t(t) = V_{OCV}(SoC) - V_1(t) - I(t) \cdot R_0(T) \quad (1)$$

Burada V_{OCV} açık devre voltajı, $I(t)$ yük akımı ve V_1 polarizasyon voltajıdır. Polarizasyon voltajının değişimi Eşitlik 2 de gösterilmiştir (Li et al., 2025; El Djallil Rabhi & Kerrouche, 2026).

$$\frac{dV_1}{dt} = -\frac{V_1}{R_1 C_1} + \frac{I}{C_1} \quad (2)$$

Bataryanın şarj durumu (SoC), Coulomb Sayma yöntemi ile hesaplanmaktadır (Eş. 3). Burada C_n bataryanın nominal kapasitesidir (Tran et al., 2021; Zhang & Zhang, 2021; Bressan et al., 2025).

$$SoC(t) = SoC_{init} - \frac{1}{C_n} \int_0^t I(t) dt \quad (3)$$

Batarya hücresi içindeki ısı üretimi (Q_{gen}), Bernardi modeli temel alınarak hesaplanmaktadır (Eş. 4) (Wang et al., 2023; Blyth & Hales, 2025; Hassan et al., 2026).

$$Q_{gen} = I^2 R_0(T) \quad (4)$$

Sistemin termal dengesi, enerji korunum yasasına dayalı Toplu Kapasitans modeli ile Eşitlik 5'teki gibi ifade edilir. Burada m hücre kütlesi, c_p özgül ısı kapasitesi ve Q_{cool} soğutma sistemi tarafından uzaklaştırılan ısıdır (Liu et al., 2025; Wang et al., 2026).

$$m \cdot c_p \cdot \frac{dT_{bat}}{dt} = Q_{gen} - Q_{cool} \quad (5)$$

Bu çalışmada karşılaştırılan iki soğutma senaryosu (Geleneksel vs. Biyomimetik), Newton'un Soğuma Yasası üzerinden termal direnç (R_{th}) parametresindeki değişim ile modele entegre edilmiştir (Eş. 6) (Bejan & Lorente, 2004; Wang et al., 2020).

$$Q_{cool} = \frac{T_{bat} - T_{amb}}{R_{th}} \quad (6)$$

Önerilen biyomimetik sistemin düşük termal direnci, aşağıda teorik altyapısı verilen iki ana bileşene dayanmaktadır:

- i. *Fraktal Akış Dağıtımı*: Akışkanın basınç kaybını minimize ederek yüzeye homojen dağılması Murray Yasası ile optimize edilen dallanma yapısına atfedilmiştir (Eş. 7). Burada D_p ana kanal ve D_i yavru kanalları ifade etmektedir (Murray, 1926).

$$D_p^3 = \sum_{i=1}^N D_i^3 \quad (7)$$

Sistemdeki akışkan, sıkıştırılamaz ve Newtonyen kabul edilir. Süreklilik denklemi (Eş. 8) ve Navier-Stokes denklemi (Momentum denklemi (Eş. 9) ile gösterilir (Bejan & Lorente, 2004).

$$\nabla \cdot (\rho_f u_f) = 0 \quad (8)$$

$$\rho_f \left(\frac{\partial u_f}{\partial t} + u_f \cdot \nabla u_f \right) = -\nabla P + \mu_f \nabla^2 u_f \quad (9)$$

Burada u_f hız vektörü, P basınç, ρ_f yoğunluk ve μ_f dinamik viskozitedir.

- ii. *TPMS Yüzey Yapısı*: Isı transfer yüzey alanı, Gyroid yapısının seviye-set denklemi ile tanımlanan geometrik avantajı sayesinde maksimize edilmiştir (Eş. 10).

$$\cos(k_x x) \sin(k_y y) + \cos(k_y y) \sin(k_z z) + \cos(k_z z) \sin(k_x x) = C \quad (10)$$

Burada $k_i (= 2\pi/L_i)$ dalga vektörleri, C ise gözenekliliği belirleyen seviye sabitidir. Bu geometrik yapı, konvektif ısı transfer katsayısını (h) artırarak sistemin eşdeğer termal direncini (R_{th}) düşürmektedir. Soğutucu akışkan içindeki ısı transferi Eşitlik 11’de, TPMS’in katı metal yapısı içindeki ısı iletimi ise Eşitlik 12’de gösterildiği gibi hesaplanır (Qureshi et al., 2021; Chen et al, 2024; Kilic, 2025).

$$\rho_f c_{p,f} \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + u_f \cdot \nabla T_f \right) = \nabla \cdot (k_f \nabla T_f) \quad (11)$$

$$\rho_s c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) \quad (12)$$

Faz değişimi sırasındaki gizli ısıyı (ΔH_m) modellemek için etkin ısı kapasitesi ($c_{p,eff}(T)$) sıcaklığa bağlı bir fonksiyon olarak tanımlanır (Eş. 13). $T_{m,start}$ faz değişiminin başladığı, $T_{m,end}$ ise bittiği sıcaklıklardır. ΔT_m bu faz değişim aralığıdır (Song, 2018; Khan et al., 2023; Maknikar & Pawar, 2023).

$$c_{p,eff}(T) = \begin{cases} c_{p,solid} & T < T_{m,start} \\ \frac{c_{p,solid} + c_{p,liquid}}{2} + \frac{\Delta H_m}{\Delta T_m} & T_{m,start} \leq T \leq T_{m,end} \\ c_{p,liquid} & T > T_{m,end} \end{cases} \quad (13)$$

Hidrojel (matris) ve PCM (dolgu) için kompozit etkin termal iletkenlik katsayısı (k_{eff}) Maxwell (Eş. 14) veya Bruggeman (Eş. 15) modelleri ile hesaplanabilir (Plett, 2004; Plett, 2015; Qi et al., 2025).

Maxwell modeli, homojen olmayan ve izotropik kompozitler için daha uygun bir yaklaşımdır (Plett, 2004; Plett, 2015). Genellikle çok küçük boyutlardaki dolgu parçacıkları ile büyük boyutlu matris malzemelerinin bir arada bulunduğu durumlar için tercih edilir. Bu model, dolgu malzemesinin çok küçük partiküllere sahip olduğu düşük hacimsel oranlarda geçerlidir.

$$k_{eff} = k_m \left[\frac{(k_f + 2k_m) + 2\phi_f(k_f - k_m)}{(k_f + 2k_m) + \phi_f(k_f - k_m)} \right] \quad (14)$$

Burada k_m matris malzemenin iletkenliği, k_f dolgu malzemenin iletkenliği ve ϕ_f dolgu fazının hacimsel oranıdır.

Bruggeman modeli, kompozitin her iki fazının birbirine benzer olduğu (homojen dağılım) veya fazlar arasında bir dengenin sağlandığı durumlarda kullanılır (Qi et al., 2025).

$$\phi_f \frac{k_m - k_{eff}}{k_m + 2k_{eff}} + \phi_m \frac{k_{eff} - k_f}{k_{eff} + 2k_f} = 0 \quad (15)$$

Burada ϕ_m matris malzemesinin hacimsel oranıdır. Ara yüz sınır koşulları ısı akısı, termal eşleşme ve taşınım olmak üzere üç kısımda incelenir.

- i. *Batarya $\leftrightarrow$ PCM/Hidrojel Arayüzü (Isı Akısı)*: Bataryadan gelen ısı akısı (q''_{bat}), PCM/Hidrojel malzemesine iletim ile girer (Eş. 16). Burada n yüzeyin normal vektörüdür.

$$q''_{bat} = -k_{eff}(\nabla T_{pcm} \cdot n) \quad (16)$$

- ii. *PCM/Hidrojel $\leftrightarrow$ TPMS Duvarı Arayüzü (Termal Eşleşme)*: İki katı yüzey arasında ısı sürekliliği kabul edilir (Eş. 17).

$$-k_{eff}(\nabla T_{pcm} \cdot n) = -k_s(\nabla T_s \cdot n) \quad (17)$$

- iii. *TPMS Duvarı $\leftrightarrow$ Akışkan Arayüzü (Taşınım)*: TPMS'in katı duvarından (T_s) soğutucu akışkana (T_f) olan ısı transferi, konveksiyon ile gerçekleşir (Eş. 18).

$$k_s(\nabla T_s \cdot n) = h(T_s - T_f) \quad (18)$$

Burada yerel ısı transfer katsayısıdır ($h = Nu \cdot k_f / D_h$), ve Nusselt sayısı (Nu) TPMS geometrisi için Reynolds (Re) ve Prandtl (Pr) sayılarına bağlı olarak Eşitlik 19 ile elde edilir (Bejan & Lorente, 2004).

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \quad (19)$$

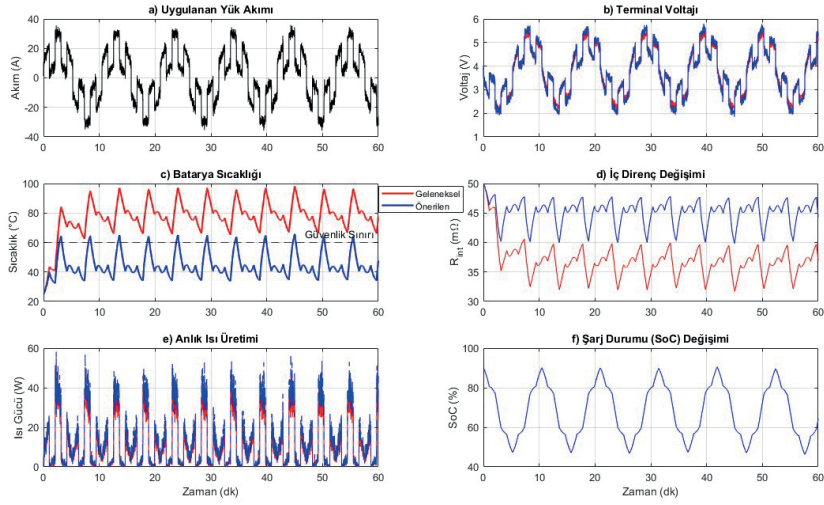
Bu çalışmada, önerilen hibrit sistemin (Fraktal + TPMS + PCM) karmaşık çoklu fizik davranışları, sistem seviyesindeki analiz için eşdeğer termal direnç (R_{th}) ve etkin ısı kapasitesi parametrelerine indirgenerek modellenmiştir. Eşitlik 13-17'de verilen detaylı fiziksel davranışların kümülatif etkisi, simülasyonda parametresindeki iyileşme ile temsil edilmiştir. Simülasyonda kullanılan batarya ve soğutma sistemi parametreleri Tablo 1'de sunulmuştur (Wang et al., 2020; Zhao et al., 2020; Bressan et al., 2025; Falcone et al., 2025; Pande et al., 2025; Williams et al., 2025; Wang et al., 2026).

Tablo 1. Simülasyon parametreleri

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Nominal Kapasite	C_n	3.0	Ah
Hücre Kütlesi	m	0.045	kg
Özgül Isı Kapasitesi	c_p	900	J/(kg·K)
Ortam Sıcaklığı	T_{amb}	25	°C
Başlangıç SoC	SoC_{init}	%90	-
Termal Direnç (Geleneksel)	$R_{th,std}$	5.0	K/W
Termal Direnç (Biyomimetik)	$R_{th,bio}$	1.5	K/W
İç Direnç (Referans)	$R_{0,ref}$	0.05	Ohm
Polarizasyon Direnci	R_1	0.02	Ohm
Polarizasyon Kapasitansı	C_1	2000	F

3. Bulgular ve Tartışma

Geliştirilen elektro-termal model, agresif sürüş koşullarını ve rejeneratif frenlemeyi temsil eden dinamik bir sentetik akım profili altında (Şekil 5a) koşturulmuştur. Simülasyon sonuçları, Geleneksel Soğutma ve Önerilen Biyomimetik Hibrit Soğutma senaryoları için karşılaştırmalı olarak Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. Sonuçların özeti.

Şekil 5c incelendiğinde, geleneksel soğutma yönteminde (kırmızı eğri) batarya sıcaklığının, yüksek akım çekilen periyotlarda hızla arttığı ve simülasyonun 20. dakikasından itibaren güvenli çalışma sınırı olan 60 °C'yi aştığı görülmektedir. Simülasyon sonunda sıcaklık 100 °C seviyelerine yaklaşarak termal kaçak riski oluşturmaktadır. Buna karşın, önerilen Biyomimetik/TPMS tabanlı sistem (mavi eğri), düşük termal direnci sayesinde oluşan Joule ısısını (Şekil 5e) etkin bir şekilde uzaklaştırmıştır. Önerilen sistemde batarya sıcaklığı, en zorlu piklerde dahi 60°C bandında sınırlanmış ve ortalama çalışma sıcaklığı optimum aralığa çok daha yakın seyretmiştir. İki sistem arasında yaklaşık 30-35 °C'lik belirgin bir sıcaklık farkı elde edilmiştir.

Sıcaklık kontrolünün elektriksel parametreler üzerindeki etkisi Şekil 5d'de (İç Direnç Değişimi) açıkça görülmektedir. Geleneksel sistemde aşırı ısınma nedeniyle iç direnç düşüşü daha sert olsa da, bu durum kontrolsüz bir ısınma döngüsüne işaret eder. Önerilen sistemde ise iç direnç daha stabil bir aralıkta salınım göstermektedir. Terminal voltajı (Şekil 5b) ve SoC değişimi (Şekil 5f) her iki senaryoda benzer trendler izlese de, termal kararlılığın batarya ömrü (State-of-Health) üzerindeki uzun vadeli pozitif etkisi literatürle uyumludur. Bu sonuçlar, Fraktal ve TPMS yapılarının sağladığı geometrik avantajların, sistem seviyesinde termal yükleri yönetmede kritik bir rol oynadığını doğrulamaktadır.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, elektrikli araç bataryalarının termal yönetimi için geliştirilen Fraktal akış dağıtım ve TPMS yüzeyli biyomimetik hibrit soğutma sisteminin etkinliği, Toplu Parametre (Lumped Parameter) tabanlı bir elektro-termal model ile analiz edilmiştir. Çalışmanın temel çıktıları şunlardır:

- I. Önerilen biyomimetik tasarım, geleneksel yöntemlere kıyasla eşdeğer termal direnci teorik olarak önemli ölçüde düşürmüştür. Simülasyon sonuçları, bu düşüşün dinamik yükler altında batarya maksimum sıcaklığında 30 °C'yi aşan bir azalma sağladığını göstermiştir.
- II. Geleneksel sistemin güvenlik sınırını (60 °C) hızla aştığı senaryoda, önerilen sistem sıcaklık artışını baskılayarak termal kaçak riskini minimize etmiştir.
- III. Kullanılan basitleştirilmiş Eşdeğer Devre ve Termal Model kuplajı, karmaşık geometrik tasarımların (TPMS/Fraktal) sistem üzerindeki etkisini, yüksek hesaplama maliyetli CFD analizlerine gerek duymadan hızlı ve etkili bir şekilde öngörebilmiştir.

Gelecek çalışmalarda, tasarlanan TPMS geometrisinin Eklemeli İmalat (SLM) yöntemiyle üretilmesi ve PCM faz değişim sürecinin entalpi tabanlı modellerle simülasyona dahil edilerek deneysel verilerle doğrulanması hedeflenmektedir.

Kaynaklar

- Al-Ketan, O., Ali, M., & Abu Al-Rub, R. K. (2018). Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic minimal surface structures. *Additive Manufacturing*, 19, 167–183. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.006>
- Amara, K., Saghir, M. Z., & Abdeljabar, R. (2025). Review of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) Structures for Cooling Heat Sinks. *Energies*, 18(18), 4920. <https://doi.org/10.3390/en18184920>
- Bai, H., Chen, Y., Zhou, Y., Zhao, L., & Chen, M. (2026). Application of multi-component organic-inorganic eutectic phase change materials in the thermal management of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 141(D), 119506. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.119506>
- Bejan, A., & Lorente, S. (2004). The constructal law and the thermodynamics of flow systems with configuration. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(14–15), 3203–3214. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.02.007>
- Bernardi, D., Pawlikowski, E., & Newman, J. (1985). A general energy balance for battery systems. *Journal of The Electrochemical Society*, 132(1), 5–12. <https://doi.org/10.1149/1.2113792>
- Blyth, M., & Hales, A. (2025). Thermal parameters fitted from electrical data enable lumped models of heterogeneous battery cells. *Journal of Energy Storage*, 140(A), 118856. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.118856>
- Bressan, M., Campagnoli, E., & Giaretto, V. (2025). Experimental evidence on the effect of temperature on the performance of a lithium-ion battery. *Batteries*, 11(12), 439. <https://doi.org/10.3390/batteries11120439>
- Chaudhary, D., Kumar, P., Varshney, P., Varshney, U., Yahya, S. M., & Rafat, Y. (2020). Critical review on battery thermal management and role of nanomaterial in heat transfer enhancement for electrical vehicle application. *Journal of Energy Storage*, 32, 102003. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102003>
- Chen, M., Shi, Y., Yang, L., Yan, C., Song, B., Liu, Y., Dou, Z., & Chen, Y. (2024). Thermal performances of Gyroid-fin heat sink for power chips. *Case Studies in Thermal Engineering*, 61, 105095. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105095>
- Chen, Y., & Cheng, P. (2005). An experimental investigation on the thermal efficiency of fractal tree-like microchannel nets. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32, 931–938. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.02.001>

- Choudari, S. (2025). Battery management systems for electric vehicles: A review of state-of-the-art technologies. *International Journal of Applied Mathematics*, 38, 694–708. <https://doi.org/10.12732/ijam.v38i6s.426>
- Dan, D., Zhao, Y., Wei, M., & Wang, X. (2023). Review of thermal management technology for electric vehicles. *Energies*, 16(12), 4693. <https://doi.org/10.3390/en16124693>
- Debbarma, A. (2024). Thermal management system of e-vehicle Li-ion battery modules: A comprehensive review. *Journal of Thermal Engineering*, 10(6), 1679–1697. <https://doi.org/10.14744/thermal.0000868>
- Deng, Y., Feng, C., Jiaqiang, E., Zhu, H., Chen, J., Wen, M., & Yin, H. (2018). Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithiumion battery system: A review. *Applied Thermal Engineering*, 142, 10–29. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.06.043>
- Ejaz Malik, M. A., Kalam, M. A., Ikram, A., Zeeshan, S., & Zahidi, S. Q. R. (2025). Energy transition towards electric vehicle technology. *Energy Reports*, 13, 2958–2996. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.02.029>
- El Djallil Rabhi, A., & Kerrouche, K. D. E. (2026). Enhanced and reliable techniques for modeling lithium-ion battery parameters based on experimental characterization. *Measurement*, 259(A), 119524. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.119524>
- Esmacel Nezhad, A., Mobtahej, M., Javadi, M. S., Nardelli, P. H. J., & Sahoo, S. (2024). Optimal operation of lithium-ion batteries in microgrids considering degradation, uncertainty, and grid support services. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 155(B), 109630. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109630>
- Fekri, Y., Heyhat, M. M., Salehzadeh, F. J., Wang, Z., & Rahbari, A. (2025). A review of thermal management systems for extreme fast charging of lithium-ion batteries. *Applied Thermal Engineering*, 279(E), 127870. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127870>
- Feng, X., Ouyang, M., Liu, X., Lu, L., Xia, Y., & He, X. (2018). Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Energy Storage Materials*, 10, 246–267. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2017.05.013>
- Falcone, F., Giannotta, A., Ricco, R., & De Palma, P. (2025). Thermal management systems for EV Li-ion batteries. *Applied Thermal Engineering*, 279(F), 127575. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127575>

- Hwang, F.S., Confrey, T., Reidy, C., Picovici, D., Callaghan, C., Culliton, D., & Nolan, C. (2024). Review of battery thermal management systems in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192, 114171. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114171>
- Hassan, S., Stoyanov, S., Rajaguru, P., & Bailey, C. (2026). Reduced-order modelling for thermal–mechanical analysis of lithium-ion battery cells under dynamic loading. *Finite Elements in Analysis and Design*, 253, 104488. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2025.104488>
- Iticha, W., & Stręk, T. (2025). Computational analysis of thermal performance of heat sinks with foam structures. *Materials*, 18(23), 5280. <https://doi.org/10.3390/ma18235280>
- Jilte, R., Kumar, R., Ahmadi, M., & Chen, L. (2019). Battery thermal management using PCM with air cooling. *Applied Thermal Engineering*, 161, 114199. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114199>
- Khan, M. M., Alkhedher, M., Ramadan, M., & Ghazal, M. (2023). Hybrid PCM-based battery thermal management system for electric vehicles: Design, modeling, and performance evaluation. *Journal of Energy Storage*, 73, 108775. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108775>
- Kilic, G. A. (2025). Performance evaluation of TPMS heat exchangers in liquid-cooling battery thermal management systems. *Applied Sciences*, 15(8), 4140. <https://doi.org/10.3390/app15084140>
- Kumar, S. S., & Rao, G. A. P. (2020). Recent progress on battery thermal management with composite PCMs. *Energy Storage*, 6(4), e647. <https://doi.org/10.1002/est2.647>
- Kurkin, A., Chivenkov, A., Aleshin, D., Trofimov, I., Shalukho, A., & Vilkov, D. (2025). Battery management system for electric vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, 16(8), 451. <https://doi.org/10.3390/wevj16080451>
- Leonori, S., Mostacciolo, E., Baccari, S., & Di Luzio, F. (2025). An advanced Li-ion cell equivalent circuit model. *Journal of Energy Storage*, 139(B), 118623. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.118623>
- Li, Z., Wang, Y., Sun, X., Wang, L., Li, C., Cheng, Z., & Wang, S. (2025). High precision modeling and targeted thermal management of lithium-ion batteries using multi-physics data fusion. *Journal of Power Sources*, 660, 238557. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238557>

- Liu, J., Zhong, W., Lv, Z., Li, C., & Liu, Y. (2025). Thermal management in EV wireless charging systems using coupled electromagnetic–thermal analysis. *DeCarbon*, 10, 100133. <https://doi.org/10.1016/j.decarb.2025.100133>
- Liu, S., Zhang, Y., & Liu, P.(2007). Heat transfer and pressure drop in fractal microchannel heat sinks. *Heat and Mass Transfer*, 44, 221–227. <https://doi.org/10.1007/s00231-007-0240-0>
- Liu, Z., Xiong, C., & Du, X. (2024). Optimization of BTMS using flat heat pipes and biomimetic fins. *Heliyon*, 10, e35387. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35387>
- Lu, K., Wang, C., Wang, C., Fan, X., Qi, F., & He, H. (2023). Topological structures for microchannel heat sinks. *Manufacturing Review*, 10, 2. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2022035>
- Maknikar, S. K., & Pawar, A. M. (2023). Application of PCM in BTMS. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.329>
- Ma, L., Xu, Y., Zhang, H., Yang, F., Wang, X., & Li, C. (2022). Co-estimation of state of charge and state of health for lithium-ion batteries using a dual Kalman filter with consideration of thermal effects. *Journal of Energy Storage*, 52, 104904. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104904>
- Men, Z., Chen, W., & Liu, S. (2025). Collaborative topology optimization for TPMS heat exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 169(D), 109840. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109840>
- Murray, C. D. (1926). The physiological principle of minimum work. *PNAS*, 12, 207–214. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.12.3.207>
- Nazari, A., Esmaceli, R., Hashemi, S. R., Aliniagerdroudbari, H., & Farhad, S. (2018). The effect of temperature on Li-ion battery energy efficiency and performance under dynamic load profiles. *ASME Proceedings*. <https://doi.org/10.1115/POWER2018-7375>
- Ouyang, D., Weng, J., Chen, M., & Wang, J. (2020). Impact of high-temperature environment on the cycle life and safety of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, 28, 101242. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101242>
- Pande, A. S., Soni, B. P., & Sharma, A. K. (2025). Modeling of one and two RC model of Li-ion batteries for improved state estimation accuracy. *Procedia Computer Science*, 259, 494–503. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.03.351>

- Plett, G. L. (2004). Extended Kalman filtering for battery management systems: Modeling, identification, and state-of-charge estimation. *Journal of Power Sources*, 134(2), 252–261. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.02.031>
- Plett, G. L. (2015). *Battery management systems, Volume II: Equivalent-circuit methods*. Artech House.
- Qi, Y., Zhao, W., Sun, X., Qi, L., Wang, D., & Zhang, Y. (2025). State estimation of Li-ion batteries using improved dual-extended Kalman filter with thermal coupling considerations. *Energy Reports*, 14, 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.05.083>
- Qureshi, Z. A., Al-Omari, S. A. B., Elnajjar, E., Al-Ketan, O., & Abu Al-Rub, R. (2021). TPMS metal foam PCM composites for efficient battery thermal management under high-power operations. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 124, 105265. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105265>
- Song, L. (2018). Thermal performance analysis using PCM. *OALib*, 5, 1–5. <https://doi.org/10.4236/oalib.1105127>
- Tran, M.-K., Mathew, M., Janhunen, S., Panchal, S., Raahemifar, K., Fraser, R., & Fowler, M. (2021). A comprehensive equivalent circuit model for lithium-ion batteries including thermal dynamics and degradation mechanisms. *Journal of Energy Storage*, 43, 103252. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103252>
- Wang, H., Tao, T., Xu, J., Mei, X., Liu, X., & Gou, P. (2020). Cooling capacity of modular liquid-cooled BTMS. *Applied Thermal Engineering*, 178, 115591. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115591>
- Wang, M., Wu, S., Chen, Y., Luan, W., & Chen, H. (2026). Thermal safety evolution of lithium-ion batteries under abusive operating conditions. *Applied Thermal Engineering*, 282, 128803. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.128803>
- Wang, R., Wang, M., & Xi, H. (2023). Thermal investigation and forced air-cooling optimization of lithium-ion battery packs for electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 219(D), 119566. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119566>

- Williams, N. P., Zelent, B., Trimble, D., & O'Shaughnessy, S. M. (2025). Experimental determination of entropic heat coefficient of lithium-ion batteries under dynamic fast-charging conditions. *Applied Thermal Engineering*, 258(A), 124597. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124597>
- Wu, W., Wang, S., Wu, W., Chen, K., Hong, S., & Lai, Y. (2019). Review of battery thermal performance. *Energy Conversion and Management*, 182, 262–281. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.051>
- Yu, F., Ding, W., Luo, X., He, B., & Hampel, U. (2023). Optimization of fractal-tree microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 217, 124672. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124672>
- Zare, P., Perera, N., Lahr, J., & Hasan, R. (2024). A novel thermal management system using hybrid cooling strategies for next-generation lithium-ion batteries. *Applied Thermal Engineering*, 238, 121985. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121985>
- Zhang, S., & Zhang, X. (2021). Multi time-scale framework for SOC and capacity estimation. *Journal of Energy Storage*, 35, 102325. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102325>
- Zhao, C., Zhang, B., Zheng, Y., Huang, S., Yan, T., & Liu, X. (2020). Hybrid BTMS: A review. *Energies*, 13, 6257. <https://doi.org/10.3390/en13236257>
- Zhao, J., Rao, Z., & Li, Y. (2015). Thermal performance of mini-channel battery cooling. *Energy Conversion and Management*, 103, 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.056>



KARBON AYAK İZİNİ AZALTMADA YENİLENEBİLİR ENERJİNİN ROLÜ

“ ”

Merve ERDAL¹

Adem YILMAZ²

¹ Merve ERDAL, Batman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji Sistemleri, eminemerveerdal@gmail.com, ORCID: 0009-0009-8229-8130

² Doç. Dr. Adem YILMAZ, Batman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, adem0306@gmail.com, ORCID:0000-0001-7266-0866

GİRİŞ

Günümüz dünyasında iklim değişikliği, yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ekonomik ve toplumsal bir kriz olarak karşımıza çıkmaktadır. Her geçen yıl artan sıcaklık ortalamaları, buzulların erimesi, deniz seviyesinin yükselmesi ve ekstrem hava olaylarının sıklığındaki artış, insanlık olarak gezegene olan sorumluluğumuzu tekrar düşünmemiz gerektiğini açıkça göstermektedir. Bu bağlamda en sık tartışılan kavramlardan biri olan karbon ayak izi, bireysel ve kurumsal faaliyetlerin çevre üzerindeki etkisini doğrudan ölçmemizi sağlayan önemli bir göstergedir (Okanlı & Demir, 2024). Enerji tüketiminden ulaşım tercihlerine, üretim süreçlerinden günlük alışkanlıklara kadar birçok faktör karbon ayak izini şekillendirmekte ve büyötmektedir. Özellikle fosil yakıtlara olan bağımlılığın, bu iz üzerindeki etkisi oldukça yüksektir (Erden, 2014). Bu durum, daha temiz ve sürdürülebilir enerji alternatiflerine yönelmenin artık bir seçenek değil, zorunluluk haline geldiğini ortaya koymaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları, çevresel sürdürülebilirliği sağlamak ve karbon emisyonlarını azaltmak adına umut verici çözümler sunmaktadır. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve biyokütle gibi kaynaklar, fosil yakıtlara göre çok daha düşük karbon salımı ile enerji üretimine olanak tanımaktadır (Demirci, 2018). Üstelik bu kaynakların büyük bir kısmı doğada sürekli olarak yenilenebilir olduğu için, uzun vadede enerji arz güvenliğini de desteklemektedir. Son yıllarda yapılan bilimsel araştırmalar, yenilenebilir enerjinin karbon ayak izinin azaltılmasında doğrudan ve güçlü bir etkisi olduğunu göstermektedir (Sümer & Güngör, 2024). Bu enerjilerin yaygınlaştırılması sadece çevre açısından değil, aynı zamanda ekonomik anlamda yeni iş alanlarının doğmasına, enerji ithalatının azalmasına ve yerli üretimin artmasına da katkı sunmaktadır (Çayalan & Rodoplu, 2025). Dolayısıyla, yenilenebilir enerjiye geçiş çok boyutlu bir kazanım süreci olarak değerlendirilmektedir.

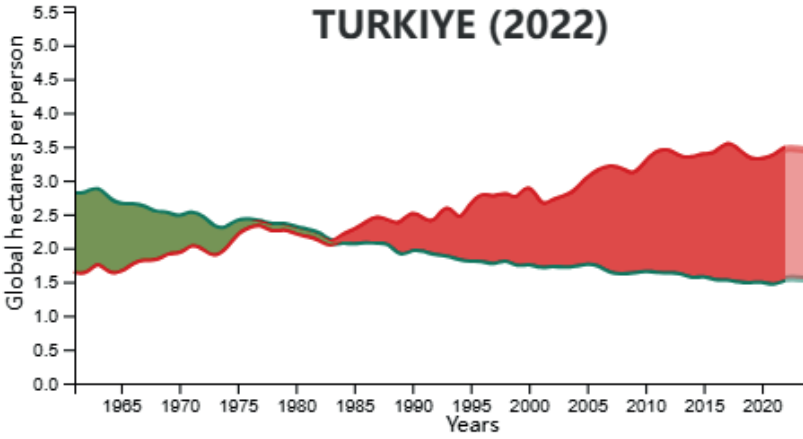
Karbon ayak izinin azaltılması için sadece teknolojik dönüşüm yeterli değildir; bu dönüşümün arkasında toplumsal bilinç, politik irade ve ekonomik planlama gibi birçok faktörün de yer alması gerekir. Bu bağlamda, devletlerin karbon nötr hedeflerine ulaşmak için benimsediği stratejiler, uluslararası anlaşmalar ve teşvik mekanizmaları kritik bir rol oynamaktadır (Durmuş & Gücüyeter, 2024). Aynı zamanda bireylerin enerji tüketim alışkanlıklarını gözden geçirmeleri, çevresel etkilerini sorgulamaları ve yenilenebilir kaynaklara yönelmeleri, toplumsal değişimin temelini oluşturmaktadır (Kumaş et al., 2019). Bu makalede, karbon ayak izinin temel kaynakları, yenilenebilir enerji türleri ve bu kaynakların çevresel etkileri detaylı biçimde ele alınarak, sürdürülebilir bir gelecek için izlenmesi gereken yol haritası ortaya konulacaktır. Çünkü içinde yaşadığımız dünya, yalnızca bizim değil, gelecek nesillerin de evidir ve bu evi korumak, hepimizin ortak sorumluluğudur.

KARBON AYAK İZİ

Karbon Ayak İzi Nedir

Karbon ayak izi, bireylerin, kurumların ve hatta ülkelerin günlük yaşamlarında veya üretim süreçlerinde atmosfere saldıkları sera gazı miktarının karbondioksit (CO₂) cinsinden hesaplanan toplamını ifade eder. Bu kavram, çevresel farkındalığın artmasıyla birlikte son yıllarda daha fazla önem kazanmıştır. Özellikle enerji tüketimi, ulaşım, gıda tüketimi ve endüstriyel üretim gibi alanlarda yapılan her faaliyet, bir karbon salımına neden olur (Okanlı & Demir, 2024). Karbon ayak izi, sadece teknik bir ölçüm aracı değil, aynı zamanda bireylerin ve toplumların doğaya olan etkilerini görünür kılan bir aynadır. İnsanlık olarak attığımız her adımın, yaktığımız her litre yakıtın ya da tükettiğimiz her ürünün ardında çevresel bir iz bırakması, artık göz ardı edilemeyecek kadar net bir gerçektir (Durmuş & Gücüyeter, 2024).

Karbon ayak izinin ölçülmesi, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak açısından oldukça önemlidir. Çünkü bu iz sayesinde hangi sektörlerin ya da yaşam alışkanlıklarının çevreye ne ölçüde zarar verdiği belirlenebilir. Örneğin, ulaşım sektörü, özellikle karayolu taşımacılığı, toplam karbon salımının önemli bir kısmını oluşturmaktadır (Civelekoğlu & Bıyık, 2018; Kılıç, Dönmez & Adalı, 2021). Aynı şekilde, sanayi ve inşaat sektörlerinin de karbon ayak izinde ciddi payı vardır (Akbaş & Çalışkan, 2024). Bu nedenle karbon ayak izini azaltmak, yalnızca çevreci bir tavır değil, aynı zamanda bilinçli bir yaşam biçimi haline gelmelidir. Karbon ayak izinin sistematik olarak hesaplanması ve şeffaf şekilde raporlanması, çevresel etkiyi düşürmeye yönelik stratejilerin temelini oluşturur (Üreden & Özden, 2018). Türkiye'nin 1695 ve 2022 yılları arası Ulusal ayak izi ve biyokapasite hesapları Şekil 1'de verilmiştir.



Data Sources: [National Footprint and Biocapacity Accounts 2025 edition \(Data Year 2022\)](#); GDP, International Financial Statistics (IFS); Population, U.N. Food and Agriculture Organization.

Şekil 1: Ulusal Ayak İzi ve Biyokapasite Hesapları (Global Footprint Network)

Küresel Isınma ve İklim Değişikliği Bağlamında Önemi

Karbon ayak izi, küresel ısınmanın ve iklim değişikliğinin en büyük tetikleyicisi olan sera gazı salımlarının başlıca göstergelerinden biridir. Atmosfere salınan karbondioksit ve diğer sera gazları, güneşten gelen ısıyı atmosferde tutarak dünya genelinde sıcaklıkların artmasına neden olur. Bu süreç, yalnızca ekosistemleri değil, insan yaşamını da doğrudan tehdit etmektedir. Artan sıcaklıklar, kuraklık, seller, orman yangınları ve tarımsal verimlilikte düşüş gibi birçok olumsuz etkiyi beraberinde getirir (Senturk, Gök & Koçyiğit, 2023). Bilim insanları, bu etkilerin doğrudan karbon salımıyla ilişkili olduğunu ve acil önlemler alınmadığı takdirde geri dönüşü olmayan zararların yaşanabileceğini vurgulamaktadır (Özsoy, 2015). Dolayısıyla, karbon ayak izini küçültmek yalnızca bireysel bir sorumluluk değil, aynı zamanda kolektif bir hayatta kalma mücadelesidir.

İklim değişikliği bağlamında karbon ayak izini azaltmanın önemi, sadece çevresel sürdürülebilirlikle sınırlı değildir. Aynı zamanda ekonomik ve sosyal etkileri de kapsamaktadır. Aşırı iklim olayları; altyapıya zarar vermekte, sağlık sistemlerini zorlamakta ve milyonlarca insanın göç etmesine neden olmaktadır. Bu durum, dünya genelinde sosyal adaletsizliğin artmasına, kaynak savaşlarına ve ekonomik krizlere zemin hazırlamaktadır (Çayalan & Rodoplu, 2025). Karbon ayak izinin azaltılması, bu zincirleme felaketleri önlemede kritik bir role sahiptir. Nitekim yapılan araştırmalar, yenilenebilir enerji kullanımı, enerji verimliliği ve sürdürülebilir yaşam alışkanlıklarının karbon ayak izini önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir (Coşkun

& Doğan, 2021; Sümer & Güngör, 2024). Bu nedenle, karbon ayak izine odaklanan politikalar ve bireysel farkındalık çalışmaları, iklim krizinin çözümünde vazgeçilmezdir.

Karbon Ayak İzinin Kaynakları

Karbon ayak izinin oluşumunda en büyük payı, enerji üretimi ve tüketimi almaktadır. Özellikle fosil yakıtlar, kömür, petrol ve doğal gaz, elektrik üretimi ve ulaşım gibi temel sektörlerde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu yakıtların yanması sonucu atmosfere salınan karbondioksit (CO₂), küresel sera gazı emisyonlarının temel kaynağını oluşturur (Erden, 2014). Karayolu taşımacılığı gibi ulaşım faaliyetleri de karbon ayak izine büyük katkı sağlar; motorlu taşıtların fosil yakıt tüketimi, çevreye doğrudan karbon salımıyla sonuçlanmaktadır (Kılıç, Dönmez & Adalı, 2021; Civelekoğlu & Bıyık, 2018). Uçaklar, gemiler ve trenler de benzer şekilde bu yükü artırmaktadır. Bu nedenle ulaşım sektöründe yapılacak yapısal dönüşümler, karbon ayak izini azaltma yönünde önemli bir fırsat sunmaktadır.

Bununla birlikte, sanayi ve inşaat sektörleri de yüksek miktarda karbon salımı gerçekleştiren kaynaklar arasında yer almaktadır. Özellikle çimento, demir-çelik, kimya ve tekstil gibi enerji yoğun sektörlerde üretim sırasında yüksek miktarda sera gazı ortaya çıkmaktadır (Coşkun & Doğan, 2021; Çolak & Türkmen, 2023). İnşaat faaliyetlerinde kullanılan makineler, malzemeler ve lojistik süreçler de karbon ayak izine ciddi katkılar sağlar (Akbaş & Çalışkan, 2024). Ayrıca bireysel tüketim alışkanlıkları, gereksiz enerji kullanımı, fazla et tüketimi, bilinçsiz alışveriş ve atık üretimi, toplumsal ölçekte büyük bir çevresel baskıya dönüşmektedir (Okanlı & Demir, 2024). Kısacası, karbon ayak izinin kaynakları çok katmanlıdır ve bireyselden küresele kadar her düzeyde sorumluluk gerektirir.

Fosil Yakıt Kullanımı

Fosil yakıtlar, modern dünyanın enerji ihtiyacını karşılamada hâlâ başlıca kaynaklar arasında yer almakta; ne yazık ki bu durum çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtların yakılması sonucunda açığa çıkan karbon dioksit gazı, atmosferdeki sera gazı yoğunluğunu artırarak iklim değişikliğini derinleştirmektedir (Erden, 2014). Enerji sektörüne dair yapılan araştırmalar, fosil yakıtların karbon ayak izinin toplam salımların büyük bir bölümünü oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Bu kaynaklara olan bağımlılığın azaltılamaması, sadece çevresel değil, ekonomik ve politik açıdan da riskler doğurmaktadır (Okanlı & Demir, 2024). Ne yazık ki bu bağımlılık, gelişmekte olan ülkelerde enerjiye erişimin kolaylığı ve maliyet etkinliği gibi nedenlerle hâlâ oldukça yaygın.

Bu durumu daha da vahim kılan ise, fosil yakıt kullanımının sadece enerji üretimiyle sınırlı kalmaması; ulaşım, sanayi, konut ısıtması gibi pek çok alanda da temel enerji kaynağı olarak benimsenmiş olmasıdır. Özellikle kentleşmenin hızlandığı bölgelerde, fosil yakıta dayalı enerji altyapısının dönüşümü oldukça yavaş ilerlemektedir. Türkiye’de de enerji üretiminin büyük kısmı hâlâ kömür ve doğal gaz gibi fosil kaynaklardan sağlanmaktadır (Özsoy, 2015). Bu nedenle, fosil yakıtların yerine geçebilecek yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarına yönelmek artık yalnızca çevreci bir tercih değil, aynı zamanda bir zorunluluk haline gelmiştir. Fosil yakıt kullanımının azaltılması, iklim krizine karşı alınabilecek en temel adımlardan biridir.

Sanayi ve Ulaşım Sektörü

Sanayi ve ulaşım sektörü, karbon ayak izinin en yüksek olduğu alanlardan ikisidir ve bu nedenle iklim değişikliğiyle mücadelede kritik roller üstlenmektedir. Sanayi tesislerinin yoğun enerji ihtiyacı, çoğunlukla fosil yakıtlara dayalıdır ve özellikle ağır sanayi alanlarında bu durum, karbon salımını ciddi oranda artırmaktadır (Coşkun & Doğan, 2021). Ayrıca sanayide kullanılan makinelerden çıkan emisyonlar, hava kalitesini düşürerek hem çevre hem de insan sağlığı açısından tehdit oluşturmaktadır. Sanayide yeşil dönüşüm henüz yeterince yaygınlaşmamış olsa da bazı öncü işletmeler, enerji verimliliği projeleri ve karbon ayak izi hesaplama sistemleriyle bu değişime öncülük etmeye başlamıştır (Çolak & Türkmen, 2023).

Diğer yandan, ulaşım sektörü de özellikle kentleşmenin yoğun olduğu bölgelerde başlı başına bir emisyon kaynağıdır. Karayolu taşımacılığının ağırlıklı tercih edilmesi ve bireysel araç kullanımının artması, toplam karbon salımında ulaşımın payını sürekli olarak yükseltmektedir (Civelekoğlu & Bıyık, 2018). Türkiye’de de benzer bir tablo söz konusudur; motorlu taşıtlardan kaynaklanan emisyonlar hem şehir içi hem şehirlerarası ulaşımında karbon ayak izini büyötmektedir (Kılıç, Dönmez & Adalı, 2021). Ulaşım sistemlerinin daha sürdürülebilir hale getirilmesi, örneğin toplu taşımanın yaygınlaştırılması, elektrikli araçlara geçişin teşvik edilmesi ve bisiklet yollarının artırılması gibi adımlar, bu sektördeki çevresel yükü azaltmanın en etkili yolları arasında yer alır.

Bireysel Tüketim Alışkanlıkları

Her bireyin gündelik yaşantısında yaptığı tercihlerin çevre üzerindeki etkisi düşündüğümüzden çok daha büyük olabilir. Tüketim alışkanlıklarımız – ne yediğimiz, nasıl seyahat ettiğimiz, neleri satın aldığımız ve nasıl enerji kullandığımız – doğrudan karbon ayak izimizi belirler. Örneğin tek kullanımlık plastiklerin aşırı tüketimi, gereksiz enerji harcaması ve yerli ürünler yerine ithal ürün tercih edilmesi gibi davranışlar, çevresel yükü artırmaktadır (Okanlı & Demir, 2024). Aynı zamanda, özellikle konutlarda ısınma ve soğutma

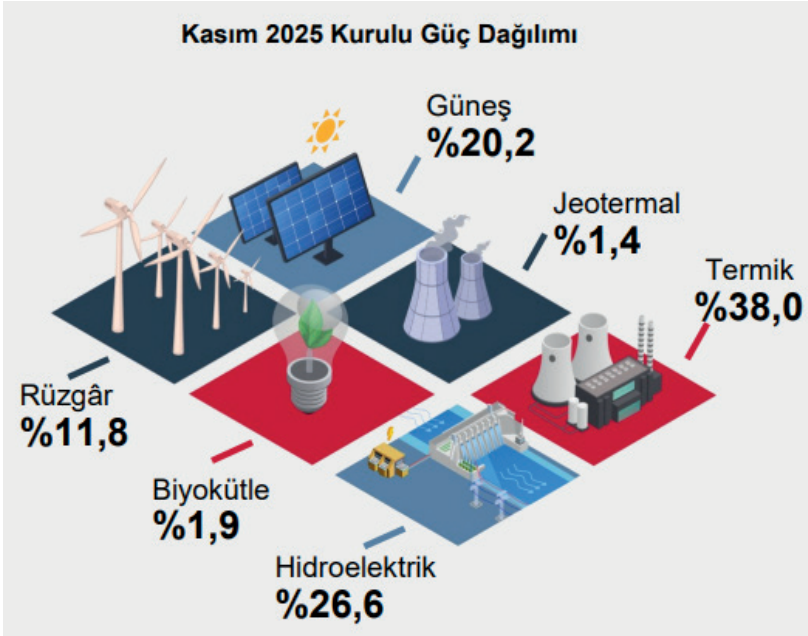
sistemlerinin bilinçsiz kullanımı da enerji israfına neden olmakta ve karbon salımını artırmaktadır (Demirci, 2018). Bu nedenle bireylerin çevre bilincine sahip olması, yalnızca kendi yaşam kalitesini değil, gezegenin geleceğini de doğrudan etkiler.

Toplumda oluşan tüketim kültürü, çoğu zaman hızlı tüketim ve sürekli yenileme eğilimiyle karbon salımını tetiklemektedir. Ancak bu durum tersine çevrilebilir. Tüketicilerin bilinçli tercihler yapması, örneğin geri dönüştürülmüş ürünleri kullanması, ikinci el eşyaları tercih etmesi veya enerji verimli cihazlara yönelmesi gibi adımlar, oldukça etkili sonuçlar doğurabilir (Binboğa & Ünal, 2018). Ayrıca bireysel farkındalık kampanyaları, çevre dostu yaşam tarzlarının yaygınlaşmasına katkı sağlar. Sonuç olarak, bireylerin alışkanlıklarında yapacağı küçük değişiklikler, küresel ölçekte büyük dönüşümlerin tetikleyicisi olabilir.

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğada kendiliğinden yenilenebilen ve kullanıldığında tükenmeyen enerji biçimleridir. Güneş enerjisi, bu kaynakların en bilinen ve en yaygın kullanılan örneklerinden biridir. Güneş panelleri sayesinde hem bireysel hem de endüstriyel ölçekte elektrik üretilmekte ve bu üretim sırasında karbon salımı gerçekleşmemektedir. Rüzgâr enerjisi de aynı şekilde doğanın sunduğu güçle çalışan ve sifıra yakın karbon emisyonu sağlayan temiz bir kaynaktır (Demirci, 2018). Hidroelektrik santraller, akarsuların gücünden yararlanarak elektrik üretir; jeotermal enerji ise yer altındaki sıcak su kaynaklarını değerlendirir. Bu kaynakların ortak özelliği, fosil yakıtlar gibi çevreyi kirletmeden enerji üretmeleridir.

Bu tür enerjilerin karbon ayak izini düşürmedeki rolü, yalnızca salım yapmamalarından değil, aynı zamanda enerji arzının güvenliğini ve sürdürülebilirliğini desteklemelerinden de kaynaklanır. Yenilenebilir enerji projeleri, uzun vadeli planlamalarla doğal kaynakların korunmasını sağlar, yerel ekonomilere katkı sunar ve enerji ithalatını azaltarak ülkelerin dışa bağımlılığını düşürür (Sümer & Güngör, 2024). Üstelik bu yatırımlar istihdam yaratır ve teknolojik ilerlemeyi teşvik eder. Türkiye gibi güneş ve rüzgâr potansiyeli yüksek ülkelerde, bu kaynakların değerlendirilmesi yalnızca çevresel değil, aynı zamanda ekonomik açıdan da stratejik bir öneme sahiptir (Teke, 2013). Yenilenebilir enerji kaynakları, geleceğin enerji politikalarının temel taşıdır. Türkiye’de 2025 yılı itibarı ile Yenilenebilir enerji sistemlerinin dağılımı Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2: Türkiye Kasım 2025 Kurulu güç dağılımı (Koçlu, Hakyemez 2025)

Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, temiz ve yenilenebilir bir kaynak olması sayesinde karbon ayak izini azaltmak adına en umut verici enerji çözümlerinden biridir. Güneşten elde edilen enerji, doğrudan elektrik üretiminde kullanılabildiği gibi, binalarda ısıtma ve sıcak su ihtiyacını karşılamakta da kullanılabilir. Üstelik güneş enerjisi sistemleri, karbon emisyonu yaratmaksızın enerji sağlayarak hem doğayı korur hem de uzun vadede enerji maliyetlerini düşürür (Sümer & Güngör, 2024). Türkiye gibi güneşlenme süresi yüksek ülkelerde, bu kaynağın yeterince değerlendirilmemesi, büyük bir potansiyelin boşa harcanması anlamına gelmektedir.

Güneş enerjisinin yaygınlaştırılması, aynı zamanda enerji bağımsızlığı açısından da stratejik bir öneme sahiptir. Yerel yönetimlerin güneş enerjisine yönelik teşvikler sunması, bireylerin çatı tipi paneller kurmasını kolaylaştırabilir. Ayrıca tarım alanlarında sulama sistemleri ya da sokak aydınlatmaları gibi küçük ölçekli uygulamalar da bu temiz enerjiden yararlanabilir (Demirci, 2018). Güneş enerjisi teknolojilerindeki ilerleme ve düşen maliyetler sayesinde, bu kaynak artık sadece çevreci değil, ekonomik açıdan da cazip bir seçenek haline gelmiştir.

Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr enerjisi, sera gazı emisyonu yaratmayan yapısıyla çevre dostu enerji kaynakları arasında öne çıkmaktadır. Rüzgâr türbinlerinin sağladığı elektrik enerjisi, özellikle geniş kırsal alanlarda büyük ölçekli enerji üretimi için idealdir. Türkiye'nin özellikle Ege ve Marmara bölgeleri gibi rüzgâr potansiyeli yüksek coğrafyaları, bu enerji türünden maksimum verim alınmasını mümkün kılmaktadır (Erden, 2014). Bu sayede, fosil yakıtlara olan bağımlılık azaltılırken aynı zamanda temiz enerjiye geçiş hızlanır. Rüzgâr enerjisi santrallerinin işletme maliyetlerinin düşüklüğü de bu kaynağı cazip hale getiren bir diğer etkidir.

Ancak rüzgâr enerjisinin yaygınlaşmasının önündeki engellerden biri, kamuoyundaki bilgi eksikliği ve yerel halkın bazı çevresel ve görsel etkiler konusundaki endişeleridir. Oysaki doğru planlama ve etkili yer seçimiyle bu tür çevresel kaygılar en aza indirilebilir. Ayrıca modern türbin teknolojileri, daha sessiz ve verimli çalışarak bu endişelere çözüm sunmaktadır (Çayalan & Rodoplu, 2025). Rüzgâr enerjisi hem ulusal enerji stratejileri hem de yerel kalkınma projeleri açısından sürdürülebilir bir geleceğin önemli bir parçasıdır.

Hidroelektrik Enerji

Hidroelektrik enerji, uzun yıllardır elektrik üretiminde kullanılan, yenilenebilir ve emisyonsuz bir enerji kaynağıdır. Barajlar aracılığıyla elde edilen bu enerji, fosil yakıt kullanımının yerine geçerek karbon ayak izini düşürmede etkili bir rol oynar. Özellikle Türkiye gibi dağlık ve akarsular açısından zengin ülkelerde hidroelektrik potansiyeli oldukça yüksektir (Teke, 2013). Ancak bu potansiyelin değerlendirilmesi, çevresel etkilerle dengeli bir şekilde yapılmalıdır. Zira büyük baraj projeleri, su ekosistemlerini ve biyolojik çeşitliliği olumsuz etkileyebilmektedir.

Bu nedenle, hidroelektrik santrallerin planlanmasında sürdürülebilirlik ilkesi büyük önem taşır. Küçük ölçekli hidroelektrik santraller (HES) bu noktada daha çevre dostu alternatifler sunabilir. Enerji ihtiyacının çevreyi tahrip etmeden karşılanması için, teknolojik çözümler ve çevresel etki değerlendirmeleri eş zamanlı olarak değerlendirilmelidir (Çayalan & Rodoplu, 2025). Doğru bir yaklaşımla planlanmış hidroelektrik projeleri hem enerji üretimini artırmakta hem de karbon emisyonunu minimize etmektedir.

Biyokütle ve Jeotermal Enerji

Biyokütle ve jeotermal enerji hem yerel hem de sürdürülebilir özellikleriyle enerji çeşitliliğini artıran önemli kaynaklardır. Biyokütle enerjisi, tarım ve orman atıkları gibi organik materyallerin enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilir ve bu süreçte doğaya salınan karbon, tekrar bitkiler tarafından emildiği

için net karbon emisyonu çok düşüktür (Senturk, Gök & Koçyiğit, 2023). Bu yönüyle biyokütle, döngüsel ekonomi anlayışına uygun bir enerji çözümüdür. Aynı şekilde, yerin derinliklerinden gelen ısıyla sağlanan jeotermal enerji de yıl boyunca istikrarlı bir enerji kaynağı sunarak karbon ayak izini düşürmeye katkı sağlar (Demirci, 2018).

Özellikle Türkiye, jeotermal kaynaklar açısından oldukça avantajlı bir konumdadır ve bu potansiyelin daha fazla değerlendirilmesi gerektiği sıkça vurgulanmaktadır. Jeotermal enerji santralleri, konut ısıtması, seracılık ve elektrik üretimi gibi çeşitli alanlarda kullanılabilir. Bununla birlikte, bu enerji türlerinin de çevresel ve yerel etkilerinin dikkatlice yönetilmesi gerekir (Sümer & Güngör, 2024). Doğru yönlendirildiğinde, biyokütle ve jeotermal enerji hem çevreye duyarlı hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir bir enerji dönüşümünü mümkün kılabilir.

BULGULAR

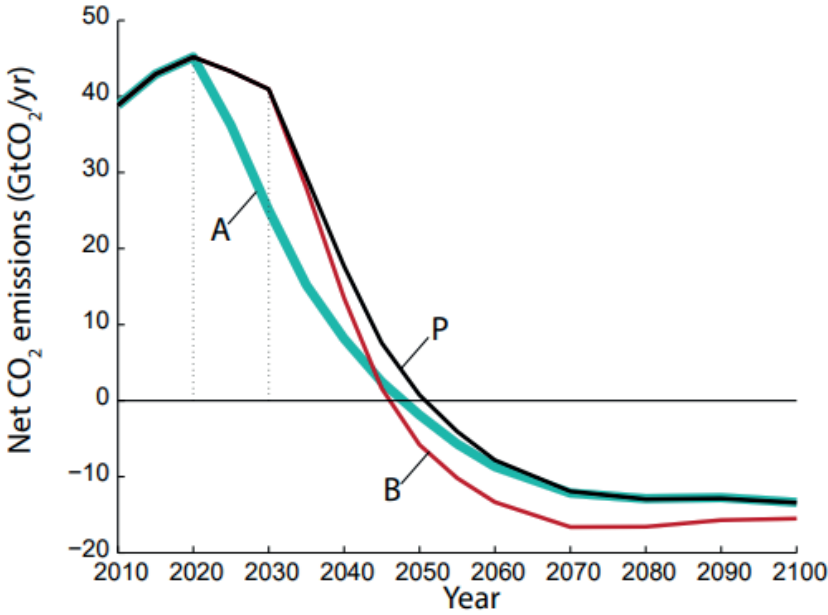
Yenilenebilir Enerjinin Karbon Ayak İzine Etkisi

Yenilenebilir enerji kaynaklarının karbon ayak izine etkisi oldukça derindir. Bu kaynaklar sayesinde, enerji üretimi esnasında fosil yakıtların neden olduğu karbondioksit salımı büyük oranda ortadan kalkar. Örneğin, bir konutun çatısına yerleştirilen güneş panelleri, yıllık enerji tüketiminin önemli bir kısmını karşılayabilir ve bu sayede binlerce kilogram CO₂ salımı engellenmiş olur (Demirci, 2018). Rüzgâr türbinleri, aynı şekilde yüzlerce haneye temiz enerji sağlarken atmosfere hiçbir zararlı gaz bırakmaz. Bu teknolojiler sayesinde hem bireysel hem de kurumsal ölçekte karbon ayak izi azaltılabilir; üstelik bu sadece çevre için değil, enerji maliyetleri açısından da kazanç sağlar.

Yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte, karbon salımında görülen düşüşler artık istatistiklerle de kanıtlanmaktadır. Örneğin, birçok ülkede yenilenebilir enerji kullanımının artmasıyla birlikte ulusal karbon emisyonlarında belirgin düşüşler yaşanmıştır (Çayalan & Rodoplu, 2025). Türkiye’de de benzer bir eğilim söz konusudur; özellikle kırsal alanlarda güneş ve biyokütle enerji sistemleriyle yapılan uygulamalar, karbon ayak izinin azaltılmasında olumlu etkiler yaratmıştır (Kumaş, Akyüz, Zaman & Güngör, 2019). Ancak bu etkinin kalıcı ve güçlü olabilmesi için, sadece teknolojik altyapı değil, aynı zamanda politik irade, teşvik mekanizmaları ve toplumsal farkındalık da gereklidir. Bu nedenle yenilenebilir enerjinin karbon ayak izine olan etkisi, yalnızca teknik değil, aynı zamanda sosyopolitik bir konudur.

Emisyon Azaltımı

Emisyonların azaltılması, günümüzde sadece çevresel bir gereklilik değil, aynı zamanda toplumsal sorumluluk haline gelmiştir. Atmosfere salınan karbon dioksit (CO_2) ve diğer sera gazları, küresel ısınmanın en büyük tetikleyicilerindendir. Fosil yakıtlara dayalı üretim ve tüketim modelleri, karbon ayak izimizi büyütmemekte ve iklim krizini derinleştirmektedir. Ancak bireylerin, kurumların ve devletlerin birlikte atacağı somut adımlarla bu süreci tersine çevirmek mümkündür. Enerji verimliliği önlemleri, sürdürülebilir ulaşım sistemleri ve atık yönetimi gibi alanlardaki küçük ama etkili değişiklikler, büyük ölçekte emisyonların düşmesini sağlayabilir (Okanlı & Demir, 2024). Özellikle sanayi ve ulaşım sektöründe karbon salımının azaltılması, sadece çevresel değil ekonomik açıdan da uzun vadede olumlu etkiler yaratmaktadır (Kılıç, Dönmez & Adalı, 2021). Unutulmamalıdır ki emisyonları azaltmak, sadece geleceği korumak değil, bugünü yaşanabilir kılmak adına da verilmiş bir sözdür. Önümüzdeki on yılda küresel CO_2 emisyonlarında ki değişimler Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3: Gelecek yıllardaki küresel CO_2 emisyonlarındaki değişimler (Rogelj, J., D. ve diğerleri, 2018)

Enerji Dönüşümünde Temiz Teknolojilerin Rolü

Temiz teknolojiler, enerji dönüşümünün temel yapı taşlarından biridir. Bu teknolojiler, hem doğal kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlar hem de

çevreye verilen zararı minimuma indirir. Özellikle yenilenebilir enerji sistemleri, karbon salınımını ciddi oranda azaltarak sürdürülebilir bir gelecek vizyonuna katkıda bulunur. Güneş panelleri, rüzgâr türbinleri, biyokütle sistemleri ve jeotermal enerji gibi çözümler, fosil yakıtlara alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu teknolojilerin yaygınlaşması, enerjide dışa bağımlılığı azaltırken çevresel etkileri de en aza indirir (Demirci, 2018). Aynı zamanda bu dönüşüm, yeni iş alanları yaratarak ekonomik dinamizme de katkı sağlar (Çayalan & Rodoplu, 2025). Temiz teknolojiler sadece teknik değil, etik bir seçimdir; insanlığın doğaya karşı olan sorumluluğunu yerine getirme biçimidir.

Uzun Vadeli Çevresel ve Ekonomik Kazanımlar

Karbon ayak izini azaltmaya yönelik yatırımların geri dönüşü, yalnızca çevreye değil, ekonomiye de büyük faydalar sağlar. Enerji verimliliği projeleri sayesinde maliyetler azalırken, doğal kaynakların daha etkin kullanımı sağlanır. Uzun vadede temiz enerji yatırımları, enerji arz güvenliğini artırır ve dışa bağımlılığı azaltır (Sümer & Güngör, 2024). Ayrıca sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için yapılan her yatırım, toplumsal refahın ve çevresel kalitenin artmasına katkı sunar (Durmuş & Gücüyeter, 2024). Çevresel kazanımların başında hava, su ve toprak kalitesinin artması gelirken, ekonomik kazanımlar da yeni iş fırsatları, inovasyon ve yeşil teknoloji ihracatı gibi alanlarda kendini gösterir. Bu denge, hem gelecek nesillerin yaşam hakkına saygı duymak hem de bugünün ekonomik gerçekliklerine akıllıca karşılık vermek anlamına gelir.

TARTIŞMA

Dünya Genelinden Uygulama Örnekleri

Karbon ayak izini azaltma konusunda dünya genelinde farklı ülkeler, yenilikçi ve sürdürülebilir uygulamalarıyla dikkat çekiyor. Örneğin İsveç, enerji ihtiyacının büyük bir kısmını biyoyakıt ve hidroelektrik gibi yenilenebilir kaynaklardan karşılayarak atmosfere salınan karbon oranını ciddi biçimde azaltmıştır. 2045 yılına kadar karbon nötr olma hedefiyle yürütülen bu politikalar, toplumun her kesimine entegre edilmiştir. Benzer şekilde Almanya’da enerji dönüşümü (“Energiewende”) politikası kapsamında nükleer enerji terk edilip güneş ve rüzgâr enerjisine geçiş hızlandırılmıştır (Demirci, 2018). Bu politikaların başarılı olmasında sadece hükümetin değil, vatandaşların da büyük rol oynadığı unutulmamalıdır.

Dünyanın diğer ucunda, Yeni Zelanda gibi ülkeler tarım ve hayvancılığın çevresel etkisini azaltmaya yönelik karbon vergileriyle dikkat çekerken; Kanada, ulaşım sektöründe karbon salınımını sınırlamak adına elektrikli araç altyapısına milyarlarca dolarlık yatırım yapmıştır (Çayalan & Rodoplu, 2025). Uygulamalar sadece ulusal düzeyde değil, yerel yönetimlerde de etkisini gösteriyor. Örneğin Kopenhag, 2025’e kadar dünyanın ilk karbon

nötr başkenti olmayı hedeflemekte ve bu doğrultuda bisiklet yolları, yeşil bina politikaları ve atık yönetimiyle bütünleşik çözümler sunmaktadır. Bu örnekler, karbon ayak izini azaltmanın yalnızca bir hedef değil, toplumun tüm kesimlerini içine alan bir yaşam biçimi olması gerektiğini ortaya koymaktadır (Durmuş & Gücüyeter, 2024).

Almanya: Yenilenebilir Enerji Devrimi

Almanya, dünyada yenilenebilir enerji dönüşümünde öncü ülkelerden biri olarak dikkat çekmektedir. “Energiewende” adı verilen enerji dönüşümü politikasıyla Almanya, nükleer ve fosil yakıtlardan uzaklaşarak güneş, rüzgâr ve biyokütle gibi kaynaklara yönelmiştir. Bu dönüşüm yalnızca enerji üretim biçimlerini değiştirmekle kalmamış, aynı zamanda halkın enerjiye bakışını da dönüştürmüştür. Bugün Almanya’da enerji kooperatifleri aracılığıyla vatandaşlar doğrudan enerji üreticisi konumuna gelebilmektedir (Teke, 2013). 2020’li yıllarla birlikte, toplam elektrik üretiminin yaklaşık %50’sinden fazlası yenilenebilir kaynaklardan sağlanmaktadır. Bu süreçte karbon salınımı ciddi biçimde azalmış, enerji ithalatı düşmüş ve yeni istihdam alanları yaratılmıştır (Erden, 2014). Almanya’nın bu başarısı, doğru planlama, toplumsal katılım ve kararlı siyasi iradenin birleşimiyle mümkündür.

Danimarka: Rüzgâr Enerjisi Liderliği

Kuzey Avrupa’nın küçük ama vizyoner ülkesi Danimarka, rüzgâr enerjisinde dünyanın lider ülkelerinden biri olmayı başarmıştır. Özellikle 1980’li yıllardan bu yana yapılan yatırımlar sayesinde, rüzgâr enerjisi bugün Danimarka’nın toplam elektrik ihtiyacının yarısından fazlasını karşılamaktadır. Bu başarıda devlet politikalarının yanı sıra halkın bilinçli tüketim tercihleri ve çevreye duyarlı yaşam tarzı büyük rol oynamıştır (Senturk, Gök & Koçyiğit, 2023). Danimarka sadece karasal değil, deniz üstü rüzgâr santrallerinde de öncü konumdadır. Bu da ülkeyi hem enerji arz güvenliğinde hem de iklim değişikliğiyle mücadelede güçlü bir aktör haline getirmiştir. Danimarka’nın örneği, küçük bir ülkenin bile kararlı adımlarla küresel enerji sisteminde nasıl devrim yaratabileceğini göstermektedir.

Türkiye’deki Mevcut Durum ve Potansiyel

Türkiye, yenilenebilir enerji kaynakları açısından oldukça zengin bir coğrafyaya sahiptir; ancak bu potansiyelin tam anlamıyla değerlendirildiğini söylemek zordur. Son yıllarda güneş ve rüzgâr enerjisine yapılan yatırımlar artsa da enerji üretiminde fosil yakıtların payı hâlâ yüksek düzeydedir. Özellikle jeotermal ve hidroelektrik kaynaklarda Türkiye’nin ciddi bir avantajı bulunmaktadır (Sümer & Güngör, 2024). Buna karşın mevzuat eksiklikleri, yatırımcı çekinceleri ve yerel düzeydeki bilinçsizlikler sürecin önünde engel oluşturmaktadır (Çolak & Türkmen, 2023). Ancak artan çevre bilinci ve iklim değişikliğiyle mücadele gerekliliği, Türkiye’yi daha kararlı

adımlar atmaya zorlamaktadır. Enerji dönüşümünün hızlandırılması, sadece çevresel açıdan değil, ekonomik bağımsızlık ve istihdam yaratma bakımından da büyük fırsatlar sunmaktadır (Binboğa & Ünal, 2018). Türkiye'nin sahip olduğu potansiyeli doğru politikalar ve güçlü uygulamalarla hayata geçirmesi durumunda, bölgesel bir enerji lideri olması hiç de uzak bir ihtimal değildir.

Karbon Ayak İzini Azaltmaya Yönelik Politikalar ve Teşvikler

Hükümetlerin karbon ayak izini azaltmak amacıyla uyguladığı politikalar, çevresel dönüşümde en kritik araçlardan biridir. Karbon vergisi, emisyon ticaret sistemleri (ETS) ve sürdürülebilir altyapı yatırımları gibi ekonomik araçlar, şirketleri ve bireyleri daha düşük karbon salımı yapan tercihlere yönlendirmektedir. Örneğin Avrupa Birliği, ETS kapsamında belirlenen sınırların ötesine geçen firmalara ağır yaptırımlar uygularken, düşük emisyonlu yatırımları teşvik eden fonlarla dönüşümü hızlandırmaktadır (Erden, 2014). Türkiye'de de son yıllarda karbon ayak izini azaltmaya yönelik strateji belgeleri hazırlanmış ve kamu kurumları için enerji verimliliği hedefleri belirlenmiştir (Özsoy, 2015).

Bununla birlikte, doğrudan finansal teşvikler ve kamu destekli projeler de yaygınlaşmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik devlet destekleri, vergi indirimleri ve enerji verimliliği projelerine hibe olanakları, özel sektörü bu alanda yatırım yapmaya teşvik etmektedir (Sümer & Güngör, 2024). Ayrıca, sürdürülebilir ulaşımı destekleyen projeler — örneğin raylı sistem yatırımları, bisiklet yollarının yaygınlaştırılması ve elektrikli araçlar için şarj altyapısı — toplumsal karbon salımını azaltmada kilit rol oynamaktadır (Civelekoğlu & Bıyık, 2018). Politika yapımcılar, sadece yasal düzenlemelerle değil, aynı zamanda toplumun her kesimini bilinçlendirecek iletişim kampanyalarıyla da karbon ayak izinin azaltılmasına katkıda bulunmalıdır.

Uluslararası Anlaşmalar ve Hedefler (Paris Anlaşması vb.)

İklim değişikliğiyle mücadelede küresel iş birliği, artık bir seçenek değil, zorunluluktur. Bu bağlamda Paris Anlaşması, insanlık tarihinin en önemli çevresel mutabakatlarından biridir. 2015 yılında imzalanan bu anlaşma, küresel ısınmayı 2°C'nin altında tutmayı, hatta mümkünse 1.5°C ile sınırlamayı hedeflemiştir. Taraf ülkeler, sera gazı emisyonlarını azaltma yönünde gönüllü taahhütler vermekte ve bu taahhütlerini belirli periyotlarla güncelleyerek şeffaf bir şekilde raporlamaktadır. Bu çaba, yalnızca hükümetlerin değil; özel sektörün, akademik çevrelerin ve bireylerin ortak katkısıyla başarıya ulaşabilir (Durmuş & Gücüyeter, 2024). Türkiye de 2021 yılında Paris Anlaşması'nı onaylamış ve 2053 yılına kadar net sıfır emisyon hedefini benimsemiştir. Bu gibi uluslararası anlaşmalar, ülkelerin çevresel politikalarını şekillendirmekle kalmaz; aynı zamanda karbon ayak izinin küresel ölçekte azaltılması için moral ve yön verir.

Karbon Vergisi ve Yeşil Sertifikalar

Karbon vergisi, çevreye zarar veren davranışları ekonomik olarak cezalandırmayı hedefleyen etkili bir araçtır. Bu sistemde, işletmeler saldıkları her ton karbon için belirli bir ücret öder, bu da onları daha çevreci üretim tekniklerine yönelmeye teşvik eder. Aynı şekilde yeşil sertifikalar da çevreye duyarlı enerji tüketiminin belgelenmesini sağlar. Örneğin bir işletme, kullandığı elektriğin yenilenebilir kaynaklardan geldiğini bu sertifikayla belgeleyerek hem yasal avantajlar sağlar hem de marka değerini artırır (Okanlı & Demir, 2024). Türkiye’de karbon piyasaları henüz gelişim aşamasında olsa da bu tür uygulamalar hem kurumsal hem bireysel çevre bilincini artırmak açısından büyük potansiyele sahiptir. Sonuç olarak bu sistemler, çevre dostu teknolojilere geçişin ekonomik olarak da teşvik edilmesine katkıda bulunur (Çolak & Türkmen, 2023).

Devlet Destekli Yenilenebilir Enerji Projeleri

Devletin yenilenebilir enerjiye verdiği destek, enerji dönüşümünün hızlanmasında belirleyici bir rol oynar. Türkiye’de son yıllarda özellikle güneş ve rüzgâr enerjisi alanında devlet teşvikleri artmış, yatırımcılar için cazip ortamlar yaratılmıştır. Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) projeleri ve alım garantili ihaleler sayesinde büyük ölçekli temiz enerji santralleri kurulmuş, bu sayede enerji üretiminde sürdürülebilirlik ilkesi güç kazanmıştır (Demirci, 2018). Ayrıca yerli teknoloji üretimi ve AR-GE destekleri ile hem çevresel hem de ekonomik bağımsızlık hedeflenmektedir. Bu projeler, sadece enerji sektörünü değil; istihdamı, yerel kalkınmayı ve çevre bilincini de doğrudan etkilemektedir. Kamu politikalarının uzun vadeli vizyonla şekillenmesi, yeşil dönüşümün toplumun her kesiminde kabul görmesini sağlayacaktır (Sümer & Güngör, 2024).

Bireysel ve Kurumsal Katkıları

Karbon ayak izini azaltmak yalnızca hükümetlerin veya büyük şirketlerin sorumluluğu değildir. Her birey, günlük yaşamındaki küçük ama etkili değişikliklerle çevreye katkı sunabilir. Gereksiz enerji kullanımının önlenmesi, doğa dostu ulaşım tercihlerinin benimsenmesi ve yerel ürünlerin tüketilmesi gibi davranışlar bireysel karbon ayak izini ciddi biçimde azaltır. Özellikle gençler arasında artan çevre bilinci, sosyal medya ve kampanyalar yoluyla daha geniş kitlelere yayılmaktadır. Bireysel seçimlerin toplumsal sonuçlara dönüştüğü bu yeni dönemde, herkesin katkısı bir zincirin halkasıdır (Kumaş, Akyüz, Zaman & Güngör, 2019).

Kurumsal düzeyde ise şirketler artık sadece kâr hedefli değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik odaklı politikalar geliştirme zorunluluğuyla karşı karşıyadır. Özellikle büyük üretim firmaları, karbon ayak izlerini hesaplayarak çevresel etkilerini minimize edecek stratejiler geliştirmektedir (Çolak & Türkmen, 2023). Yeşil ofis uygulamaları, çevre dostu lojistik sistemleri ve yenilenebilir enerji

kullanımına geçiş gibi adımlar, sadece doğaya değil, marka değerine de katkı sağlamaktadır. Ayrıca üniversiteler, hastaneler ve kamu kurumları da karbon emisyonlarını azaltmak için çeşitli iç denetimler ve bilinçlendirme programları uygulamaktadır (Binboğa & Ünal, 2018). Bu bütüncül yaklaşımlar sayesinde kurumsal katkıların çevresel dönüşüme olan etkisi her geçen gün daha görünür hale gelmektedir.

Enerji Verimliliği Uygulamaları

Enerji verimliliği hem ekonomik tasarruf hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından çift taraflı bir kazançtır. Binalarda yalıtım sistemlerinden sanayide verimli üretim hatlarına, ulaşımdan aydınlatmaya kadar her alanda uygulanabilecek verimlilik çözümleri mevcuttur. Türkiye’de enerji verimliliği yönetmelikleri, yeni yapı projelerinde artık zorunlu hale gelmiştir ve bu durum enerji tüketimini ciddi şekilde düşürmektedir (Çayalan & Rodoplu, 2025). Ayrıca, enerji izleme sistemlerinin yaygınlaşması, tüketim alışkanlıklarını daha şeffaf ve kontrol edilebilir kılmaktadır. Enerji verimliliği, yalnızca bir maliyet azaltma yöntemi değil; gelecek nesillere yaşanabilir bir dünya bırakma iradesinin de bir ifadesidir (Kumaş et al., 2019). Bu nedenle verimlilik uygulamaları, kişisel yaşamdan kurumsal yapılara kadar her düzeyde içselleştirilmelidir.

Yeşil Enerji Tüketimi

Yeşil enerji tüketimi, bireylerin ve kurumların sürdürülebilirliğe katkı sunabileceği en doğrudan yollardan biridir. Güneş, rüzgâr, biyokütle ve hidroelektrik gibi kaynaklardan elde edilen bu tür enerji, fosil yakıtların aksine çevreye zarar vermez ve karbon ayak izini azaltır. Bugün birçok ülkede tüketiciler, enerji sağlayıcılarından yeşil enerji tercihinde bulunabilmekte ve bu tercihi belgelerle doğrulayabilmektedir (Durmuş & Gücüyeter, 2024). Türkiye’de bu konuda atılacak adımlar, bireysel farkındalıkla birleştğinde güçlü bir dönüşüm yaratabilir. Özellikle üniversiteler, kamu kurumları ve büyük işletmeler yeşil enerjiye geçerek hem çevreyi koruyabilir hem de sosyal sorumluluk anlamında örnek oluşturabilir (Binboğa & Ünal, 2018). Yeşil enerji tüketimi, sessiz ama etkili bir çevresel direniş biçimidir: Tüketerек korumak.

Kurumsal Karbon Ayak İzi Azaltma Stratejileri

Kurumsal düzeyde karbon ayak izini azaltmak hem etik bir sorumluluk hem de stratejik bir zorunluluktur. Kuruluşlar, sürdürülebilirlik raporları hazırlayarak emisyonlarını ölçebilir ve bu veriler ışığında hedefler belirleyebilir. Elektrik tüketimini düşürmek, geri dönüşüm sistemleri kurmak, ulaşımda hibrit araçlara geçmek ve tedarik zincirinde çevreci iş ortaklarını tercih etmek gibi adımlar, somut çözümler arasında yer alır (Çolak & Türkmen, 2023). Ayrıca karbon dengeleme projeleriyle kurumsal emisyonlar tamamen sıfırlanmasa da doğaya olan zararı telafi edici adımlar atılabilir. Bu tür stratejiler, sadece doğayı değil; marka güvenilirliğini, yatırımcı ilgisini ve çalışan bağlılığını da güçlendirir

(Üreden & Özden, 2018). Karbon ayak izini azaltmak, artık bir rekabet avantajı değil, kurumsal varoluşun temel koşullarından biridir.

SONUÇ VE ÖNERİ

Karbon ayak izini azaltmada yenilenebilir enerjinin rolü, günümüzün en kritik çevresel konularından biridir. Fosil yakıtların yol açtığı karbon emisyonları, küresel ısınmanın ve iklim krizinin başlıca sebeplerindendir. Bu nedenle, fosil kaynaklara olan bağımlılığın azaltılması ve temiz, sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelim büyük önem taşımaktadır. Yenilenebilir enerji, doğası gereği karbon salınımını minimize eden bir seçenek olarak hem çevresel hem de ekonomik açıdan uzun vadeli faydalar sağlamaktadır.

Yenilenebilir enerji teknolojilerinin hızla gelişmesi ve maliyetlerinin düşmesi, bu alandaki yatırımların artmasına öncülük etmektedir. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve biyokütle gibi kaynaklar, enerji üretiminde karbon emisyonlarını neredeyse sıfıra indirirken, aynı zamanda enerji arz güvenliğini de güçlendirmektedir. Bu kaynaklar, yerel ekonomilere can katmakta, istihdam yaratmakta ve enerji maliyetlerini düşürmektedir. Bu dinamikler, yenilenebilir enerjiyi sadece çevre dostu değil, aynı zamanda stratejik bir enerji politikası aracı haline getirmektedir.

Yenilenebilir enerji kullanımının yaygınlaşması, karbon ayak izinin azalmasında toplumun tüm kesimlerinin rolünü artırmaktadır. Devletlerin teşvik politikaları, özel sektör yatırımları ve bireysel farkındalık, bu dönüşümün temel taşlarını oluşturur. Enerji verimliliği ve yeşil enerji tüketimi gibi uygulamalarla desteklenen yenilenebilir enerji, sadece büyük ölçekli projelerde değil, günlük yaşamda da etkisini göstermektedir. Bu süreç, sürdürülebilir kalkınmanın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir.

Bununla birlikte, yenilenebilir enerjiye geçişin başarılı olması için altyapı yatırımları, teknolojik yenilikler ve eğitim gibi alanlarda koordineli çabalar gereklidir. Enerji dönüşümünde yaşanacak her türlü gecikme veya yetersizlik, karbon emisyonlarının devam etmesine yol açabilir ve iklim hedeflerinin tutturulmasını zorlaştırabilir. Bu nedenle, bütüncül ve kararlı politikalarla yenilenebilir enerji sistemlerinin güçlendirilmesi büyük bir önceliktir. Aynı zamanda, bu dönüşümün sosyal ve ekonomik etkileri göz önünde bulundurularak adil bir enerji geçişi planlanmalıdır.

Yenilenebilir enerji karbon ayak izinin azaltılmasında en etkili ve sürdürülebilir çözümlerden biridir. Hem çevresel sorumluluk hem de ekonomik fırsatlar sunan bu enerji kaynakları, geleceğin dünyasında temiz bir yaşamın anahtarıdır. Karbon emisyonlarının azaltılması ve iklim değişikliği ile mücadelede yenilenebilir enerji, toplumların daha sağlıklı ve yaşanabilir bir gezegende buluşmasını sağlayacak en önemli unsurlardan biri olmaya devam edecektir.

KAYNAKÇA

- Akbaş, A., & Çalışkan, Ö. (2024). İnşaat Sektörü ve Karbon Ayak İzi.
- Binboğa, G., & Ünal, A. (2018). Sürdürülebilirlik Ekseninde Manisa Celal Bayar Üniversitesi'nin Karbon Ayak İzinin Hesaplanmasına Yönelik Bir Araştırma. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, (21), 187-202.
- Civelekoğlu, G., & Bıyık, Y. (2018). Ulaşım sektöründen kaynaklı karbon ayak izi değişiminin incelenmesi. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 2(2), 157-166.
- Coşkun, S., & Doğan, N. (2021). Tekstil endüstrisinde karbon ayak izinin belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(1), 28-35.
- Çayalan, N., & Rodoplu, H. (2025). Sürdürülebilir Havaalanı Uygulamaları: Enerji Verimliliği ve Karbon Ayak İzi Azaltma Stratejileri. *Iğdır University Journal of Social Sciences/Iğdır Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (38).
- Çolak, G., & Türkmen, B. A. (2023). Kurumsal karbon ayak izi analizi: Bir kimya fabrikası için örnek hesaplama. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 9(1), 191-201.
- Demirci, E. (2018). Yenilenebilir enerji kaynaklarının konutlarda karbon ayak izinin azaltılmasındaki rolü.
- Durmuş, İ., & Gücüyeter, İ. (2024). Karbon ayak izi ve yeşil organizasyon kavramlarına yönelik bibliyometrik araştırmalar. *Journal of Agriculture Faculty of Ege University*, 61(1), 113-124.
- Erden, C. (2014). Düşük Karbon Ekonomisi Ve Türkiye'nin Karbon Ayak İzi. In *International Conference in Economics September* (pp. 03-05).
- Kılıç, M. Y., Dönmez, T., & Adalı, S. (2021). Karayolu ulaşımında yakıt tüketimine bağlı karbon ayak izi değişimi: Çanakkale örneği. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(3), 943-955.
- Koçlu, E. İ. & Hakyemez, C. (2025). TSKB Ekonomik Araştırmalar. *Aylık Enerji Bülteni*, Kasım 2025, <https://www.tskb.com.tr/uploads/file/enerji-bulteni-kasim-20251209.pdf>.
- Kumaş, K., Akyüz, A. Ö., Zaman, M., & Güngör, A. (2019). Sürdürülebilir bir çevre için karbon ayak izi tespiti: MAKÜ Bucak Sağlık Yüksekokulu örneği. *El-Cezeri*, 6(1), 108-117.
- Global Footprint Network: https://data.footprintnetwork.org/?_ga=2.236124993.1999036158.1765787224-1099845937.1765787224#/
Erişim Tarihi: 12.12.2025

- Okanlı, G., & Demir, O. (2024). Karbon ayak izi, türleri, oluşum sebepleri ve azaltma stratejileri. *Toprak Altı Hazinesi*, 1, 47-65.
- Özsoy, C. E. (2015). Düşük karbon ekonomisi ve Türkiye'nin karbon ayak izi. *Hak İş Uluslararası Emek ve Toplum Dergisi*, 4(9), 198-215.
- Rogelj, J., D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, H. Kheshgi, S. Kobayashi, E. Kriegler, L. Mundaca, R. Séférian, and M.V.Vilarinho. (2018). Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. *Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA*, pp. 93-174. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.004>.
- Senturk, G. O., Gök, G., & Koçyiğit, H. (2023). Tarımda karbon ayak izi ve iklim değişikliğine etkisi. *Artvin Çoruh Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 1(1), 12-24.
- Sümer, Y., & Güngör, A. (2024). Antalya İli İçin Solar Termal Isıtma Teknolojilerinin Karbon Ayak İzini Azaltma Potansiyeli. *Bilim Armonisi*, 6(2), 52-58.
- Teke, O. (2013, May). Petrol, Yenilenebilir Enerji ve Karbon Ayak izi Üçgeni'nde Türkiye. In *19th International Petroleum and Natural Gas Congress and Exhibition of Turkey* (pp. cp-380). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Üreden, A., & Özden, S. (2018). Kurumsal karbon ayak izi nasıl hesaplanır: teorik bir çalışma. *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, 4(2), 98-108.



MODERN RÜZGÂR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ: KÜRESEL GÖRÜNÜM, AERODİNAMİK ESASLAR VE ŞEBEKE ENTEGRASYONU

“ ”

Tufan Volkan KÜÇÜK¹

¹ Öğr. Gör. Dr. Tufan Volkan KÜÇÜK, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Osmaneli Meslek Yüksekokul, İş Sağlığı ve Güvenliği Programı, Bilecik, 11500, Türkiye, tufan.kucuk@bilecik.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2456-5706>

1. Giriş

1.1. Genel bakış ve küresel enerji dönüşümü

Antropojenik sera gazı emisyonlarının neden olduğu küresel ısınma ve buna bağlı iklim değişikliği, 21. yüzyılın en acil çözüm bekleyen mühendislik ve çevre sorunlarından biridir. Uluslararası enerji politikaları, "Net sıfır emisyon" hedefleri doğrultusunda fosil yakıt bağımlılığını azaltmayı ve sürdürülebilir enerji kaynaklarını şebeke altyapısına entegre etmeyi zorunlu kılmıştır. Bu dönüşüm sürecinde rüzgâr enerjisi; teknolojik olgunluğu, farklı ölçeklerde uygulanabilirliği ve giderek azalan birim enerji maliyetleri ile küresel enerji arzının en stratejik bileşenlerinden biri haline gelmiştir.

1.2. Kurulu güç gelişimi ve bölgesel analiz (2014-2023)

Rüzgâr enerjisi sektörü, son on yılda lineer büyüme trendini aşarak üstel (eksponansiyel) bir ivme kazanmıştır. Tablo 1’de sunulan 2014-2023 dönemi verileri incelendiğinde, küresel rüzgâr enerjisi kurulu gücünün 2014 yılında yaklaşık 349 GW seviyesindeyken, 2023 yılı itibarıyla neredeyse üç katına çıkarak 1.017 GW (1 TW) eşliğini aştığı görülmektedir. Bu veriler, rüzgâr enerjisinin artık niş bir alternatif kaynak değil, baz yük santrallerinin enerji arzındaki payını ikame edebilecek ölçekte bir enerji kaynağı olduğunu kanıtlamaktadır.

Tablo 1: Bölgelere ve Ülkelere Göre Rüzgâr Enerjisi Kurulu Güç Gelişimi ve Kişi Başına Düşen Kapasite Analizi (2014-2023) (Central Intelligence Agency [CIA], n.d.; Global Wind Energy Council [GWEC], 2025; International Renewable Energy Agency [IRENA], 2024)

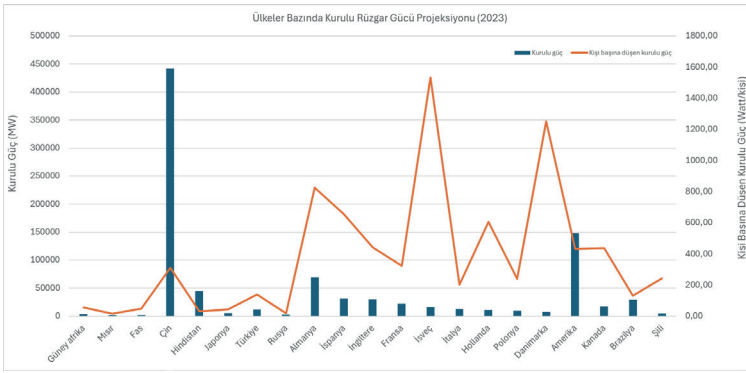
Kapasite (MW)	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2023 Nüfus	Kişi Başına Düşen Kurulu Rüzgâr Gücü (Watt/kişi)
Dünya	349418	416335	466956	515045	563840	622773	733719	824602	901231	1017199	8045311447	126,43
Afrika	2399	3320	3831	4578	5471	5528	6514	6909	7745	8654		
Güney Afrika	569	1079	1473	2094	2094	2094	2516	2495	3163	3442	60414495	56,97
Mısır	555	755	755	755	1130	1132	1380	1640	1643	1890	111247248	16,99
Fas	797	797	902	1022	1225	1225	1435	1471	1558	1858	37387585	49,70
Asya	124337	161805	184144	205017	229095	257670	331941	384757	426333	508452		
Çin	96819	131048	148517	164374	184665	209582	281993	328973	365964	441895	1416043270	312,06
Hindistan	22465	25088	28700	32848	35288	37505	38559	40067	41930	44736	1409128296	31,75
Japonya	2753	2809	3205	3483	3498	3952	4120	4262	4372	5232	123201945	42,47
Avrasya	3645	4525	5801	6566	7146	7783	9868	12652	13702	14305		
Türkiye	3630	4503	5751	6516	7005	7591	8832	10607	11396	11697	84119531	139,05
Rusya	10	11	11	11	52	102	945	1955	2218	2518	140820810	17,88
Avrupa	130198	143015	155727	170616	181787	196110	207896	221517	240278	257111		
Almanya	38614	44580	49435	55580	58721	60742	62201	63711	66163	69459	84119100	825,72
İspanya	22925	22943	22990	23124	23405	25590	26819	27908	30114	31028	47280433	656,25
İngiltere	13074	14305	16126	19585	21606	23887	24458	25748	28762	30215	68459055	441,36
Fransa	9201	10298	11567	13499	14900	16427	17535	18551	20811	22196	68374591	324,62
İsviçre	5088	5819	6435	6611	7300	8681	9976	12116	14279	16252	10589835	1534,68
İtalya	8683	9137	9384	9737	10230	10679	10871	11254	11821	12308	60964931	201,89
Hollanda	2865	3391	4257	4202	4393	484	6648	7674	8755	10749	17772378	604,81
Polonya	3836	4886	5747	5759	5766	5838	6298	6967	8150	9307	38746310	240,20
Danimarka	4886	5077	5245	5489	6123	6111	6259	7004	7084	7482	5973136	1252,61
Kuzey Amerika	76694	87252	97526	104261	111662	123597	139394	154433	164257	172327		
Amerika	64430	72767	81502	87831	94666	103836	118664	133019	141674	148020	341963408	432,85
Kanada	9694	11214	11973	12250	12816	13220	13735	14259	15265	16989	38794813	437,92
Güney Amerika	6521	9914	12916	15703	19117	20670	24201	29730	33572	39845		
Brezilya	4888	7633	10129	12304	14843	15438	17198	21161	24163	29135	220051512	132,40
Şili	732	907	1034	1305	1524	1620	2340	3137	3830	4510	18664652	241,63

Bölgesel bazda yapılan analizler, küresel rüzgâr endüstrisinde bir eksen kayması yaşandığını göstermektedir. 2014-2023 yılları arasında Asya kıtası, özellikle Çin'in agresif enerji politikalarıyla kurulu gücünü 124 GW'tan 508 GW'a çıkararak, küresel kapasitenin yarısından fazlasını tek başına barındırır hale gelmiştir. Buna karşılık, rüzgâr enerjisinin öncüsü olan Avrupa, aynı dönemde 130 GW'tan 257 GW'a ulaşarak istikrarlı ancak daha doygun bir büyüme profili sergilemiştir. Kuzey Amerika ise 2023 itibarıyla 172 GW seviyesine ulaşarak küresel pazardaki ağırlığını korumuştur. Ülkemiz Türkiye ise Avrasya bölgesindeki en dikkat çekici aktörlerden biri olarak, 2014 yılında 3.6 GW olan kurulu gücünü 2023 yılında 11.7 GW seviyesine taşıyarak yaklaşık %320'lik bir kapasite artışı gerçekleştirmiştir (Central Intelligence Agency [CIA], n.d.; Global Wind Energy Council [GWEC], 2025; International Renewable Energy Agency [IRENA], 2024).

1.3. Hacimsel büyüklük ve enerji yoğunluğu paradoksu

Ülkelerin rüzgâr enerjisi performansları değerlendirilirken, sadece toplam kurulu güç (Mutlak Kapasite) verisine odaklanmak yanıltıcı olabilir. Enerji dönüşümünün toplumsal tabana yayılma düzeyini ve teknolojinin penetrasyonunu anlamak için nüfusa oranla normalize edilmiş "Kişi başına düşen kurulu rüzgâr gücü (Watt/kişi)" verisi kritik bir indikatördür.

Şekil 1’de sunulan karşılaştırmalı analiz, mutlak kurulu güç ile kişi başına düşen güç arasındaki ters orantılı ilişkiyi ve farklı enerji politikalarının sonuçlarını açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 1: Seçilmiş Ülkeler İçin Toplam Rüzgâr Kurulu Gücü ve Kişi Başına Düşen Güç Kapasitesinin Karşılaştırmalı Analizi (2023 Verileri). (Central Intelligence Agency [CIA], n.d.; Global Wind Energy Council [GWEC], 2025; International Renewable Energy Agency [IRENA], 2024)

Şekil 1 incelendiğinde şu sonuçlar öne çıkmaktadır:

- **Hacim liderleri:** Mutlak kurulu güçte 441 GW ile dünya lideri olan Çin ve 148 GW ile ikinci sırada yer alan ABD, kişi başına düşen güçte sırasıyla 312 W/kişi ve 432 W/kişi değerleriyle orta sıralarda yer almaktadır.
- **Yoğunluk liderleri:** Buna karşın, toplam kapasitesi daha düşük olan İskandinav ülkeleri, kişi başına düşen güçte zirveyi oluşturmaktadır. İsveç (1.534 W/kişi) ve Danimarka (1.252 W/kişi) gibi ülkeler, Çin'den yaklaşık 4-5 kat daha yüksek bir yoğunluğa sahiptir.

Bu durum, İskandinav ve Avrupa ülkelerinde rüzgâr enerjisinin enterkonnekte sisteme ve toplumsal yaşama tam entegre olduğunu; Çin ve Hindistan gibi ülkelerde ise devasa yatırımlara rağmen pazarın henüz doyum noktasına ulaşmadığını ve büyük bir büyüme potansiyeli barındırdığını

göstermektedir. Türkiye ise 139 W/kişi değeri ile gelişmekte olan rüzgâr ekonomileri arasında yer almakta olup, Avrupa ortalamasını yakalamak için önemli bir potansiyele sahiptir.

1.4. Teknolojik evrim ve bölüm kapsamı

Söz konusu kapasite artışı, sadece türbin sayısının artmasıyla değil, birim türbin gücünün ve verimliliğinin artmasıyla mümkün olmuştur. 2000'li yılların başında kullanılan kW mertebesindeki türbinler, günümüzde yerini multi-megawatt (MW) seviyesindeki devasa yapılara bırakmıştır. Ancak bu büyüme, şebeke kararlılığı (grid stability) ve güç kalitesi açısından yeni mühendislik zorluklarını da beraberinde getirmiştir (Afridi ve ark., 2024).

Bu kitap bölümü, yukarıda özetlenen küresel büyümenin teknik altyapısını oluşturan modern rüzgâr enerjisi sistemlerini incelemeyi amaçlamaktadır. Bölüm kapsamında; rüzgârın kinetik enerjisinin mekanik güce dönüşümünü sınırlayan aerodinamik yasalar, modern türbinlerde kullanılan gelişmiş generatör topolojileri (DFIG, PMSG) ve bu sistemlerin şebeke ile uyumlu çalışmasını sağlayan güç elektroniği denetim yöntemleri detaylandırılacaktır.

2. Rüzgâr Enerjisinin Temelleri ve Aerodinamik Esaslar

Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinin (REDS) performansı, termodinamik yasaları ve akışkanlar mekaniği prensipleri üzerine inşa edilmiştir. Bu bölümde, rüzgârın kinetik gücünü ifade eden matematiksel modeller türetilecek ve bir rüzgâr türbininin erişebileceği maksimum verimliliği tanımlayan Betz Limiti'nin teorik ispatı yapılacaktır (Küçük, 2018).

2.1. Rüzgâr gücü denkleminin türetilmesi

Rüzgâr gücü, hareket halindeki hava kütesinin kinetik enerjisinden kaynaklanır. Bir m kütesinin v hızıyla hareketi sırasındaki kinetik enerjisi (E_k) Denklem 1 ile verilen fizik yasası ile ifade edilir.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Güç (P), enerjinin zamana göre değişimi (dE/dt) olarak tanımlanır. Rüzgâr akışında kütle sürekli yer değiştirdiği için, burada sabit bir kütle yerine

kütlesel debi ($m = dm / dt$), kavramı kullanılır. Belirli bir A kesit alanına sahip (örneğin türbin süpürme alanı) bir kontrol hacminden geçen hava akışını ele alalım. Hava yoğunluğu (ρ) ve akış hızı (v) sabit kabul edildiğinde, dt süresinde bu kesitten geçen hava kütlesi (dm); hacim (dV) ve yoğunluğun çarpımına eşittir. Hacim ise kesit alanı (A) ile alınan yolun ($dx = v \cdot dt$) çarpımıdır.

$$v = \frac{dx}{dt}, \quad \rho = \frac{dm}{dV}, \quad A = \frac{dV}{dx} \quad (2)$$

Denklem 2 deki ifadeler kütlesel debi denkleminde yerine konularak Denklem 3 elde edilir.

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \frac{\overbrace{(\rho \cdot dV)}^{dm}}{dt} = \frac{\rho \overbrace{(A \cdot dx)}^{dv}}{dt} = \frac{\rho \cdot A \cdot \overbrace{(v \cdot dx)}^{dx}}{dt} = \rho \cdot A \cdot v \quad (3)$$

Kütlesel debi ifadesi, güç denkleminde entegre edildiğinde rüzgârın taşıdığı anlık güç ($P_{rüzgar}$) türetilmiş olur.

$$\begin{aligned} P_{rüzgar} &= \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 = \frac{1}{2} (\rho A v) v^2 \\ P_{rüzgar} &= \frac{1}{2} \rho A v^3 \end{aligned} \quad (4)$$

Denklem 4, rüzgâr enerjisi mühendisliğinin temel yapı taşıdır ve rüzgâr gücünün, rüzgâr hızının küpü (v^3) ile orantılı olduğunu matematiksel olarak kanıtlar.

2.2. Betz limiti ispatı ve momentum teorisi

Bir rüzgâr türbini, rüzgârın gücünün tamamını mekanik güce dönüştüremez. Bunun teorik üst sınırını ispatlamak için Eyleyici Disk Teorisi (Actuator Disc Theory) ve Doğrusal Momentum (Linear Momentum) korunumu kullanılır (Carriveau, 2011; Chattot, 2014).

Kabul ve Varsayımlar:

1. Rüzgâr türbini, sonsuz incelikte geçirgen bir disk (actuator disc) olarak modellenir.
2. Akış, sürtünmesiz, sıkıştırılamaz ve kararlıdır.
3. Disk boyunca basınç düşer ($p^+ \rightarrow p^-$), ancak hız süreklidir.

Akış hızlarını şu şekilde tanımlayalım:

- v_1 : Türbinden çok önceki serbest akış hızı.
- v_2 : Türbin rotor düzlemindeki hız.
- v_3 : Türbinden çok sonraki akış hızı.

Rüzgâr, türbine yaklaşırken bir miktar yavaşlar. Rotor düzlemindeki hız (v_2), serbest akış hızının (v_1) belirli bir oranda azalmış halidir. Bu azalma eksenel indüksiyon faktörü (a) ile tanımlanır:

$$v_2 = v_1(1 - a) \quad (5)$$

Bernoulli denklemi ve momentumun korunumu uygulandığında, rotor düzlemindeki hızın (v_2), giriş (v_1) ve çıkış (v_3) hızlarının aritmetik ortalaması olduğu ispatlanabilir ($v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2}$). Buradan çıkış hızı (v_3) Denklem 6 ile tanımlanmaktadır.

$$v_3 = v_1(1 - 2a) \quad (6)$$

Denklem 6 a değerinin 0.5'ten büyük olamayacağını (aksi takdirde rüzgârın ters yöne akması veya durması gerekir) gösterir. Türbinden çekilen mekanik güç ($P_{Türbin}$), disk üzerindeki itki Kuvveti (F) ile diskteki hızın (v_2) çarpımına eşittir. Momentum teorisine göre itki kuvveti, kütsel debi ile hız değişiminin çarpımıdır ($F = \dot{m}(v_1 - v_3)$). Denklemdaki ($v_1 - v_3$) ifadesi sisteme giren ve çıkan hava arasındaki toplam hız farkıdır. Bu fark, Momentum değişimini (dolayısıyla kuvveti) meydana getirir.

$$P_{Türbin} = \underbrace{\left[\dot{m} \cdot (v_1 - v_3) \right]}_{Kuvvet (F)} \cdot v_2 = F \cdot v_2 = \left[\underbrace{\rho A v_2}_{\dot{m}} (v_1 - v_3) \right] \cdot v_2 \quad (7)$$

Denklem 7'deki v_2 ve v_3 ifadelerini a cinsinden yerine yazarsak Denklem 8 elde edilir.

$$\begin{aligned} P_{Türbin} &= \rho A [v_1 (1-a)] \cdot [v_1 - v_1 (1-2a)] \cdot [v_1 (1-a)] \\ P_{Türbin} &= \rho A v_1^3 (1-a)^2 (2a) = 2 \rho A v_1^3 a (1-a)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Rüzgâr türbin gücü, rüzgâr gücü ve verimlilik katsayısı arasındaki matematiksel ilişki Denklem 9 ile tanımlanmaktadır.

$$\begin{aligned} P_{Türbin} &= \rho A v_1^3 (1-a)^2 (2a) = 2 \rho A v_1^3 a (1-a)^2 \\ P_{Rüzgar} &= 0.5 \rho A v_1^3 \\ C_p &= \frac{P_{Türbin}}{P_{Rüzgar}} = \frac{2 \rho A v_1^3 a (1-a)^2}{0.5 \rho A v_1^3} = 4a (1-a)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

Maksimum güç katsayısını ($C_{p,max}$) bulmak için, C_p fonksiyonunun a ya göre türevi alınıp sıfıra eşitlenir.

$$\frac{dC_p}{da} = \frac{d}{da} [4a(1-2a+a^2)] = 4(1-4a+3a^2) = 0 \quad (10)$$

Bu ikinci dereceden denklemin $(3a^2 - 4a + 1 = 0)$ kökleri $(3a-1) \cdot (a-1) = 0$ şeklinde çarpanlara ayrılır. $a=1$ fiziksel olarak anlamsızdır (akış durur). Dolayısıyla optimum indüksiyon faktörü denklem 11 ile ifade edilmektedir (Küçük, 2018).

$$a_{opt} = \frac{1}{3} \quad (11)$$

Bu değer güç katsayısı denkleminde yerine konulduğunda Betz Limiti elde edilir.

$$C_{p,max} = 4 \left(\frac{1}{3} \right) \left(1 - \frac{1}{3} \right)^2 = \frac{16}{27} \cong 0.5926 \quad (12)$$

Bu ispat, hiçbir rüzgâr türbininin rüzgâr enerjisinin %59.3'ünden fazlasını mekanik güce dönüştüremeyeceğini matematiksel kesinlikle göstermektedir (Küçük, 2018).

2.3. Aerodinamik tork, kanat ucu hız oranı (λ) ve hatve açısı (β)

Rüzgâr türbinlerinde enerji dönüşüm zinciri, aerodinamik kuvvetlerin rotor mili üzerinde yarattığı dönme momenti (tork) ile başlar. Bu bölümde, tork ifadesi fiziksel yasalardan türetilcek ve sistemin performansını belirleyen iki temel boyutsuz parametre (λ ve β) analiz edilecektir.

Aerodinamik torkun oluşumu:

Rüzgâr türbini kanatları, uçak kanatlarına benzer kanat profili kesitine sahiptir. Rüzgâr akışı kanat yüzeyinden geçerken, üst ve alt yüzeyler arasında Bernoulli prensibi gereği bir basınç farkı oluşur. Bu fark, rotoru döndüren kaldırma kuvvetini (F_{lift}) ve harekete direnç gösteren sürüklenme kuvvetini (F_{drag}) doğurur. Klasik mekanikte güç (P), tork (T) ile açısal hızın (ω) çarpımıdır ($P = T \cdot \omega$). Daha önce türetilen güç denklemi ($P_{Türbin}$) kullanılarak aerodinamik tork (T_a) Denklem 13 ile ifade edilir (Küçük, 2018).

$$T_a = \frac{P_{Türbin}}{\omega} = \frac{0.5 \cdot \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta)}{\omega} \quad (13)$$

Denklem 13, kontrol mühendisliği açısından daha kullanışlı olan Tork Katsayısı (C_q) ile yeniden düzenlendiğinde Denklem 14 elde edilir.

$$T_a = 0.5 \cdot \rho \pi R^3 v^2 C_q(\lambda, \beta) \quad (14)$$

$$C_q = C_p / \lambda$$

Denklem 14 ten görüldüğü üzere sistemin performansı λ ve β parametrelerine doğrudan bağlıdır (Carriveau, 2011).

Kanat ucu hız oranı (Tip Speed Ratio - λ):

λ , türbin aerodinamiğinin en kritik işletme parametresidir. Kanadın en uç noktasındaki çizgisel hızın, serbest rüzgâr hızına oranı olarak tanımlanır:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (15)$$

Her türbin kanadının, maksimum verimliliği ($C_{p,max}$) sağladığı optimum bir λ değeri (λ_{opt}) vardır.

- λ değerinin optimum değerinin altında kaldığı durumda ($\lambda < \lambda_{opt}$) rüzgâr kanat aralarından etkileşime girmeden geçer (verim düşer).
- λ değerinin optimum değerinin üzerinde olduğu durumda ($\lambda > \lambda_{opt}$) kanatlar çok hızlı döndüğü için türbülans yaratır ve rüzgârı bloklar (verim düşer).

Maksimum Güç Noktası Takip algoritmaları (MGNT, MPPT), rüzgâr hızı değiştikçe rotor devrini (ω) ayarlayarak sistemi sürekli λ_{opt} noktasında tutmaya çalışır.

Hatve açısı (Pitch Angle - β):

Denklemdaki β parametresi, kanat kord hattı (chord line) ile rotor dönüş düzlemi arasındaki mekanik açıyı ifade eder. β , sistemin aktif kontrol değişkenidir.

- Optimum çalışma ($\beta \approx 0^\circ$): Nominal rüzgâr hızının altındaki (Partial Load) bölgelerde, maksimum kaldırma kuvvetini ve $C_{p,max}$ değerini yakalamak için kanat açısı genellikle sabit ve sıfıra yakın (örneğin 0° veya 2°) tutulur.

- Güç sınırlama ($\beta > 0^\circ$): Rüzgâr hızı nominal değerin üzerine çıktığında (Full Load), generatörü ve mekanik aksamı aşırı yükten korumak gerekir. Bu durumda "Pitch Kontrol" mekanizması devreye girer; β artırılır, kanadın rüzgarla yaptığı hücum açısı (angle of attack) değiştirilir ve aerodinamik kaldırma kuvveti kasten düşürülür. Bu sayede üretilen güç nominal değerde sabitlenir.

Aerodinamik analizler, rüzgârın kinetik enerjisinin mekanik güce dönüşümünde belirleyici olan fiziksel sınırları ve parametrik ilişkileri $C_p(\lambda, \beta)$ netleştirmiştir (Carriveau, 2011; Küçük, 2018). Buna karşın, rüzgâr rejimine bağlı olarak geniş bir aralıkta değişken devir ve moment karakteristiği sergileyen rotor çıkışının, sabit frekans ve gerilim genliği gerektiren enterkonnekte şebeke altyapısına doğrudan entegrasyonu teknik olarak mümkün değildir. Mekanik enerji kaynağı ile elektriksel yük arasındaki bu yapısal uyumsuzluğun giderilmesi ve sistem verimliliğinin elektriksel tarafta da sürdürülebilmesi; enerji dönüşüm zincirinin bir sonraki halkasını oluşturan elektromekanik dönüşüm teknolojilerinin ve güç elektroniği tabanlı kontrol arayüzlerinin incelenmesini gerektirmektedir.

3. Rüzgar Enerjisi Sistemlerinde Generatör Topolojileri ve Sınıflandırma

3.1. Elektromekanik dönüşüm perspektifi

Önceki bölümde detaylandırılan aerodinamik analizler, rüzgâr türbin rotoru tarafından üretilen mekanik gücün, rüzgar hızının küpü ile orantılı ($P \propto v^3$) ve doğası gereği değişken karakterli olduğunu ortaya koymuştur. Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemlerinin (REDS) temel amacı, bu değişken mekanik girişi, enterkonnekte şebekenin katı frekans ve gerilim toleranslarına uygun elektrik enerjisine dönüştürmektir. Bu dönüşüm sürecinde elektrik generatörleri, mekanik ve elektriksel sistemler arasındaki elektromekanik kuplajı sağlayan temel bileşenlerdir.

Bu bölümde, rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatör topolojileri; hız kontrol yetenekleri, güç elektroniği arayüzlerinin konfigürasyonu ve şebeke entegrasyon karakteristikleri açısından analiz edilecektir (Carriveau, 2011; Küçük, 2025).

3.2. Rüzgâr türbini topolojilerinin sınıflandırılması

Modern rüzgâr endüstrisinde kullanılan topolojiler, aerodinamik verimliliği artırma hedefi ve güç dönüştürücü teknolojisindeki gelişmeler paralelinde evrimleşmiştir. Literatürde bu sistemler, hız kontrol yeteneklerine

göre temel olarak dört ana sınıfta (Tip 1 – Tip 4) kategorize edilir. Bu sınıflandırmadaki temel belirleyici faktör, generatörün şebekeye doğrudan mı yoksa bir güç dönüştürücü arayüzü üzerinden mi bağlandığıdır.

3.3. Sabit hızlı sistemler (Tip-1: SKAG, SCIG)

Rüzgâr enerjisi teknolojisinin erken dönem uygulamalarını temsil eden ve "Danimarka Konsepti" olarak da bilinen bu yapı, tasarım sadeliği ve maliyet etkinliği nedeniyle uzun yıllar endüstri standardı olarak kullanılmıştır (Abu-Rub et al., 2014; Burton et al., 2021).

Yapısal mimari:

Tip-1 topolojisinde, bir Sincap Kafesli Asenkron Generatör (SKAG), (Squirrel Cage Induction Generator - SCIG), yükseltici bir dişli kutusu üzerinden türbin miline akuple edilir ve stator sargıları doğrudan şebekeye bağlanır.

Çalışma karakteristiği ve kısıtlar:

Asenkron generatörler, şebeke frekansı (f_s) tarafından belirlenen senkron hızın (n_s) çok küçük bir miktar üzerinde, kayma (s) bölgesinde çalışır:

$$n_s = \frac{120 f_s}{p}, \quad s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (16)$$

Tipik bir SKAG için kayma değeri tam yükte dahi %1-2 mertebesinde dir. Bu durum, rotor hızının (n_r) pratik olarak sabit kalmasına neden olur. Sabit hızlı çalışmanın getirdiği temel mühendislik dezavantajları şunlardır:

1. Düşük aerodinamik verim: Rüzgâr hızı değiştikçe rotor hızı değiştirilemediği için, sistem λ_{opt} noktasında tutulamaz ve C_p değeri düşer.
2. Mekanik stres: Rüzgâr hamlelerinden (wind gusts) kaynaklanan tork dalgalanmaları, elektriksel olarak sönümlenemediği için doğrudan mekanik aksama (dişli kutusu ve shaft) iletilir.
3. Reaktif güç tüketimi: Asenkron makinenin ihtiyaç duyduğu mıknatıslanma akımı şebekeden çekilir. Bu durum, şebeke gerilim kararlılığını bozar ve harici kompanzasyon ünitelerinin (kondansatör grupları veya STATCOM) kullanımını zorunlu kılar.

3.4. Sınırlı değişken hızlı sistemler (Tip-2: RSAG, WRIG)

Rüzgâr türbini teknolojisinin gelişim sürecinde, sabit hızlı Tip-1 sistemlerin mekanik yük problemlerini hafifletmek ve sınırlı da olsa bir hız kontrol yeteneği kazanmak amacıyla geliştirilen topolojidir. Endüstride "Opti-Slip" (Optimize Edilmiş Kayma) konsepti olarak da bilinen bu yapı, tam değişken hızlı sistemlere (Tip-3 ve Tip-4) geçişte önemli bir ara basamak olmuştur.

Yapısal mimari ve kontrol prensibi:

Tip-2 topolojisinde, Tip-1'den farklı olarak sincap kafesli rotor yerine, Rotoru Sargılı Asenkron Generatör (RSAG), (Wound Rotor Induction Generator - WRIG) kullanılır.

Generatörün stator sargıları yine doğrudan şebekeye bağlıdır. Ancak rotor sargıları kısa devre edilmek yerine, bilezikler ve fırçalar üzerinden seri bağlı harici bir değişken direnç bankasına aktarılır. Bu direnç bankasının etkin değeri, bir güç elektroniği anahtarlama elemanı (genellikle IGBT veya Tristör tabanlı bir kısıyıcı) tarafından kontrol edilir (Abu-Rub et al., 2014; Burton et al., 2021; Küçük, 2025).

İşletme karakteristiği:

Asenkron makine teorisine göre, rotor devresine eklenen dış direnç (R_{ext}), makinenin tork-hız karakteristiğini değiştirir ve devrilme torkunu sabit tutarak maksimum torkun oluştuğu kayma değerini (s_{max}) öteler.

Bu yöntem sayesinde:

1. Hız kontrol aralığı: Tip-1'de %1-2 olan kayma aralığı, Tip-2 sistemlerde yaklaşık %10 seviyesine kadar çıkarılabilir. Bu, türbinin ani rüzgâr hamlelerinde hızlanmasına izin vererek mekanik stresi sönmülmesini sağlar.
2. Yumuşak kalkış: Rotor direnci başlangıçta yüksek tutularak demeraj akımları sınırlandırılır ve şebekeye yumuşak bağlantı (soft start) sağlanır.

Dezavantajlar ve verimlilik sorunu:

Tip-2 sistemlerin modern santrallerde tercih edilmemesinin temel nedeni, enerji verimliliğindeki yapısal kısıttır. Rotor devresinde indüklenen ve kayma ile orantılı olan güç (P_{kayma}), Tip-3 sistemlerinde olduğu gibi şebekeye geri kazandırılmaz; aksine direnç bankası üzerinde ısı enerjisi olarak harcanır:

$$P_{kayıp} \approx s \cdot P_{gap} \quad (17)$$

Hız kontrol aralığı arttıkça (s arttıkça), dirençlerde harcanan güç ve dolayısıyla sistemin soğutma ihtiyacı artar. Bu durum, Tip-2 topolojisinin hız kontrol yeteneğini dar bir bantla sınırlar ve enerji verimliliğini düşürür.

3.5. Kısmi ölçekli güç dönüştürücülü sistemler (Tip-3: ÇBAG,DFIG)

Değişken hızlı rüzgâr türbini teknolojisinde bir endüstri standardı haline gelen Tip-3 topolojisi, literatürde Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG), (Doubly Fed Induction Generator - DFIG) olarak adlandırılır. Bu yapının en belirgin üstünlüğü, toplam sistem gücünün sadece bir kısmını işleyen optimize edilmiş bir güç dönüştürücü arayüzü ile geniş bir hız aralığında kontrol imkânı sunmasıdır (Abu-Rub et al., 2014; Burton et al., 2021; Küçük, 2025).

Generatör ve güç dönüştürücü yapılandırması:

ÇBAG topolojisinde, rotoru sargılı bir asenkron generatör kullanılır. Sistemin güç akışı iki farklı yol üzerinden gerçekleşir:

1. Stator devresi: Doğrudan şebekeye bağlıdır ve nominal gücü sabit frekansta şebekeye aktarır.
2. Rotor devresi: Bilezikler ve fırçalar üzerinden, "Sırt Sırta" (Back-to-Back) bağlı iki yönlü bir güç dönüştürücü bloğu aracılığıyla şebekeye entegre edilir.

Bu mimaride, güç dönüştürücünün anma gücü ($S_{dönüştürücü}$), toplam generatör gücünün (S_{gen}) tamamına değil, sadece rotor üzerinden akan kayma gücüne (P_{kayma}) göre boyutlandırılır. Tipik bir ÇBAG tasarımında izin verilen kayma aralığı $s \approx \pm \%30$ civarındadır. Dolayısıyla güç dönüştürücü kapasitesi:

$$S_{dönüştürücü} \approx |s_{max}| \cdot S_{gen} \approx 0.30 \cdot S_{gen} \quad (18)$$

Bu özellik, tam ölçekli (Tip-4) sistemlere kıyasla güç elektroniği maliyetlerinde ve anahtarlama kayıplarında önemli bir azalma sağlar.

Güç elektroniği arayüzü (RSC ve GSC):

Rotor devresi ile şebeke arasındaki enerji transferi, ortak bir DC bara (DC Link) üzerinden birbirine bağlı iki adet Gerilim Kaynaklı Dönüştürücü (VSC) ile yönetilir:

- Rotor tarafı güç dönüştürücü (Rotor Side Converter - RSC): Generatörün rotor sargılarına bağlıdır. Temel fonksiyonu, rotor akımlarının genliğini ve frekansını kontrol ederek elektromanyetik torku ve dolayısıyla türbin hızını regüle etmektir. Ayrıca stator terminallerinden şebekeye basılan reaktif gücün kontrolü de RSC üzerinden sağlanır.
- Şebeke tarafı güç dönüştürücü (Grid Side Converter - GSC): Şebeke tarafına bağlıdır. Temel görevi, DC bara gerilimini (V_{dc}) sabit tutmak ve rotor gücünün şebekeye aktarımını sağlamaktır. GSC, gerektiğinde şebeke ile reaktif güç alışverişi yaparak Güç Faktörü Düzeltme (PFC) işlevi de görebilir.

Çift yönlü güç akışı ve işletme modları:

ÇBAG sisteminde rotor gücü (P_{rotor}), çalışma hızına bağlı olarak yön değiştirir:

- *Senkron-Altı Çalışma (Sub-synchronous, $s > 0$):* Rotor hızı senkron hızdan düşüktür. Bu modda rotor şebekeden enerji çeker ($P_{rotor} > 0$).
- *Senkron-Üstü Çalışma (Super-synchronous, $s < 0$):* Rotor hızı senkron hızdan yüksektir. Bu modda rotor şebekeye enerji basar ($P_{rotor} < 0$).

Sonuç olarak, şebekeye aktarılan toplam aktif güç ($P_{şebeke}$), stator ve rotor güçlerinin cebirsel toplamıdır:

$$P_{şebeke} = P_{stator} + P_{rotor} = P_{stator} (1 - s) \quad (19)$$

3.6. Tam ölçekli güç dönüştürücülü sistemler (Tip-4)

Rüzgâr türbini teknolojisindeki en radikal mimari değişiklik, generatör ile şebeke arasındaki doğrudan elektriksel bağlantının tamamen kaldırıldığı Tip-4 topolojisi ile gerçekleşmiştir. Bu yapıda, generatörde üretilen gücün tamamına yakını, tam ölçekli bir güç dönüştürücü üzerinden işlenerek şebekeye aktarılır. Bu konfigürasyon, aerodinamik rotor hızını şebeke

frekansından tamamen bağımsız hale getirerek maksimum operasyonel esneklik sağlar (Abu-Rub et al., 2014; Burton et al., 2021; Küçük, 2025).

Yapısal mimari ve generatör seçimi:

Tip-4 topolojisi, farklı generatör tipleriyle uygulanabilir olsa da, endüstriyel standart büyük ölçüde Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör (MSG) (Permanent Magnet Synchronous Generator - PMSG) yönüne kaymıştır.

Özellikle Doğrudan Sürürlü MSG uygulamaları, Tip-4 mimarisinin en gelişmiş halini temsil eder. Bu yapıda:

- Dişli kutusu eliminasyonu: Generatör, türbin miline doğrudan akuple edilir. Dişli kutusunun kaldırılması, rüzgâr türbinlerindeki en büyük arıza kaynağını ve bakım maliyetini elimine eder.
- Çok kutuplu tasarım: Düşük devirde (örneğin 10-20 rpm) şebeke frekansına uygun gerilim üretebilmek için generatör çok yüksek kutup sayısına (örneğin 60-100 kutup) sahip olacak şekilde büyük çaplı tasarlanır.

Güç elektroniği arayüzü (tam izolasyon (Decoupling)):

Sistemin kalbini, generatör ile şebeke arasına yerleştirilen "Back-to-Back" (Sırt Sırt) bağlı iki adet Gerilim Kaynaklı Dönüştürücü (VSC) oluşturur:

1. Makine tarafı güç dönüştürücü (Machine Side Converter - MSC): Generatör çıkışına bağlıdır. Temel görevi, generatörün elektromanyetik torkunu kontrol ederek türbinin optimum hızda dönmesini sağlamaktır (MGNT Kontrolü). MSG kullanıldığında, mıknatıslanma akımı rotor mıknatısları tarafından sağlandığı için MSC sadece aktif tork üreten akım bileşenini (i_q) kontrol eder.
2. Şebeke tarafı güç dönüştürücü (Grid Side Converter - GSC): Şebeke tarafına bağlıdır. DC bara gerilimini sabit tutar ve şebekeye aktarılan aktif/reaktif gücü yönetir.

Tip-3 sisteminden en büyük farkı; generatör frekansının şebeke frekansından tamamen izole edilmiş olmasıdır. Şebekedeki bir arıza (örneğin gerilim çökmesi), generatörü doğrudan etkilemez; güç dönüştürücü bir tampon görevi görerek generatörü korur.

Avantajlar ve teknik üstünlükler:

- Üstün şebeke uyumluluğu: Gücün tamamı güç elektroniği devresi üzerinden geçtiği için, şebeke yönetmeliklerinin talep ettiği Düşük Gerilimde Kalma (Fault Ride Through - FRT) ve reaktif güç desteği gereksinimleri en üst seviyede karşılanır.
- Bakım kolaylığı: Doğrudan sürürlü SMSG yapısında dişli kutusu, bilezik ve fırça bulunmaz. Bu durum, özellikle erişimin zor ve maliyetli olduğu deniz üstü (offshore) santraller için kritik bir avantajdır.
- Geniş hız aralığı: Teorik olarak 0 ile nominal hız arasındaki tüm devirlerde güç kontrolü yapılabilir.

Dezavantajlar:

Bu topolojinin temel dezavantajı, toplam sistem gücünü taşıyacak kapasitede olması gereken güç dönüştürücünün yüksek maliyeti ve hacmidir. Ayrıca, gücün tamamının anahtarlama elemanlarından geçmesi, Tip-3 sisteme kıyasla iletim ve anahtarlama kayıplarını bir miktar artırır. Ancak SMSG'nin yüksek verimi ve dişli kutusu kayıplarının olmaması, toplam sistem veriminde bu açığı kapatmaktadır.

4. Rüzgar Enerjisi Sistemlerinde Denetim Stratejileri ve MGNT Algoritmaları

4.1. Giriş ve denetim hiyerarşisi

Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemlerinin performansı; stokastik rüzgar girişine rağmen, sistemin maksimum verimlilikte çalışmasını ve şebeke güvenliğini sağlayan denetim yapısının başarısına bağlıdır. Modern bir rüzgâr türbininin denetim mimarisi, farklı zaman sabitlerine sahip iki temel katmandan oluşur:

1. Elektriksel denetim (Hızlı Dinamikler): Milisaniyeler mertebesinde gerçekleşen, güç dönüştürücüler üzerinden generatörün tork ve akı kontrolünü sağlayan süreçtir.
2. Mekanik denetim (Yavaş Dinamikler): Saniyeler mertebesinde gerçekleşen, kanat açısı (pitch) ve yaw mekanizması üzerinden aerodinamik gücün sınırlandırılmasını sağlayan süreçtir.

Bu bölümde, sistemin çalışma bölgelerine göre uygulanan kontrol stratejileri, Vektör Kontrolü (FOC) teorisi ve MGNT algoritmaları analiz edilecektir.

4.2. Türbin çalışma bölgeleri

Bir rüzgâr türbininin kontrol stratejisi, anlık rüzgâr hızının (v) nominal rüzgâr hızına (v_{nom}) göre konumuna bağlı olarak belirlenir.

- Bölge 2 (Kısmi Yük Bölgesi / $v_{cut} < v < v_{nom}$):

Amaç, mevcut rüzgârdan maksimum enerjiyi çekmektir. Burada kanat açısı sabit tutulur ($\beta \approx 0^\circ$) ve generatör torku kontrol edilerek rotor hızı, λ_{opt} yakalayacak şekilde sürekli değiştirilir.

- Bölge 3 (Tam Yük Bölgesi / $v_{nom} < v < v_{cut-out}$):

Amaç, türbini ve generatörü aşırı mekanik/elektiriksel yüklerden korumaktır. Rüzgâr hızı artsa bile üretilen güç nominal değerde (P_{nom}) sabitlenir. Bu işlem, Kanat Açısı (Pitch) Kontrolü ile sağlanır.

4.3. Generatör tarafı denetimi: alan yönlendirmeli kontrol (FOC)

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde (Tip-3 ve Tip-4), generatör torkunun hassas kontrolü için endüstri standardı olarak Alan Yönlendirmeli Kontrol (Field Oriented Control - FOC) veya diğer adıyla vektör kontrolü kullanılır (Küçük, 2018, 2025).

Matematiksel model ve dönüşümler:

FOC yönteminin temeli, üç fazlı (abc) alternatif akım büyüklüklerinin, matematiksel dönüşümlerle senkron hızda dönen iki eksenli (dq) referans çerçevesine taşınmasına dayanır. Bu sayede AC makine, bir DC motor sadeliğinde kontrol edilebilir hale gelir.

Clarke ve Park dönüşümleri kullanılarak stator akımları (i_{abc}), akı ve tork bileşenlerine ayrıştırılır:

- d-ekseni akımı (i_d): Manyetik akıyı oluşturan bileşendir. MSG sistemlerinde genellikle i_d referansı ile sürülerek tork verimliliği maksimize edilir.
- q-ekseni akımı (i_q): Elektromanyetik torku üreten aktif bileşendir.

Elektromanyetik tork (T_e), bu iki bileşenin fonksiyonu olarak ifade edilir:

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d) \quad (20)$$

Burada p kutup çifti sayısını, ψ ise manyetik akı bağlantılarını temsil eder. Denetleyici, referans tork değerini (T_{ref}) üretmek için doğrudan i_q akımını kontrol eder (Küçük, 2025).

4.4. MGNT algoritmaları

Bölge 2'de (Kısmi Yük), türbinin $C_{p,max}$ verimliliğinde çalışabilmesi için rotor hızının rüzgâr hızını takip etmesi gerekir. Literatürde en yaygın kullanılan MGNT yöntemleri şunlardır (Küçük, 2025):

Kanat ucu hız oranı (TSR) kontrolü:

Bu yöntem, rüzgâr hızının (v) bir anemometre ile ölçülmesine dayanır. Referans rotor hızı (ω_{ref}), Bölüm 2'de tanımlanan λ_{opt} değeri kullanılarak hesaplanır:

$$\omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot v}{R} \quad (21)$$

- Avantajı: Hızlı dinamik tepki verir.
- Dezavantajı: Anemometre ölçümleri türbülans nedeniyle gürültülüdür ve rüzgârın rotora ulaşmadan önceki hızını tam temsil etmeyebilir. Ayrıca sensör maliyeti ve kalibrasyon ihtiyacı getirir.

Optimum tork kontrolü (OTC):

Endüstriyel uygulamalarda en sık tercih edilen, rüzgâr hızı ölçümüne ihtiyaç duymayan (sensorless) yöntemdir. Aerodinamik analizlerden bilindiği üzere, optimum çalışma noktasında mekanik güç $P_{mek} \propto \omega^3$ olduğuna göre, optimum tork (T_{opt}) rotor hızının karesiyle orantılıdır:

$$T_{opt} = \frac{P_{opt}}{\omega} = k_{opt} \cdot \omega^2 \quad (22)$$

Burada k_{opt} , türbinin aerodinamik özelliklerine (hava yoğunluğu, yarıçap, $C_{p,max}$) bağlı sabit bir kazanç katsayısıdır. Denetleyici, anlık rotor hızını ölçer, karesini alır ve k_{opt} ile çarparak referans torku (T_{ref}) generatöre uygular (Küçük, 2025).

Değiştir ve gözle (Perturb and Observe - P&O):

Rüzgâr hızı veya türbin parametreleri hakkında bilgi gerektirmeyen bir "tepe tırmanma" (hill climbing) algoritmasıdır. Rotor hızı küçük bir adım ($\Delta\omega$) değiştirilir ve güçteki değişim (ΔP) gözlemlenir:

- Eğer güç artıyorsa ($\Delta P > 0$), değişim yönü doğrudur, aynı yönde devam edilir.
- Eğer güç azalıyorsa ($\Delta P < 0$), değişim yönü terstir, hız diğer yönde değiştirilir.

Bu yöntemin temel dezavantajı, optimum nokta etrafında sürekli salınım yapması ve ani rüzgâr değişimlerinde yönü karıştırabilmesidir (Küçük, 2025).

4.5. Aerodinamik güç sınırlama: Pitch kontrol

Rüzgâr hızı nominal değerın üzerine çıktığında (Bölge 3), generatörü aşırı yüklenmeden korumak için aerodinamik gücün sınırlandırılması gerekir. Bu işlem, kanatların rüzgarla yaptığı açının (β) aktif olarak değiştirilmesiyle sağlanır.

Pitch kontrolcüsü genellikle bir PI (Oransal-İntegral) denetleyici yapısındadır. Rotor hızı veya generatör gücü nominal değeri aştığında oluşan hata sinyali ($e = \omega_{ölçülen} - \omega_{nominal}$), PI denetleyiciye girer. Denetleyici, kanatları yelkene alma pozisyonuna doğru sürerek kaldırma kuvvetini düşürür ve rotorun hızlanmasını engeller.

5. Rüzgâr Enerjisi Sistemlerinin Şebeke Entegrasyonu Ve Güç Kalitesi

5.1. Giriş ve modern şebeke gereksinimleri

Geleneksel güç sistemlerinde rüzgâr enerjisi santralleri, toplam kurulu güç içindeki paylarının düşük olması nedeniyle uzun süre ihmal edilebilir bir negatif yük olarak değerlendirilmiş ve şebeke dinamikleri üzerindeki etkileri sınırlı kabul edilmiştir. Ancak rüzgâr enerjisinin kurulu güç içindeki payının hızla artmasıyla birlikte, bu santrallerin iletim sistemi kararlılığı üzerindeki etkileri kritik bir mühendislik problemi hâline gelmiştir (Ackermann, 2012).

Günümüzde İletim Sistemi Operatörleri (Transmission System Operators – TSO), rüzgâr santrallerinden yalnızca aktif güç üretmelerini değil; aynı zamanda gerilim regülasyonuna katkı sağlamalarını, frekans sapmalarına dinamik tepki vermelerini ve şebekede meydana gelen arıza koşullarında sistemden ayrılmadan şebekeyi desteklemelerini talep etmektedir. Bu beklentiler, rüzgâr türbinlerinin klasik üretim birimleri olmaktan çıkıp, güç elektroniği tabanlı aktif şebeke bileşenleri olarak değerlendirilmesini zorunlu kılmıştır (Ackermann, 2012; Anaya-Lara et al., 2019; Teodorescu et al., 2011).

Bu bölümde, rüzgâr türbinlerinin enterkonnekte sisteme entegrasyonunu düzenleyen şebeke yönetmelikleri, arıza koşullarında sistem davranışını tanımlayan Düşük Gerilimde Kalma (Low Voltage Ride Through – LVRT) gereksinimleri ve güç elektroniği kaynaklı güç kalitesi konuları ele alınmaktadır (Teodorescu et al., 2011).

5.2. Şebeke yönetmelikleri

Şebeke yönetmelikleri, rüzgâr enerji santrallerinin elektrik şebekesine entegrasyonu sırasında Ortak Bağlantı Noktasında (Point of Common Coupling – PCC) sağlaması gereken teknik ve işletme kriterlerini tanımlayan düzenleyici dokümanlardır. Bu yönetmelikler; iletim sisteminin güvenilirliğini, kararlılığını ve güç kalitesini korumayı amaçlar. Uluslararası ölçekte ENTSO-E ve IEC 61400-21 standartları referans alınırken, Türkiye’de bu gereksinimler Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği ve TEİAŞ teknik şartnameleri ile tanımlanmaktadır (Ackermann, 2012; Anaya-Lara et al., 2019; Teodorescu et al., 2011).

Modern şebeke yönetmelikleri, rüzgâr türbinlerinden yalnızca enerji üretimi değil, aynı zamanda aktif şebeke destek fonksiyonları da talep etmektedir. Bu kapsamda bir rüzgâr türbininden temel olarak aşağıdaki üç yetenek beklenir:

1. Aktif güç kontrolü: Şebeke frekansının nominal değerine üzerine çıkması durumunda ($f > f_{nom}$), türbinin aktif güç çıkışını kontrollü şekilde azaltarak frekans regülasyonuna katkı sağlaması.
2. Reaktif güç yeteneği: Şebeke geriliminin regülasyonu amacıyla, türbinin kapasitif veya endüktif, reaktif güç sağlayabilmesi ve belirlenen P–Q çalışma bölgeleri içerisinde işletilebilmesi.
3. Arıza dayanımı (Fault Ride Through): Şebekede meydana gelen kısa süreli kısa devreler veya gerilim çökmesi durumlarında, türbinin belirli sınırlar dâhilinde şebekeden ayrılmadan çalışmaya devam etmesi.

5.3. Düşük gerilimde kalma (Low Voltage Ride Through - LVRT)

Güç sistemlerinde en sık karşılaşılan bozucu olaylardan biri, kısa süreli gerilim çökmesi (voltage dip/sag) vakalarıdır. Geleneksel tip rüzgâr türbinlerinde (Tip-1), bu tür gerilim düşümleri sırasında koruma sistemleri türbini hızlı bir şekilde şebekeden ayırmaktaydı. Ancak yüksek penetrasyonlu rüzgâr enerjisi sistemlerinde, büyük kurulu gücün ani olarak devreden çıkması, sistem frekansı ve gerilimi üzerinde ciddi kararlılık problemlerine ve zincirleme kesintilere yol açabilmektedir.

Bu riskleri azaltmak amacıyla LVRT gereksinimleri geliştirilmiştir. LVRT, rüzgâr türbinlerinin şebekede meydana gelen belirli derinlikteki ve süredeki gerilim çökmesi olaylarında, şebekeye bağlı kalmaya devam etmesini zorunlu kılar (Ackermann, 2012; Anaya-Lara et al., 2019; Teodorescu et al., 2011).

LVRT karakteristiği:

LVRT karakteristiği, bir rüzgâr türbininin şebeke geriliminin zamana bağlı değişimine karşı göstermesi gereken minimum dayanım seviyesini tanımlar. Bu karakteristik, gerilim çökmesinin derinliği ve süresine bağlı olarak türbinin şebekeye bağlı kalma zorunluluğunu belirler.

Bir şebeke arızasının başlangıç anında ($t = 0$), ortak bağlantı noktasındaki (Point of Common Coupling – PCC) gerilim, nominal değerinin çok altına, hatta teorik olarak sıfıra kadar düşebilir. LVRT gereksinimlerine göre, türbin bu tür bir gerilim çökmesi sırasında, belirlenen minimum süre boyunca (örneğin 150 ms mertebesinde) şebekeden ayrılmaksızın bağlı kalmak zorundadır. Bu süre, arızanın temizlenmesi ve şebeke geriliminin toparlanması için kritik öneme sahiptir (Teodorescu et al., 2011).

Gerilim toparlanma sürecine girdiğinde, türbinin davranışı da kontrollü bir şekilde düzenlenmelidir. Şebeke gerilimi kademeli olarak yükselirken, rüzgâr türbininin aktif güç üretimini ani sıçramalar oluşturmaktan artırmaması beklenir. Bu süreçte, şebeke kodlarının izin verdiği ölçüde reaktif güç veya akım desteği sağlanarak gerilim toparlanmasına katkı verilmesi de istenebilir. Gerilim nominal seviyelere ulaştığında ise türbin normal işletme koşullarına geri döner.

Bu şekilde tanımlanan LVRT karakteristiği, rüzgâr türbinlerinin yalnızca enerji üreten birimler değil, aynı zamanda şebeke kararlılığına aktif katkı sağlayan unsurlar olarak çalışmasını mümkün kılar (Teodorescu et al., 2011).

Dinamik reaktif akım enjeksiyonu:

Yönetmelikler sadece bağlı kalmayı değil, aynı zamanda şebeke geriliminin toparlanmasına destek olmayı da şart koşar. Gerilim çökmesi sırasında güç dönüştürücü, aktif güç (P) üretimini durdurup, şebekeye kapasitif reaktif akım basmalıdır.

5.4. Reaktif güç kapasitesi ve P-Q karakteristikleri

Modern rüzgâr türbinleri, kullanılan generatör ve güç elektroniği topolojisine bağlı olarak şebekeye reaktif güç desteği sağlayabilmektedir. Ancak bu yetenek, Tip-3 ve Tip-4 türbinlerde farklı fiziksel ve elektriksel mekanizmalarla gerçekleştirilir.

Tip-4 rüzgâr türbinlerinde, generatör şebekeden tamamen izole edilmiş olup, şebeke ile enerji alışverişi tam ölçekli bir güç dönüştürücüsü aracılığıyla sağlanır. Bu yapı sayesinde şebeke tarafı dönüştürücü, aktif güç üretiminden bağımsız olarak reaktif güç üretimi veya tüketimi gerçekleştirebilir. Uygun işletme koşullarında ve dönüştürücü sınırları dâhilinde, Tip-4 türbinler gerilim regülasyonu amacıyla STATCOM benzeri bir davranış sergileyerek şebekeye reaktif güç desteği sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, sağlanabilecek reaktif güç miktarı dönüştürücünün anma gücü, akım ve termal sınırları ile DC bara geriliminin sürdürülebilirliği tarafından sınırlandırılmaktadır (Ackermann, 2012; Anaya-Lara et al., 2019; Teodorescu et al., 2011).

Tip-3 rüzgâr türbinlerinde ise stator sargıları doğrudan şebekeye bağlıdır ve reaktif güç alışverişi esas olarak asenkron makinenin elektromanyetik özellikleri üzerinden gerçekleşir. Rotor tarafı dönüştürücü, rotor akımlarını kontrol ederek statorun reaktif güç üretim veya tüketim miktarını ayarlayabilir; ancak bu kontrol yeteneği rotor dönüştürücüsünün sınırlı anma gücü ve akım kapasitesi ile kısıtlıdır. Bu nedenle Tip-3 türbinlerin reaktif güç kapasitesi, stator akım sınırları, dönüştürücünün akım limitleri, şebeke gerilimi ve çalışma noktası gibi parametrelere bağlıdır ve tam ölçekli bir STATCOM davranışı göstermeleri mümkün değildir (Teodorescu et al., 2011).

Rüzgâr türbinlerinin aktif ve reaktif güç üretim sınırları, genellikle P-Q kapasite eğrileri (D-eğrileri) ile ifade edilir. Bu eğriler, türbinin çalışma noktasına bağlı olarak sağlayabileceği maksimum ve minimum reaktif güç değerlerini tanımlar. Tip-4 türbinlerde P-Q kapasite eğrisi ağırlıklı olarak güç dönüştürücünün akım ve termal limitleri ile DC bara gerilimi kısıtları tarafından belirlenirken, Tip-3 türbinlerde bu sınırlar makinenin elektromanyetik karakteristikleri, stator ve rotor akım limitleri ile

dönüştürücü kapasitesinin birleşik etkisi sonucu oluşur. Her iki türbin tipinde de P–Q karakteristikleri, ilgili şebeke kodlarında tanımlanan gerilim destek gereksinimleriyle uyumlu olacak şekilde sınırlandırılmaktadır.

Tip-3: Rüzgâr türbinlerinde reaktif güç alışverişi ağırlıklı olarak stator üzerinden gerçekleşir. Rotor tarafı dönüştürücü, rotor akımlarını kontrol ederek statorun reaktif güç üretimini düzenlerken, bu kapasite makinenin elektromanyetik sınırları ve rotor dönüştürücünün akım limitleriyle kısıtlanır.

Tip-4: Rüzgâr türbinlerinde şebeke tarafı dönüştürücü, aktif güç üretimi bulunmadığı durumlarda dahi, dönüştürücünün anma gücü ve DC-link koşullarıyla sınırlı olmak üzere reaktif güç sağlayabilmektedir. Bu özellik, uygun işletme koşulları ve şebeke kodları çerçevesinde, rüzgâr türbinlerinin gerilim desteği gibi yan hizmetlerde kullanılabilmesine olanak tanır (Teodorescu et al., 2011).

5.5. Senkronizasyon: Faz kilitlemeli döngü (PLL)

Şebekeye bağlı çalışan güç elektroniği tabanlı rüzgâr türbinlerinde, kararlı ve güvenilir bir işletme için temel gereksinimlerden biri, dönüştürücünün şebeke gerilim vektörü ile doğru şekilde senkronize edilmesidir. Bu senkronizasyon işlemi, yaygın olarak Faz Kilitlemeli Döngü (Phase Locked Loop – PLL) algoritmaları aracılığıyla gerçekleştirilir.

PLL yapısı, Ortak Bağlantı Noktasında (Point of Common Coupling – PCC) ölçülen üç fazlı şebeke gerilimlerini kullanarak, şebekenin anlık faz açısını (θ_{grid}) ve frekansını gerçek zamanlı olarak tahmin eder. Elde edilen faz açısı bilgisi, akım ve gerilim büyüklüklerinin senkron referans ekseninde ifade edilmesini sağlayan dq dönüşümleri için temel referans niteliğindedir. Bu bağlamda PLL, Bölüm 4’te ele alınan Vektör Kontrolü yapısının ayrılmaz bir bileşeni olarak görev yapar.

Ancak, zayıf şebeke koşullarında, gerilim harmoniklerinin ve asimetrielerin belirgin olduğu durumlarda, PLL algoritmalarının dinamik davranışı sistem kararlılığını doğrudan etkileyebilmektedir. PLL’in yanlış faz takibi veya aşırı gecikmeli tepki vermesi, akım regülatörlerinde salınımlara, reaktif güç kontrolünde kararsızlığa ve hatta dönüştürücünün korumaya gitmesine neden olabilir. Bu nedenle modern rüzgâr türbini uygulamalarında, geliştirilmiş PLL yapıları (örneğin SRF-PLL, DSOGI-PLL veya adaptif PLL algoritmaları) tercih edilerek, bozucu şebeke koşulları altında dahi kararlı senkronizasyon sağlanması hedeflenmektedir (Anaya-Lara et al., 2019; Teodorescu et al., 2011).

5.6. Güç kalitesi: harmonikler ve THB

Güç elektroniği tabanlı rüzgâr türbinleri, enerjiyi şebekeye aktarmak amacıyla yüksek frekanslı anahtarlama yapan yarı iletken anahtarlar kullanır. Bu anahtarlama işlemi, genellikle Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation – PWM) prensibine dayanır ve doğası gereği şebekeye harmonik bileşenlerin enjekte edilmesine neden olur. Şebekeye yayılan harmonikler; transformatörlerde ek bakır ve demir kayıplarına, iletim hatlarında aşırı ısınmaya, koruma ve ölçü sistemlerinin hatalı çalışmasına ve belirli frekanslarda rezonans oluşma riskine yol açabilmektedir. Bu nedenle güç kalitesi, modern rüzgâr santrallerinin şebeke entegrasyonunda kritik bir tasarım kriteri olarak ele alınmaktadır (Teodorescu et al., 2011).

Uluslararası standartlar, şebekeye enjekte edilen akım harmoniklerinin sınırlarını açık şekilde tanımlamaktadır. Özellikle IEEE 519 ve IEC 61000-3-6 standartları kapsamında, rüzgâr türbinlerinin PCC noktasındaki Toplam Harmonik Bozulma (Total Harmonic Distortion – THD) değerinin genellikle %5'in altında tutulması zorunlu kılınmaktadır. Bu gereksinimlerin sağlanabilmesi için, güç dönüştürücü çıkışında çeşitli filtreleme teknikleri uygulanır. En yaygın çözümler arasında L tipi filtreler, daha yüksek bastırma performansı sunan LCL filtreler ve dinamik performansı artırmak amacıyla kullanılan aktif filtreleme yaklaşımları yer almaktadır. Filtre tasarımı; anahtarlama frekansı, şebeke empedansı, dönüştürücü gücü ve kararlılık kriterleri göz önünde bulundurularak optimize edilmekte, böylece hem harmonik emisyonlar sınırlandırılmakta hem de sistemin dinamik cevabı korunmaktadır (Teodorescu et al., 2011).

6. Sonuçlar, Değerlendirme ve Gelecek Vizyonu

6.1. Genel değerlendirme

Bu çalışmada, Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemleri aerodinamik enerji yakalama mekanizmalarından başlayarak elektromekanik dönüşüm süreçleri, güç elektroniği topolojileri ve şebeke entegrasyon dinamikleri kapsamında bütüncül bir bakış açısıyla incelenmiştir. Yapılan analizler, rüzgâr türbinlerinin günümüzde yalnızca mekanik enerji üreten yapılar olmaktan çıkarak, gelişmiş denetim algoritmalarıyla yönetilen ve şebeke kararlılığına aktif katkı sağlayan güç elektroniği tabanlı enerji sistemlerine dönüştüğünü ortaya koymaktadır.

Özellikle tam ölçekli dönüştürücüye sahip Tip-4 topolojilerinin ve vektör kontrol tekniklerinin yaygınlaşması, rüzgâr enerjisinin enerji sistemleri içindeki rolünü önemli ölçüde arttırmıştır. Bu gelişmeler, rüzgâr santrallerinin yalnızca değişken bir enerji kaynağı değil, aynı zamanda şebeke destek fonksiyonları sunabilen stratejik üretim birimleri olarak değerlendirilmesini mümkün kılmaktadır.

6.2. Teknoloji trendleri: Devleşme ve deniz üstü (Offshore) sistemler

Rüzgâr enerjisi endüstrisindeki temel eğilimlerden biri, Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti'nin (LCOE) düşürülmesi amacıyla türbin başına düşen kurulu gücün artırılmasıdır. Karasal uygulamalar, lojistik ve kurulum kısıtları nedeniyle genellikle 5–6 MW güç seviyelerinde doygunluğa ulaşırken, deniz üstü (offshore) rüzgâr türbinlerinde 15 MW ve üzeri güç seviyeleri ile 200 metreyi aşan rotor çapları ticari projelerde yaygınlaşmaktadır.

Bu ölçek büyümesi, güç elektroniği ve enerji iletim altyapılarında yeni tasarım yaklaşımlarını zorunlu kılmaktadır. Düşük gerilim seviyelerinde (örneğin 690 V) yüksek güçlerin iletilmesi aşırı akım ve kayıplara yol açtığından, modern sistemlerde 3.3 kV–10 kV aralığında orta gerilim (MV) dönüştürücüler ve modüler çok seviyeli (MMC) topolojiler ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, kıyıdan uzak offshore santraller için kapasitif kablo etkilerini minimize eden Yüksek Gerilim Doğru Akım (HVDC) iletim sistemleri ve bunlara bağlı AC/DC konvertör istasyonları kritik bir rol üstlenmektedir.

6.3. Şebeke entegrasyonunda yeni dönem: Grid forming (Şebeke oluşturu)

Günümüzde yaygın olarak kullanılan rüzgâr türbini dönüştürücüleri, şebeke gerilimi ve frekansını referans alan “Grid-Following” yapıda olup, senkronizasyon için faz kilitleme döngülerine (PLL) dayanmaktadır. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının sistem içindeki payının yüksek seviyelere ulaştığı senaryolarda, senkron generatörlerin azalmasıyla birlikte sistem ataletinin düşmesi önemli bir kararlılık problemi oluşturmaktadır.

Bu bağlamda, geleceğin güç elektroniği tabanlı üretim sistemlerinin “Grid-Forming” yeteneklere sahip olması beklenmektedir. Grid-forming dönüştürücüler, sanal atalet ve sanal senkron generatör (Virtual Synchronous Machine – VSM) yaklaşımları sayesinde şebeke gerilimi ve frekansının

oluşumuna aktif olarak katkı sağlayabilmektedir. Böylece rüzgâr santralleri, yalnızca enerji üretmekle kalmayıp sistem kararlılığı, kısa devre dayanımı ve kara başlangıç (black start) gibi kritik hizmetleri de sunabilir hale gelmektedir.

6.4. Hibritleşme ve enerji depolama entegrasyonu

Rüzgâr enerjisinin doğası gereği değişken olması, güç dalgalanmalarının azaltılması ve esnek işletme gereksinimlerini gündeme getirmektedir. Bu amaçla, rüzgâr santrallerinin Batarya Enerji Depolama Sistemleri (BESS) ile hibrit olarak tasarlanması giderek yaygınlaşmaktadır. Enerji depolama entegrasyonu sayesinde kısa süreli güç dalgalanmaları sönmülenebilmekte ve enerji arbitrajı mümkün hale gelmektedir.

Geleceğe yönelik projeksiyonlarda, rüzgâr türbinlerinin DC barasına doğrudan entegre edilen enerji depolama sistemleri aracılığıyla, santrallerin sınırlı süreler için talep edilebilir güç sağlayabilen esnek üretim birimlerine dönüşmesi öngörülmektedir.

6.5. Sonuç

Yirmi birinci yüzyılda enerji sistemleri, fosil yakıtlardan yenilenebilir kaynaklara doğru geri döndürülemez bir dönüşüm sürecine girmiştir. Bu dönüşümün merkezinde yer alan rüzgâr enerjisi teknolojileri, aerodinamik tasarımlar, elektromekanik sistemler ve gelişmiş güç elektroniği altyapısının başarılı bir entegrasyonunu temsil etmektedir. Geleceğin enerji şebekeleri; üretim, depolama ve kontrol fonksiyonlarını bir arada barındıran akıllı ve esnek yapılar üzerine inşa edilecektir. Bu bağlamda, güç elektroniği ve gelişmiş denetim disiplinleri, sürdürülebilir enerji sistemlerinin tasarımında temel yetkinlik alanları olmaya devam edecektir.

Kaynaklar

- Abu-Rub, H., Malinowski, M., & Al-Haddad, K. (2014). *Power electronics for renewable energy systems, transportation and industrial applications*. Chichester, UK: Wiley–IEEE Press.
- Ackermann, T. (Ed.). (2012). *Wind power in power systems* (2nd ed.). Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Afridi, S. K., *et al.* (2024). Winds of progress: An in-depth exploration of offshore, floating, and onshore wind turbines as cornerstones for sustainable energy generation and environmental stewardship. *IEEE Access*, 12, 66147–66166.
- Anaya-Lara, O., Jenkins, N., Ekanayake, J. B., Cartwright, P., & Hughes, M. (2019). *Wind energy generation: Modelling and control* (2nd ed.). Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2021). *Wind energy handbook* (3rd ed.). Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Carriveau, R. (Ed.). (2011). *Fundamental and advanced topics in wind power*. Norderstedt, Germany: BoD–Books on Demand.
- Central Intelligence Agency. (n.d.). Countries The world factbook. Retrieved from <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/>
- Chattot, J. J. (2014). Actuator disk theory—Steady and unsteady models. *Journal of Solar Energy Engineering*, 136(3), 031012.
- Global Wind Energy Council (GWEC). (2025). Global wind report 2025. Retrieved Dec 8, 2025, from <https://www.gwec.net/reports/globalwindreport>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2024). Renewable capacity statistics 2024. Abu Dhabi: IRENA. Retrieved from <https://www.irena.org/Publications/2024/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2024>
- Küçük, T. V. (2018). Asenkron motorun vektör denetimi ile rüzgâr türbinleri için fiziksel emülatör tasarımı ve deneysel uygulaması. Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye.
- Küçük, T. V. (2025). Değişken hızlı rüzgâr türbinleri için rezonans güç dönüştürücü tabanlı maksimum güç noktası izleyici geliştirilmesi (Doktora tezi). Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük, Türkiye.
- Teodorescu, R., Liserre, M., & Rodríguez, P. (2011). *Grid converters for photovoltaic and wind power systems* (2nd ed.). Chichester, UK: John Wiley & Sons.



MÜHENDİSLİK ETİĞİNİN ÖNEMİ: İLKELER, SORUMLULUKLAR VE ÖRNEK VAKALAR

“ ”

Aslı ABDULVAHİTOĞLU¹
Adnan ABDULVAHİTOĞLU²

¹ Doç.Dr. Aslı ABDULVAHİTOĞLU, Makine Müh. Böl., Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Adana, aabdulvahitoglu@atu.edu.tr, ORCID ID:0000-0002-3603-6748
² Dr.Öğr.Üyesi Adnan ABDULVAHİTOĞLU, Endüstri Müh. Böl., Mudanya Üniversitesi, Bursa, abdulvahitoglu@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2659-6709

1. Giriş

Günümüzde etik değerlerin toplumsal yaşam ve organizasyonel yapılanmalar açısından taşıdığı önem giderek artmaktadır. Sürdürülebilir bir gelecek için bireylerin, toplumların ve kurumların etik ilkelere dayalı bir yönelim geliştirmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu doğrultuda oluşturulan çeşitli mekanizmalar, etik kavramını anlaşılır kılmayı, bireylerin bu değerleri içselleştirerek davranışlarına yansıtmasını sağlamayı amaçlamaktadır.

Bu mekanizmalar ile kültürel ve inanç temelli farklılıkların ötesine geçen, evrensel nitelikteki etik ilkeler öne çıkarılmaktadır. Adalet, doğruluk, saygı, sorumluluk ve hoşgörü gibi temel prensiplerin bireylerin karar süreçlerinde ve sosyal ilişkilerinde üstlendiği belirleyici rol açıklanmaktadır (Yıldırım, 2010). Böylece etik, yalnızca teorik bir alan olmaktan çıkarak gündelik yaşamla bütünleşen bir yapı hâline gelmektedir.

Etik değerler, bireysel düzeyde farkındalık oluşturma yanı sıra, kurumlar ve liderler için etik temelli bir yönetim anlayışı geliştirmeyi de amaçlamaktadır. Bu bağlamda iş dünyası, eğitim ve sağlık gibi çeşitli sektörlerde etik ilkeler temelli uygulamalar kurumsallaştırılabilmeye çalışılmaktadır. Bununla birlikte etik perspektif, sürdürülebilirlik, toplumsal adalet ve kültürel çeşitlilik gibi küresel sorunların değerlendirilmesine katkı sağlayarak etik değerlerin tüm toplumlar için ortak ve kalıcı bir miras niteliği taşımasının önemi de ortaya koymaktadır (Bektaş, 2024).

Geçmişten günümüze gelişim gösteren etik ilkeler, bireylerin yaşamlarına yön verebilecek evrensel bir rehber işlevi görmek ve daha adil, saygılı ve güvenilir bir toplum düzeni kurmak isteyen tüm kesimler için önemli bir referans oluşturmaktadır (Aslan ve Ulutaş, 2021). Böylece etik değerlerin bilincinde olunarak ve bu değerleri günlük yaşama yansıtılarak, sağlıklı ve sürdürülebilir bir toplumsal yapı inşa edilmesine katkı sağlanmaktadır.

Küreselleşmenin hızlandığı ve maddi kaygıların ön plana çıktığı günümüz dünyasında etik ilkelerin önemi daha da belirginleşmekte; özellikle meslek gruplarında etik kurallara uyum hem toplumsal sorumluluğun yerine getirilmesi hem de mesleki itibarın korunması açısından kritik bir nitelik kazanmaktadır. Meslek etiği, yalnızca bireysel davranışlara yön vermekle kalmayıp, mesleklerin toplumla kurduğu ilişkinin etik temelde sürdürülmesine de aracılık etmektedir.

Bu çerçevede, farklı alanlarda çalışan bireylerin etik değerleri kendi mesleki normlarıyla ilişkilendirerek anlamlandırmaları ve bu ilkeleri günlük iş süreçlerine dâhil etmeleri hem mesleğin sürdürülebilirliği hem de toplumsal güven açısından önem taşımaktadır (Bahar, 2014). Meslek etiği, bir meslek grubunun değerlerini, sorumluluklarını ve standartlarını belirleyerek,

adalet, doğruluk, gizlilik ve mesleki ilkelere bağlılık gibi temel kavramların korunmasına katkıda bulunmaktadır. (Çabuk ve İşgüden, 2006). Bireysel etik ile mesleki etik arasındaki uyumun sağlanması ise meslek üyelerinin etik liderlik sergilemesine ve toplumla kurulan ilişkinin güçlenmesine olanak tanımaktadır.

Meslek gruplarında ortaya çıkan etik ikilemler ve mesleki zorluklar, bireylerin karşılaşılabilecekleri çatışmaları sağlıklı biçimde çözebilmesi ve etik ilkeleri çalışma süreçlerine dahil edebilmesi için önemli bir çerçeve oluşturmaktadır (Yüce, 2023). Bu bağlamda meslek etiği hem bireylerin hem de kurumların güvenilirlik ve saygınlıklarını sürdürürebilmeleri için gerekli olan etik bakış açısını geliştirmelerine imkân tanımaktadır. Etik değerlerin meslek yaşamına yerleşmesi, yalnızca mesleğin kendi iç dengelerini değil, aynı zamanda toplumla kurulan etik temelli ilişkilerin güçlenmesini de desteklemekte, daha adil ve yaşanabilir bir düzenin oluşumuna katkı sağlamaktadır.

Teknolojik gelişmelerle birlikte iletişim ve ulaşımın hız kazanması, etik ilkelerin ve mühendislik etiği standartlarının önemini daha görünür hâle getirmiştir. Bu nedenle meslek gruplarında etik ilkelere bağlılık, toplumsal sorumluluğun yanı sıra mesleki prestijin korunması açısından da kritik bir zorunluluk hâline gelmiştir. Meslek etiği ve mühendislik etiği, mühendislerin görev sırasında uyması gereken davranış ilkelerini, sorumluluk alanlarını ve dikkat etmeleri gereken etik standartları belirleyerek görevlerini güvenli ve şeffaf yürütebilmelerine katkı sunmaktadır.

Farklı meslek alanlarında çalışan bireylerin etik değerleri kendi meslek normlarıyla ilişkilendirmesi ve bu ilkeleri günlük uygulamalarına yansıtması hem mesleki disiplinin sürdürülmesi hem de toplumla kurulan güven ilişkisinin güçlendirilmesi açısından temel bir gerekliliktir. Adalet, dürüstlük, gizlilik ve kamusal hizmetin etik ilkeleri bu sürecin temelini oluşturmaktadır.

2. Ahlak Ve Etik Kavramları

Günümüzün hızla küreselleşen ortamında toplumsal dönüşüm artan bir ivmeyle devam ederken, mühendislik olgusu önem kazanmakta ve mühendislik türleri de çeşitlenmektedir. Bu dinamik yapı, toplumsal değişime uygun niteliklerle donatılmış mühendislere olan ihtiyacı zorunlu kılmaktadır. Mühendislerin yalnızca iş gereklerini uygulayan teknik personel olmalarının ötesinde, toplumu anlayabilen, toplumsal beklentilere duyarlı ve etik açıdan yetkin bireyler hâline gelmeleri gerekmektedir. Farklı zaman ve koşullarda çok farklı pozisyonlarda görev yapan mühendislerin ortak meslek ilkeleri, ahlaki standartlar ve güncel etik değerlerle uyumlu hareket etmesi, profesyonel bütünlüğün temel şartıdır.

Ahlak kavramı, bireylerin birbirleriyle olan ilişkilerinde uymaları beklenen değerler, normlar ve sosyal davranış kurallarını ifade eder. Bu kurallar, toplumların ve uluslararası ilişkilerin gerektirdiği ortak standartlar çerçevesinde şekillenir (Bayrak, 2001). Etik ise kökenini “gelenek, görenek” anlamına gelen eski Yunanca ethos sözcüğünden alır (Karalar, 2001). Tarihsel olarak bireylerin törelere ve toplumsal alışkanlıklara uygun davranması bekler; erdemli davranışların alışkanlık hâline getirilmesi toplumsal düzenin bir gereği sayar (Konak, 2020). Bu nedenle düşünürler yüzyıllardır insan davranışlarının amaçlarını ve bu davranışlardaki farklılıkların nedenlerini incelemiş, farklı ahlaki görüşlerin bu çeşitliliğin temelinde yer aldığını ortaya koymuşlardır (Oruç, 2004).

İyi-kötü ya da doğru-yanlış gibi değer yargıları görünürde basit görünse de kültürden kültüre, hatta aynı toplum içinde zamana bağlı olarak değişebilen subjektif kavramlardır (Fisher, 2005). Bilimsel açıdan etik, çoğunlukla felsefenin bir alt dalı olarak kabul edilmekle birlikte, birey ve toplum davranışlarının değer temelli analizini içeren temel bir inceleme alanıdır. Etik bilimi, ahlaki normların içeriğini ve bu normların arkasındaki gerekçeleri analiz eder (Sağır, 2006). Bu çerçevede etik ve ahlak, toplumsal değerleri oluşturan bir bütünün ayrılmaz parçaları olup, aynı ağacın birbirini tamamlayan kolları olarak değerlendirilebilir.

Küreselleşen dünyada teknolojik gelişmeler ve toplumsal ihtiyaçların çeşitlenmesi, mühendislerin yalnızca teknik mevzuatı uygulayan değil, etik açıdan yetkin ve toplumsal sorumluluk bilincine sahip bireyler olmasını gerektirmektedir. Ahlak, bireylerin iyi-kötü ve doğru-yanlış temelli davranış normlarını ifade ederken (Bayrak, 2001) etik toplumsal alışkanlık ve törelere uygun davranışı ifade eder (Karalar, 2001; Konak, 2020). Bu değerlerin yorumlanması kültürel ve zamansal farklılık gösterebilir (Fisher, 2005). Etik, ahlaki davranışları ve normları inceleyen felsefi bir alan olup bu normların temellerini analiz eder (Sağır, 2006). Ahlak felsefesinin temel taşları olarak belirlenen esaslar aşağıda Şekil 1.’de gösterilmiştir.



Şekil 1. *Ahlak Felsefesinin Temel Kavramları*

Etik ve ahlak kavramlarının birbiriyle ilişkili olmasının temel nedeni, etiğin ahlak felsefesine dayanması ve ahlaki normların etik incelemenin merkezinde yer almasıdır. Ahlak, kültürel değerlerden ve toplumsal geleneklerden beslenen; doğru/yanlış, iyi/kötü ve erdem/kusur gibi kavramlara uygun davranış biçimlerini belirleyen yazılı olmayan bir normlar bütünü olarak tanımlanır. Etik ise daha soyut bir düzlemde, bu ahlaki kavramların nasıl anlaşılması gerektiğine açıklık getiren teorik bir çerçeve sunar (Aydın, 2002). Bu bağlamda etik, bireylerin istem ve davranışlarını ahlaki değerlere göre değerlendirirken, iyi/kötü ya da doğru/yanlış ayrımlarının temelindeki ilkeleri analiz eder (Pehlivan, 1998).

Mühendislik alanında etik, teknik bilgi kadar önemli bir profesyonel bileşen hâline gelmiştir. Etik ilkeler, mühendislerin toplumla ilişkilerinde güven oluşturmalarını, teknik kararlarında sorumluluk bilinciyle hareket etmesini ve mesleki eylemlerinin sonuçlarını ahlaki açıdan değerlendirmesini sağlar. Etik değerlendirme, bir eylemin toplumsal değerlere uyup uymadığını belirlemeyle başlar; bu nedenle mühendislerin de etik kurallara uygun davranması mesleğin saygınlığı ve toplum güvenliği için zorunludur (Kubilay, 2003).

Etik davranış ilkeleri, geleneksel ahlaki mirasın üzerine inşa edilmekle birlikte, çağın gerekliliklerine göre yeniden şekillenebilir. Bu nedenle “etik” kavramı günümüzde çoğu zaman mesleklere özgü yazılı norm sistemlerini, yani etik kodları ifade eder. Bu kodlar, belirli amaçlar doğrultusunda oluşturulan ve evrensel ahlaki talepleri yansıtan normlardır (Kuçuradi, 1998). Mühendislikte meslek etiği, teknik yeterliliğin yanında mesleki sorumluluğun, toplumsal faydanın ve güvenilirliğin korunmasını sağlayan bir özdenetim sistemi olarak işler. Meslek üyelerinin etik ilkelere aykırı davranışları yalnızca bireysel itibarı değil, tüm mühendislik mesleğinin toplumsal güvenilirliğini zedeleyebilir. Bu nedenle meslek etiği, mühendislerin en doğru, en güvenli ve en erdemli şekilde faaliyet göstermesini hedefleyen bir temel yapı taşıdır ve mesleğin sürdürülebilirliği açısından vazgeçilmezdir (Kubilay, 2003).

3. Meslek Etiği Ve Mühendislik Etiği

Etik, bireylerin doğru kararlar almasını sağlayan çerçeve kurallar bütünüdür ve topluluğun ortak değerlerini bireylere benimsetme girişimi olarak tanımlanabilir. Etik ilkeler, belirli bir alana ilişkin yazılı kurallar içerir ve evrensel kabul gören değerlere dayanır; bireyin özelliklerinden bağımsız olarak geliştirilir (Bilgi ve İpbüker, 2005). Bu ilkeler, kararların topluluk değerleri ile uyumlu olmasını sağlayan rehber mekanizmayı oluşturur.

Etik, davranış standartlarını inceleyen bir bilim dalıdır ve yalnızca kuramsal değil, uygulamalı olarak da değerlendirilebilir. Genel etik ilkeler, belirli yaşam ve eylem alanlarına uygulanabilir; bu bağlamda tıbbi etik, sosyal etik, bilim etiği, ekoloji etiği ve iş/meslek etiği gibi alanlar ortaya çıkar (Pieper, 1999). Meslek etiği, yalnızca bireyin değil, meslek grubunun onurunu koruyan ve mesleğin itibarına zarar vermemeyi amaçlayan özel kurallar bütünüdür. Genelleştirme ilkesine göre, eylemler toplumda kabul edilemez sonuçlara yol açıyorsa ahlak dışı sayılır. Bu bağlamda etik, ilişkilerin kurulması ve karşılıklı muvafakatin sürdürülmesine hizmet eder.

Bireyler normlara uygun davranmaya zorlanabilir; ancak etik değerleri içselleştirmek ve değerler doğrultusunda eylemde bulunmak gönüllü bir süreçtir (Kuçuradi, 2003). Mesleki davranış kuralları veya mesleki etik kurallar, evrensel etik ilkeler dahilinde herhangi bir mesleğin uygulama alanına özgü olarak düzenlenir. Bu kurallar, dünyanın herhangi bir yerinde aynı mesleği icra eden tüm çalışan bireyler için geçerlidir (Aydın, 2002; Kuçuradi, 1988).

Davranış ilkeleri ise, yapılması veya yapılmaması gerekenler hakkında çıkarımları ve genel kabulleri ifade eder. Bilgi değil, düşünce temellidir; doğrulukları sınınamaz, geçerlilikleri ölçülebilir. Sonuçların yarar-zarar

açısından değerlendirilmesi, insan değerine dayalı eylemlerin belirlenmesi ve değer yargıları üzerine mantıksal çıkarımlar yapılması olmak üzere üç tür çıkarım söz konusudur (Kuçuradi, 1999).

Mesleki etik kurallar, meslek ve toplum üyeleri arasındaki güveni sağlayan araçtır. Ortak değerler ve misyona sahip üyelerden oluşan meslek gruplarının kendi içlerindeki aidiyet duygusunu güçlendirir, toplumsal sorumluluk bilincini canlı tutar. Temel amaç, mesleğin insanlara daha iyi hizmet etmesini sağlamaktır; bu ilkeler kişilerin damgalanması veya dışsal kaygılarla dayatılmamalıdır. Nasıl davranılırsa daha kaliteli hizmet verilebilir sorusuna cevap arayan mesleki davranış ilkeleri, mesleki etik değerlerin ve eylemlerin temelini oluşturur.

Bir uğraşın “meslek” olarak nitelendirilebilmesi için belirli özellikleri taşıması gerekir (Bilgi ve İpbüker, 2005). Toplumca değer verilen hedefler ile hizmetlere ulaşmayı sağlayan, genellikle toplumun kaçınılmaz gereksinimlerini karşılayan yararlı işlere meslek denir (Aydın, 2002). Her mesleğin faaliyetleri yönlendiren gizli veya açık hizmet, davranış ve yeterlilik standartları vardır. Bu anlamda meslek, kişinin yalnızca kendi faydası için değil, başkalarının yararı için de yürüttüğü bir uğraştır (Bayles, 1988).

Çalışanlar bir profesyonel olarak mesleğe kabul edilmeden önce uzun ve sistemli bir eğitim sürecinden geçerler (Fuchs, 1992). Bu süreçte kazanılan özel bilgi ve beceriler, meslek elemanlarını toplum tarafından “uzman” olarak kabul ettirir ve hizmetlerde güven sağlar. Meslekler, araştırma, deneyim ve mesleki uygulamalarla geliştirilir; teknik bilgiler kuşaktan kuşağa aktarılır, yeni teknik ve uygulamaların keşfedilmesine olanak tanır (Aydın, 2002).

Mesleklerin standartlara uygunluğunu denetleyen meslek odaları, birlikler ve dernekler gibi örgütler mevcuttur. Meslekler aynı zamanda kariyer ve iştir; meslek elemanları yaptıkları işlerden maddi kazanç sağlar ve bu kariyerleri saygı görmelerini destekler (Resnik, 2004).

Profesyonellerin topluma sağladıkları hizmetlerde ayrıcalıkları bulunur; halk, bu hizmetlerin etik ve toplumsal sorumluluk bilinciyle sunulacağına inanır. Ayrıca profesyoneller, kendi alanlarında entelektüel otorite olarak görülür ve özel bilgi, yargı ve uzmanlığa sahip oldukları kabul edilir (Bayles, 1988).

Her meslek alanı kendi etik değerlerini ve normlarını oluşturur; bu kurallar mesleği seçen tüm bireyleri bağlar. Mühendislikte de mesleğin itibarı, meslek etiği kurallarına bağlılıkla doğrudan ilişkilidir. Etik ilkelere aykırı davranışlar yalnızca bireysel saygınlığı değil, aynı zamanda bütün mühendislik mesleğinin güvenilirliğini zedelerken; topluma örnek teşkil eden etik davranışlar meslek mensuplarına hem manevi hem de kurumsal

düzeyde takdir kazandırır. Meslek etiği, özellikle insan yaşamını, güvenliğini veya toplumsal refahı etkileyen alanlarda uygulanması zorunlu davranış kurallarını ifade eder ve mühendislik bu kapsamın merkezinde yer almaktadır (Kuçuradi, 1998).

Meslek etiği, mesleğin itibarı ve doğruluk standardını koruyan, üyelerin davranışlarını yönlendiren ve gerektiğinde mesleğe uygun olmayan kişi ve uygulamaları dışlayan kurallar bütünüdür. Mühendislikte bu ilkeler, teknik kararların tarafsızlık içinde verilmesini, toplumsal yararın kişisel çıkarlara üstün tutulmasını ve meslek içi rekabetin adil biçimde sürdürülmesini sağlar. Bu yönüyle mühendislik etiği, sadece teknik yeterliliğin değil, topluma karşı duyulan sorumluluğun da temel bir göstergesidir (Pehlivan, 1988).

Organizasyonlarda görülen çıkar çatışması olgusu mühendislik mesleğinde de benzer şekilde ortaya çıkabilir. Mühendisler zaman zaman toplumsal yarar ile kişisel çıkarları arasında tercih yapma durumunda kalabilirler. Bu nedenle tarafsızlık, nesnellik ve kamu yararını esas alma ilkeleri, mühendislik etiğinin temel bileşenleridir. Etik ilkeler ve etik eğitimi, profesyonellerin adil, insani ve hukuka uygun kararlar almasına katkı sağlar; aynı zamanda meslektaşlar arasında ortak amaç duygusunu güçlendirir (İçli, 2002). Bu durum, mühendislik kurumlarının toplum nezdinde güvenilir, saygın ve sorumlu yapılar olarak konumlanmasına imkân verir.

Sonuç olarak, mühendislik etiği teknik başarı kadar kritik bir unsur olup, mesleğin sürdürülebilirliği ve toplum güvenliği açısından Şekil 2’de görüldüğü gibi ahlak ve prensipler arasındaki bağı sağlayan vazgeçilmez bir yapı taşıdır.



Şekil 2. Meslek etiği (Sertdemir, 2021)

Meslek etiği, bir kişinin veya mesleğin temsilcilerinin görevlerini etik bir şekilde nasıl yerine getireceklerini belirleyen kurallar, prensipler ve değerler bütünüdür. Mühendislik bağlamında meslek etiği, mühendislerin toplum, işveren, müşteriler ve meslektaşları ile ilişkilerini düzenler. Bu çerçevede, etik ilkeler yalnızca teknik yeterliliği değil, aynı zamanda toplumsal sorumluluğu da kapsar. Meslek etiğinin temel unsurları aşağıda açıklanmış ve Şekil 3.'te gösterilmiştir (Sayın, 2006).

Onur ve itibar: çalışanlar, mesleklerini onurlu bir şekilde temsil etmeli ve mesleki itibarlarını korumalıdır. Bu, toplum ve müşteriler nezdinde güven oluşturmak açısından kritik öneme sahiptir.

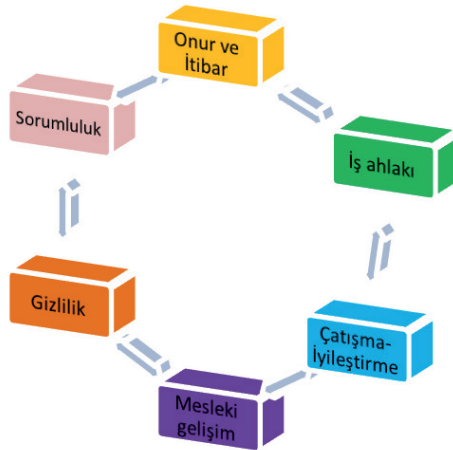
İş ahlakı: İş ahlakı, dürüstlük, şeffaflık ve adil davranışları teşvik eder. Mühendisler, proje ve teknik uygulamaların her aşamasında bu ilkeleri benimsemelidir.

Sorumluluk: çalışanlar, topluma, müşterilerine ve meslektaşlarına karşı sorumluluk taşır. Bu, teknik çözümlerde güvenliği, sürdürülebilirliği ve toplumsal faydayı gözetmeyi içerir.

Gizlilik: Meslekte bazı bilgiler ve projeler gizli tutulmalıdır. Bu, hem kurum içi güveni hem de müşteri ve toplum güvenini sağlamaya yönelik bir etik yükümlülüktür.

Mesleki gelişim: Meslek etiği, mühendislerin sürekli öğrenmesini ve mesleki becerilerini güncel tutmasını teşvik eder. Bu, teknolojik değişim ve yeni uygulamalara uyum için gereklidir.

Çatışma iyileştirme: Meslekte ortaya çıkan teknik ve yönetsel anlaşmazlıkların adil ve etik bir biçimde çözülmesi, hakemlik, arabuluculuk veya diğer yöntemlerle sağlanmalıdır.



Şekil 3. Meslek etiğinin temel unsurları

3.1. Mühendislik etiği

Her meslek gibi mühendisliğin de özgün etik normları vardır; bu normlar, güvenlik, sürdürülebilirlik, toplumsal yarar ve insan yaşamını koruma gibi evrensel ilkelere dayanır. Sonuç olarak, meslek etiği, mühendislerin mesleklerini saygın, sorumlu ve toplumsal değerlerle uyumlu şekilde yürütmelerini sağlayarak hem mesleğin hem de toplumun uzun vadeli faydasını güvence altına alır (Sayın, 2006).

Bazen mühendislik ve yönetsel kararlar, etik ilkelerle çelişebilir. Etik kurallara uymayan karar vericiler, örgütlerin, toplumu ve paydaşları etkileyen uygulamalarda sosyal sorumluluk ilkesini ihlal edebilir; bu durum, özellikle marka değeri yüksek ve köklü işletmelerde önem taşır (Saxena, 2004). Kurum kültürünü benimsemiş ve aidiyet duygusu yüksek liderlerin davranışları ise şeffaf, düzenli ve sürdürülebilir karar süreçleri sağlar. Etik davranışın başlıca motivasyonları aşağıda açıklanmıştır (Josephson, 2002).

İç fayda: Doğruluk, bireyin kendine verdiği ödüldür.

Kişisel avantaj: Etik olmak, saygınlık ve itibar kazandırır.

Onay: Toplum tarafından kabul görmeyi ve özsaygıyı destekler.

İnanç: Doğru söz ve davranış, güveni artırır ve toplumsal kabul sağlar.

Alışkanlık: Etik eylemler, düzenli uygulama ve liderlik örneğiyle alışkanlık hâline gelmelidir.

Bu bağlamda işletmelerin değişik departmanlarında lider pozisyonunda görev yapan mühendisler, örgüt içinde eylem ve söylemleriyle örnek olur; dürüst, güvenilir, merhametli ve adil olarak kabul edilir. Astlarının ve çalışanlarının davranışlarını etik çerçevede yönlendirir, olası etik dışı davranışları önlemeye çalışır. Böylece etik liderlik, sadece bireysel doğru kararları değil, tüm mühendislik ekibinin ve kurumun etik performansını güvence altına alan temel bir yapı oluşturur.

Mühendislik etiği, mühendislerin mesleklerini icra ederken ahlaki sorumluluklarını ve yükümlülüklerini belirleyen ilkeler bütünüdür (Doğan, 2021). Bu etik ilkeler, mühendislik kararlarının ve uygulamalarının kamu güvenliği, refahı ve çevre üzerindeki derin etkilerini dikkate almayı gerektirir.

Mühendisler, köprüler, binalar, elektrik şebekeleri, tıbbi cihazlar ve yazılım sistemleri gibi hayatımızın temelini oluşturan yapılar ve teknolojiler tasarlar ve inşa ederler. Bu sistemlerdeki herhangi bir hata veya etik olmayan karar, ciddi yaralanmalara, ölümlere ve büyük maddi kayıplara yol açabilir. Etik ilkeler, mühendisleri her zaman halkın güvenliğini en öncelikli tutmaya

zorlar (Oğulata, 2023). Örneğin, dayanıksız malzeme kullanmamak veya tasarım kusurlarını bildirmek etik bir zorunluluktur.

Mühendislik, toplumda büyük bir güven duyulan bir meslektir. Müşteriler, işverenler ve genel olarak halk, mühendislerin yüksek standartlarda, dürüst ve objektif çalışacağına inanır (Onbaşıoğlu, 2004). Etik kurallar, bu güvenin sürdürülmesi için rüşvetten kaçınmayı, çıkar çatışmalarını önlemeyi, gizliliği korumayı ve yetkinlik sınırları içinde çalışmayı şart koşar. Etik dışı davranışlar sadece bireysel mühendisin itibarını değil, tüm mesleğin güvenilirliğini zedeler.

Günümüzde mühendislik projelerinin sürdürülebilirlik, kirlilik, kaynak kullanımı gibi çevre üzerindeki etkileri ve erişilebilirlik, gizlilik, yapay zekâ gibi yeni teknolojilerin etkilerinin toplumsal sonuçları giderek daha kritik hale gelmektedir. Mühendislik etiği, mühendislerin uzun vadeli etkileri düşünmesini ve yalnızca teknik fizibiliteye değil, aynı zamanda sürdürülebilirliğe ve sosyal adalete de odaklanmasını sağlar.

Dünya Mühendisler Birliği 5 Ekim 1977 tarihinde yapılan toplantıda mühendislik etiğinin temel ilkelerini belirlemiştir. Bu ilkeler aşağıda özetlenmiştir. Mühendisler (UNESCO, 2010);

- Mesleki görevlerini toplumun güvenliğini, sağlığını ve refahını gözeterek yerine getirmelidir.
- Sadece kendi uzmanlık alanlarında yetkin oldukları hizmetleri vermelidirler.
- Raporları gerçek ve objektif bir şekilde hazırlamalı veya yayınlamalıdır.
- Her işveren veya müşteri için güvenilir bir meslek erbabı olarak davranmalı ve çıkar çatışmalarına girmekten veya dahil olmaktan kaçınmalıdır.
- Meslek itibarlarını oluşturmak için objektif ve tarafsız hareket bir şekilde hizmetleri ifa etmeli ve diğer meslektaşlarıyla haksız rekabete girmekten kaçınmalıdır.
- Mesleğinin doğruluğunu, onurunu ve değerini yüceltmek ve geliştirmek için çalışmalıdır.
- Mesleki kariyerlerini kendi çalışmaları ile geliştirmeli, başkalarının emeğini çalmamalı ve astı durumunda olan mühendislerin mesleki gelişimleri için onlara imkan sağlamalıdır.

Mühendislik projeleri sıklıkla karmaşık ikilemler içerir. Maliyet kısıtlamaları, zaman baskıları veya işveren/müşteri talepleri, etik olmayan

çözümlere yönlendirebilir. Etik ilkeler, bu baskı altında kalan mühendisler için doğru ve sorumlu kararlar almaları için bir çerçeve sunar. Amerikan Ulusal Profesyonel Mühendisler Topluluğu'na göre mühendisler mesleklerinin gerektirdiği profesyonel görevlerini yerine getirirken aşağıda belirtilen prensiplere uyarlar (NSPE, 2025).

- Toplumun sağlığı, güvenliği ve refahını her şeyden üstün görmelidirler.
- Sadece yetkin oldukları alanlarda görev yapmalıdırlar.
- Raporlar ve açıklamalarda doğru ve tarafsız olmalıdırlar.
- Her işveren veya müşteri için tarafsız ve güvenilir olmalıdırlar.
- Çıkar çatışmalarından kaçınmalıdırlar.
- Tutum ve davranışlarında doğru olmalıdırlar.
- Etik ilke ve yasalara uygun olarak onurlu ve sorumlu bir şekilde çalışarak mühendislik mesleğini yüceltmeyi esas kabul etmelidir.

Dünyada çok sayıda kişinin aynı mesleği yapması, bu kişilerin bir araya gelmeleri ve bir meslek birliği içerisinde hareket etmelerini gerekli kılar. Bu şekilde oluşturulan birliktelik ve dayanışma hem mesleğin saygınlığının yükseltilmesine hem de topluma daha iyi hizmet edilmesine katkı sağlar (Aydın, 2002). Meslek odaları böyle özverili bir görevi ve sorumluluğu taşırlar. Bir meslek birliğinin temel hedefi, mesleği geliştirmek, üyeleri arasında birlik ve beraberliği sağlamak, aynı ilke ve değerler etrafında toplamak, meslek grubunu toplum için onurlu ve saygın bir konuma getirmek ve sonuçta insanlık için yararlı bir meslek grubu oluşturmaktır.

Bu bağlamda sorumlu olunan etik gereklilikler, belirli etik kurallar etrafında örgütlenmiş kurumsal yapılara ihtiyaç gösterir. Uluslararası meslek örgütleri ve bazı ulusal birlikler, evrensel mesleki etik değerler çerçevesinde kendi mesleki etik kurallarını yıllardır uygulamaktadır. Her meslek grubu, topluma kendini kabul ettirirken öncelikle mesleki etik kriterlerini meslektaşlarına ve topluma açıklamaktadır.

Bu etik değerler, bir meslek ve toplum üyeleri arasındaki güvenin aracıdır. Ortak değerlere ve bilince sahip üyeler arasında mesleki aidiyet duygusunu güçlendirir ve topluma karşı görev bilincini güçlü tutar. Mühendislik alanında belirlenen etik değerler, mesleğe, meslektaşlara, çalışanlara, işverenlere, müşterilere, topluma, çevreye ve doğaya karşı sorumlulukları ortaya koyar (Bilgi ve İpbüker, 2005).

Uluslararası düzeyde mühendislik mesleğinin etik değerleri ile ilgili ilk yazılı belge, Dünya Mühendisler Birliği tarafından 5 Ekim 1977'de yayımlanmıştır. Türkiye'de ise Türkiye Mühendis ve Mimar Odaları Birliği

(TMMOB) tarafından hazırlanan “Mesleki Davranış İlkeleri”, mühendislik etiği çerçevesindeki ilk ulusal belge niteliğini taşımaktadır.

Makine Mühendisleri Odası mesleki davranış ilkeleri ile ilgili tanımlamaları aşağıda belirtildiği şekilde özetlenmiştir (MMO, 2025). Bu tanımlamalara göre mühendislerin mesleki sorumlulukları hizmetlerinin topluma, doğaya ve gelecek kuşaklara etkisiyle doğrudan ilişkilidir.

Bireysel sorumluluklar: Mühendisler, bilim ve teknolojiyi insanlık yararına ve doğal dengeyi gözeterek kullanmayı temel ilke olarak kabul eder. Bilgi ve yeteneklerini sürekli geliştirmek, mesleki hizmetlerde en iyi uygulamayı sunmak, ulusal ve uluslararası adalet, eşitlik ve hukuka uygun davranmak, iş sözleşmelerine sadık kalmak ve disiplinler arası çalışmalarda iş birliği yapmak bu sorumlulukların başlıca unsurlarıdır. Ayrıca, mesleki unvanların doğru kullanımı ve etik ilkelere aykırı davranışlardan kaçınmak da temel ilkeler arasında yer alır.

Örgütsel davranış kuralları: Mühendisler, örgüt kültürüne saygı göstererek yazılı kuralları uygular ve geliştirir. Örgütsel sorumlulukları yerine getirirken duyarlılık gösterir, örgüt içi demokrasiyi ve meslek itibarını destekler. Ayrıca meslek ilkelerinin uygulanması ve denetiminde etik kuralları geliştirmek ve mesleki, sosyal, kültürel gelişmeleri teşvik etmek önemli görevlerdir.

Toplumsal ve sosyal sorumluluklar: Meslek mensupları insan haklarına, demokrasiye ve toplumsal çeşitliliğe saygı gösterir. Hizmetlerini çok kültürlü bir anlayışla yürütür ve toplumsal sağlığı ve çevresel sürdürülebilirliği ön planda tutar.

Doğaya ve çevreye karşı sorumluluklar: Gelecek kuşaklar ve tüm canlılar için çevresel dengeyi korumak meslek sorumluluğunun bir parçasıdır. Mühendisler, çevresel risklerin farkında olarak karar alır ve bu doğrultuda hareket ederler.

Meslek mensupları, toplumsal ve çevresel etkiler konusunda şüphe duyduklarında meslek örgütünü bilgilendirir ve gerektiğinde kamuoyunu aydınlatırlar. Görevlerini en iyi şekilde yapabilmek için örgütleriyle iş birliği yaparlar. Mesleki yetkinlik alanlarında hizmet verir ve gerektiğinde yetkilerini ehil meslektaşlara devrederler.

Kısacası, mühendislerin topluma, doğaya, mesleğe ve kendilerine karşı sorumlulukları, hizmetlerinin kapsamıyla orantılı olarak artar. MMO Mesleki Davranış İlkeleri, bu sorumlulukların sistematik bir şekilde uygulanmasını sağlayacak ödül ve yaptırımlar ile birlikte mesleki etik çerçeveyi oluşturur. Bu bağlamda bir mühendisin bilimsel bir mesleği icra etmesi nedeniyle

taşıması gereken etik standartlar aşağıdaki başlıklar altında özetlenebilir (Resnik 2004):

Dürüstlük: Profesyonel çalışanlar bilgiyi veya sonuçları saptırmamalı, yalan veya yanıltıcı veriler kullanmamalıdır. Analiz, üretim ve sunum aşamalarında nesnellik, tarafsızlık ve doğruluk esastır. Yanlış veya uydurma veri sunma, sonuçları gizleme (kırpma), çarpıtma (bulandırma) ve sahte sonuçlar yayınlama (uydurma) gibi tahrifat biçimleri en önemli etik ihlaller olarak kabul edilir.

Dikkat: Profesyonel çalışanlar, tasarım ve sunum süreçlerinde hataları minimize etmelidir. Yöntemsel ve insan hatalarını asgariye indirmek, menfaat çatışmalarından ve taraflılıktan kaçınmak esastır. Tekrarlanan hatalar ihmal olarak değerlendirilir; hataların tespitinde en uygun davranış, hatayı kabul etmek, düzeltmek veya ürünü geri çekmektir.

Açıklık: Profesyonel çalışanlar, veri, sonuç, yöntem ve fikirlerini paylaşmalı; başkalarının çalışmalarını değerlendirmesine izin vererek eleştiriye ve yeni fikirlere açık olmalıdırlar.

Onur payı: Fikri mülkiyet haklarına saygı göstermek, patentli ve lisanslı ürünleri uygun şekilde kullanmak esastır. Kullanılan verilerin ve sonuçların telif hakları ödenmeli; hak eden kişilere uygun şekilde onur payı verilmelidir.

Toplumsal sorumluluk: Profesyoneller, topluma fayda sağlamak ve halkın güvenliğini korumakla yükümlüdür. Bu, mesleki uygulamalarda etik ve sorumlu davranmayı gerektirir.

Yasalılık: Çalışmalar, ilgili yasa ve yönetmeliklere uygun yürütülmeli, bu süreçlerde duyarlılık gösterilmeli ve yasa hazırlanmasına katkı sağlanmalıdır. Yasalara uymak evrensel bir ahlaki görevdir.

Karşılıklı Saygı: Meslektaşlara saygı, özellikle bilimsel iş birliği ve güven açısından önemlidir. Kişisel sırların korunmaması, haksız müdahaleler ve olumsuz eleştiriler iş birliği ve güveni zedeler.

Verimlilik: Kaynakların ekonomik, insani, doğal ve teknolojik boyutlarda verimli kullanımı önemlidir. Kaynak israfı etik dışı bir davranış olarak görülür.

Bu ilkeler, mühendis ve profesyonel meslek mensuplarının hem mesleki sorumluluklarını yerine getirmelerini hem de topluma karşı güven ve etik standardı korumalarını sağlar. Diğer yandan mühendislik uygulamalarının etik kurallar, yetkinlik ve performans olmak üzere üç temel bileşeni vardır. Bunlardan etik, davranış standartlarını belirlerken yetkinlik, mesleki standartlarda faaliyet gösterme kapasitesini ifade eder. Performans ise bu

faaliyetleri etkin bir şekilde yürütmeyi kapsar. Yetkinlik ve yetkin çalışma arasındaki fark, doğru muhakeme ve karar verme becerisidir. Dolayısıyla yetkin olmadan iş yapmak ve düşük performans gösterme etik ve iş ahlakına aykırı kavramlardır.

3.2. Mühendislik etiğinin önemi

Mühendislik etiği son derece önemlidir; çünkü mühendislerin bilinçli kararlar alabilmeleri için etkili bir görev ve sorumluluk çerçevesini çizer. Mühendislik etiği, mühendislik faaliyetlerinde ve meslekte kamu güvenliğinin, çevresel sürdürülebilirliğin ve ahlaki değerlerin korunmasını sağlar. Mühendislik etiğinin önemini gösteren başlıca noktalar şunlardır (Tutorialspoint, 2025):

- Mühendislik etiği, mühendislerin kamu güvenliği ve refahını en öncelikli hedef olarak görmesini sağlar.
- Topluma fayda sağlayan ahlaki kararların alınmasına rehberlik eder.
- Mühendislerin güvenli, etkili ve sürdürülebilir teknolojik çözümler geliştireceklerine dair toplumsal güveni korur.
- Mühendislik faaliyetlerinde ortaya çıkabilecek tehlikelerin belirlenmesine ve azaltılmasına katkı sunar.
- Çevresel etkileri en aza indiren ve sürdürülebilir kalkınmayı teşvik eden tasarımları destekler.
- Meslek içinde dürüstlük, sorumluluk ve şeffaflık kültürü oluşturarak yüksek standartların korunmasını sağlar.

Mühendisler toplumda önemli bir role sahiptir ve çalışmalarının kamu güvenliği, çevre, teknoloji ve ekonomi üzerinde doğrudan etkileri vardır. Bu nedenle mühendislerin etik ilkeleri öğrenmesi ve uyması şu açılardan gereklidir:

- Kamu güvenliğini ve toplumsal refahı korumak,
- Sorumlu kararlar almak,
- Çevreyi korumak ve sürdürülebilir kalkınmayı desteklemek,
- Mesleki bütünlüğü korumak ve toplumsal güveni güçlendirmek,
- Hesap verebilirlik ve şeffaflığı sağlamak,
- Teknolojik gelişmelerle ortaya çıkan sorunları çözmek,
- Kişisel ve mesleki gelişimi desteklemek.

Mühendislik etiğinin bazı temel avantaj ve dezavantajları aşağıda Çizelge 1.'de özetlenmiştir.

Çizelge 1. Mühendislik etiğinin avantaj ve dezavantajları (Tutorialspoint, 2025)

Avantajlar	Dezavantajlar
Kamu güvenliğinin, sağlığının ve refahının korunmasına yardımcı olur.	Bazı durumlarda mühendislik etiği ilkeleri belirli koşullarda uygulanabilir bulunmayabilir.
Çevresel etkileri en aza indiren mühendislik uygulamalarını teşvik eder.	Etik standartlar ile işletme hedefleri arasında çatışma olduğunda mühendisler üzerinde baskı oluşturabilir.
Mühendisler ve hizmetlerine yönelik toplumsal güven inşa eder.	Etik olmayan kurumsal ortamlarda etik kurallara uymak zorlaşır ve mühendisler iş kaybı riskiyle karşılaşabilir.
Hukuki sorunlar, çıkar çatışmaları, ihmaller ve sahtekarlıklardan kaçınmayı sağlar.	Geleneksel mühendislik etiği modern durumlarda yetersiz kalabilir.
Meslekte adalet, saygı ve eşitlik kültürü oluşturur.	Mühendislik etiğini sürdürmek ve uygulamak kimi zaman zor olabilir.

4. Örnek Vakalar

Aşağıda mühendislerin taşıması gereken etik standartlar bazı örnek vakalar ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve açıklanmıştır

Vaka-1: Rüşvet talebi: Bir mühendis, kamuya ait bir projede, malzeme tedarikçisi tarafından ekstra ödeme veya hediye karşılığı belirli ürünlerin kullanılmasını öneren bir teklif alır. Bu durumda yapılan teklif, etik ve yasal kurallara aykırıdır; kabul edilmesi hem kamu kaynaklarının kötüye kullanılmasına hem de mühendislik sorumluluklarının ihlaline yol açacaktır (WFEO, 2023).

Analiz-1: bu durumda mühendis teklifi reddedip yazılı olarak kayda geçirmeli, proje yönetim ve etik denetim ekibini bilgilendirmeli ve derhal yasal mercilere haber verilmelidir.

Çıkarılması gereken ders-1: Mühendisler, herhangi bir finansal veya kişisel avantaj teklifini etik çerçevede değerlendirmeli ve şeffaf olmalıdır. Bu örnekten çıkarılan ders, çıkar çatışması içeren rüşvet tekliflerine karşı mühendisin etik ve yasal sorumluluğu bulunduğuudur. Bu bağlamda bir mühendis, kamu projesinde malzeme tedarikçisinden aldığı ekstra ödeme veya hediye teklifini (rüşveti) derhal reddetmeli ve bu durumu ilgili makamlara bildirmelidir.

Bu durum, mühendislik etiğinde dürüstlük, objektiflik ve kamu refahını önceliklendirme ilkelerinin, kişisel kazançtan her zaman üstün tutulması gerektiğini gösterir. Aksi takdirde, hem kamu kaynakları kötüye kullanılmış olur hem de mühendis yasal ve etik sorumluluğunu ciddi şekilde ihlal etmiş olur.

Vaka-2. Volkswagen emisyon skandalı: ABD’de satılan dizel otomobillerin 482.000’inde 18 Eylül 2015 günü yasa dışı emisyon kontrol yazılımı bulunduğu tespit edilmiştir. Bu “sahte yazılım”, test sırasında emisyonları düşürürken normal sürüşte devre dışı kalmaktadır (Parloff, 2018). Volkswagen skandalı dünya çapında 11 milyon aracı kapsamaktadır. Şirket CIO’su görevden alınmış ve hisse değerleri %32 düşmüştür; finansal kayıp yaklaşık 17 milyar dolardır (Jacobs ve Singhal, 2020).

Analiz-2: Yanıltıcı rapor hem kamu güvenliği hem de çevre sağlığı açısından ciddi riskler yaratmaktadır. Ayrıca dürüstlük (doğru olma) ilkesi ihlal edilmiştir. Ölçümü yapan veya tasarımı yapan mühendisler yanlış bildirim yapılmasına müsaade etmemeliydi. Raporu hazırlayan altına imza atmamalıydı.

Çıkarılması gereken ders-2: Ölçümde görevli mühendisler yanıltıcı raporları imzalamamalı bunu ilgili birimlere bildirmeli, gerekirse istifa etmelidir. Çünkü insan hayatına zarara veren sonuçlar da ortaya çıkabilir. Etik olmayan uygulamalar hem meslektaşlar hem de toplum nezdinde güven kaybına yol açar. Bu vakadan çıkarılan temel ders, büyük kurumsal aldatmacanın ve etik olmayan eylemlerin ağır finansal, itibari ve yasal sonuçlarıdır. Volkswagen Skandalı, büyük bir şirketin rekabet avantajı veya maliyet azaltma uğruna hukuku ve etik kuralları bilerek çiğnemesinin, yani kurumsal dolandırıcılığın, kaçınılmaz ve yıkıcı sonuçlarını göstermiştir. Vaka, aşağıdaki kritik etik ve kurumsal dersleri içermektedir:

- **Güven İhlalinin Bedeli:** Şirketin, tüketicileri ve regülatörleri kasten aldatması, milyonlarca müşterinin ve kamuoyunun güvenini kaybetmesine neden olmuştur. Bu güven kaybının bedeli, ağır finansal kayıplardan (%32 hisse düşüşü, 17 milyar dolarlık ceza) ve üst düzey yöneticilerin görevden alınmasından çok daha büyüktür.
- **Kısa Vadeye Odaklanma Riskleri:** Kısa vadeli ticari hedeflere ulaşmak için (düşük emisyon standartlarını düşük maliyetle karşılamak) etik dışı ve yasa dışı yollara başvurmak, uzun vadede çok daha yüksek maliyetler, davalar ve itibar yıkımı getirmiştir.
- **Mühendislik Etiği ve Yasalara Uygunluk:** Mühendislerin, yasalara ve çevre standartlarına uygunluk konusunda dürüst davranma zorunluluğu vardır. “Sahte yazılım” kullanmak, mühendislik becerilerinin etik dışı ve yasa dışı amaçlar için kullanılmasına çarpıcı bir örnektir.

Özetle, Volkswagen Skandalı, etik uyumun sadece bir maliyet kalemi değil, şirketlerin varlığını sürdürmesi için zorunlu bir koşul olduğunu kanıtlamıştır.

Vaka-3. İstem dışı hızlanma vakası: Modern otomobillerde mekanik gaz kelebeği, Drive-by-Wire sistemiyle elektronik olarak kontrol edilmektedir. Toyota bazı modellerinde yaşanan Elektronik kontrol ünitelerindeki (ECM) yazılım hataları, istem dışı hızlanma sorunlarına yol açmıştır. 2007'de Oklahoma'da bir sürücü ölümcül kaza yaşamış, uzman incelemesi ECM kodunda ciddi kusurlar ve endüstri standartlarına uyumsuzluk tespit etmiştir. Kod, MISRA gibi genel kabul görmüş endüstri standartlarından uzak olup, Toyota kendi geliştirdiği standartlara da uymamıştır (Dunn, 2013).

Analiz-3: Mühendislerin ürün tasarımında kullanıcı güvenliğini en öncelikli hedef olarak belirlemesi gerekir. Mühendislerin alanlarında yetkin olarak çalışması, mevcut standartları takip etmesi ve sürekli güncel bilgiye sahip olması beklenir. Bu vakada standartlara uyumsuzluk, belgelenmemiş düzeltmeler ve kötü yapılandırılmış kodların kullanılması, hem teknik hem de etik sorumluluk ihlali olarak değerlendirilebilir.

Çıkarılması gereken ders-3: Yazılım tasarımı, mekanik veya elektronik mühendislik tasarımından farklı değildir. Güvenlik ihmali ürünlerin kritik sistemlerinde hatalar yaşanmasına neden olabilir ve ölümcül sonuçlar doğurabilir. Etik ve teknik sorumluluk, yazılım mühendisliğinde de temel bir yükümlülüktür. Toyota vakası, modern mühendislik sistemlerinde yazılımın güvenliğinin ve kalitesinin ne kadar önemli olduğunu göstermiştir. ECM yazılım hataları, doğrudan fiziksel tehlikelere ve ölümcül kazalara yol açabilir. Vaka, aşağıdaki kritik dersleri içermektedir.

- Endüstri Standartlarına Uyum Zorunluluğu: Özellikle güvenlik açısından kritik sistemlerde (otomotiv gibi), MISRA gibi genel kabul görmüş ve titizlikle hazırlanmış endüstriyel kodlama standartlarına kesinlikle uyulmalıdır. Kendi iç standartlarına bile uyulmaması, sorumluluğun açıkça ihlal edildiğini gösterir.
- Yazılım Kalitesinin Önemi: Eskiden sadece mekanik hatalar tehlike yaratırken, günümüzde kötü yazılmış bir kod (yazılım hatası), mekanik bir arıza kadar, hatta ondan daha tehlikeli sonuçlar doğurabilir (istem dışı hızlanma gibi). Yazılım, sadece bir özellik değil, güvenliğin temel bileşenidir.
- Mühendislik Etiği: Mühendisler, teknik yetkinliklerini kullanarak oluşturdukları kodun kamu güvenliği üzerindeki potansiyel etkisini en üst düzeyde dikkate almak zorundadır. Kod kalitesinden ödün vermek, etik bir ihlaldir.

Özetle, bu ders, güvenlik açısından kritik sistemlerde kodun hatasız, test edilmiş ve evrensel standartlara uygun olmasının yalnızca bir teknik gereklilik değil, aynı zamanda etik bir zorunluluk olduğunu göstermektedir.

Vaka-4. Otopilot modu ve otonom araçlar: 2016'da Tesla Model S, otopilot açıkken dik açıyla yaklaşan traktör römorkuna çarparak ölümcül kaza yaptı. Araç, SAE Seviye 2 (yarı otonom) teknolojisine sahipti; sürücünün müdahalesi gerekmesine rağmen uyarı alınmadı. Kaza insan hatası ve tasarım eksikliğinden kaynaklandığı için Tesla otopilot sistemini güncellemiştir (Euronews, 2016).

Analiz-4: Aracı ve otonom sistemi tasarlayan mühendislerin toplum ve yol kullanıcılarının güvenliğini öncelikli tutmasını öngörür. Otomatik sistemlerin hatalı veya eksik tasarlanması, yazılım geliştiricilerin yani bu işi yapan mühendislerin etik sorumluluğunu artırır. İnsan sürücüler sezgisel hatalar yapabilir; yazılım geliştiricilerin ise öngörülemeyen durumları hesaba katması gerekir.

Çıkarılması gereken ders-4: Otonom araçlar, mühendislik ve etik sorumlulukları birlikte zorunlu kılmaktadır. Yazılım tasarımcıları, insan sezgisinden farklı olarak tüm senaryoları öngörmek ve sistemin güvenliğini garanti etmek zorundadır. Otonom sürüş teknolojilerinde sistem yeteneklerinin ve sınırlamalarının net bir şekilde tanımlanması durumunda ve bu sınırlamalar dahilinde dahi sürücünün sorumluluğu devam etmektedir. Tesla Model S kazası, yarı otonom sistemlerin (SAE Seviye 2) sınırları hakkındaki yanıltıcı algıların ve etik tasarım sorumluluklarının ne kadar önemli olduğunu göstermiştir. Vaka, aşağıdaki önemli dersleri içermektedir:

- *Sınırlı otomasyonun yanıltıcılığı:* Seviye 2 sistemleri, sürücü yardımı sunar, ancak tam otonom değildir. Bu teknolojinin pazarlanması ve kullanılması, sürücülerde aşırı güven oluşturarak, sistemin müdahale gerektirdiği anlarda insan hatasına (dikkat dağınıklığı) yol açmıştır.
- *Tasarım ve iletişim eksikliği:* Otopilot sisteminin kritik bir tehdidi (römork) tespit edememesi ve sürücüyü uyaramaması tasarım eksikliğidir. Mühendislik etiği, bu tür kritik sistemlerin sınırlamalarını net bir şekilde sürücüye iletmeyi ve güvenliğini sağlayacak yedek mekanizmaları (sürücünün dikkatini sürekli denetleme) içermeyi gerektirir.
- *Sürücü sorumluluğunun devamı:* Teknolojinin ilerlemesine rağmen, Seviye 2 sistemlerinde sürüşün birincil sorumluluğu daima insandadır. Şirketlerin, bu teknolojik ayrımı kullanıcılara açıkça ve sürekli olarak anlatması etik bir zorunluluktur.

Özetle, bu ders, otonom sistemler geliştirilirken, sistemin yetkinlikleri ile insan beklentileri arasındaki boşluğun kapatılması için hem mühendislik tasarımı hem de kullanıcı iletişimi açısından etik standartların yükseltilmesi gerektiğini göstermektedir.

Vaka 5- 1986 uzay mekiği Challenger kazası: NASA'nın Challenger uzay mekiği fırlatması öncesinde mühendisler, düşük sıcaklık nedeniyle katı yakıt roketlerinin güvenli olmadığını yöneticilere ilettiler. Ancak yöneticiler uyarıları dikkate almayıp fırlatmayı onayladı. Roket kalkıştan kısa süre sonra O-halkasının kilitlenmemesi nedeniyle parçalandı ve mürettebatın tamamı yaşamını yitirdi (NASA, 2025)

Analiz-5: Burada mühendisler gerekli uyarıyı yaparak kendi etik sorumluluklarını yerine getirmiştir. Ancak yöneticilerin yanlış kararı böyle vakanın yaşanmasına, mürettebatın tamamının ölmesi ile sonuçlanan ve değeri milyarlarca dolarla ölçülen maddi ve manevi kayıp ile sonuçlanmıştır.

Çıkarılması gereken ders-5: Challenger faciasından çıkarılan ana ders, güvenlik ve etik uyarıların daima öncelikli olmasıdır. Mühendislerin teknik ve güvenlik endişeleri; yönetsel baskı, zaman kısıtlaması veya operasyonel hedefler nedeniyle asla göz ardı edilmemelidir. Karar vericiler, güvenlik ve insan hayatını her zaman ilk sıraya koyarak teknik verileri politik veya kurumsal baskılardan üstün tutmalıdır. Ayrıca, organizasyon içinde şeffaf ve güvene dayalı iletişim hayati önem taşır. Bu hem hata riskini azaltır hem de etik sorumluluk kültürünü güçlendirir. Bu vakadan çıkarılan temel ders mühendislerin kritik güvenlik uyarılarının yöneticiler tarafından dikkate alınmamasının ölümcül sonuçlar doğuracağıdır. Yani güvenlik prensipleri yönetime ezdirilmemelidir. Challenger faciası, teknik bilginin ve güvenlik endişelerinin, kurumsal veya politik baskılar (fırlatma takvimine uyma zorunluluğu gibi) karşısında yöneticiler tarafından görmezden gelinmesinin en trajik örneğidir. Vaka, aşağıdaki kritik dersleri içermektedir:

- *Mühendisin sesi:* Mühendisler, teknik verilerle desteklenen güvenlik risklerini rapor ettiklerinde, bu uyarıların mutlak öncelik taşıması gerekir. Mühendislik etiği, mühendisi bu bilgiyi iletmekle yükümlü kılar; kurumsal etik ise yönetimi bu uyarıya kulak vermekle yükümlü kılar.
- *İnsan yaşamının önceliği:* Yöneticiler, zaman çizelgesi, maliyet veya itibar gibi operasyonel faktörler yerine, insan yaşamının güvenliğini her zaman en önemli öncelik olarak kabul etmelidir.
- *Sorumluluk kültürü:* Organizasyonlar, mühendislerin cezasız kalma korkusu olmadan güvenlik sorunlarını açıkça dile getirebildiği ve bu uyarıların ciddiyetle ele alındığı şeffaf ve sorumluluk sahibi bir kültür oluşturmalıdır.

Özetle, Challenger faciası, yönetim kararlarının teknik yeterliliğe ve etik güvenlik zorunluluklarına dayanması gerektiğini ve bu kuralın ihlalinin telafi edilemez felaketlere yol açtığını göstermiştir.

Vaka 6- Ford Pinto yakıt deposu: Ford Pinto vakası, 1968’de belirlenen düşük maliyet ve hızlı üretim hedefleri nedeniyle güvenlik risklerinin göz ardı edilerek üretilen bir ürünün doğurduğu olumsuz sonuçlarını göstermektedir. Arka çarpma testlerinde yakıt deposunun ciddi tasarım kusurları tespit edilmesine rağmen, yönetim maliyet-fayda analizinde düzeltme maliyetlerinin (113 milyon dolar) beklenen tazminatlardan (49 milyon dolar) fazla olduğunu hesaplayarak önlem almamayı tercih etmiştir. Araç 1970’te üretime girmiş, ancak 1977’de yaşanan ölümcül kazalar sonrası Ford’a yüksek tazminat cezaları verilmiş ve 1978’de milyonlarca Pinto geri çağırılmıştır. Olay, Ford’a ciddi bir itibar kaybı yaşatmış ve güvenlik yerine kârlılığın öncelenmesinin etik ve kurumsal açıdan ağır sonuçlarını ortaya koymuştur.

Analiz-6: Tüm tespit edilen aksaklıklara rağmen, ortaya çıkan sorunun fayda maliyet analizi yapılarak sadece maddi kayıp düşünülmüş insan hayatı göz ardı edilmiştir. Ancak kullanım esnasında oluşan kazalar sonucunda Ford firmasının çok büyük maddi kayıplara ve itibar kaybına uğramasına neden olmuştur.

Çıkarılması gereken ders-6: Mühendislik ve üretim süreçlerinde, güvenlik ve insan yaşamının değeri, hiçbir zaman finansal hesaplamalarla veya kârlılık hedefleriyle kıyaslanmamalıdır. Vaka, aşağıdaki kritik noktaları içermektedir:

- *Güvenlik üstünlüğü:* Şirketler, bir ürünün potansiyel tehlikeleri hakkında teknik bilgiye sahip olsalar bile, sırf düzeltme maliyeti yüksek diye bu tehlikeleri göz ardı etmemelidir.
- *Etik sorumluluk:* Yönetimin, potansiyel ölüm ve yaralanma maliyetlerini sadece tazminat ödemesi olarak gören bir maliyet-fayda analizi yapması, derin bir etik başarısızlık örneğidir. İnsan hayatının değeri hesaplanamaz.
- *Uzun vadeli sonuçlar:* Kısa vadeli kârı maksimize etme çabası, uzun vadede çok daha büyük finansal kayıplara (yüksek tazminatlar, geri çağırma maliyetleri) ve geri dönülmez itibar kaybına yol açmıştır.

Özetle, Pinto vakası, mühendislik ve iş etiğinde işletmelerin kârı insan hayatının önüne geçirmesinin kabul edilemez olduğunu kesin bir şekilde göstermiştir.

Vaka-7. THY 1974 Paris kazası: Türk Hava Yolları Uçuş 981, 3 Mart 1974’te Paris-Londra seferi sırasında, kargo kapağındaki yapım hatası

nedeniyle patlama yaşanması sonucu Ermenonville Ormanı'na düşmüş ve 346 kişi hayatını kaybetmiştir. İncelemeler, sorunun daha önce tespit edilmesine rağmen üretici Douglas tarafından gerekli düzeltmelerin yapılmadığını göstermiştir. Olay, tüm DC-10 uçaklarının kontrol edilmesine yol açmış ve sorumluluk büyük ölçüde üretici firmaya atfedilmiştir.

Analiz-7: THY-981 kazası, bilinen bir tasarım hatasının giderilmemesi nedeniyle meydana gelmiş; mühendislikte ihmal, iletişim eksikliği ve güvenlik güncellemelerinin uygulanmamasının ölümcül sonuçlar doğurabileceğini göstermiştir.

Çıkarılması gereken ders-7: Bu vakadan çıkarılan temel ders, daha önce tespit edilmiş kritik güvenlik kusurlarının kâr ve maliyet kaygıları nedeniyle bilerek ihmal edilmesinin yol açtığı felakettir. Yani tekrarlanan güvenlik hatalarının ihmalidir. Daha önce bilinen ve ölümcül potansiyeli kanıtlanmış bir tasarım hatası (DC-10 yük kapısı kusuru) hakkındaki uyarıların, üretici firma tarafından göz ardı edilmesi ve gerekli düzeltmelerin yapılmaması sonucu 346 kişinin hayatını kaybetmesine yol açmıştır. Vaka, aşağıdaki kritik noktaları içermektedir:

- *Bilinçli ihmal:* Üretici firma, güvenlik riskini ve tasarım kusurunu daha önceki olaylardan ve yetkili bildirimlerden bilmesine rağmen, maliyet veya operasyonel nedenlerle gerekli yenilemeyi yapmamıştır.
- *İnsan hayatının önceliği:* Bu durum, mühendislik ve iş etiğinde güvenliğin ve insan yaşamının değerinin, ticari maliyetlerin daima üstünde tutulması gerektiğini en acı şekilde kanıtlamıştır.
- *Kurumsal sorumluluk:* Teknik bir kusurun düzeltilmemesi kararı, büyük bir kurumsal etik başarısızlığıdır ve üretici firmaya ağır yasal ve vicdani sorumluluk yüklemiştir.

Özetle, güvenlik uyarıları ve teknik hatalar hakkında bilgi sahibi olduğunda, bu hataları düzeltme yükümlülüğünün maliyetten veya zamandan bağımsız olarak en yüksek önceliğe sahip olması gerektirir.

5. Sonuç

Mühendislik faaliyetlerinin temel hedefi, insan yaşamını iyileştirmek, mevcut problemlere rasyonel çözümler üretmek, toplumsal refahı artırmak ve yaşam koşullarını kolaylaştırmaktır. Ancak günümüzde, bu amaçla yürütülen bazı çalışmaların öngörülme ya da göz ardı edilen sonuçlarının ciddi olumsuz etkilere yol açtığı bilinmektedir. Özellikle yalnızca kazanç elde etmeye odaklanan ve sonuçları bütüncül bir şekilde değerlendirmeyen uygulamalar, çevre ve ekosistem üzerinde geri dönüşümlü güç zararlar doğurabilmektedir.

Bu nedenle mühendislik kararlarının ve eylemlerinin yol açtığı olumlu ya da olumsuz sonuçların büyük bir kısmı doğrudan mühendislerin etik sorumluluğunda bulunmaktadır. Mühendislerin mesleki uzmanlıklarının yanı sıra güçlü bir etik farkındalığa sahip olmaları zorunludur. Bu bağlamda mühendis, bilimsel ve teknolojik bilgiye dayalı çalışmalarını, toplumun ekonomik ve sosyal gereksinimlerini karşılayacak biçimde ve meslek etiği ilkeleri doğrultusunda yürütmelidir.

Mesleki faaliyetlerini yerine getirirken mühendisler kaçınılmaz olarak etik ikilemlerle karşılaşabilirler. Bu nedenle verdikleri kararların ve gerçekleştirdikleri uygulamaların olası etkilerini çok boyutlu bir biçimde değerlendirme yetisine sahip olmalıdırlar. Yanlış yönelimlerden kaçınabilmek için evrensel etik değerleri ve mesleki etik ilkeleri rehber edinmeleri önem taşır. Sorunlara bu perspektiften yaklaşmak, mühendislik mesleğinin gerektirdiği sorumlulukların etik bilinçle yerine getirilmesini sağlayacak ve mühendislerin topluma karşı görevlerini etkin biçimde yerine getirmelerine yardımcı olacaktır.

Bu bağlamda mühendislik etiği, mühendislere sadece ne yapacaklarını değil, aynı zamanda ne yapmamaları gerektiğini de öğreten hayati bir disiplindir. Analizler göstermektedir ki, etik kurallara uyum; risk yönetimi, itibar koruma ve uzun vadeli kurumsal sürdürülebilirliğin ayrılmaz bir parçasıdır. Çünkü bir mühendislik projesi başarısız olduğunda, bu durum genellikle karmaşık teknik bir arızadan değil, o teknik arızayı doğuran etik bir kararsızlıktan veya bilinçli ihmalden kaynaklanır. Mühendislik etiği, bu kararsızlığın ortaya çıkmasını engelleyecek bir ahlaki zorunluluğu ortaya koymaktadır. Bu zorunluluk, kamu güvenliğini, dürüstlüğü ve çevresel sürdürülebilirliği ve toplum refahını kısa vadeli kârların veya yönetsel baskıların üstünde tutmayı gerektirmektedir.

Sonuç olarak etik ilkeler, mühendisin, teknik bilimi insanlığın en yüksek çıkarları doğrultusunda, sorumlu ve şeffaf bir şekilde kullanmasını sağlamak için zorunlu bir ihtiyaçtır. Bu nedenle, mühendislik etiği, mezuniyet sonrası öğrenilen teorik bir ek kural veya yasalara uymaktan ibaret bir yükümlülük değil; mesleğin icrasının temel direği ve mühendisin vicdanıdır. Çünkü teknik uzmanlık, etik sorumlulukla birleştiğinde gerçek değere ulaşır.

Kaynaklar

- Aslan, Ş. ve Ulutaş, D. A., (2021). Evrensel Değerler Bağlamında Etik. Eğitim yayinevi.
- Aydın, İ. (2002). Yönetmel, Mesleki ve Örgütsel Etik. Pegem A Yayıncılık, <https://pegema.com.tr>. ERT: 15 Kasım 2023.
- Bahar, E. (2014). Meslek etiği. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Bayrak, S. (2001). İş Ahlakı ve Sosyal Sorumluluk. Beta Yayınları, İstanbul.
- Bayles, M., (1988), Professional Ethics, 2.Edition, Belmont, CA: Wadsworth.
- Bektaş, M. (2024). 5.Bölüm:Sürdürülebilirlik ve İş Etiği. Sürdürülebilir Yönetim, Sayfa:83-111, Özgür yayınları, Gaziantep. <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub541>.
- Bilgi, S. ve İpbüker, C., (2005) CBS Etiği, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 28 Mart-1 Nisan 2005, Ankara.
- Çabuk, A. ve İşgüden, B., (2006). Meslek Etiği ve Meslek Etiğinin Meslek Yaşamı Üzerindeki Etkileri. Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 9(16), 59-86.
- Doğan, S. (2021). Eğitim ve Mühendislik Etiği. Uluslararası Toplumsal Bilimler Dergisi, 5(1), 87-108.
- Dunn, M., (2013). Toyota's Killer Firmware: Bad Design and Its Consequences. <https://www.edn.com/toyotas-killer-firmware-bad-design-and-its-consequences/>. ERT: 27 Kasım 2025.
- Fisher, K., (2005) Ethical Decision Making in Academic Advising. NACADA Dea-ringhouse of Academic Advising Resource web.
- Fuchs, S., (1992), The professional Quest for the truth, Albany, NY: State University of NewYork Pres.
- İçli, G., (2002). Sosyolojiye Giriş, Anı Yayıncılık, Ankara.
- Jacobs, B. W. ve Singhal, V. R., (2020). Shareholder Value Effects Of The Volkswagen Emissions Scandal On The Automotive Ecosystem. Production and Operations Management, 29(10), 2230-2251.
- Josephson, M., (2002). Making Ethical decisions. Josephson Institute of Ethics.
- Karalar, R., (2001). Genel İşletme: İş Ahlakı ve Toplumsal Sorumluluk. Anadolu Üniversitesi Yayını, Yayın No.1268, Eskişehir.
- Konak, A., (2020). Etik Liderlik ve Etik. <https://ahmetkonak55.medium.com/etik-ka-rar-verme>. ERT: 8 Aralık 2023.
- Kubılay, S., (2003). Etik Daima. Türkiye Mühendislik Haberleri.426(4), 25-26.
- Kuçuradi, İ., (1998). Uludağ Konusmaları: Özgürlük, Ahlak, Kültür Kavramları. Ankara, 1998, Türkiye Felsefe Kurumu, Türk Felsefe Dizisi:1.
- Kuçuradi, İ., (1999), Etik, Türkiye Felsefe Kurumu Yayınları, Türk Felsefesi ya da Simurg Dizisi:5, Ankara, ISBN 975-7748-13-7

- Kuçuradi, I. (2003), Etik ve “Etikler”, TMH -Türkiye Mühendislik Haberleri, Sayı: 423 - 2003/1
- MMO, (2025). Makine Mühendisleri Odası Mesleki Davranış İlkeleri, <https://www.mmo.org.tr/merkez/mesleki-davranis-ilkeleri> ERT: 28 Kasım 2025.
- NASA, (2025). Challenger STS-51L Kazası. <https://www.nasa.gov/challenger-sts-51l-accident>. ERT: 25 Kasım 2025.
- NSPE, (2025). Code of Ethics. <https://www.nspe.org/career-growth/ethics/code-ethics>. ERT: 28 Kasım 2025.
- Oğulata, R. T., (2023). Mühendislikte Sorumluluk ve Etik. Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi, 10(2), 444-459.
- Onbaşıoğlu, S.U., (2004). Teknoloji, Etik ve Mühendis Sorumluluğu. I.Ulusal Mühendislik Kongresi 20-21 Mayıs 2004, Eski Foça, Izmir.
- Oruç, İ., (2004). İş Etiğinin Kurumsallaştırılması ve Karşılaştırmalı Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne.
- Parloff, R., (2018). How VW paid \$25 Billion for ‘Dieselgate and got off easy. Fortune 6 Feb 2018. <https://www.propublica.org/article/how-vw-paid-25-billion-for-dieselgate-and-got-off-easy>. ERT: 20 Kasım 2025
- Pehlivan, İ., (1998) Yönetmelik Mesleki ve Örgütsel Etik. Pagem Yayınları, Ankara.
- Pieper, A., (1999), Etiğe Giriş, Ayrıntı Yayınları, İstanbul, “Einführung in die Etik” kitabından çevirenler Veyssel Atayman, Gönül Sezer, ISBN 975-539-194-0.
- Resnik, D.B., (2004), Bilim Etiği , Ayrıntı Yayınları, İstanbul, “The Ethics of Science An Introduction” kitabından çeviren Vicdan Mutlu, ISBN 975-539-402-8
- Sağır, C., (2006). Karar Verme Sürecini Etkileyen Faktörler ve Karar Verme Sürecinde Etiğin Önemi: Uygulamalı bir Araştırma.Trakya Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Y.Lisans Tezi, 219 sayfa., Edirne.
- Saxena, S. (2004). Politics, Ethics and Social Responsibility Of Business. Taxmann Allied Services Pvt. Ltd.
- Sertdemir, R., (2021). Meslek Etiği Nedir? Meslek Etiği İlkeleri Nelerdir? <https://yazbuz.com/meslek-etigi-nedir>. ERT: 12 Kasım 2025.
- Tutorialspoint, (2025). Engineering Ethics Tutorial. https://www.tutorialspoint.com/engineering_ethics ERT: 28 Kasım 2025.
- UNESCO, (2010). Engineering Report: Engineering: Issues Challenges and Opportunities for Development. ISBN 978-92-3-104156-3.
- Yıldırım, A., (2010). Etik Liderlik ve Örgütsel Adalet İlişkisi Üzerine Bir Uygulama. Karamanoğlu Mehmet Bey Üni. Sos.Bil.Üni., Y.Lisans tezi, Karaman.
- Yüce, B. (2023). Hemşirelik Mesleğinde Etik İlkeler Farkındalık Ölçeğinin Geliştirilmesi: Geçerlik ve Güvenirlik Çalışması. Uludağ Üniversitesi, Sağlık Bil. Ens. Y.lisans Tezi, Bursa.



GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERİNİN TASARIM VE DEĞERLENDİRMESİNDE ETKİN ALBEDONUN ROLÜ

“ ”

Emrah DENİZ¹

¹ Prof. Dr. Emrah DENİZ, Karabük Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye edeniz@karabuk.edu.tr <https://orcid.org/0000-0003-0182-2631>

1. Giriş

Güneş enerjisi, büyük ölçekli ve düşük karbonlu elektrik sağlayabilmesi ve böylece iklim değişikliğinin azaltılmasına doğrudan katkıda bulunabilmesi nedeniyle küresel enerji dönüşümünün temel bir ayağı olarak ortaya çıkmıştır. Son değerlendirmeler, 2019 yılında güneş enerjisinin yaklaşık 694 TWh elektrik ürettiğini, yani küresel yenilenebilir enerji üretiminin yaklaşık %10'unu karşıladığını ve 2040 yılına kadar fotovoltaik (PV) enerjinin tek başına hidroelektrik enerjiyi geçebileceğini ve rüzgar enerjisiyle birlikte yenilenebilir enerjinin elektrik üretimindeki payını yaklaşık üçte ikisine çıkarabileceğini göstermektedir (Xu, Li, Qin, & Bach, 2024).

Yüzyılın ortasına kadar net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmak için bu çalışmalar, güneş enerjisinin 2030 yılına kadar küresel enerji üretiminin beşte birinden fazlasını oluşturacak şekilde hızla büyümesi gerektiğini göstermektedir. Bu durum, yerüstü güneş enerjisi santrallerinin, çatı üstü fotovoltaik sistemlerin ve yüzer fotovoltaik ile tarımsal fotovoltaik uygulamalar gibi yeni nesil konfigürasyonların daha önce görülmemiş ölçekte yaygınlaştırılmasını gerekli kılmaktadır (Xu vd., 2024).

Herhangi bir güneş enerjisi uygulamasının temelinde, gelen kısa dalga radyasyonun yüzeyde emilen ve yansıyan bileşenlere ayrılması yer alır. Bu nedenle, gelen geniş bant güneş radyasyonuna oranla yansıtılan kısmı tanımlayan kara yüzeyi albedosu, karasal enerji bütçesi ile buna bağlı su ve karbon döngülerinde kritik bir değişkendir (Jia, Wang, Peng, Ma, & Liang, 2025). Temel bir iklim değişkeni olan kara yüzeyi albedosu, arazi kullanımı, bitki örtüsü ve toprak koşullarındaki değişimlerin atmosferik dolaşım ve yüzey sıcaklığı üzerindeki geri beslemelerini belirler ve bu nedenle kara yüzeyi ile iklim modellerinde, toprak ve bitki örtüsü katkılarını ayıran arama tabloları ve parametrelendirmeler yoluyla yaygın biçimde kullanılır (Jia vd., 2025). Aynı yansıtıcı özellikler, özellikle çevredeki zemin, su ya da yapı yüzeylerinden gelen yansımaların önemli olduğu durumlarda, güneş kollektörlerinin yararlanabileceği ışıyım miktarını da belirler.

Yüzey tipi, pürüzlülük ve nemin doğal ve yapay ortamlarda albedoyu nasıl kontrol ettiğini gösteren geniş bir çalışma birikimi mevcuttur. Pürüzlü topraklar için fiziksel tabanlı modeller ve laboratuvar ölçümleri, mikro topografya ve agrega yapısının gölgeleme ve çoklu saçılmayı değiştirerek etkin albedoyu önemli ölçüde etkilediğini ve uydu ya da yer gözlemlerinden temsil gücü yüksek değerler elde etmeyi zorlaştırdığını ortaya koymuştur (Wang, Zhang, You, Pei, & Bai, 2019). Kaldırım ve eğimli yüzeyler üzerinde yapılan saha ölçümleri de albedonun yalnızca malzeme ve renge değil, aynı zamanda görüntüleme ve aydınlatma geometrisine de bağlı olduğunu göstermiştir. Bu nedenle açık alan koşullarında güvenilir geniş bant albedo ölçümü için çift piranometre yöntemleri ve güncellenmiş ölçüm standartları

önerilmektedir. Son yıllarda geliştirilen yarı deneysel çift yönlü yansıma dağılım fonksiyonu (BRDF) modelleri, toprak, fotosentetik olmayan bitki örtüsü ve fotosentetik bitki örtüsü albedo bileşenlerini; toprak nemi, arazi pürüzlülüğü ve güneş zenit açısını açıkça içerecek biçimde parametrelendirerek yüksek mekânsal çözünürlükte boşluksuz küresel albedo haritaları üretmektedir (Jia vd., 2025).

Bu gelişmeler, kara yüzeyi şemalarında net radyasyon, buharlaşma-terleme bölüşümü ve biyofiziksel geri beslemelerin daha doğru öngörülmesi için önemlidir. Radyometri ve güneş enerjisi tasarımı ise çoğu zaman, yön, spektral içerik ve kollektör geometrisini birlikte dikkate alan “etkin albedo” kavramı ile çalışmak gerekir. Albedo ve yansıma terminolojisinin kapsamlı bir değerlendirmesi, yönlü yarım küresel albedo ile yarım küresel yönlü yansıma gibi nicelikler arasındaki farkları netleştirmekte ve güneş zenit açısı, gökyüzü parlaklık dağılımı, görüş geometrisi ve yüzey anizotropisinin ortak etkilerini içeren bir “etkin albedo / görünür yansıma” tanımı önermektedir (Pirouz, Naghib, Kontoleon, Javadi Nejad, & Piro, 2025). Bu türden etkin albedo, ister eğik bir fotovoltaik modül, ister bir güneş havuzu yüzeyi ya da yoğunlaştırıcı bir güneş termal alıcısı söz konusu olsun, kollektöre ulaşan yansıyan radyasyon miktarını belirleyen başlıca büyüklüktür.

Su yüzeyleri, albedolarının geliş açısı ve atmosfer koşullarına yüksek duyarlılığı nedeniyle özel bir durumu temsil eder. Okyanus üzerine uygulanan Monte Carlo tabanlı radyasyon transfer simülasyonları, güneş zenit açısı ve atmosferik geçirgenliğin fonksiyonu olarak okyanus yüzey albedosuna (OSA) ilişkin parametrelendirmeler türetmiş ve hem açık hem de bulutlu gökyüzü koşulları altında OSA’yı çevresel değişkenlerle ilişkilendirmek için kompakt ifadeler sunmuştur. Bu analizler, OSA’nın $\cos \theta_z$ ve atmosferik zayıflama derecesine güçlü ve doğrusal olmayan bir biçimde bağlı olduğunu göstermiştir. Bu durum, yüzer güneş santralleri veya güneş havuzlarına ev sahipliği yapan göl, rezervuar ve deniz yüzeyleri üzerindeki kullanılabilir ışıının tahmininde doğrudan önem taşımaktadır (Huang, Wang, Chen, Guo, & Qiao, 2024). Bu tür parametrelendirmeler uzun dönemli uydu ya da yeniden analiz veri kümeleriyle birleştirildiğinde, su kütleleri için günlük, mevsimsel ve yıllık etkin albedonun güneş enerjisi tasarımı açısından anlamlı ölçeklerde hesaplanmasına olanak sağlamaktadır.

Benzer şekilde, kısa dalga aşağı ve yukarı radyasyon akılarının güneş geometrisi ve uydu görüş açısı bilgileriyle birlikte kullanılması, kara albedosunun akı ölçümlerinden daha doğru biçimde elde edilmesine imkân vermektedir. Önerilen yeni bir yöntem, bu büyüklükleri en uygun şekilde birleştirerek yönlü yarım küresel yüzey albedosunu üretmekte ve bağımsız referanslarla karşılaştırıldığında pek çok enerji dengesi ve güneş kaynağı uygulaması için yeterli olan 0,01–0,02 mertebesinde kök ortalama kare hata değerleri sunmaktadır (Ziar, Sönmez, Isabella, & Zeman, 2019). Yöntemin

doğrudan radyasyon akılarıyla çalışması, mevcut küresel radyasyon veri setleriyle entegrasyonu kolaylaştırmakta ve karmaşık topoğrafya ya da heterojen arazi örtüsü üzerinde güneş kaynağı haritalarının iyileştirilmesi için kullanışlı bir araç sunmaktadır.

Büyük ölçekli güneş enerjisi tarlalarının hızla kurulması hem iklimin hem de enerji veriminin yüzey albedo değişikliklerine ne kadar duyarlı olduğunu göstermektedir. 116 büyük fotovoltaiik ve yoğunlaştırıcı güneş enerjisi santralinin yakın zamanda yapılan küresel bir analizinde, güneş enerjisi tarlalarının albedo, bitki örtüsü ve kara yüzeyi sıcaklığı üzerindeki etkilerini ölçmek için uzun vadeli Orta Çözünürlüklü Görüntüleme Spektrometresi (MODIS) gözlemleri kullanılmıştır. Ortalama olarak, bu tarlaların inşası kısa dalga albedoyu yaklaşık 0,016 oranında azaltmış ve çevredeki alanlara göre bitki örtüsü endekslerini bir miktar düşürmüş, kara yüzeyi sıcaklığında ise ortalama gündüz 0,5 K'lık bir soğuma sağlamıştır. Bu etkilerin işareti ve büyüklüğü arka plandaki arazi örtüsüne ve tarla boyutuna göre değişmiştir. Çorak alanlar, albedo ve yüzey sıcaklığındaki değişimlerin en yüksek olduğu bölgeler olarak öne çıkmıştır. Bitki örtüsündeki değişimlerin şiddeti ise, panellerin kurulumu sırasında dizilerin altındaki ve arasındaki bitkilerin tamamen temizlenip temizlenmemesine ya da korunmasına bağlı olarak farklılık göstermiştir.

Büyük ölçekli güneş enerjisi uygulamalarının, kaçınılmaz olarak yerel yüzey özelliklerini ve yüzey enerji dengesini değiştirdiğini ortaya koyan bu çalışma, çevresel etkilerin değerlendirilmesinde ve iklimle uyumlu güneş enerjisi tarlalarının tasarımında etkin (effective) albedonun doğru bir biçimde temsil edilmesinin kritik önem taşıdığını vurgulamaktadır.

PV teknolojisi için, zemin ve çatı albedo değerleri, özellikle çift taraflı tasarımlarda, modüllerin hem ön hem de arka yüzeylerine düşen ışıının şiddetini güçlü bir şekilde etkiler. Farklı zemin kaplama malzemeleri altında tek taraflı ve çift taraflı modülleri karşılaştıran saha ve simülasyon çalışmaları, beyaz çakıl veya açık renkli beton gibi yüksek albedo değerine sahip yüzeylerin, arka taraf ışıının şiddetini önemli ölçüde artırabileceğini ve böylece enerji verimini geleneksel koyu renkli toprağa göre %15-30 oranında artırabileceğini göstermektedir. Bu kazanımlar, Seviyelendirilmiş elektrik üretim maliyeti (LCOE) etkileyecek kadar büyüktür ve modül aralığı, eğim açısı, öz gölgeleme ve yansımış ışık arasındaki karmaşık etkileşimi çözebilen Monte Carlo ışın izleme yaklaşımlarını da içeren, çift yüzeyli sistemlerin ayrıntılı optik modellenmesini teşvik etmiştir (Pirouz et al., 2025).

Binaya entegre ve çatı tipi PV sistemler, albedoda hem büyüklüğü hem de zamansal değişkenliği etkileyen çatı malzemeleri, renkleri ve bitki örtüsü nedeniyle ilave bir karmaşıklık boyutu oluşturur. Akdeniz iklimindeki çatılar üzerine yapılan yakın tarihli bir çalışma, albedo değerlerinin bitkilendirilmiş çatılar için yaklaşık 0,16–0,19 aralığında, beyaza boyalı çatılar için 0,61 ve

beyaz çakıllı çatılar için 0,4 düzeyinde olduğunu ve bu değerlerdeki mevsimsel değişimlerin bitki büyümesi ve yüzey kirlenmesi ile ilişkili olduğunu bildirmiştir. Aynı çalışma, beyaz çatılarda yüksek albedo değerini korumanın düzenli temizlik yapılmadıkça güç olduğunu, yansıtılığın yılda yaklaşık 0,15 oranında azalabildiğini ortaya koymuş ve tipik kristal yapılı fotovoltaik modüllerin kendilerinin de 0,10'un altında bir albedo değerine sahip olduğunu belirtmiştir (Pirouz vd., 2025).

Çatılardaki çift taraflı dizilerin detaylı simülasyonları, modül geometrisi, çatı yansımaları ve çevredeki kentsel morfoloji arasındaki etkileşimin hem enerji verimini hem de gölgeleme desenlerini yönettiğini göstererek, kentsel fotovoltaik planlamada bölgeye özgü etkin albedo karakterizasyonuna duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır. Daha büyük ölçeklerde, arazi yönetimi ve kentleşmenin neden olduğu albedo değişimlerinin iklimsel önemi giderek daha fazla kabul görmektedir. Yüksek çözünürlüklü albedo bileşeni haritaları, arazi yüzey modellerinde toprak ve bitki örtüsü albedosunun güncellenmesinin, yarı kurak bölgelerde toprak yüzeyi net radyasyonunu metrekare başına birkaç watt değiştirebileceğini ve buharlaşma-terleme bölüşümünde yaygın görülen önyargıları azaltabileceğini göstermektedir (Jia vd., 2025).

Kentsel genişleme çalışmaları, koyu renkli yüzeyler nedeniyle azalan albedonun bölgesel ısınmaya ölçülebilir bir katkıda bulunduğunu, serin çatılar ve yansıtıcı kaldırımlar gibi bilinçli “radyasyon yönetimi” stratejilerinin ise insan kaynaklı radyatif zorlamanın bir kısmını telafi edebileceğini ortaya koymaktadır. Güneş tarlaları, çatı sistemleri ve diğer güneş enerjisi altyapıları yüzeyin yansıtma özelliğini (albedoyu) değiştirdiği için, bu tür sistemlerin yaygınlaşması, albedodaki değişimlere bağlı olarak işleyen iklim sistemindeki geri besleme mekanizmalarını doğrudan etkiler ve onlarla etkileşim içinde olur. Dolayısıyla, enerji sistemi planlamasında etkili albedonun hesaba katılması, yerel enerji verimleri ile küresel iklim hedefleri arasında bir köprü oluşturur.

İncelenen literatür, etkin albedonun sabit bir yüzey özelliği değil, yüzey bileşimi, küçük ölçekli geometri, nem koşulları, bitki örtüsü durumu, atmosferik özellikler ve güneş enerjili sistemlerin konfigürasyonu tarafından şekillendirilerek ortaya çıkan bir nicelik olduğunu göstermektedir. Güneş kaynağı değerlendirmesi ve fotovoltaik enerji verimi tahminindeki belirsizliği azaltmak için etkin albedo hakkında güvenilir bilgi gereklidir. Çünkü bu hesaplamalar gelen ışınımın doğrudan, dağınık ve yansıyan bileşenlere nasıl bölündüğüne karşı oldukça hassastır. Ayrıca, etkili albedo bilgisinin, çift yüzeyli yer tipi paneller, çatı uygulamaları ve su yüzeyine yerleştirilen ya da göl temelli sistemler gibi güneş enerjisi sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu açısından da arka yüzey ve yansımaya bağlı kazançlar, difüz gökyüzü bileşenine yakın ya da onu aşan büyüklüklere ulaşabilmekte

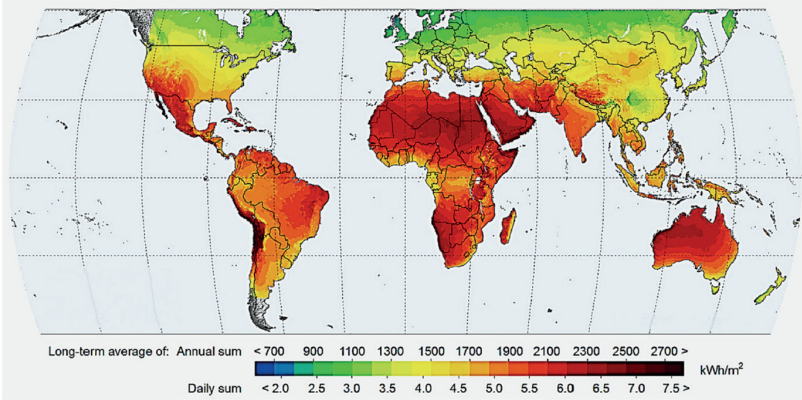
olduğundan kritik bir öneme sahiptir. Bu gereklilik, güçlü su yüzeyi yansımalarının ve gölün mevsimsel olarak değişen optik özelliklerinin hem sistem performansını hem de yerel radyasyon ortamını önemli ölçüde değiştirebildiği göl yüzeylerine veya yakınlarına kurulan güneş enerjisi tesisleri için özellikle önemlidir. Ayrıca, büyük ölçekli güneş enerjisi kullanımının çevresel ve iklimsel etkilerini değerlendirmek için etkin albedonun karakterize edilmesi gerekir. Çünkü yüzey yansımadaki nispeten küçük değişiklikler bile kara yüzeyi sıcaklığını, bitki örtüsü dinamiklerini ve bölgesel radyasyon dengesini değiştirebilir. Küresel güneş enerji sistemlerinin kullanımları artmaya devam ettikçe, etkin albedonun sağlam, ölçüme dayalı parametrelendirmelerinin mühendislik tasarım araçlarına ve Dünya sistem modellerine dahil edilmesi, güvenilir performans tahminleri üretmek ve özellikle hassas göl ve kıyı şeridi ortamlarında, güneş teknolojilerinin karbonsuzlaştırma faydalarının minimum istenmeyen iklimsel yan etkiyle gerçekleştirilmesini sağlamak için zaruri olacaktır.

2. Güneş Enerjisinin Küresel Potansiyeli

Atmosferik CO₂ konsantrasyonlarındaki ve küresel ortalama sıcaklıktaki hızlanan artış, iklim değişikliğini dünya çapındaki toplumlar için giderek daha acil bir sorun haline getirmiştir. Buna karşılık, birçok ülke nihayetinde karbon nötrlüğünü hedefleyen karbonsuzlaştırma yol haritalarını duyurmuştur. Bu geçiş yalnızca düşük karbonlu enerji kaynakların fosil yakıtların yerini aşamalı olarak alabilirse mümkün olacaktır. Bu bağlamda, güneş, rüzgar ve hidroelektrik gibi yenilenebilir kaynaklar, enerji sistemini daha sürdürülebilir bir yapılandırmaya doğru kaydırmada merkezi bir rol oynamaktadır. Güneş enerjisi, yenilenebilir enerjinin en temel ve umut verici biçimlerinden biridir ve genellikle gelecek nesillerin enerji ihtiyaçlarını karşılamak için başlıca aday olarak kabul edilir. Dünyadan yaklaşık 150 milyon kilometre uzaklıkta bulunan ve ağırlıklı olarak hidrojen ve helyumdan oluşan Güneş, sürekli olarak elektromanyetik radyasyon biçiminde muazzam miktarda enerji yayar. Bu radyasyon, yaklaşık 100 ila 2500 nm arasında geniş bir dalga boyu aralığını kapsar. Yaklaşık %42'si görünür bantta (400-700 nm), yaklaşık %49'u kızılötesinde (700-2500 nm) ve %8'den biraz fazlası ultraviyole bölgesinde (<400 nm) yer almaktadır [6]. Atmosferdeki su buharı, karbondioksit ve oksijen bu spektrumun bir kısmını emerek radyasyon yüzeye ulaşmadan önce karakteristik emilim bantları oluşturur (Alanne & Saari, 2006; Rghif, Colarossi, & Principi, 2023).

Uzun zaman ölçeklerinde, Dünya enlem ve bulutluluğa bağlı olarak yaklaşık 600 ila 2500 kWh m⁻² arasında değişen yıllık küresel güneş ışınımı miktarları alır (Şekil 1). Güneş enerjisi o kadar yüksek seviyede enerji içerir ki, Dünya'ya düşen yaklaşık 30 dakikalık güneş radyasyonu, enerjik olarak

tüm yıllık küresel enerji talebine kıyaslanabilirken, dünyanın çoğu bölgesi için ucuz, çevreye duyarlı ve pratik olarak tükenmez bir kaynak olmaya devam etmektedir. Yüksek güneş ışıını alan Güneş Kuşağı bölgelerinde, günlük yaklaşık $6 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ miktarlarına kolayca ulaşılabilir. Bu seviyedeki güneş girdisi yaklaşık $0,6 \text{ L m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ve $220 \text{ L m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ petrol eşdeğerine karşılık gelir ve bu da güneş enerjisinin bu bölgelerde fosil yakıtların yerini gerçekçi bir şekilde alabileceğini gösterir (Deniz, 2014).



Şekil 1. Küresel güneş ışıını haritası (Kannan & Vakeesan, 2016; Rghif vd., 2023).

Enerji, modern yaşam için temel bir gereksinim olduğundan ve fosil yakıtların çıkarılması ve kullanımı hem ekonomik hem de çevresel baskılar yarattığından, yenilenebilir kaynakların fosil yakıtların yerini alabilmesi (özellikle sabit uygulamalarda), enerji güvenliği ve çevresel bozulmayı aynı anda ele almak için cazip bir yol sunmaktadır. Güneş enerjisi halihazırda kurutma, pişirme, damıtma, sıcak su temini ve elektrik üretimi için yaygın olarak kullanılmaktadır ve tuzlu kaynaklardan tatlı su üretmek için termal veya fotovoltaiik tuzdan arındırma teknolojileriyle etkili bir şekilde birleştirilerek su sıkıntısı çeken bölgelerde hem evsel tüketimi hem de tarımsal faaliyetleri destekleyebilir (Deniz, 2014).

3. Güneş Radyasyonunun ve Yüzey Yansımasının Temelleri

Fresnel yansıtma katsayısı ve Albedo etkisi değerlerinin tespit edilmesi amacıyla NASA POWER saatlik değerleri yerel saat cinsinden alınarak öncelikle güneş saatine dönüştürülmüş ve ardından güneş geometrisi parametreleri hesaplanmıştır.

Deklinasyon açısı (δ) değeri yılın gün sayısına (n) bağlı olarak değişim göstermekte ve aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilmektedir (Deniz, 2026; Golding & Hicks, 1992).

$$\delta = 23.45 \sin \left(\frac{2\pi(284+n)}{365} \right) \quad (1)$$

Zaman denklemi ise Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanabilir. Eşitlikte yer alan ara açı (B) değeri ise Eşitlik 3 yardımıyla hesaplanabilir.

$$\text{EoT} = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (2)$$

$$B = \frac{2\pi}{365} (n - 81) \quad (3)$$

Yerel saat t_L (saat cinsinden) ile güneş saati t_s arasındaki ilişki Eşitlik 4 ile ifade edilmektedir. Eşitlik 4'te yer alan yerel standart meridyen değeri $\text{LSTM} = 15 \text{ TZ}$ şeklinde ifade edilir. Burada, TZ, çalışma bölgesi zaman dilimini (örneğin UTC+3 için TZ = 3) ifade etmektedir.

$$t_s = t_L + \frac{\text{EoT} + 4(\text{LSTM} - \lambda)}{60} \quad (4)$$

Eşitlik 4'te λ boylam açısıdır ($^\circ$). Güneş saati kullanılarak saat açısı (ω) ise Eşitlik 5 kullanılarak elde edilir (Alam, Saha, Chowdhury, & Rahman, 2005).

$$\omega = 15(t_s - 12) \quad (5)$$

Güneş zenit açısı (θ_z) klasik güneş geometrisi bağıntılarına bağlı olarak Eşitlik 6 ile belirlenir.

$$\theta_z = \arccos(\cos \theta_z) \quad (6)$$

Güneş azimut açısı (γ_s) için, θ_z kullanılarak sinüs ve kosinüs bileşenleri ise Eşitlik 7 ve 8 ile belirlenir.

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\sin \theta_z} \quad (7)$$

$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \theta_z \sin \varphi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \varphi} \quad (8)$$

Güneşin doğuş/batış saat açısı (ω_s) Eşitlik 9, buna karşılık gelen saat cinsinden gün uzunluğu değeri (N) ise Eşitlik 10 ile hesaplanır (Alam vd., 2005).

$$\omega_s = \arccos (-\tan \varphi \tan \delta) \quad (9)$$

$$N = \frac{2\omega_s}{15} \quad (10)$$

Atmosferdışı güneş ışıınımı ve yatay düzlem ışıınım bileşenlerinin belirlenmesi aşamasında öncelikle Yer-Güneş uzaklığı düzeltme katsayısı (d_r) değeri belirlenir (Acar, 2002).

$$d_r = 1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi N}{365} \right) \quad (11)$$

Duffie–Beckman formülasyonu kullanılarak günlük atmosfer dışı yatay düzlemdeki güneş ışıınım şiddeti değeri (H_0), $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ cinsinden Eşitlik 12 ile tespit edilir.

$$H_0 = \frac{24 \cdot 3600}{\pi} G_{sc} d_r [\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin \varphi \sin \delta] \quad (12)$$

Eşitlik 12’de G_{sc} değeri 1367 W/m^2 olarak alınmıştır. Her bir saat dilimi için, NASA POWER verisinden alınan direkt normal ışıınım (DNI_i) ve difüz yatay ışıınım (DHI_i) kullanılarak global yatay ışıınım değeri Eşitlik 13 ve aynı şekilde yatay düzlemdeki direkt bileşen Eşitlik 14 ile tespit edilir.

$$GHI_i = DNI_i \max(0, \cos\theta_{z,i}) + DHI_i \quad (13)$$

$$B_{h,i} = DNI_i \max(0, \cos\theta_{z,i}) \quad (14)$$

Bu çalışmada su yüzeyi için anlık/yönlü Fresnel yansıtma katsayısı hesaplanırken, yatay pürüzsüz su yüzeyi olduğu varsayılmış ve gelen ışınımın su yüzeyine göre gelme açısı θ_i olarak zenit açısı θ_z alınmıştır. Snell kırılma yasasıyla su içindeki kırılma açısı Eşitlik 15 ile hesaplanır.

$$\sin \theta_t = \frac{\sin \theta_i}{n_w} \quad (15)$$

burada su kırılma indisi (n_w) yaklaşık olarak 1.333 olarak alınmıştır. Kırılma açısı (θ_t), Snell yasasına göre $\theta_t = \arcsin(\sin \theta_i/n_w)$ eşitliği ile bulunur.

s ve p polarizasyon bileşenleri için Fresnel yansıma katsayıları ise sırasıyla Eşitlik 16 ve 17 kullanılarak belirlenebilir.

$$R_s = \left[\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \right]^2 \quad (16)$$

$$R_p = \left[\frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \right]^2 \quad (17)$$

Doğal yani kutupsuz güneş ışınımı için için ortalama Fresnel yansıması Eşitlik 18 ile belirlenir ve bu büyüklük her saat için su yüzeyine gelen toplam ışınımın hangi oranda yansıdığını ifade eder. Yani, bir zaman dilimdeki anlık/yönlü (instantaneous) albedo değerini ifade eder (Jaefarzadeh, 2004). Bu çalışma bağlamında R_w , su yüzeyinin aynı anda hem spekülör hem de ortalama polarizasyon için efektif geniş bant yansıtma oranını temsil eder.

$$R_w = \frac{1}{2}(R_s + R_p) \quad (18)$$

Eğimli düzleme gelen güneş ışıının hesap edilmesi amacıyla, panel eğim açısı (β) ve panel azimut değeri (γ_p) kullanılmıştır. Eğimli düzleme gelen ışıının geliş açısının kosinüs değeri Eşitlik 19 ile hesaplanır.

$$\cos \theta_{i, \text{plane}} = \cos \beta \cos \theta_z + \sin \beta \sin \theta_z \cos (\gamma_s - \gamma_p) \quad (19)$$

Yatay düzleme gelen direkt güneş ışıının şiddeti değerini, eğik düzleme gelen ışıının şiddeti değerine dönüştürebilmek amacıyla kullanılan oran (beam tilt ratio) Eşitlik 20 ile bulunur.

$$R_b = \frac{\cos \theta_{i, \text{plane}}}{\cos \theta_z} \quad (20)$$

R_b katsayısı kullanılarak eğik düzleme ulaşan direk güneş ışıının bileşeni Eşitlik 21 ile hesaplanır.

$$G_{\text{beam},i}(\beta) = \text{DNI}_i R_b \quad (21)$$

Eğik düzleme ulaşan difüz bileşen, gökyüzünden gelen difüz ışıının tüm yönler eşit dağıldığı kabulüyle (yani gökyüzü izotropik kabul edilmiştir) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$G_{\text{dif},i}(\beta) = \text{DHI}_i \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (22)$$

Su yüzeyinden yansıyan ve panel tarafından görülen albedo bileşeni hesaplanırken, su yüzeyinin alt yarı kürede ışıının saçtığı ve panelin bu yarı kürenin yalnızca bir kısmını gördüğü varsayılmıştır. Bu görülen kısmın oranı, yatay zemin ile eğik düzlem arasındaki klasik görüş faktörü (view factor) kullanılarak ifade edilir.

$$G_{\text{alb},i}(\beta) = \text{GHI}_i R_{w,i} \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (23)$$

Direkt bileşen ($G_{\text{beam},i}(\beta)$), Diffuse bileşen ($G_{\text{dif},i}(\beta)$) ve Albedo bileşeni ($G_{\text{alb},i}(\beta)$) birlikte değerlendirildiğinde, panel yüzeyine (eğik düzleme) ulaşan toplam güneş ışınlam şiddeti, yani plane-of-array (POA) ışınlamı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$G_{\text{POA},i}(\beta) = G_{\text{beam},i}(\beta) + G_{\text{dif},i}(\beta) + G_{\text{alb},i}(\beta) \quad (24)$$

Her bir saat için, yatay su yüzeyinden yansıyan ışınlam akısı Eşitlik 25 kullanılarak belirlenir.

$$G_{r,i} = \text{GHI}_i R_{w,i} \quad (25)$$

Bir gün için göl yüzeyinin etkin albedosu, gün boyunca ölçülen anlık Fresnel albedo değerlerinin, aynı saatlere karşılık gelen GHI büyüklükleriyle ağırlıklandırılmasıyla hesaplanmıştır. Başka bir ifadeyle, GHI'nin büyük olduğu saatler ortalamaya daha fazla katkı yapmakta ve böylece göl yüzeyinin gün içindeki ışıma ağırlıklı etkin albedosu elde edilmektedir (Gueymard, Lara-Fanego, Sengupta, & Xie, 2019).

$$\alpha_{\text{eff,day}} = \frac{\sum_{i \in \text{gün}} \text{GHI}_i R_{w,i}}{\sum_{i \in \text{gün}} \text{GHI}_i} \quad (26)$$

Burada $\sum_{i \in \text{gün}} \text{GHI}_i$, ilgili gün için saatlik GHI değerlerinin toplamını temsil etmektedir. Aynı yaklaşım ay ölçeğine genişletilerek, her bir yıl-ay kombinasyonu için etkin albedo, ilgili ay boyunca kaydedilen tüm saatlik GHI ve Fresnel albedo değerleri kullanılarak ışıma ağırlıklı ortalama şeklinde tanımlanmıştır. Böylece, bulutluluk ve güneşlenme süresindeki değişimlere bağlı olarak her ay için karakteristik bir etkin göl albedosu elde edilmektedir.

$$\alpha_{\text{eff,month}} = \frac{\sum_{i \in \text{ay}} \text{GHI}_i R_{w,i}}{\sum_{i \in \text{ay}} \text{GHI}_i} \quad (27)$$

Mevsimsel ölçekte, etkin albedo benzer biçimde tanımlanmış ve ilgili mevsim boyunca yer alan tüm saatlik GHI ve Fresnel albedo değerlerinin ışıma ağırlıklı ortalaması olarak hesaplanmıştır. Bu tanım, göl yüzeyinin kış, ilkbahar, yaz ve sonbahar dönemlerine özgü karakteristik yansıtma davranışını ortaya koymaya imkân vermektedir.

$$\alpha_{\text{eff,season}} = \frac{\sum_{i \in \text{mevsim}} \text{GHI}_i R_{w,i}}{\sum_{i \in \text{mevsim}} \text{GHI}_i} \quad (28)$$

4. Vaka Çalışması: Çıldır Gölü Üzerindeki Etkin Albedo ve Güneş Tasarımına Etkileri

41.0361°K, 43.2967°D koordinatları, Türkiye'nin kuzeydoğusunda, Ardahan ve Kars il sınırları içerisinde yer alan Çıldır Gölü'nün güneydoğu kıyı kesimi (Çıldır Gölü çevresindeki çalışma alanını) Şekil 2'de gösterilmiştir.

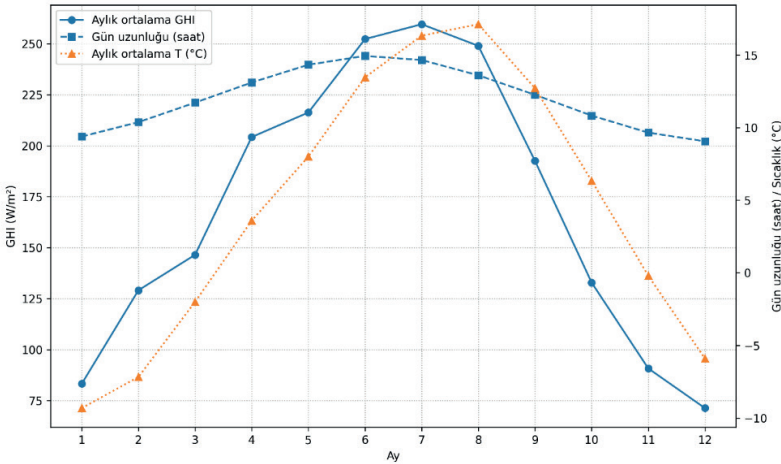
Çalışmada Çıldır Gölü ve yakın çevresinin seçilmesinin başlıca nedeni, bölgenin hem bilimsel açıdan hem de uygulamaya dönük olarak özgün bir laboratuvar ortamı sunmasıdır. Doğu Anadolu'nun yüksek rakımlı bir platosunda yer alan göl, sert karasal iklim koşulları, uzun ve karlı kış mevsimi, yaz aylarında ise yüksek güneşlenme süreleri ile belirgin bir mevsimsel radyasyon ve albedo değişkenliği göstermektedir. Ayrıca göl çevresinin görece düşük sanayi ve yerleşim baskısına sahip olmaması, hesaplanan albedo ve ışıma değerlerinin antropojenik etkilerden büyük ölçüde arındırılmış olmasını sağlar. Bölgenin önemli bir kısmının henüz güneş enerjisi açısından yeterince değerlendirilmemiş olması da, elde edilen sonuçların gelecekte göl kıyısında kurulabilecek PV sistemleri, güneş havuzları ve diğer güneş tabanlı uygulamaların potansiyelini ortaya koyması açısından Çıldır Gölü'nü uygun bir örnek alan haline getirmektedir.



Şekil 2. Çalışma alanı olarak seçilen Çıldır Gölü'nün Türkiye içindeki coğrafi konumu.

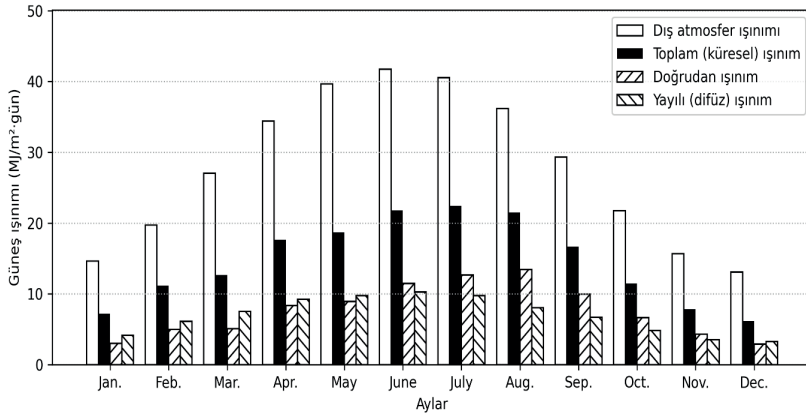
Şekil 3, Çıldır bölgesi için güneş ışınımı, gün uzunluğu ve aylık ortalama sıcaklığın yıl içindeki değişimini göstermektedir. Ocak ve şubat aylarında aylık ortalama GHI 100 W/m^2 'nin altında kalmakta, gün uzunluğu yaklaşık 9-10 saat, sıcaklık ise -5 ila -8°C düzeyindedir. Bu durum kış döneminde hem radyasyon girdisinin hem de termal koşulların oldukça sınırlı olduğunu göstermektedir. İlkbaharla birlikte (özellikle Nisan-Mayıs aylarında) hem GHI hem gün uzunluğu hızla artmakta, sıcaklıklar da pozitif değerlere yükselmektedir. Haziran-Temmuz döneminde GHI yaklaşık $250\text{--}260 \text{ W/m}^2$ seviyelerine, gün uzunluğu 15-16 saat civarına ulaşırken sıcaklıklar $15\text{--}17^\circ\text{C}$ ile yılın en yüksek değerlerini almaktadır. Sonbaharda (Eylül'den itibaren) gerek GHI gerek gün uzunluğu ve sıcaklıklar kademeli olarak azalmakta ve yıl sonuna doğru yeniden kış koşullarına dönülmektedir. Bu eğilimler, Çıldır bölgesinde güneş enerjisi uygulamaları açısından en elverişli dönemin geç ilkbahar ve yaz ayları olduğunu, buna karşılık kış aylarında düşük sıcaklıklar, kısa gün uzunlukları ve sınırlı ışınım seviyeleri nedeniyle güneş tabanlı sistemlerin veriminin belirgin biçimde azalacağını göstermektedir.

Çıldır Gölü ve çevresinde güneş ışınımının yıl içindeki mevsimsel değişimini ve yatay düzleme gelen ışınımın bileşenleri Şekil 4'te görülmektedir. Atmosfer dışı ışınım kış aylarında yaklaşık $15\text{--}20 \text{ MJ/m}^2\cdot\text{gün}$ civarındayken yaz başında $40 \text{ MJ/m}^2\cdot\text{gün}$ düzeyine kadar yükselmekte ve sonbaharla birlikte yeniden azalmaktadır. Yeryüzüne ulaşan küresel ışınım da benzer bir eğilim izlemekte ve Ocak'ta $8\text{--}9 \text{ MJ/m}^2\cdot\text{gün}$ düzeyinden başlayarak Haziran-Temmuz döneminde $20\text{--}22 \text{ MJ/m}^2\cdot\text{gün}$ ile en yüksek değerlerine ulaşmakta, ardından kademeli olarak düşmektedir.



Şekil 3. Çıldır bölgesi için güneş ışınımı, gün uzunluğu ve aylık ortalama sıcaklığın yıl içindeki değişimi.

Doğrudan bileşen özellikle ilkbahar sonu ve yaz başında belirgin biçimde artmakta ve bu aylarda küresel ışıının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Buna karşılık kış ve geç sonbahar aylarında difüz ışıının görelî payı artmakta, atmosferdeki bulutluluk ve saçılma etkileri nedeniyle toplam ışıının içerisinde yayılı bileşen daha baskın hale gelmektedir. Bu dağılım, Çıldır bölgesinde güneş enerjisi sistemlerinin tasarımında yaz aylarında yüksek doğrudan ışıının potansiyelinden yararlanılabileceğini, kış aylarında ise daha düşük toplam ışıının ve difüz ağırlıklı koşulların dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

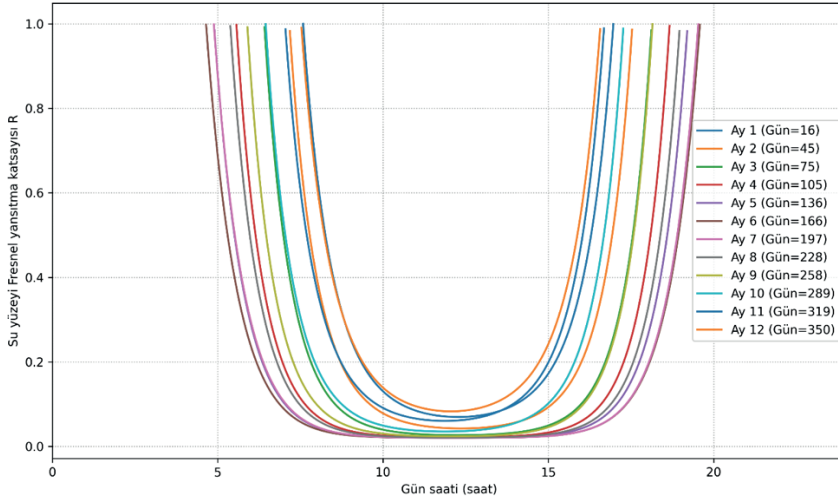


Şekil 4. Çıldır Gölü bölgesi için 2015–2024 dönemine ait aylık ortalama günlük dış atmosfer (H_0), toplam küresel, doğrudan ve yayılı (difüz) güneş ışıının yıl içindeki değişimi (NASA, 2025).

Şekil 5, Çıldır Gölü için yılın her ayını temsil eden 12 tipik günde su yüzeyinin Fresnel yansıtma katsayısının gün boyunca nasıl değiştiğini göstermektedir. Tüm eğrilerde sabah ve akşam saatlerinde, güneş ufka yakinken yansıtma katsayısı bire yaklaşmakta, yani gelen ışıının çok büyük bir kısmı su yüzeyinden yansımaktadır. Güneş yükseldikçe zenit açısı küçülmekte, buna bağlı olarak öğle saatlerine yakın dönemde R değerleri yaklaşık %2-10 aralığına kadar düşmekte ve su yüzeyine giren enerji miktarı maksimuma ulaşmaktadır. Bu durum, göl yüzeyinin günlük enerji miktarında özellikle öğle çevresinin baskın rol oynadığını ortaya koymaktadır.

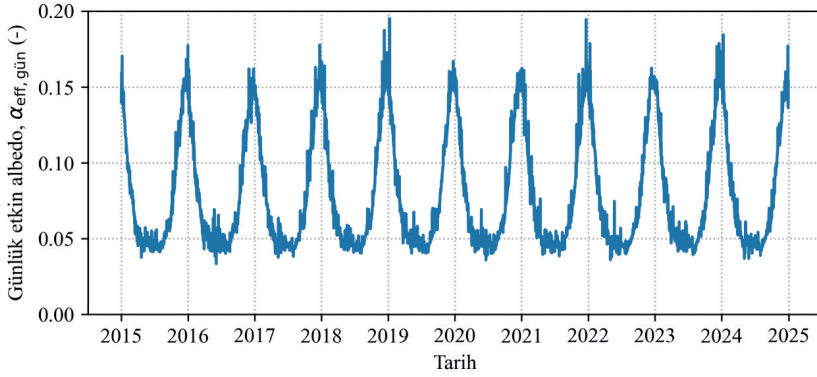
Aylar arasındaki farklar, güneşin yörüngesel konumuna bağlı mevsimsel değişimi yansıtmaktadır. İlkbahar-yaz aylarını temsil eden günlerde (örneğin Haziran-Temmuz) eğrilerin tabanı daha yayvan olup düşük R değerleri daha uzun süre korunmaktadır. Buna karşılık kış aylarını temsil eden günlerde hem gün uzunluğu kısalmakta hem de düşük yansıtma katsayısına sahip zaman aralığı daralmaktadır. Bu sonuçlar, Çıldır Gölü ve benzeri yüksek enlem derecesine sahip iç su kütleleri için efektif albedonun gün ve mevsim içinde

güçlü biçimde değiştiğini, dolayısıyla güneş enerji sistemlerinin tasarımında su yüzeyi yansıtmasının saatlik ve mevsimlik dinamiğinin mutlaka dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.



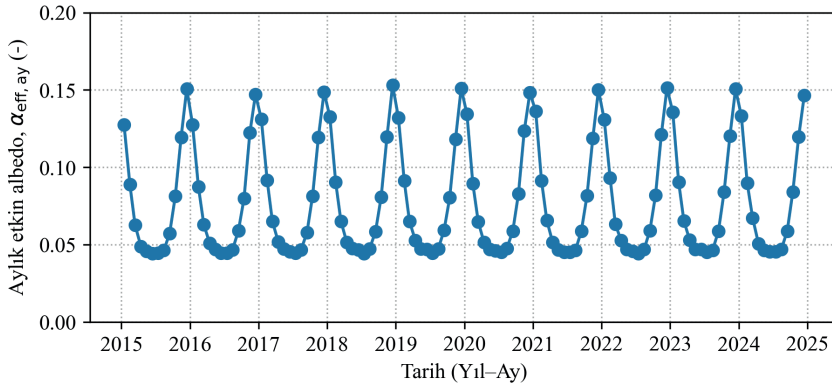
Şekil 5. Çıldır Gölü'nde yılın farklı aylarına karşılık gelen tipik günlerde su yüzeyi yansıtma katsayısı R'nin günlük değişimi.

Şekil 6, Çıldır Gölü için 2015-2024 yılları arasında güneş ışınlamı ağırlıklı günlük etkin albedo değerlerinin belirgin bir mevsimsel döngü izlediği görülmektedir. Etkin albedo, her yıl kış aylarında yaklaşık 0,15-0,18 seviyelerine kadar yükselmektedir. Bu durum, düşük güneş yükseklik açısı, artan yansımaya ve göl çevresinde kar-buz örtüsünün daha baskın hale gelmesiyle ilişkilendirilebilir. Yaz aylarında ise Güneş'in zenit açısının küçülmesine ve ışınlamının daha dik gelmesine bağlı olarak etkin albedo değerleri yaklaşık 0,04-0,06 aralığına gerilemekte ve böylece göl yüzeyinin daha fazla güneş enerjisi soğurduğu anlaşılmaktadır. Yıllar arasında genel desenin oldukça kararlı olması, Çıldır Gölü'nde yüzey özellikleri ve atmosferik koşulların etkin albedo üzerinde güçlü ancak tekrarlayan bir mevsimsel kontrol oluşturduğunu göstermektedir. Belirli yıllarda görülen küçük sapmalar ise bulutluluk, buzlanma süresi ve kar örtüsü kalınlığı gibi iklimsel değişkenlerle ilişkilendirilebilecek kısa süreli farklılıklara işaret etmektedir.



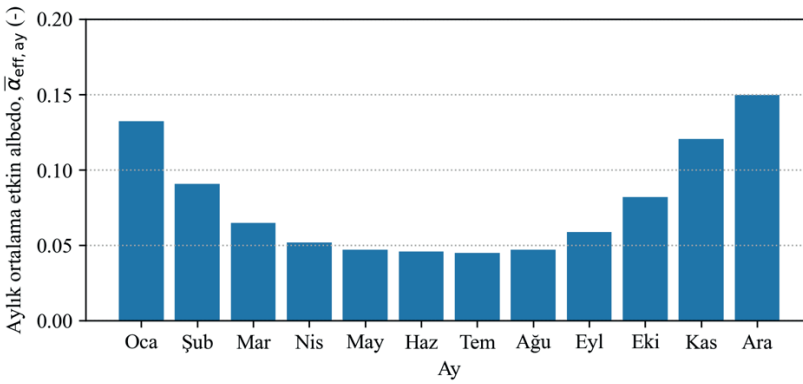
Şekil 6. Çıldır Gölü'nde günlük etkin albedo ($\alpha_{\text{eff,gün}}$) zaman serisi.

Çıldır Gölü için 2015-2024 dönemine ait aylık etkin albedo değerlerinin belirgin bir yıllık döngü sergilediği Şekil 7'de görülmektedir. Özellikle Ocak-Şubat aylarında albedo değerleri 0,13-0,16 aralığına yükselerek göl yüzeyinin bu dönemde yansıtırlığının belirgin biçimde arttığını göstermektedir. Yaz aylarında ise etkin albedo yaklaşık 0,045-0,06 düzeyine kadar düşmekte, bu durum açık su yüzeyinin ve artan güneş yükseklik açılarının yansıtırlığı azalttığını işaret etmektedir. Yıllar arasında maksimum ve minimum değerler benzer düzeylerde tekrarlanmakta, bu da gölün uzun dönemli ortalama etkin albedo rejiminin kararlı olduğunu ve iklimsel/meteorolojik koşulların her yıl benzer bir mevsimsel desen ürettiğini ortaya koymaktadır.



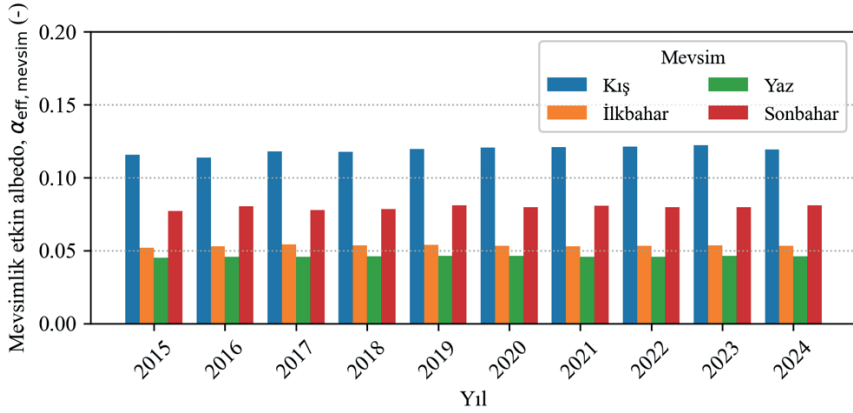
Şekil 7. Çıldır Gölü'nde aylık etkin albedonun ($\alpha_{\text{eff,ay}}$) uzun dönemli değişimi.

Şekil 8’de Çıldır Gölü’nün uzun dönemli aylık ortalama etkin albedo değerlerinin belirgin bir mevsimsel desen izlediği görülmektedir. Aralık ve ocak aylarında albedo yaklaşık 0,13-0,15 aralığına ulaşarak göl yüzeyinin yansıtırlığının maksimuma çıktığını göstermektedir. İlkbaharla birlikte güneş yüksekliğinin artması sonucu albedo değerleri hızla düşmekte, Haziran–Ağustos döneminde yaklaşık 0,045-0,05 düzeyinde yıllık minimumuna inmektedir. Sonbaharda hava sıcaklıklarının azalması ve olası erken kar örtüsü ile birlikte albedo yeniden artış eğilimine geçmekte, bu da göl yüzeyinin optik özelliklerinin yıl boyunca güçlü bir mevsimsel değişkenlik sergilediğini ortaya koymaktadır.



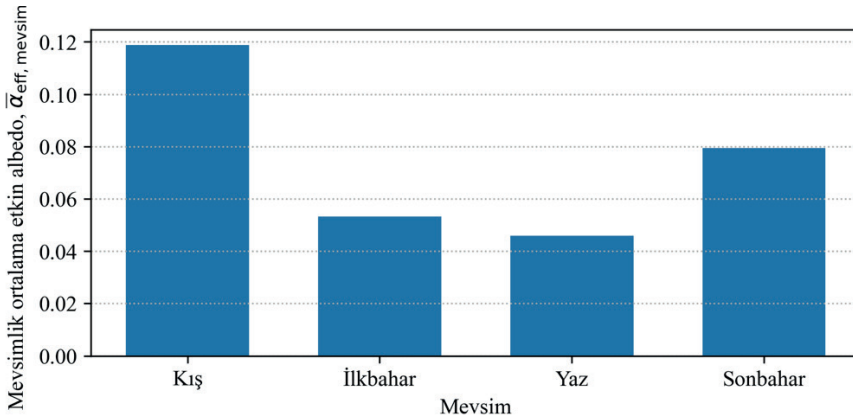
Şekil 8. Çıldır Gölü’nde aylara göre etkin albedonun ($\alpha_{\text{eff,ay}}$) dağılımı.

Yıllara ve mevsimlere göre etkin albedo değerlerinin birlikte verildiği Şekil 9, 2015-2024 dönemi boyunca Çıldır Gölü bölgesinin istikrarlı ve belirgin mevsimsel bir davranış sergilediğini göstermektedir. Her yıl kış mevsimi en yüksek albedo değerlerine sahip olup 0,11-0,12 aralığında seyretmekte, bazı yıllarda daha soğuk ve karlı kışlara bağlı küçük artışlar gözlenmektedir. İlkbahar ve yaz mevsimlerinde albedo değerleri yıllar arasında 0,04-0,06 bandında dalgalanmakta ve büyük ölçekli bir trend göstermemektedir. Bu durum, açık su koşullarının ve atmosferik geçirgenliğin uzun dönemli olarak nispeten kararlı olduğunu düşündürmektedir. Sonbahar mevsiminde albedo değerleri her yıl kış ile yaz arasındaki bir geçiş düzeyinde yer almakta ve gölün enerji dengesinin yıl sonuna doğru tekrar daha yansıtıcı bir rejime geçtiğini ortaya koymaktadır. Bu desen, Çıldır gölü çevresinde kurulacak güneş enerjisi sistemlerinde, özellikle kış ve sonbahar aylarında yüksek yansıtma değerine bağlı ek yansıyan ışıınım kazançlarının dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 9. 2015–2024 döneminde Çıldır Gölü’nün her yıl için mevsimlik etkin albedo değerlerinin değişimi.

Şekil 10’da gösterilen mevsimlik ortalama değerler, Çıldır gölünde etkin albedonun belirgin bir mevsimsellik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Kış mevsiminde ortalama albedo yaklaşık 0,12 düzeyine çıkarak yılın en yüksek değerlerine ulaşmaktadır. İlkbahar ve yaz mevsimlerinde albedo 0,05 civarına düşmekte, göl yüzeyinin büyük ölçüde açık su olması ve çevredeki kar örtüsünün ortadan kalkması nedeniyle yutulan güneş enerjisi artmaktadır. Sonbaharda ise albedo tekrar yükselerek yaklaşık 0,08 düzeyine ulaşmakta, bu da özellikle geç sonbaharda artan bulutluluk, yüzeydeki dalga ve ıslak kıyı alanlarının kombinasyonu ile açıklanabilecek orta düzeyde bir yansıtma değerine işaret etmektedir.



Şekil 10. 2015–2024 dönemi için Çıldır gölünün mevsimlik ortalama etkin albedo değerleri.

5. Sonuçlar ve Genel Değerlendirme

Bu çalışmada, uydu tabanlı güneş ışıınımı verileri ve su yüzeyi için fiziksel olarak tutarlı bir Fresnel yansıma modeli kullanılarak Çıldır gölüne ait uzun dönemli bir etkin albedo klimatolojisi oluşturulmuştur. 2015-2024 dönemine ait saatlik NASA POWER verileri, günlük, aylık ve mevsimsel ışıınım alanlarına dönüştürülmüş ve güneş geometrisiyle birleştirilerek hava-su ara yüzeyinde zamana bağlı aynasal yansıtma oranı elde edilmiştir. Anlık Fresnel yansımasını, gelen küresel yatay ışıınımla ağırlıklandırarak, güneş enerjisi sistemi modellemesi ve yüzey enerji dengesi çalışmalarıyla doğrudan uyumlu günlük, aylık ve mevsimsel etkin albedo değerleri elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, etkili albedo değerinin belirgin ve oldukça tekrarlanabilir bir mevsimsel döngü ortaya koyduğunu göstermektedir. Günlük değerler genellikle yaklaşık 0,04 ile 0,19 arasında değişmekte ve en yüksek değerler kış aylarında, en düşük değerler ise ilkbahar sonu ve yaz aylarında olduğu görülmüştür. Aylık bazda, etkili albedo Mayıs ve Ağustos ayları arasında ~0,045-0,05 değerlerine kadar düşmekte ve Aralık-Ocak aylarında ~0,13-0,15 değerlerine kadar yükselmektedir. Mevsimsel ortalamalar kış etkili albedo değeri (~0,12), yaz değerinin (~0,045) iki katından fazladır. İlkbahar ve sonbahar ise orta düzeyde bir davranış göstermekte olup bu modeli doğrulamaktadır. Her mevsimdeki yıllık değişkenlik nispeten düşüktür ve bu da 10 yıllık verinin tasarım amaçları doğrultusunda sağlam bir iklimlendirme oluşturmak için yeterli olduğunu göstermektedir.

Fresnel yansımasının güneş zamanı ve yılın temsili gününe bağlı olarak analizi, yansımanın büyük ölçüde güneş zenit açısı tarafından kontrol edildiğini göstermektedir. Güneşin doğuşu ve batışına yakın, güneş yüksekliğinin düşük olduğu zamanlarda, göl üzerindeki anlık Fresnel yansıması bire yaklaşabilirken, yerel öğle saatlerinde çok düşük değerlere sahip olur. Kışın, düşük güneş yükseklikleri günün daha uzun bir bölümünde devam eder ve bu durum kış aylarındaki yüksek etkili albedoyu açıklar. Bu durumun tersine, yaz aylarında daha yüksek Güneş, aynasal yansıtma oranını azaltır ve açık su yüzeyi gelen radyasyonun çoğunu emer.

Uygulamalı bir bakış açısıyla, bu bulguların Çıldır Gölü ve çevresindeki güneş enerjisi sistemlerinin değerlendirilmesi ve tasarımı için çeşitli çıkarımları vardır. İlk olarak, mevsimsel olarak değişen etkin albedoyu göz ardı etmek, özellikle çift taraflı fotovoltaik sistemler, gölde yüzen fotovoltaik sistemler veya arka yüzey kazanımlarının toplam kaynağın göz ardı edilemez bir kısmını temsil edebildiği sistemler için, dizi düzlemi ışıınım tahminlerinde sistematik sapmalara yol açacaktır. Etkin albedonun en yüksek olduğu kış ve sonbahar ayları, daha kısa gün uzunluklarını ve düşük doğrudan ışıınımı

kısmen telafi edebilen gelişmiş yansıyan ışıınım sunarken, yaz aylarında yansıyan ışığın katkısı nispeten küçüktür. Bu nedenle, türetilen aylık ve mevsimsel α_{eff} değerlerinin performans simülasyonlarına dahil edilmesi, bu bölgedeki olası tesisler için verim tahminlerini ve tekno-ekonomik değerlendirmeleri iyileştirebilir.

Son olarak, burada uzun vadeli uydu ışıınımı, ayrıntılı güneş geometrisi ve Fresnel optiğinin ışıınım ağırlıklı etkin albedoyu elde etmek için birleştirilerek geliştirilen metodoloji diğer göllere ve rezervuar alanlarına kolayca aktarılabilir. Mevcut analiz, yerinde albedo ölçümlerinin olmaması, dalga durumu ve buz örtüsünün basitleştirilmiş bir şekilde ele alınması ve tamamen aynasal yansıtma oranı modelinin kullanılmasıyla sınırlı olsa da Çıldır gölünün gelen güneş kaynağıyla nasıl etkileşime girdiğine dair tutarlı bir birinci dereceden karakterizasyon sağlamaktadır. Gelecekteki çalışmalar, bu tahminleri saha ölçümleriyle doğrulamaya, yaklaşımı dağınık gökyüzü ve çoklu saçılma etkilerini de içerecek şekilde genişletmeye ve etkin albedo klimatolojisini ayrıntılı fotovoltaiik ve diğer güneş enerjisi modellerinin yanı sıra bölgesel iklim değerlendirmeleriyle birleştirmeye odaklanmalıdır.

Semboller ve Kısaltmalar

Sembol	Açıklama	Birim
φ	Enlem açısı (pozitif kuzey)	$^{\circ}$ veya rad
λ	Boylam açısı (pozitif doğu)	$^{\circ}$ veya rad
δ	Güneş deklinasyon açısı	$^{\circ}$ veya rad
EoT	Zaman denklemi	dakika
N	Yılın günü	-
TZ	Zaman dilimi (UTC ofseti, örn. +3)	saat
LSTM	Yerel standart meridyen	$^{\circ}$
t_L	Yerel saat (LST: Local Standard Time)	h
t_s	Güneş saati (solar time)	h
ω	Saat açısı	$^{\circ}$ veya rad
ω_s	Güneş doğumu/batımı saat açısı	$^{\circ}$ veya rad
β	Panel eğim açısı (0° yatay, 90° : dikey)	$^{\circ}$ veya rad

γ_p	Panel azimut açısı (0° güney, pozitif batı yönünde)	$^\circ$ veya rad
γ_s	Güneş azimut açısı	$^\circ$ veya rad
θ_z	Güneş zenit açısı	$^\circ$ veya rad
θ_i	Düzleme dik gelen ışının geliş açısı	$^\circ$ veya rad
$\theta_{i,plane}$	Eğimli düzlem üzerindeki ışın geliş açısı	$^\circ$ veya rad
n_w	Su kırılma indisi	—
R_s	s -polarizasyon Fresnel yansıtma katsayısı	—
R_p	p -polarizasyon Fresnel yansıtma katsayısı	—
R_w	Su yüzeyi için ortalama Fresnel yansıtma katsayısı	—
β_b	Eğimli düzlem için ışın geometrik dönüşüm katsayısı	—
G_{sc}	Güneş sabiti	$W\ m^{-2}$
d_r	Yer-Güneş uzaklığı düzeltme katsayısı	—
DNI_i	i 'inci saat için direkt normal ışınım	$Wh\ m^{-2}$
DHI_i	i 'inci saat için difüz (yayınık) yatay ışınım	$Wh\ m^{-2}$
GHI_i	i 'inci saat için global yatay ışınım	$Wh\ m^{-2}$
$B_{h,i}$	i 'inci saat için yatay düzleme düşen direkt bileşen	$Wh\ m^{-2}$
$G_{beam,i}(\beta)$	i 'inci saat için eğimli düzlemdeki direkt bileşen	$Wh\ m^{-2}$
$G_{diff,i}(\beta)$	i 'inci saat için eğimli düzlemdeki difüz bileşen	$Wh\ m^{-2}$
$G_{alb,i}(\beta)$	i 'inci saat için eğimli düzleme su yüzeyi yansımından gelen albedo bileşeni	$Wh\ m^{-2}$

$G_{POA,i}(\beta)$	i'inci saat için eğimli düzlem (POA) toplam ışıınımı	Wh m ⁻²
$G_{to,i}$	i'inci saat için su yüzeyinden yansıyan yatay ışıınım akısı	Wh m ⁻²
H_0	Günlük ekstra-atmosferik yatay ışıınım	J m ⁻² day ⁻¹
H_{dir}	Günlük direkt yatay ışıınım	MJ m ⁻² day ⁻¹
H_{dif}	Günlük difüz yatay ışıınım	MJ m ⁻² day ⁻¹
H	Günlük global yatay ışıınım	MJ m ⁻² day ⁻¹
K_T	Günlük berraklık indisi (H/H_0)	—
$E_{X,month}(\beta)$	Eğimli yüzeyde aylık toplam ışıınım	kWh month ⁻¹
n_m	m'inci ayda yer alan saat sayısı	—
$\alpha_{eff,day}$	Günlük albedo	—
$\alpha_{eff,month}$	Aylık etkin albedo	—
$\alpha_{eff,season}$	Mevsimlik etkin albedo	—
N	Tipik gün için hesaplanan gün uzunluğu	h
n	Yılın gün sayısı	—
i	Saat indeksi (zaman adımı)	—

Kaynaklar

- Acar, H. I. (2002). *Estimation of Global Monthly Irradiation From Sunshine Duration Data At Sivas, Turkey. Politeknik Dergisi Journal of Polytechnic Cilt* (Vol. 5).
- Alam, M. S., Saha, S. K., Chowdhury, M. A. K., & Rahman, M. (2005). Simulation of Solar Radiation System. *American Journal of Applied Sciences*, 2(4), 751–758.
- Alanne, K., & Saari, A. (2006). Distributed energy generation and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(6), 539–558. doi:10.1016/J.RSER.2004.11.004
- Deniz, E. (2014). Solar-Powered Desalination. In Robert Y. Ning (Ed.), *Desalination Updates* (Vol. 5, pp. 89–124). intechopen. doi:10.5772/60436
- Deniz, E. (2026). Comparative energy, exergy, and thermoeconomic evaluation of NaCl and Na₂CO₃ based salt gradient solar ponds. *Solar Energy*, 303, 114143. doi:10.1016/J.SOLENER.2025.114143
- Golding, P., & Hicks, M. C. (1992). *One-Dimensional Transient Finite Difference Model of An Operational Salinity Gradient Solar Pond*. In *The Fourth Annual Thermal and Fluids Analysis Workshop* (pp. 207–219).
- Gueymard, C. A., Lara-Fanego, V., Sengupta, M., & Xie, Y. (2019). Surface albedo and reflectance: Review of definitions, angular and spectral effects, and intercomparison of major data sources in support of advanced solar irradiance modeling over the Americas. *Solar Energy*, 182, 194–212. doi:10.1016/J.Solener.2019.02.040
- Huang, C. J., Wang, G., Chen, S., Guo, J., & Qiao, F. (2024). An effective parameterization of broadband ocean surface albedo applicable to all skies. *Ocean Modelling*, 190, 102394. doi:10.1016/J.OCEMOD.2024.102394
- Jaefarzadeh, M. R. (2004). Thermal behavior of a small salinity-gradient solar pond with wall shading effect. *Solar Energy*, 77(3), 281–290. doi:10.1016/j.Solener.2004.05.013
- Jia, A., Wang, D., Peng, J., Ma, Z., & Liang, S. (2025). Dynamic parameterization of global land surface albedo components: Bare soil, non-photosynthetic vegetation, and photosynthetic vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 329, 114943. doi:10.1016/J.RSE.2025.114943
- Kannan, N., & Vakeesan, D. (2016). Solar energy for future world: - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1092–1105. doi:10.1016/J.RSER.2016.05.022
- NASA. (2025, May 8). Surface meteorology and solar energy – a renewable energy resource. Retrieved 8 May 2025, from <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

- Pirouz, B., Naghib, S. N., Kontoleon, K. J., Javadi Nejad, H., & Piro, P. (2025). Revealing the impact of albedo on solar panel power generation potential in various installation patterns: Case study of Italy. *Energy Reports*, 14, 473–485. doi:10.1016/J.Egyr.2025.06.024
- Rghif, Y., Colarossi, D., & Principi, P. (2023). Salt gradient solar pond as a thermal energy storage system: A review from current gaps to future prospects. *Journal of Energy Storage*, 61, 106776. doi:10.1016/J.EST.2023.106776
- Wang, J., Zhang, M., You, Z., Pei, W., & Bai, R. (2019). A developed method to measure and calculate the solar albedo of discrete-particle layers. *Solar Energy*, 194, 671–681. doi:10.1016/J.Solener.2019.10.076
- Xu, Z., Li, Y., Qin, Y., & Bach, E. (2024). A global assessment of the effects of solar farms on albedo, vegetation, and land surface temperature using remote sensing. *Solar Energy*, 268, 112198. doi:10.1016/J.Solener.2023.112198
- Ziar, H., Sönmez, F. F., Isabella, O., & Zeman, M. (2019). A comprehensive albedo model for solar energy applications: Geometric spectral albedo. *Applied Energy*, 255, 113867. doi:10.1016/J.Apenergy.2019.113867



MAKİNE VE ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİNDE ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME (ÇKKV) UYGULAMALARI

“ ”

*Aslı ABDULVAHİTOĞLU¹
Adnan ABDULVAHİTOĞLU²*

¹ Doç.Dr. Aslı ABDULVAHİTOĞLU, Makine Müh. Böl., Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Adana, aabdulvahitoglu@atu.edu.tr, ORCID ID:0000-0002-3603-6748
² Dr.Öğr.Üyesi Adnan ABDULVAHİTOĞLU, Endüstri Müh. Böl., Mudanya Üniversitesi, Bursa, abdulvahitoglu@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2659-6709

1.Giriş

ÇKKV, birden fazla kriterin eş zamanlı olarak değerlendirildiği durumlarda karar vericilere sistematik ve rasyonel bir yaklaşım sunmaktadır. Günümüzün giderek karmaşılaşan toplumsal ve teknolojik yapısı, karar süreçlerinde hem nicel hem de nitel çok sayıda unsurun birlikte dikkate alınmasını zorunlu hâle getirmektedir. Bu bağlamda ÇKKV, farklı boyutlara sahip kriterleri tanımlayarak bunları anlaşılır bir yapıya dönüştürmekte ve karar vericilerin alternatifler arasında daha bilinçli, tutarlı ve karşılaştırılabilir seçimler yapmalarına imkân sağlamaktadır.

ÇKKV yöntemlerinin temel amacı, karar süreçlerinde karşılaşılan belirsizlikleri azaltarak çok boyutlu problem yapılarına uyum sağlayabilen sistematik bir analiz süreci oluşturmaktır. Kriter ve alternatif sayısının artmasıyla birlikte karar verme süreci daha karmaşık hâle geldiğinden, ÇKKV tekniklerinin kullanımı karar vericiler için önemli bir destek mekanizması oluşturmaktadır.

Ekonomiden yönetim bilimlerine, yatırımlardan sağlık sektörüne kadar ve her türlü mühendislik çalışmalarında geniş bir uygulama alanına sahip olan ÇKKV, seçeneklerin sıralanması, değerlendirilmesi veya en uygun alternatifin belirlenmesi gibi işlevlerle karar kalitesini artırmaktadır (Yapıcı vd., 2020). Bu yönüyle ÇKKV hem bireysel hem de kurumsal düzeyde rasyonel, şeffaf ve yeniden üretilebilir karar süreçlerinin oluşturulmasında vazgeçilmez bir araç hâline gelmiştir.

Tüm mühendislik alanlarında olduğu gibi makine mühendisliği ve enerji sistemleri mühendisliği alanlarında ÇKKV, teknik, ekonomik, çevresel ve güvenlik kriterlerinin birlikte değerlendirilmesini gerektiren problemlerde etkin biçimde kullanıl alanı bulmaktadır. Örneğin makine mühendisliğinde malzeme seçimi, üretim yönteminin belirlenmesi, bakım stratejilerinin planlanması veya tasarım alternatiflerinin performans karşılaştırmaları ÇKKV teknikleriyle daha bütüncül bir yaklaşımla ele alınabilmektedir.

Enerji sistemleri mühendisliğinin de ise yenilenebilir enerji yatırımlarının değerlendirilmesi, enerji verimliliği projelerinin önceliklendirilmesi, güç santrali yeri seçimi, teknoloji alternatiflerinin kıyaslanması ve sürdürülebilirlik odaklı performans analizleri gibi karmaşık karar süreçlerinde ÇKKV yöntemleri kritik bir rol oynamaktadır (Danışan vd., 2018). Bu kapsamda ÇKKV, teknik uzmanlık gerektiren mühendislik süreçlerini daha sistematik, ölçülebilir ve karşılaştırılabilir hâle getirerek mühendislik kararlarının etkinliğini artırmaktadır.

Sonuç olarak ÇKKV yaklaşımları, çatışmalı ortamlarda seçim ve sıralama yapmamıza olanak sağlayan etkili bir yaklaşımdır. Birçok kriterin etkili olduğu

alanlarda sıkça kullanılmakta olup son zamanlarda yöneylem araştırmasının en hızlı büyüyen alanı haline gelmiştir. Bu nedenle, ÇKKV teknikleri en yaygın kullanılan karar verme yöntemleri arasında yer almaktadır (Abdulvahitoğlu, 2022).

2.Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV)

ÇKKV, aynı anda birden fazla ölçütün göz önünde bulundurarak en uygun seçeneğin belirlenmesini hedefleyen sistematik bir karar verme yaklaşımıdır. Bir karar problemini etki eden çeşitli ve çok sayıda faktörün bulunduğu durumlarda, karar verme işlemini kolaylaştıran ve etkili bir karar desteği sağlayan yöntem ve uygulamaların tamamını kapsar. Günümüzün karmaşık yapıya sahip sorunları etkileyen çok fazla sayıda faktör bulunduğundan, ÇKKV teknikleri sayesinde bu problemler daha sade, anlaşılır ve yönetilebilir hale getirilmektedir.

Karar vericiler ÇKKV tekniklerini kullanarak mevcut seçenekleri çok fazla kriteri göz önünde bulundurularak değerlendirmekte, ağırlıklandırmakta ve sıralamaktadır (Fidan, 2021). Literatürde yer alan yöntem çeşitliliği her geçen gün daha fazla artması bu yöntemlerin ne derece kabul gördüğünü ve çok yaygın olarak kullanıldığını göstermekte olup, teknolojik gelişmelerin bireysel ve toplumsal ihtiyaçları karmaşılaştırması bu yöntemlerin önemini daha da artırmaktadır. Birbiriyle çelişebilen pek çok nitel ve nicel ölçütün aynı anda analiz edilmesini gerektiren bu durum, karar süreçlerinde “çok kriterli”, “çok amaçlı” ve “çok nitelikli” gibi kavramların kullanımını yaygınlaştırır da en kapsayıcı tanım olarak ÇKKV ifadesi öne çıkmaktadır (Abdulvahitoğlu, 2022).

ÇKKV teknikleri, 1960’lı yıllarda karmaşık veri setlerinin ve farklı uzman görüşlerinin karar mekanizmalarına uyum sağlamasında yaşanan güçlükleri azaltmak amacıyla geliştirilmiştir (Afshari vd., 2016). Daha sonra bilimsel çalışmalarda hatta hayatın hemen hemen her alanında karşılaşılan sorunların çözümünde alternatif sayısının ve seçime etki eden kriter çeşitliliğinin artmasıyla birlikte karar verme süreci daha da zorlaşmıştır. Bu durum ÇKKV yaklaşımlarının geliştirilmesindeki temel etkenlerden biri olmuştur (Durmuş ve Tayyar, 2017). Bu nedenle ÇKKV yöntemleri, karar vericilerin rasyonel bir seçim yapmasına imkân tanıyan kapsamlı metodolojik araçların bütünü olarak da tanımlanabilir (Sahoo ve Goswami, 2023).

Yöntemler arasındaki temel farklılıklar, kullanılan algoritmalar, veri türleri ve bunların kullanım amaçlarından kaynaklanmaktadır (Durak, 2024). ÇKKV, yöneylem araştırmasının bir alt alanı olmakla birlikte zamanla kendi metodolojik yapısına kavuşmuş bağımsız bir disiplin haline gelmiştir. Bu teknikler, birbiriyle çelişen, bağımsız veya orantısız özelliklere sahip seçeneklerin matematiksel ya da istatistiksel yöntemlerle analiz edilmesi, sıralanması veya seçilmesine olanak sağlar (Karim ve Karmaker, 2016).

Diğer bir görüşe göre ÇKKV yaklaşımı, alternatiflerin belirli kriterlere göre en iyiden en kötüye doğru sıralanmasını sağlayan bir optimizasyon sürecidir. Bu yönüyle ÇKKV yaklaşımları (Çoban, 2012; Günay ve Ayyıldız, 2017; Abdulvahitoğlu, 2022);

- i. Ekonomi,
- ii. Yönetim,
- iii. Yatırım,
- iv. Üretim,
- v. Pazarlama,
- vi. Planlama,
- vii. Risk analizi,
- viii. Tesis yeri seçimi,
- ix. Kaynak tahsisi,
- x. Ulaştırma,
- xi. Eğitim,
- xii. Sağlık ve
- xiii. Personel seçimi gibi geniş bir uygulama alanına sahiptir.

Günümüzde ÇKKV teknikleri sadece akademik çalışmalarda değil hem özel sektörde hem kamu politikalarında gerçek hayat problemlerinde sıklıkla başvurulmuş güçlü analitik araçlar haline gelmiştir (Kumar ve Pamucar, 2025).

Sonuç olarak, ÇKKV yaklaşımları çok sayıda kriterin rol oynadığı belirsizlik ve çatışma ortamlarında karar sürecine önemli katkılar sunmakta, bu nedenle yöneylem araştırmasının en hızlı gelişen alanlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Artan uygulama çeşitliliği ve yöntemsel zenginliği sayesinde ÇKKV, günümüzde en yaygın kullanılan karar verme araçlarından biri haline gelmiştir (Tao vd., 2012).

2.1. ÇKKV problemleri

ÇKKV yöntemleri aynı anda birden fazla kriterin ve çoğu zaman birbirleriyle çelişen hedeflerin dikkate alındığı durumlarda en uygun kararın belirlenmesini sağlayan sistematik ve kapsamlı bir yaklaşımdır. Bu yöntem, karar vericinin farklı yönleriyle değerlendirilmesi gereken alternatifleri bütüncül bir şekilde analiz etmesine imkân tanır. (Kabak vd., 2017).

Standart bir ÇKKV probleminin yapısı üç ana unsurdan oluşur. Bunlardan ilki, karar vericinin arasından seçim yapacağı alternatiflerin kümesidir. İkincisi, bu alternatifleri değerlendirmede kullanılacak olan ve karar üzerinde etkili olan kriterlerdir. Üçüncü bileşen ise, her bir kriterin karar sürecindeki önem düzeyini yansıtan ve seçilen yönteme göre belirlenen göreceli ağırlıklarıdır (Chen, 2000). Bu bileşenlerin bir araya gelmesi, karmaşık karar problemlerinin sistematik ve karşılaştırılabilir bir biçimde çözümlenmesine olanak sağlar.

Karar verme olgusu günlük yaşamın her alanında hem kişisel hem de mesleki süreçlerde sürekli olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir kararın verilebilmesi için öncelikle tanımlanmış bir problem ve bu problemi çözmeye yönelik birden fazla alternatifin bulunması gerekir (Gudigantala vd., 2023). Alternatiflerin doğru şekilde belirlenebilmesi ise problemin açık, anlaşılabilir ve kapsamlı bir biçimde ifade edilmesine bağlıdır. Gerçek hayattaki pek çok karar problemi doğası gereği karmaşıktır, belirsizlik içerir ve çoğunlukla birden fazla kriteri bünyesinde barındırır (Pelissari vd., 2021). Bu kriterler, karar vericinin değerlendirme yapmasına olanak tanıyan temel ölçütlerdir.

ÇKKV teknikleri, çoklu ve genellikle birbiriyle çelişen kriterlerin birlikte ele alındığı bu tür problemlerin rasyonel şekilde çözümlenmesine imkân sağlar (Yücel ve Ulutaş, 2009). Bu bağlamda, bir ÇKKV süreci; belirli kriter setlerini dikkate alarak alternatifler arasından en uygun olanının seçilmesi işlemidir. Söz konusu süreç, karar verme problemlerinin analitik bir çerçevede yapılandırılmasını gerektirir ve bu nedenle ÇKKV uygulamaları belirli bir düzen içinde yürütmek zorundadır.

Bir ÇKKV probleminde ulaşılmak istenen hedef ile bu hedefe yönelik olarak dikkate alınması gereken kriterler, karar sürecinin en kritik unsurlarını oluşturur (Arısoy, 2019). Karar verici ya da karar vericiler tarafından belirlenen bu kriterlerin her biri, nihai karar üzerinde farklı düzeylerde etkiye sahiptir (Passos Neto vd., 2023). Bu etki, literatürde çoğu zaman kriterin performans değeri veya karara katkı düzeyi olarak ifade edilmektedir.

Her kriter, karar vericinin sorun algısına ve önceliklerine göre farklı bir önem derecesine sahiptir. Bu nedenle, kriterlerin göreceli önemlerinin belirlenmesi ÇKKV sürecinin temel adımlarından biridir (Badi ve Bouraima, 2023). Kriter ağırlıklarının belirlenmesinde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta ise, hesaplanan önem derecelerinin toplamının 1 olacak şekilde normalize edilmesidir. Böylece her kriterin karar üzerindeki göreceli etkisi açık ve karşılaştırılabilir bir biçimde ortaya konmuş olur.

ÇKKV yöntemleri genel olarak (Gade 2014; Pekkaya ve Burak, 2018; Chejarla vd., 2022):

- i. Karar problemi tanımlanması,
- ii. Kriterlerin uygun şekilde belirlenmesi,
- iii. Alternatiflerin oluşturulması,
- iv. Kriter ağırlıklarının hesaplanması,
- v. Her bir seçenek için kriter değerlerinin tanımlanması,
- vi. Uygun bir ÇKKV yönteminin uygulanması
- vii. Seçeneklerin kriterlere göre değerlendirilmesi ve
- viii. En uygun seçeneğin tespiti aşamalarından oluşur. Gerekğinde süreç yeni veriler ışığında yeniden işletilebilir. Bu adımlar, sistematik bir yaklaşım geliştirerek karar vericinin karmaşık problemlerle başa çıkmasını kolaylaştırır. Genel bir ÇKKV uygulaması aşağıda Şekil 1.'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çok kriterli karar verme sürecinde işlemler (Abdulahitoğlu vd., 2024)

2.2. ÇKKV problemlerinin sınıflandırılması

ÇKKV problemleri literatürde genel olarak, Çok Amaçlı Karar Verme (ÇAKV) ve Çok Ölçütlü Karar Verme (ÇÖKV) olmak üzere iki temel başlık altında incelenmektedir. Bu ayrım, karar problemlerinin yapısal özelliklerine dayanmaktadır. ÇAKV problemleri, sürekli bir çözüm uzayına sahip olup geniş bir karar setinin optimizasyonunu içerir. Diğer bir ifadeyle, karar verici çok sayıda ve genellikle sonsuz çözüm arasından amaçları en iyi şekilde karşılayıcı bulmaya çalışır. Buna karşılık, ÇÖKV problemlerinde karar verici sonlu sayıda alternatif arasından değerlendirme yapmak durumundadır; yani seçenekler önceden belirlenmiştir ve amaç bu seçenekleri kriterlere göre karşılaştırarak en uygun olanı seçmektir (Kabak ve Ark., 2017).

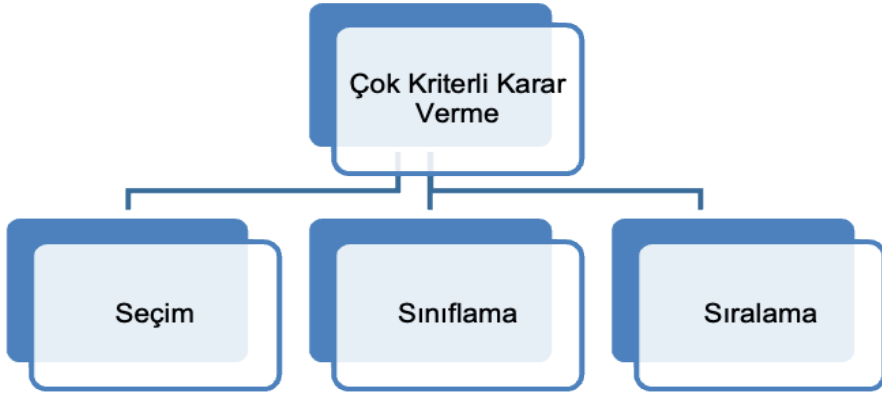
Bazı araştırmacılar tarafından ÇAKV, doğrusal programlamanın özel bir türü olarak kabul edilmekte olup, doğrusal programlamadan temel farkı aynı anda birden fazla amacın optimize edilmeye çalışılmasıdır. Bu nedenle ÇAKV modelleri, çok boyutlu hedef fonksiyonlarına sahiptir ve karar vericinin çeşitli amaçlar arasındaki dengeyi gözetmesini gerektirir (Türkoğlu, 2017). Buna karşılık, ÇKKV genel bir çerçeve olarak birden fazla kriteri dikkate alarak alternatiflerin karşılaştırıldığı, değerlendirme ve seçim süreçlerini kapsayan yöntemleri ifade eder. Burada amaç, karar vericinin tercihlerini en iyi yansıtan ölçütler doğrultusunda rasyonel ve sistematik bir sonuca ulaşmaktır.

Araştırmacılar, ÇKKV problemlerini uygulama amaçlarına göre genel olarak seçim, sınıflama ve sıralama olmak üzere üç temel kategoride sınıflandırmaktadır (Yalçın vd., 2022; Abdulvahitoğlu, 2022; Lopez vd., 2023). Bu sınıflandırma, gerçek hayatta karşılaşılan farklı karar verme gereksinimlerini karşılamaya yönelik bir ayrım sunmaktadır.

Seçim problemleri, çok sayıda alternatifin bulunduğu ve bu alternatiflerin doğrudan karşılaştırılmasının güç olduğu durumlarda en iyi seçeneğin belirlenmesini amaçlar. Örneğin, bireylerin araba, konut veya telefon alırken yaptıkları tercih süreçleri seçim problemlerine tipik bir örnektir. Burada amaç, alternatifler kümesi içerisinde karar vericinin ihtiyaçlarını en iyi karşılayan tek bir seçeneğin belirlenmesidir.

Sınıflama problemleri ise benzer özelliklere sahip alternatiflerin belirlenen kriterler doğrultusunda belirli kategorilere ayrılmasını hedefler. Bu tür problemlere öğrencilerin başarı durumlarına göre “çok iyi, iyi, orta, vasat, kötü” gibi gruplara ayrılması örnek gösterilebilir. Bu yaklaşım, alternatiflerin benzerlik temelinde kümelenmesine odaklanır.

Sıralama problemleri alternatiflerin belirli kriterler esas alınarak en iyiden en kötüye doğru dizilmesini amaçlar. Ülke veya üniversite sıralamalarında kullanılan yöntemler bu tür problemlere örnek teşkil etmektedir. Burada amaç, alternatiflerin performansına ilişkin bütüncül bir kıyaslama yaparak karar vericiye kapsamlı bir değerlendirme sunmaktır. ÇKKV problemlerinin sınıflandırılması aşağıda Şekil 2.’de gösterilmiştir.



Şekil 2. ÇKKV problemlerinin sınıflandırılması (Abdulahitoğlu, 2022)

2.3. ÇKKV Yöntemleri

Gerçek hayatta karşılaşılan karar verme problemleri, çoğu zaman birden fazla kriterin aynı anda göz önünde bulundurulmasını gerektiren karmaşık yapılara sahiptir. Karar seçeneklerinin farklı özelliklere sahip olması, bu özelliklerin birbirleriyle çelişebilmesi, hedeflenen faydanın değişkenlik göstermesi ve alınacak kararların çok yönlü etkiler yaratması, karar vericilerin etkili ve optimum kararları verebilmesi için, sezgisel yaklaşımlar yerine bilimsel yöntemlere yönelmesi ihtiyacını zaruretin ötesine taşımaktadır. Bu nedenle, ÇKKV yöntemleri, karar süreçlerinde sistematik ve rasyonel analizler sunarak karar kalitesinin artırılmasında önemli bir rol oynamaktadır.

ÇKKV yöntemlerinin kullanımı literatürde 1950’li yıllara kadar uzanmaktadır. Seçenek sayısının fazla olduğu ve bu seçeneklerin çeşitli kriterler açısından avantaj ve dezavantajlar taşıdığı durumlarda karar verme süreci daha da zorlaşmaktadır. Böyle durumlarda karar vericinin doğru tercihe ulaşabilmesi için hızlı, tutarlı ve analitik bir değerlendirme yapması gerektiğinden ÇKKV yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Batuhan vd., 2023). Bu bağlamda ÇKKV yöntemlerine, karar vericiyi karmaşık problemlerde yönlendiren önemli bir karar destek mekanizması olarak sıklıkla başvurulmaktadır.

Bir ÇKKV probleminin var olabilmesi için en az iki seçeneğin ve birbiriyle çelişen en az iki kriterin bulunması gerekmektedir (Massam, 1988). Seçeneklerin tüm kriterlerde aynı değeri alması ya da kriterlerin birbiriyle çatışması durumunda karar verme süreci belirsizleşir ve ÇKKV yöntemlerinin kullanılması zorunluluk haline gelir. Bu nedenle kriterlerin ayırt edici gücü ve seçenekler arasındaki performans farklılıkları yapılan çok kriterli ve karşılaştırmalı analizin temel bileşenleridir.

Ele alınan probleme uygun ÇKKV yönteminin seçilmesi, problemin yapısal özelliklerini doğru anlamayı, kriterler arasındaki ilişkileri iyi belirlemeyi ve karar vericinin hangi ödünleri verebileceğini açık bir şekilde ortaya koymayı gerektirir. Böylece belirsizlik ve risk unsurları daha tutarlı bir biçimde analiz edilir ve karar vericilerin üzerinde uzlaşabileceği daha güvenilir sonuçlar elde edilir (Kolios vd., 2016).

Diğer bir bakış açısıyla ÇKKV yöntemleri, birden fazla kriterin, belirsizliğin ve karmaşık yapıların söz konusu olduğu durumlarda karar vericiye alternatifleri bütüncül biçimde değerlendirme imkânı sunar. Bu yöntemler, karar sürecinde bilgiye dayalı, sistematik ve daha iyi temellendirilmiş sonuçlara ulaşılmasına katkı sağlar (Özdemir vd., 2016).

Bu kapsamda Karar Destek Sistemleri (KDS) de organizasyonların ve bireylerin etkili, şeffaf ve tutarlı kararlar almasına yardımcı olan önemli araçlardır. KDS; kullanıcı, model ve veritabanı olmak üzere üç temel bileşenden oluşur. Modeller, kullanıcıların veritabanındaki bilgileri analiz ederek çeşitli senaryolar üretmesini sağlar. Kullanıcıların bilgi düzeyi, ihtiyaçları ve teknolojik yeterlilikleri de KDS'nin etkinliğini belirleyen önemli faktörlerdendir (Odokuma vd., 2017). ÇKKV etkili ve yaygın olarak kullanılan KDS'lerden biridir.

Günümüzde bilgi teknolojilerindeki gelişmeler ve internet erişiminin yaygınlaşması, işletmelerdeki karar problemlerini daha karmaşık hale getirmiştir. Bu karmaşıklığın artmasıyla birlikte karar vericiler hem karar destek sistemlerine hem de ÇKKV yöntemlerine giderek daha fazla başvurmaktadır. Kriter sayısının artması, manuel değerlendirmeyi güçleştirdiği için ÇKKV tekniklerinin kullanımında teknolojiye dayanma ve bilgisayar tabanlı işlemleri daha da gerekli kılmaktadır (Asemi vd., 2009).

ÇKKV yöntemleri hem sayısal hem de sözel nitelikteki kriterleri dikkate alarak birden fazla alternatif arasından en uygun seçeneği belirlemeye yönelik matematiksel modeller sunar. İlk kullanılmaya başladığı günlerden günümüze kadar çok çeşitli ÇKKV teknikleri geliştirilmiş olup bu yöntemler ekonomi, mühendislik, yönetim bilimi ve sosyal bilimler gibi pek çok alanda yaygın şekilde kullanılmaktadır (Karaatlı vd., 2015).

ÇKKV yöntemleri günümüzde literatürde sıklıkla seçenekleri sıralamak veya kriterleri ağırlıklandırmak için kullanılmaktadır. Bazı yöntemler ise hem ağırlıklandırma hem de sıralama için yani iki farklı amaç için de kullanılabilir. Bu yöntemlerden yaygın olarak kullanılanların bir kısmı aşağıda sıralanmıştır.

i. Ağırlıklandırma için kullanılan ÇKKV yöntemleri

- ▶ AHP
- ▶ ANP
- ▶ DEMATEL
- ▶ MEREC
- ▶ CRITIC
- ▶ Standart Sapma (SD)
- ▶ İstatiksel Varyans (SV)
- ▶ SAW
- ▶ SWARA

ii. Hem ağırlıklandırma hem de sıralama için kullanılan ÇKKV yöntemleri

- ▶ AHP
- ▶ SWARA

iii. Sıralama (seçim) için kullanılan ÇKKV yöntemleri

- ▶ TOPSIS
- ▶ VIKOR
- ▶ MULTIMOORA
- ▶ PSI
- ▶ EDAS
- ▶ ARAS
- ▶ MAUT
- ▶ OWA
- ▶ WASPAS
- ▶ EDAS
- ▶ MAIRCA
- ▶ MABAC

- MOOSRA
- PROMETHEE
- SMART
- COPRAS
- CODAS

3.Makine Ve Enerji Sistemleri Mühendisliğinde ÇKKV Uygulamaları

ÇKKV yöntemleri, günümüzde hem teorik hem de uygulamalı araştırmalarda geniş bir kullanım alanı bulmakta ve hayatın hemen hemen her alanında karmaşık karar verme süreçlerini desteklemektedir. Bu yöntemler, yalnızca tamamen sayısal verilere dayanan objektif karar verme süreçlerinde değil, aynı zamanda uzman görüşlerinin belirleyici olduğu subjektif karar verme süreçlerinde de etkin bir şekilde uygulanmaktadır. Özellikle fen bilimlerinde, deneysel verilerin elde edilebildiği çalışmalarda ÇKKV teknikleri sonuçların optimize edilmesine önemli katkılar sağlamaktadır. Bu bağlamda, aşağıda bu bölüm yazarlarının makine mühendisliği ve enerji sistemleri mühendisliği disiplinlerinde yürüttükleri araştırmalardan bazı örneklerle yer verilerek, ÇKKV yöntemlerinin uygulama çeşitliliği ve sağladığı faydalar açıklanmaya çalışılmıştır.

Çalışma-1: Otomotiv motor soğutma sistemlerinde nanoakışkan seçimi (Abdolvahitoğlu, 2019).

Bu çalışmada, otomotiv motorlarında kullanılan soğutma sistemlerinin performansını iyileştirmek amacıyla farklı nanoakışkan türlerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi ele alınmıştır. Çalışmada Cu-su, NiO-su ve CuO-su nanoakışkanlarının termofiziksel özellikleri AHP yöntemi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda öncelikle bu nanoakışkan özelliklerinin önem dereceleri AHP ile belirlenmiş daha sonra yine AHP yöntemi ile en uygun olanı belirlenmiştir.

Su ve etilen glikol gibi geleneksel soğutucular modern motorlarda ortaya çıkan yüksek ısı karşısında sınırlı ısı transfer kapasitesine sahiptir. Bu durum, araştırmacıları daha yüksek ısıl iletkenlik sağlayan nanoakışkanlara yöneltmektedir. Bu yüzden bu çalışmada, söz konusu üç nanoakışkanın motor soğutma verimliliğine etkisini analiz edilerek optimum seçeneğin belirlenmesini amaçlanmıştır.

Araştırmada ilk aşamada nanoakışkanların ısıl iletkenlik, yoğunluk, özgül ısı, viskozite ve ısıl genleşme katsayısı gibi temel termofiziksel özelliklerinin önem dereceleri hesaplanmış olup, bu özelliklerin uzman görüşleri ile yapılan karşılaştırma matrisi aşağıda Çizelge 1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. AHP yöntemi ile nanoakışkanlarının özelliklerini karşılaştırma matrisi

Özellikler	Yoğunluk	Özgül ısı	Isıl iletkenlik	Kinematik viskozite	Isıl genleşme
Yoğunluk	1	1/7	1/9	1/4	1/4
Özgül ısı	7	1	1/2	3	3
Isıl iletkenlik	9	2	1	4	5
Kinematik viskozite	4	1/3	1/4	1	3
Isıl genleşme	4	4	1/5	1/3	1

AHP yöntemi ile yapılan hesaplama sonuçları, seçenekler arasında Cu-su nanoakışkanının diğerlerine göre daha üstün termofiziksel özellikler gösteren optimum soğutucu olduğunu göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, nanoakışkanların motorlarda ısı transfer kapasitesini artırmada önemli bir potansiyele sahip olduğunu ve mühendislik temelli karar verme süreçlerinde AHP gibi analitik yöntemlerin değerli katkılar sağlayabileceğini göstermektedir. Cu-su nanoakışkanının özellikle yüksek ısı iletkenliğiyle öne çıkması, çalışmanın uygulamaya dönük önemini pekiştirmektedir. Bu yönüyle bu çalışma hem akademik araştırmacılar hem de motor soğutma sistemlerinin tasarımıyla ilgilenen mühendislik uzmanları için yol gösterici nitelik taşımaktadır.

Çalışma-2: Alternatif yakıt seçiminde biyodizellerin AHP ile değerlendirilmesi (Abdulvahitoğlu, 2018)

Bu çalışmada, artan küresel enerji talebi ve sürdürülebilir bir çevre hedefi doğrultusunda biyodizelin üretiminde kullanılan yağlı tohum bitkilerinin alternatif ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Yenilenebilir enerji ihtiyacının artması ve fosil yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalar, biyodizelin sera gazı emisyonlarını azaltma potansiyeli ile birlikte enerji dönüşümünde önemli bir alternatif olarak değerlendirilmesini desteklemektedir. Bu yüzden bu çalışmada Pamuk tohumu, Madhuca, Yer fıstığı, Camelina sativa, Kolza ve Jatropha olmak üzere altı farklı yağlı bitkiden elde edilen biyodizel türü yakıt özellikleri açısından karşılaştırılmış ve en uygun biyodizelin belirlenmesi için Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi uygulanmıştır.

Biyodizelin yaygın kullanımının önündeki temel zorluklardan biri, farklı biyolojik kaynaklardan elde edilen biyodizellerin değişken fizikokimyasal özellikler sergilemesidir. Bu çeşitlilik, uygun biyodizel alternatifinin belirlenmesine yönelik karar verme sürecini karmaşık hâle getirmekte,

sistematik ve analitik bir yöntemle duyulan ihtiyacı artırmaktadır. Mevcut literatürde bu çeşitliliğin ÇKKV yöntemi ile bütüncül biçimde ele alınmamış olması, bu çalışmanın özgün katkılarından biri olarak öne çıkmaktadır.

Bu kapsamda, altı biyodizel türüne ait ısı değer, setan sayısı, viskozite, yoğunluk, akma noktası ve parlama noktası gibi temel fizikokimyasal özelliklere ilişkin deneysel veriler literatürden derlenmiştir. Söz konusu kriterlerin göreceli önemleri AHP yöntemi kullanılarak belirlenmiş; özellikle ısı değerinin yakıt performansı açısından en belirleyici kriter olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Daha sonra yine AHP yöntemi ile elde edilen biyodizeller bu yakıt özelliklerine göre karşılaştırılarak en etkili performans gösterenden en etkisize kadar sıralanmıştır. Bu yöntemsel yaklaşım, biyodizel seçimine ilişkin karar verme süreçlerine nesnel, ölçülebilir ve tutarlı bir değerlendirme yapabilme imkanı vermektedir. Bu çalışmada biyodizel yakıt özellikleri uzmanlarla görüşülerek ikili karşılaştırmalar yapılmış ve birden fazla uzmanın görüşüne başvurulduğu için uzman görüşlerinin ortalaması alınmıştır. AHP başlangıç matrisi aşağıda Çizelge 2.'de gösterildiği gibi oluşmuştur.

Çizelge 2. AHP başlangıç matrisi

Kriterler	Setan Sayısı	Yoğunluk	Viskozite	Parlama Noktası	Akma Noktası	Isıl Değer
Setan Sayısı	1,00	1,93	1,18	3,33	4,38	0,62
Yoğunluk	0,52	1,00	0,71	2,75	2,63	0,30
Viskozite	0,85	1,41	1,00	2,58	3,75	0,63
Parlama Noktası	0,30	0,36	0,39	1,00	0,99	0,26
Akma Noktası	0,23	0,38	0,27	1,01	1,00	0,24
Isıl Değer	1,62	3,31	1,60	3,89	4,24	1,00

AHP analiz sonuçlarına göre, incelenen biyodizel türleri arasında Pamuk tohumundan elde edilen biyodizel en uygun yakıt özelliklerine sahip alternatif olarak belirlenmiştir. Buna karşılık Jatropha değerlendirme ölçütleri açısından en düşük performans gösteren biyodizel olarak ortaya çıkmıştır. Kriterlerin önem dereceleri en yüksekte en düşüğe doğru Isıl değer, Setan sayısı, Viskozite, Yoğunluk, Akma noktası ve Parlama noktası olarak sıralanmıştır.

Bu çalışma, biyodizellerin fizikokimyasal özelliklerinin yakıt performansını belirlemedeki rolünü önemini açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Çalışma, AHP yönteminin biyodizel değerlendirme süreçlerine uygulanması açısından

literatüre yenilikçi bir katkı sunmakta; bu konuda karar desteği sağlayarak biyodizel seçimine yönelik sistematik bir model önermektedir. Pamuk tohumu biyodizelinin en uygun seçenek olarak belirlenmesi ise hem uygulayıcılar hem de enerji politikası geliştiren karar vericiler için önem taşımaktadır.

Sonuç olarak bu çalışma, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik artan çalışmalar dahilinde, biyodizelin enerji tüketimindeki potansiyel rolünü vurgulamakta ve alternatif yakıt teknolojilerine ilişkin araştırmalara değerli bir katkı sunmaktadır.

Çalışma-3: AHP tümleşik TOPSIS ile biyodizel üretiminde kullanılan yağ bitkisi seçimi (Abdulahitoğlu ve Kılıç, 2022)

Fosil yakıt rezervlerinin azalması ve çevresel etkilerin giderek artması sonucunda alternatif enerji kaynaklarına duyulan ihtiyacının da arttığı bir dönemde, Türkiye koşullarında üretilebilen yağlı tohumlardan elde edilen biyodizelin değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Bu bağlamda Kolza, Soya, Camelina ve Pamuk tohumu gibi enerji bitkileri biyodizel üretimine uygunlukları açısından karşılaştırılmış; en uygun alternatifin belirlenmesi için ÇKKV yöntemlerinden tümleşik olarak yararlanılmıştır. AHP yöntemi ile kriterler ağırlıklandırılmış, TOPSIS yöntemi ile de seçenekler sıralanmıştır. Araştırma, biyodizelin yenilenebilirlik, biyobozunurluk ve çevresel etkiler bakımından sunduğu avantajlara işaret ederken; motor gücü kayıpları ve emisyon artışları gibi dezavantajları da ele almaktadır.

Çalışmada incelenen yağlı tohumlar en uygun olandan itibaren sırasıyla Kolza, Soya, Camelina ve Pamuk tohumu olarak sıralanmıştır.

Hesaplamalar Türkiye’de biyodizel üretimi için en elverişli enerji bitkisinin Kolza olduğunu göstermiştir. Pamuk tohumu ise alternatifler arasında en düşük uygunluğa sahip seçenek olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, ilgili yağlı tohumlardan elde edilen biyodizellerin motor performans ölçütleri, tork, birim özgül yakıt tüketimi ve motor gücü, ticari dizel ile karşılaştırılmış; performans üzerinde farklı düzeylerde etkileri gözlemlenmiştir. Düşük motor gücü, artan emisyonlar ve bazı performans kayıplarının, biyodizelin dezavantajlı yönleri arasında öne çıktığı görülmüştür.

Araştırmada ÇKKV yaklaşımlarından AHP ve TOPSIS yöntemleri bütünsel olarak kullanılmıştır. AHP ile yakıt kalitesi, motor performansı ve emisyon özellikleri gibi kriterlerin önem derecelerini belirlenirken; TOPSIS ile alternatif yağlı tohumların bu kriterlere göre nihai sıralamaları oluşturulmuştur. Çalışmada literatüre dayalı sayısal verilerin kullanılması, karar sürecinin nesnelliğini ve güvenilirliğini artırmıştır. Değerlendirme esnasında kullanılan veriler aşağıda Çizelge 3.’te gösterilmiştir.

Çizelge 3. TOPSIS başlangıç matrisi

Biyodizel	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C21	C22	C23	C31	C32	C33
A1	9	8	7	9	9	3	9	8	5	9	8	4
A2	3	6	8	5	8	8	4	2	4	2	5	9
A3	8	7	6	3	4	4	8	7	5	3	9	5
A4	7	9	9	6	3	9	3	3	3	4	6	3

Bu matriste satırları ifade eden yağlı tohum bitkileri sırasıyla;

- i. A1-Kolza,
- ii. A2-Camelina,
- iii. A3-Soya ve
- iv. A4-Pamuktur.

Sütunları ifade eden biyodizel yakıt özellikleri ise sırasıyla;

- i. C11-Setan Sayısı,
- ii. C12-Yoğunluk,
- iii. C13-Viskozite,
- iv. C14-Parlama Noktası,
- v. C15-Akma Noktası,
- vi. C16-Isıl Değer,
- vii. C21-Tork,
- viii. C22-Birim Özgül Yakıt Tüketimi,
- ix. C23-Güç,
- x. C31-NO_x Emisyonu ve
- xi. C32-CO Emisyonudur.

Bu çalışmada, Türkiye’de biyodizel üretiminde kullanılabilecek yağlı tohum alternatiflerini sistematik ve karşılaştırmalı bir şekilde analiz eden tümleşik bir ÇKKV modeli sunulmuştur. Kolzanın en uygun enerji bitkisi olarak tanımlanması, ulusal biyodizel stratejileri, tarımsal üretim planlaması ve enerji politikalarının geliştirilmesi açısından önemli çıkarımlar sağlamaktadır. AHP ve TOPSIS’in bütünleşik kullanımı, biyodizel üretim süreçlerinde enerji bitkisi seçimine yönelik metodolojik bir yaklaşım sunmakta ve karar vericiler için güçlü bir analitik yöntem önermektedir.

Sonuç olarak çalışma, biyodizelin çevresel faydaları ve sürdürülebilirlik potansiyelini vurgularken; performans ve emisyon sınırlılıklarına dikkat çekerek daha verimli ve çevre dostu alternatif yakıt stratejilerinin geliştirilmesine yönelik araştırma alanlarını da dikkat çekmektedir. Bu yönleriyle çalışma, enerji politikası yapıcılar, mühendislik uygulayıcıları ve alternatif yakıt araştırmacıları için değerli bir karar destek çalışması niteliği taşımaktadır.

Çalışma-4: Otonom denizaltılar için kontrol yöntemi seçiminde çok kriterli karar analizi (Nennioğlu vd., 2024)

Otonom Denizaltı Araçları (UUV) için uygun kontrol yönteminin seçilmesine yönelik karar verme süreçlerinde farklı ÇKKV teknikleri karşılaştırmalı olarak kullanılmıştır. Farklı yöntemler ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak oluşturulan modelin doğruluğu da ispatlanmıştır. Bu farklı yöntemlerin hesaplama prensipleri birbirinden ayrıışa da kontrol stratejilerinin güvenilir ve kararlı bir şekilde sıralanması UUV operasyonlarının etkinliği açısından önem arz etmektedir. Araştırma kapsamında UUV'lerin dinamik ve kinematik modelleri temel alınmış; PD/PID kontrol, kaymalı mod kontrol ve adaptif kontrol yaklaşımları performans, sınırlılık ve uygulanabilirlik yönleriyle karşılaştırılmıştır.

Çalışmada TOPSIS, COPRAS, MAUT ve MOOSRA yöntemleri kullanılarak alternatif kontrol tekniklerinin ÇKKV yaklaşımıyla değerlendirilmesi yapılmıştır. Kriter ağırlıklarının belirlenmesinde ise AHP uygulanmış ve uzman görüşleri karar sürecine dahil edilmiştir. Uygulanan ÇKKV yaklaşımlarının hepsi; alternatiflerin sıralanması, kriterlerin ağırlıklandırılması ve verilerin standartlaştırılması gibi temel aşamalardan oluşmakta olup, kontrol yöntemlerinin performansının nesnel ve karşılaştırılabilir bir şekilde analiz edilmesine imkân vermektedir.

Simülasyon tabanlı değerlendirme sonucunda kontrol tekniklerinin göreceli performans sıralaması elde edilmiştir. AHP ile belirlenen kriter ağırlıkları bu sıralamayla uyumluluk göstermiş ve yöntemin karar sürecine sağladığı katkıyı pekiştirmiştir. Elde edilen bulgular, UUV kontrol stratejilerinin belirlenmesinde bütünlük ÇKKV yaklaşımlarının güvenilir bir metodolojik temel sunduğunu göstermekte; ayrıca deniz robotik uygulamalarının diğer alanlarında da benzer karar analizlerinin uygulanabilir olduğunu ve ÇKKV yöntemleri ile simülasyon tekniklerinin birlikte kullanılabilir olduğunu ortaya koymaktadır.

Simülasyonlardan yararlanılarak oluşturulan karar matrisleri, kontrol yöntemi seçimine ilişkin kapsamlı bir değerlendirme zemini sunmuştur. Özellikle PID temelli kontrol yöntemlerinin farklı uygulama senaryolarındaki etkilerinin incelenmesi, bu yöntemlerin robotik sistemler içindeki süreklilik

arz eden önemini vurgulamaktadır. ÇKKV yaklaşımı hem kontrol sistemlerinin optimizasyonunda hem de karar destek mekanizmalarının geliştirilmesinde etkili bir şekilde kullanılabilmektedir. Bu yönleriyle çalışma, deniz robotik sistemleri tasarlayan mühendisler, araştırmacılar ve karar vericiler için bir referans niteliği taşımaktadır. Çalışmada kullanılan kriterler, kontrol yöntemlerinin çok boyutlu performansını değerlendirmeye olanak tanıyacak şekilde yapılandırılmıştır. Bunlar aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

i. Uygulama basitliği (C1): Kontrol yönteminin matematiksel uygulanabilirliği ve Lyapunov kararlılığı gibi analizleri içerir.

ii. Model belirsizliklerine duyarlılık (C2): Modeldeki hata veya belirsizliklerin performans üzerindeki etkisini yansıtır.

iii. Bozulmalara yanıt (C3): Dış bozucu etkilerin yörünge takip performansını ne ölçüde etkilediğini gösterir.

iv. Sensör gürültüsüne duyarlılık (C4): Sensör verisindeki gürültüye karşı kontrol performansındaki değişimi ifade eder.

v. Ayarlama kolaylığı (C5): Kazanç ve parametrelerin performansı artıracak biçimde ne kadar kolay optimize edilebildiğini gösterir.

vi. Hesaplama süresi (C6): Kontrol girdilerinin hesaplanması için gerekli işlem süresini ifade eder.

vii. Takip hassasiyeti (C7): Çıktıların istenen yörüngeye yakınlığını ölçerek kontrol yönteminin doğruluk düzeyini belirler.

Bu kriterlerin bütüncül değerlendirilmesi, UUV kontrol yöntemlerinin çok boyutlu performansını sistematik biçimde analiz etmeyi mümkün kılmakta olup değerlendirme matrisi aşağıda Çizelge 4.'te gösterilmiştir.

Çizelge 4. Kontrol yöntemleri başlangıç matrisi

Kriterler	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	1,0000	0,1514	0,1548	0,3095	1,1760	0,4152	0,1382
C2	6,6057	1,0000	0,5520	3,5218	4,7540	2,8692	1,9622
C3	6,4618	1,8114	1,0000	2,2679	5,1230	4,2415	2,2523
C4	3,2309	0,2839	0,4409	1,0000	3,2216	1,8964	0,5904
C5	0,8503	0,2103	0,1952	0,3104	1,0000	0,5627	0,2029
C6	2,4087	0,3485	0,2358	0,5273	1,7772	1,0000	0,2029
C7	7,2345	0,5096	0,4440	1,6938	4,9278	4,9278	1,0000

Çalışma-5: Bir tekstil işletmesinde enerji verimliliği analizi (Koç, 2023)

Bu çalışmada, sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin küresel politika gündemini etkilediği bir konjonktürde, tekstil sektörünün Avrupa Yeşil Mutabakatı (AYM) doğrultusunda zorunlu kıldığı dönüşüm politikalarının işletme düzeyindeki uygulanabilirliği incelenmiştir. Çalışmanın temel odağını, Adana Organize Sanayi Bölgesi'nde (AOSB) faaliyet gösteren bir tekstil tesisinde enerji verimliliği ve temiz üretim çalışmalarının sistematik bir şekilde değerlendirilmesi teşkil etmektedir. Literatürde, tekstil endüstrisinde tam ölçekli uygulamalara dayanan detaylı enerji verimliliği analizlerinin kısıtlı olması nedeniyle, bu çalışma hem uygulamalı boyutta hem de yöntemsel çerçevede önemli bir boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda, tesisin mevcut enerji kullanım profili titizlikle analiz edilmiş; bilhassa doğal gaz tüketimi ve proses bazlı özgül verimlilik göstergeleri incelenerek yüksek iyileştirme potansiyeli taşıyan kritik alanlar belirlenmiştir.

Proje önceliklendirme süreçlerinde sağladığı nesnellik ve çok boyutluluk ilkesi sebebiyle ÇKKV yöntemleri bu çalışmada da kullanılmıştır. Bu yaklaşım ile enerji verimliliği projelerinin değerlendirilmesi, yalnızca klasik ekonomik ölçütlerle sınırlı kalmayıp; uygulanabilirlik, çevresel etki, verimlilik artış potansiyeli ve işletmeye sağlayacağı uzun vadeli stratejik katkılar gibi çok ölçütlü bir boyutta ele alınmıştır. Bu doğrultuda, karar kriterleri, nesnel yaklaşımlardan biri olan Standart Sapma (SD) Yöntemi ile ağırlıklandırılmış, projelerin toplam fayda düzeyleri ise MAUT yöntemi ile hesaplanmıştır. Böylece karar vericilerin sübjektif yargılarından bağımsız, sistematik ve tekrarlanabilir bir değerlendirmesi yapılmıştır. Çalışma tesisin enerji yoğun alt proseslerinde verimliliği artırmayı, kayıpları minimize etmeyi ve doğrudan AYM'nin öngördüğü temiz üretim ilkeleriyle uyumlu sonuçlar üretmeyi hedeflemektedir.

Bu kapsamda yapılacak projelerin karşılaştırmalı analizi neticesinde, yüksek enerji tasarrufu potansiyeli, kısa geri ödeme süresi ve güçlü çevresel fayda sunan seçeneklerin öne çıktığı görülmüştür. Özellikle atık ısı geri kazanım sistemleri, süreç optimizasyonu ve ekipman verimliliği yükseltici uygulamaların, işletmeye hem finansal hem de ekolojik açıdan somut ve anlamlı katkılar sağlayacağı ortaya konulmuştur. Çalışmada kullanılan veriler ile oluşturulan başlangıç değerlendirme matrisi aşağıda Çizelge 5.'te gösterilmiştir.

Çizelge 5. MAUT değerlendirme matrisi

Proje	Tasarruf Türü			CO2 Azalma Miktarı Ton/Yıl	Yatırım Maliyeti/ TL.	Geri ödeme süresi/Yıl
	Miktar	TEP/yıl	TL/yıl			
Yoğuşmalı Ekonomizer Projesi	42745	35,3	125243	8,55	490000	3,91
Kompresör Atık Isı Projesi	27090	22,3	79374	5,42	198250	2,5
Borularda Termal Kayıplar	13720	11,3	40200	2,74	13000	0,32
Vanalarda Termal Kayıplar	16749	13,7	49075	3,35	13500	0,28
Yüzeylerde Termal Kayıplar	65003	53,3	190459	13	338072	1,78

Bu çalışma, ÇKKV yöntemlerinin sanayi tesislerindeki enerji verimliliği çalışmaları kapsamında yapılacak yatırımların değerlendirilmesinde güçlü, rasyonel ve analitik bir yöntem önermektedir. Farklı ve birbiri ile çelişkili kriterler arasında sistematik bir değerlendirme sağlaması, karar verme sürecini daha şeffaf, ölçülebilir ve gerçekçi bir temele oturtmaktadır. Bu yönüyle çalışma, yeşil dönüşümün yalnızca makro düzeyde politika belirleme ile değil, aynı zamanda mikro ölçekte işletme bazlı, ölçülebilir ve somut müdahaleler gerektirdiğini çarpıcı bir uygulama örneği üzerinden göstermektedir. Ayrıca, enerji verimliliği yatırımlarının işletmelerde rekabetçiliği ve dış pazarlara erişim koşullarını iyileştiren stratejik bir araç olduğu da vurgulanmıştır.

Çalışmada, tek bir entegre tesis üzerinde yürütülmüş olması nedeniyle sektör geneline yönelik doğrudan bir çalışma olmamakla birlikte, sunulan yöntemsel çerçevenin diğer sanayi tesislerinde de uygulanabilir olması, literatüre olan katkısını artırmaktadır. Özellikle ÇKKV tekniklerinin tesis düzeyinde stratejik karar alma süreçlerinde kullanılması, enerji verimliliği ve temiz üretim yatırımlarında daha gerçekçi, uzun vadeli ve sürdürülebilir sonuçlar doğuracak bir yönetim anlayışının kurumsallaşmasına katkı sağladığını göstermektedir.

Sonuç olarak, AYM'nin gerektirdiği dönüşümün bir işletme özelinde nasıl somut ve uygulanabilir bir stratejiye dönüştürülebileceğini göstermektedir. Enerji verimliliği projelerinin ÇKKV yöntemleriyle bilimsel, ölçülebilir ve sistematik bir çerçevede değerlendirilmesi, tekstil sektöründe sürdürülebilir üretime geçişin yönetilmesine katkı sağlamaktadır. Bu niteliğiyle araştırma hem akademik literatür hem de endüstriyel karar alıcılar için bir model önerisi sunmaktadır.

Çalışma-6: Elektrikli araç bataryalarının SWARA tümleşik TOPSIS ile değerlendirilmesi (Abdulahitoğlu vd., 2022)

Bu çalışmada küresel iklim değişikliği, enerji güvenliği endişeleri ve fosil yakıtlı araçların çevresel etkilerine karşı çözümlerden birisi olarak öne çıkan elektrikli araç (EA) teknolojilerinin yaygınlaşması bağlamında, EA'ların en kritik bileşeni olan batarya seçim problemi sistematik bir yaklaşımla ele alınmıştır. Küresel ısınma ve iklim değişikliği açısından içten yanmalı motorlu (İYM) araçların yarattığı olumsuzluklar, yenilenebilir enerji kullanan ve çevre dostu alternatif araç teknolojilerine geçişi zorunlu kılmış; bu dönüşümde bataryalar, bir aracın menzili, verimliliği, maliyeti ve genel performansı üzerinde doğrudan ve belirleyici bir etkiye sahip bileşen olarak ön plana çıkmıştır. Piyasada mevcut olan her biri farklı avantaj/dezavantaj dengesine sahip çeşitli batarya tipleri arasından optimum seçeneğin belirlenmesi ihtiyacı, üreticiler, tasarımcılar ve karar vericiler için karmaşık ve zor bir karar problemi yaratmaktadır.

Birden fazla birbiri ile çelişen kriterlerin yer aldığı bu karmaşık karar verme sürecini nesnel, sistematik ve analitik bir şekilde gerçekleştirmek maksadıyla, bütünsel bir ÇKKV metodolojisi önerilmiştir. Bu kapsamda kriterlerin önem derecelerini belirlemek için SWARA yöntemi. Bu kriterlere göre seçenekleri sıralamak için ise TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. SWARA yönteminin kullanıldığı ilk aşamada, uzman görüşleri ve göreceli önem analizine dayalı olarak, batarya seçiminde etkili olan kriterler; batarya kapasitesi, verimlilik, şarj süresi, enerji yoğunluğu/menzil, maliyet, güç değeri, ömür ve performans olarak belirlenmiş ve SWARA yöntemiyle ağırlıklandırılmıştır. Bu sayede, kriterler arasındaki öncelikler, karar vericilerin subjektif değerlendirmelerinden bağımsız, sistematik ve tekrarlanabilir bir biçimde belirlenmiştir.

TOPSIS yönteminin kullanıldığı ikinci aşamada, SWARA ile belirlenen ağırlıklar kullanılarak alternatif batarya tipleri ise TOPSIS yöntemi ile değerlendirilmiştir. TOPSIS yöntemi alternatiflerin ideal en iyi çözüme olan yakınlığını ve ideal en kötü çözüme olan uzaklığını hesaplayarak, çok kriterli bir ortamda en uygun batarya alternatifinin sıralamasını objektif bir şekilde yapmıştır. Bu bütünsel yaklaşım, batarya seçiminde örneğin maliyet ya da kapasite gibi sadece tek bir kritere odaklanmanın ötesine geçerek; teknik gereksinimler, ekonomik kısıtlar ve performans hedefleri gibi çok sayıda kriteri eş zamanlı ve dengeli bir biçimde değerlendirme imkânı sunmaktadır.

SWARA bütünsel TOPSIS yaklaşımının uygulandığı değerlendirme sonucunda, bu yaklaşımın elektrikli araç bataryası seçiminde karar vericiler için güvenilir, gerçekçi, sistematik ve analitik model olduğu görülmüştür. Çalışmanın başlangıç değerlendirme matrisi aşağıda Çizelge 6.'da gösterilmiştir.

Çizelge 6. Başlangıç değerlendirme matrisi

Batarya çeşidi	Özgül güç	Özgül enerji yoğunluğu	Güvenilirlik	Güvenlik	Fiyat
LCOB	5	3	3	3	5
LNMC0	5	4	4	4	5
LMOB	4	3	4	4	4
LFPB	4	5	5	5	3
LTOB	1	5	5	4	3

Bu çalışma EA üreticileri, batarya tedarikçileri ve tasarım mühendisleri için somut ve önemli pratik çıkarımlar içermektedir. Zira batarya seçimi, aracın nihai menzilin, şarj sürelerini, maliyetini ve genel kullanıcı deneyimini doğrudan etkileyen stratejik bir karardır. Ancak, çalışma belirli batarya alternatifleri ve belirli kriterlere göre değerlendirmesi nedeniyle sınırlı kalmıştır. Gelecek çalışmalar için batarya yaşanması, batarya güvenliği, çevresel etkilere duyarlılık, geri dönüşüm ve yaşam döngüsü maliyetleri gibi ek kriterlerin de modele dahil edilmesi, modelin genellenebilirliğini ve sürdürülebilirlik boyutundaki etkinliğini artıracaktır.

Çalışma-7: Alternatif yakıtların sürdürülebilir enerji politikaları açısından küresel bulanık TOPSIS yaklaşımıyla değerlendirilmesi (Abdulvahitoğlu, 2025)

Bu çalışma, yenilenebilir enerjiye geçiş ve düşük karbon ekonomisine uyumun küresel ölçekte zorunluluk hâline geldiği günümüzde, alternatif yakıt türlerinin sürdürülebilir enerji politikaları kapsamında stratejik önemini çok boyutlu ve yüksek belirsizlik içeren bir ortamda incelemektedir. Fosil yakıtlara olan yüksek bağımlılığın hem çevresel hem de ekonomik kırılganlıkları artırması nedeniyle, alternatif yakıtların teknik performansı, çevresel etkileri, ekonomik uygulanabilirliği ve uzun vadeli enerji güvenliğine katkısı bütüncül biçimde değerlendirilmelidir. Çalışma bu gereksinim doğrultusunda, çok sayıda kriterin ve uzman görüşü kaynaklı belirsizliklerin aynı anda ele alınmasını sağlayan Küresel Bulanık Çok Kriterli Karar Verme (KF-ÇKKV) yaklaşımıyla sistematik bir değerlendirme modeli sunmaktadır.

Alternatif yakıtlar yalnızca çevresel avantajlarıyla değil; maliyet, teknik uygunluk, sürdürülebilirlik düzeyi, fiziksel ve kimyasal özellikler, altyapı gereksinimleri ve toplumsal kabul gibi geniş bir kriter setiyle değerlendirilmesi daha optimum sonuçlar verecektir. Tek boyutlu analizler günümüz enerji dönüşüm süreçlerindeki karmaşıklığı açıklamakta yetersiz kalmakta; bu nedenle belirsizliği, uzman farklılıklarını ve karar vericilerin tereddütlerini

yansıtan küresel bulanık küme temelli yöntemler daha güvenilir sonuçlar ifade etmektedir. Küresel bulanık küme teorisi, üyelik, üyelik dışılık ve tereddüt derecelerini eşzamanlı olarak değerlendirmesi sayesinde, alternatif yakıt seçimi gibi karmaşık ve çok boyutlu problemler için yüksek belirsizlik ortamlarında daha gerçekçi bir model sunmaktadır.

Araştırma beş aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada iklim değişikliği ve sürdürülebilir enerji politikaları tartışılmış, ikinci aşamada alternatif yakıt türleri detaylandırılmıştır. Üçüncü aşama bulanık mantık ve küresel bulanık küme teorisinin açıklanmasına ayrılmış; dördüncü aşamada 13 kriter ve 9 alternatiftan oluşan karar matrisi oluşturularak KB-TOPSIS yöntemi uygulanmıştır. Son aşamada ise elde edilen sonuçlar analiz edilerek enerji politikalarına yönelik stratejik çıkarımlar sunulmuştur. Değerlendirmenin küresel bulanık başlangıç matrisi aşağıda Çizelge 7.'de gösterilmiştir.

Çizelge 7. Küresel bulanık TOPSIS başlangıç matrisi

YAKIT	FM	EC	LHV	HHV	PS	FP	AT	MI	ESI	S	CO ₂	NO _x	PAH
G	EP	VG	VG	VG	VG	P	G	EG	VP	VP	VG	VG	VG
D	EP	EG	EG	EG	VG	VG	F	VG	VP	VP	VG	EG	VG
B100	EG	VG	VG	VG	VG	EG	F	F	EG	EG	F	EG	VP
LPG	VP	G	G	G	P	VP	G	VP	VP	VP	VP	VP	VP
CNG	VP	F	VP	VP	VP	EP	VG	VP	EP	P	VP	VP	VP
LNG	VP	F	VP	VP	F	EP	VG	EP	EP	P	VP	VP	VP
E100	EG	F	F	F	VG	G	G	P	EG	EG	VP	F	VP
M	VP	P	P	P	VG	G	G	VP	G	F	VP	VP	VP
H	VP	VG	P	P	VP	EP	VG	VP	VP	P	EP	VP	EP

Değerlendirme kriterleri olarak ham madde kaynağı, fiziksel hâl, parlama ve tutuşma sıcaklıkları, alt ve üst ısı değerler, bakım ve işletme gereksinimleri, emisyon düzeyleri (CO₂, NO_x, PAH), enerji güvenliği etkisi ve genel sürdürülebilirlik özellikleri kullanılmıştır. Alternatifler ise fosil yakıtlar (benzin, dizel), biyoyakıtlar (biyodizel, etanol, metanol), LNG, CNG, LPG ve hidrojen olmak üzere geniş bir yakıt yelpazesini kapsamaktadır.

KB-TOPSIS sonuçlarına göre fosil yakıtlar, mevcut altyapı ve erişilebilirlik avantajları nedeniyle hâlâ en yüksek genel performansı göstermektedir. Alternatif yakıtlar özellikle emisyon kriterlerinde daha iyi sonuç verse de maliyet, altyapı eksikliği ve enerji güvenliği açısından dezavantajlı konumdadır. Bu durum, sürdürülebilir enerji geçişi için teknik üstünlük sağladığı kadar ekonomik ve kurumsal kapasite geliştirme açısından da kritik olduğunu göstermektedir.

Çalışma, alternatif yakıt seçiminde belirsizlikleri dikkate alan bu yeni metodolojik yaklaşımın politika yapıcılara ve enerji planlayıcılarına daha dengeli, gerçekçi ve uzun vadeli kararlar alma imkânı sunduğunu

ortaya koymaktadır. Ayrıca modelin daha fazla kriter ve alternatifle genişletilebileceği, diğer MCDM teknikleriyle karşılaştırmalı çalışmalar yapılabileceği önerilmektedir. Genel olarak sürdürülebilir enerji politikalarının tasarımı bilimsel temelli, çok boyutlu ve belirsizlik ortamlarda KB-ÇKKV uygulamalarının kritik rolü vurgulanmaktadır.

4.Sonuç

ÇKKV yöntemleri, mühendislik alanlarında karmaşık sistemlerin değerlendirilmesi, alternatiflerin karşılaştırılması ve optimal çözümün belirlenmesi açısından vazgeçilmez çözümler sunmaktadır. Günümüzün karmaşık mühendislik problemlerinde performans, güvenilirlik, maliyet, sürdürülebilirlik ve etkinlik gibi birbirleriyle çelişebilen çok boyutlu kriterler bulunmakta; bu durum karar vericilerin hem nicel verileri hem de uzman görüşlerini bütüncül biçimde değerlendirmesini zorunlu kılmaktadır. ÇKKV yöntemleri, bu çok ölçütlü değerlendirme süreçlerini sistematik ve analitik bir yapıya kavuşturarak karar destek sistemlerini güçlendirmektedir.

Son yıllarda, özellikle makine mühendisliği, enerji sistemleri mühendisliği, robotik ve ulaşım teknolojileri gibi alanlarda ÇKKV yöntemlerinin kullanımı önemli ölçüde artmıştır. Bu alanlarda yürütülen çalışmalar, teknik performansı, ekonomik verimliliği ve çevresel etkileri eş zamanlı olarak dikkate alma gerekliliği nedeniyle karar verme süreçlerini daha karmaşık hâle getirmiştir. TOPSIS, COPRAS, MAUT, MOOSRA gibi sıralama yöntemleri ile AHP ve SWARA gibi ağırlıklandırma metotları, mühendislik tasarım ve optimizasyon çalışmalarında yaygın biçimde sıklıkla kullanılmaktadır.

Bu çalışmada açıklanan araştırmalar, ÇKKV yöntemlerinin mühendislik alanındaki değerini ortaya koymaktadır. Örneğin motor soğutma sistemlerinde nanoakışkan seçimi üzerine yapılan çalışmalarda, farklı nanoakışkan türlerinin termofiziksel özellikleri AHP ve TOPSIS gibi yöntemlerle değerlendirilmiş ve Cu-su nanoakışkanının yüksek ısıl iletkenliği nedeniyle optimum seçenek olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum, enerji verimliliği odaklı tasarımlarda analitik karar verme süreçlerinin uygulamaya dönük faydasını göstermektedir.

Benzer şekilde, UUV için kontrol yöntemlerinin seçimine yönelik araştırmada, farklı ÇKKV teknikleri kullanılarak yöntemlerin doğruluğu ortaya konmuştur. PID, kaymalı mod ve adaptif kontrol gibi tekniklerin; uygulama kolaylığı, model belirsizliğine duyarlılık, sensör gürültüsü etkisi, hesaplama süresi ve takip hassasiyeti gibi kriterler çerçevesinde değerlendirilmesi, mühendislik kararlarının yalnızca teorik değil, aynı zamanda operasyonel gerekliliklerle de uyumlu olması gerektiğini göstermektedir.

Enerji ve ulaşım sektörlerinde yapılan değerlendirmeler de ÇKKV yöntemlerinin kapsamını genişletmektedir. EA bataryalarının performans, güvenlik, maliyet, çevresel etkiler ve yaşam döngüsü kriterleri bazında SWARA-TOPSIS yöntemiyle analiz edilmesi, sürdürülebilir ulaşım teknolojilerinin geliştirilmesinde sistematik karar destek mekanizmalarının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Çalışmalar, batarya teknolojilerinin yalnızca teknik özellikleri değil, aynı zamanda ekonomik ve çevresel kriterleri açısından da karşılaştırılması gerektiğini göstermekte; böylece daha güvenilir, uzun ömürlü ve enerji yoğunluğu yüksek batarya seçeneklerinin belirlenmesine katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada ele alınan örnekler bir arada değerlendirildiğinde, ÇKKV yöntemlerinin mühendislik disiplinlerinde hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalar açısından stratejik bir araç hâline geldiği görülmektedir. Söz konusu yöntemler, alternatiflerin nesnel biçimde sıralanmasını sağlayarak kaynak kullanımını optimize etmekte, tasarım süreçlerini rasyonelleştirmekte ve karar vericiler arasında görüş birliği oluşturmayı kolaylaştırmaktadır. Daha da önemlisi, geleneksel karar verme yaklaşımlarının ötesine geçerek mühendislik uygulamalarına çok boyutlu bir değerlendirme perspektifi kazandırmaktadır.

Sonuç olarak, ÇKKV yöntemleri modern mühendislik problemlerinin çözümünde güçlü, esnek ve uygulanabilir metodolojik araçlar sunmaktadır. Enerji sistemlerinden otonom robotik teknolojilerine, malzeme seçiminden kontrol stratejilerine kadar geniş bir yelpazede kullanılan bu yöntemler, geleceğin mühendislik tasarım ve optimizasyon süreçlerinde belirleyici bir rol üstleneceğini göstermektedir.

Kaynaklar

- Abdulahitoglu, A. (2019). Using Analytic Hierarchy Process for Evaluating Different Types of Nanofluids for Engine Cooling Systems. *Thermal Science*, 23(5 Part B), 3199-3208.
- Abdulahitoglu, A., 2022. ÇKKV Yöntemleri, Matematiksel Modelleme ve CBS ile Jandarma Karakolu Kuruluş Yeri seçimi, Nobel Yayınevi, Ankara.
- Abdulahitoglu, A. ve Kilic, M. (2022). A New Approach for Selecting the Most Suitable Oilseed for Biodiesel Production; The Integrated AHP-TOPSIS Method. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(3), 101604.
- Abdulahitoglu, A., Abdulvahitoglu, A. ve Kılıç, M., (2022). Elektrikli Araç Bataryalarının Bütünleşik Swara-Topsis Metodu ile Değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(4), 1061-1076.
- Abdulahitoglu, A.; Abdulvahitoglu, A. Ve Cengiz, N., (2024). A Comprehensive Analysis of Apricot Drying Methods via Multi-Criteria Decision Making Techniques. *J. Food Process Eng.* 2024, 47, e14759. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14759>.
- Abdulahitoglu, A. (2025). A Symmetry-Based Spherical Fuzzy MCDM Approach for the Strategic Assessment of Alternative Fuels Toward Sustainable Energy Policies. *Symmetry*, 17(7), 1089.
- Arisoy, E. (2019). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri PROMETHEE. Dokuz Eylül Üniversitesi, Y.lisans tezi. İzmir.
- Afshari, A., Vatanparast, M., ve Čockalo, D., (2016). Application of Multi Criteria Decision Making to Urban Planning: A Review. *Journal of Engineering Management and Competitiveness (JEMC)*, 6:46–53.
- Asemi, A., Baba, M. S., Asemi, A., Rukaini, B. H. A. ve Idris, N. (2009). Fuzzy multi criteria decision making applications: a review study. *planning*, 33(36), 36.
- Badi, I. ve Bouraima, M. B. (2023). Development of MCDM-based Frameworks for Proactively Managing the Most Critical Risk Factors for Transport Accidents: A Case Study in Libya. *Spectrum of engineering and management sciences*, 1(1), 38-47.
- Batuhan, T., Muti, A., Kaymaz, Ç. K. ve Yılmaz, M. (2025). Kentsel Dönüşüm Projelerinden Beklenen Faydaların AHS-BWM Yöntemi ile Belirlenmesi. *Planlama*, 35(1).
- Chejarla, K. C., Vaidya, O. S. ve Kumar, S. (2022). MCDM Applications in Logistics Performance Evaluation: A Literature Review. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 29(3-4), 274-297.
- Chen, C.T., (2000). Extensions of the TOPSIS for Group Decision-Making under Fuzzy Environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 114(1): 1–9.
- Çoban, M. (2012). Personel Seçiminde Analitik Hiyerarşi Prosesi ve İmalat Sanayiinde bir Uygulama. Balıkesir Üni. Sos.Bil.Ens. İşletme ABD Y.lisans Tezi, Balıkesir.

- Danişan, T., Yumuşak, R., Özcan, E. ve Eren, T. (2018). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Yenilenebilir Enerji Alternatiflerinin Yatırım Değerlendirmesi. *Yöneylem Araştırması*, 19, 17-20.
- Durak, İ. (2024). Çok Kriterli Karar Verme: Temel Yöntemler, Süreçler ve Hibrit Yaklaşımı. *Bütünleşik Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri*.
- Durmuş, M. ve Tayyar, N., (2017). AHP ve TOPSIS ile Farklı Kriter Ağırlıklandırma Yöntemlerinin Kullanılması ve Karar Verici Görüşleriyle Karşılaştırılması. *Es-kişehir Osmangazi Üni. İİBF Dergisi*, 12(3):65-80.
- Fidan, H. (2021). CRITIC ve MAIRCA çok kriterli karar verme yöntemi ile uluslararası hedef pazar seçimi. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 23(41), 291-309.
- Gade, P.,K. ve Osuri, M., (2014). Evaluation of Multi Criteria Decision Making Methods for Potential Use in Application Security. *School of Computing Blekinge Institute of Technology Electrical Engineering, Karlskrona/Sweden*, Y.Lisans Tezi, 63 s.
- Gudigantala, N., Madhavaram, S. ve Bicen, P. (2023). An AI Decision-Making Framework for business value maximization. *AI Magazine*, 44(1), 67-84.
- Günay, B. ve Ayyıldız, H. (2017). Firmaların Pazarlama Faaliyet Performans Düzeylerinin Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Karşılaştırmalı Analizi. *Uluslararası İktisadi ve İdari İncelemeler Dergisi*, (18), 113-136.
- Kabak, M., Sağlam, F. ve Aktaş, A., (2017). Farklı Uzaklık Hesaplama Yaklaşımlarının TOPSIS Üzerinde Kullanılabilirliğinin İncelenmesi. *Gazi Üni.Müh.Mim.Fak. Dergisi* 32(1):35-43.
- Karim, R. ve Karmaker, C.L., (2016). Machine Selection by AHP and TOPSIS Methods, *American Journal of Industrial Engineering*, 4(1):7-13.
- Karaath M., Ömürbek N., Budak İ. ve Dağ O., (2015). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Yaşanabilir İllerin Sıralanması. *Selçuk University Journal of Institute of Social Sciences* 33: 215-228,
- Koç, D.D., Abdulvahitoğlu, A. Ve Abdulvahitoğlu, A., (2023). Adana İlinde Bir Tekstil İşletmesindeki Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı Uygulamalarının Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Analizi. *Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(4), 875-885.
- Kolios, A., Mytilinou, V., Minguez, E.L. ve Salonitis, K., (2016). A Comparative Study of Multiple-Criteria Decision Making Methods Under Stochastic Inputs, *Energies* 2016, 9,566;DOI:10:3390/en9070566.
- Kumar, R. ve Pamucar, D. (2025). A Comprehensive and Systematic Review of Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) Methods to Solve Decision-Making Problems: Two Decades from 2004 to 2024. *Spectrum of Decision Making and Applications*, 2(1), 178-197.

- Lopez, L. M., Ishizaka, A., Qin, J. ve Alvarez-Carrillo, P. A. (2023). Multi-Criteria Decision-Making Sorting Methods: Applications to Real-World Problems. Academic Press.
- Massam, B. H. (1988). Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Techniques in Planning. *Progress in Planning*, 30, 1-84.
- Nennioğlu, A. K., Abdulvahitoğlu, A. ve Dal, A. (2024). Integrated Analytic Hierarchy Process and Multi-Criteria Decision-Making Approach: An Application for Unmanned Underwater Vehicle Control Method Selection. *Ocean Engineering*, 312, 119261.
- Özdemir, Y., Tüysüz, S. ve Başgil, H., (2016). Nükleer Enerji Santralleri için AHP ve ANP Yöntemi Kullanılarak Risklerin Ağırlıklandırılması. *Yıldız Teknik Üni. Sigma Journal of Engineering and National Science*, 7(2):207-217.
- Passos Neto, G. D. M., Alencar, L. H. ve Valdes-Vasquez, R. (2023). Multiple-Criteria Methods for Assessing Social Sustainability in the Built Environment: A Systematic Review. *Sustainability*, 15(23), 16231.
- Pekkaya, M. ve Bucak, U., (2018). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Bölgesel Liman Kuruluş Yeri Seçimi: Batı Karadeniz’de Bir Uygulama, 18’nci EYİ Sempozyumu Özel Sayısı:253-268.
- Pelissari, R., Oliveira, M. C., Abackerli, A. J., Ben-Amor, S. ve Assumpção, M. R. P. (2021). Techniques to Model Uncertain Input Data of Multi-Criteria Decision-Making Problems: A Literature Review. *International Transactions in Operational Research*, 28(2), 523-559.
- Sahoo, S. K. ve Goswami, S. S. (2023). A Comprehensive Review of Multiple Criteria Decision-Making (MCDM) Methods: Advancements, Applications, and Future Directions. *Decision Making Advances*, 1(1), 25-48.
- Tao, L., Chen, Y., Liu, X. ve Wang, X., (2012). An Integrated Multiple Criteria Decision Making Model Applying Axiomatic Fuzzy Set Theory. *Applied Mathematical Modeling*, 36:5046-5058.
- Türkoğlu, S.P., (2017). Karar Vermede Hedef Programlama Yöntemi ve Uygulamaları, *Osmaniye Korkut Ata Üni., İİBF Dergisi*, 1(2):29-46.
- Yalcin, N., Koksalan, M. ve Zionts, S. (2022). A Comprehensive Study on MCDM Methods and Applications. *World Scientific Publishing*.
- Yapıcı, S., Yumuşak, R. ve Eren, T. (2020). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Medikal Depo Yeri Seçimi. *Trakya Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi E-Dergi*, 9(2), 203-221.
- Yücel, M. ve Ulutaş, A., (2009). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden ELECTRE Yöntemiyle Malatya’da bir Kargo Firması için Yer Seçimi. *Sosyal Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 9(17):327-344.



DÜZLEMSEL GÜNEŞ ENERJİ SİSTEMLERİNDE UZUN DÖNEM İSTATİSTİKLER KULLANILARAK OPTİMUM EĞİM AÇISININ HESAPLANMASI

“ ”

Emrah DENİZ¹

¹ Prof. Dr. Emrah DENİZ, Karabük Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye edeniz@karabuk.edu.tr <https://orcid.org/0000-0003-0182-2631>

1. Giriş

Enerji, canlı yaşamı için en temel gereksinimlerden biridir. Ancak, birincil enerji kaynaklarını kullanılabilir biçimlere dönüştürebilmek genellikle hem ekonomik hem de çevresel sorunların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Son yıllarda, küresel enerji talebindeki hızlı artış, enerji güvenliği konusundaki endişeler ve iklim değişikliğinin azaltılmasının aciliyeti, fosil yakıtlardan düşük karbonlu enerji sistemlerine geçişi enerji politikası tartışmalarının merkezine yerleştirmiştir. Birincil enerji kaynaklarının kullanımlarına bağlı olarak artan sera gazı emisyonları ve bunun sonucu olarak iklim değişikliği gibi önemli çevresel etkilere sahip olmalarından dolayı kaçınılmaz olarak alternatif çözümler geliştirme çalışmalarına gün geçtikçe daha fazla önem verilmekte ve yeni geliştirilen yöntemlerle çevresel sorunların en düşük seviyelere indirilmesi hedeflenmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması, enerji ihtiyacının karşılanması ve çevre sorunlarının üstesinden gelebilmek için etkili bir alternatif sunmakta ve yakın gelecekte birçok uygulamada fosil yakıtların yerini alabilecek potansiyel sunabilmektedir. Yenilenebilir seçenekler arasında güneş enerjisi, bol miktarda bulunan bir kaynak olması ve doğrudan elektrik ve ısıya dönüştürülebilmesi nedeniyle fosil yakıtlara en önemli alternatiflerden birini temsil etmektedir. Doğru şekilde tasarlanıp kurulan güneş enerjisi sistemleri, enerji talebinin önemli bir bölümünü verimli bir şekilde karşılarken genellikle kısa geri ödeme süreleri sunmaktadırlar. Güneş enerjisi halihazırda kurutma, pişirme, damıtma, evsel sıcak su üretimi ve elektrik üretimi gibi günlük insan ihtiyaçlarına doğrudan karşılık gelen uygulamalar için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Fotovoltaik (PV) ve güneş-termal teknolojileri günümüzde bağımsız, binaya entegre ve kamu hizmeti ölçeğindeki sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, PV modüllerinden atık ısıyı geri kazanarak düşük sıcaklıkta ısı ve elektriği birlikte üretmek ve böylece genel ekserji kullanımını artırmak için hibrit fotovoltaik-termal (PV/T) konseptleri geliştirilmiştir (Atiz, 2025).

Tüm bu sistemlerin performansları, kollektör yüzeyi tarafından yakalanan güneş ışınımı miktarına büyük ölçüde bağlıdır. Sabit düzlemsel yüzeyli kollektör ve PV modüller için, yakalanan bu ışınım miktarında öncelikle yerel güneş geometrisine göre eğim ve azimut açıları belirleyici olur. Eğim açısı doğru seçilmediğinde, mevcut güneş enerjisi potansiyelinin önemli bir kısmından yıl içinde faydalanılamaz ve yapılan uygulamalar beklentilerin çok altında kullanılabilir nitelikte enerji üretimi yapabilirler (Khatib, Samiji, & Mlyuka, 2024).

Sonuç olarak, çok sayıda araştırma, farklı konumlar ve uygulamalar için optimum eğim açılarını belirlemeye odaklanmıştır. Genel bir kabul gören yaklaşımla, yıllık optimizasyon için en iyi sabit eğimin genellikle saha enlemine yakın olduğunu, aylık veya mevsimsel ayarlamaların ise toplanan radyasyonu, yatay bir yüzeye göre genellikle %10-25 oranında daha da artırabileceğini göstermiştir. Orta Doğu, Kuzey Afrika, Hindistan ve Sahra Altı Afrika dahil olmak üzere çeşitli iklimlerden alınan detaylı vaka çalışmaları, aylık, mevsimsel, iki yılda bir ve yıllık yeniden yönlendirme stratejileriyle ilişkili kazanımları nicelleştirmiş ve enerji verimi ile toplayıcıları yeniden ayarlamak için gereken operasyonel çaba arasındaki dengeyi vurgulamıştır. Buna paralel olarak, optimum eğim açısını enlem, sapma, berraklık indeksi (clearness index) veya diğer yerel değişkenlerin bir fonksiyonu olarak ifade etmek için ampirik korelasyonlar, regresyon teknikleri veya küresel optimizasyon yöntemleri kullanılarak çok sayıda model önerilmiştir. Daha yeni çalışmalar, bu kavramları kentsel cephelere, tarımsal güneş panellerine ve eğim optimizasyonunun gölgeleme, albedo ve sistem konfigürasyonu ile etkileşime girdiği çift taraflı veya güneş takip sistemlerine genişletmektedir (Ferry, Parenti, Thebault, Ménézo, & Fossa, 2025).

Bu çalışmaların büyük bölümü, toplam küresel yatay ışıınımı doğrudan ve yayılı bileşenlerine ayıran ve bu bileşenleri uygun geometrik katsayılar kullanarak eğik bir yüzeye aktaran standart güneş radyasyonu modellerine dayanmaktadır. Yaygın olarak kullanılan izotropik gökyüzü formülasyonu, klasik güneş-geometri ilişkileri (sapma, gün batımı saat açısı ve atmosfer dışı radyasyon) ile birleştirildiğinde, yatay verilerden eğimli düzlemlerdeki aylık ortalama radyasyonu hesaplamak ve optimum konfigürasyonu belirlemek için aday eğim açılarını taramak için sağlam bir çerçeve sağlar (Choudhary, Lal, & Verma, 2025).

Bu çerçevede, atmosferin yüzeyindeki küresel yatay radyasyonun atmosfer dışı radyasyona oranı olarak tanımlanan atmosferik berraklık indeksi, yerel gökyüzü koşullarının kompakt bir göstergesi olarak hizmet eder ve ışın ve günlük bileşenler arasındaki dengeyi ve dolayısıyla optimum eğimi etkiler.”

Bu arka plana dayanarak, bu bölümde, Türkiye’nin doğusunda, Çıldır gölü bölgesi ile temsil edilen yüksek enlem derecesine sahip bir kıtasal alanın güneş radyasyonu özellikleri ve optimum eğim açısı davranışı incelenmektedir. Uzun vadeli meteorolojik veriler kullanılarak, bu bölüm öncelikle küresel yatay ve eğimli radyasyonun aylık ve mevsimsel evrimini değerlendirmekte, yatay bir düzleme göre optimum eğimli yüzeyler tarafından

elde edilen ışınlam kazancını nicelleştirmekte ve optimum eğim ile berraklık indeksi arasındaki ilişkiyi analiz etmektedir. Sonuçlar, aylık ve mevsimsel eğim performans eğrileri, kazanç dağılımları ve eğimli/yatay ışınlam oranının ısı haritası gösterimlerini içeren bir dizi örnek şekil aracılığıyla sunulmaktadır.

2. Güneş Işınlamının Modellenmesi ve Optimum Eğim Açısı Hesapları

Bu çalışmada, 2015-2024 yılları arasındaki uzun vadeli saatlik NASA POWER verileri ve basitleştirilmiş bir güneş geometrisi modeli kullanılarak optimum eğim açıları ve karşılık gelen güneş kazanımları belirlenmiştir. İlk olarak, saatlik direk normal ve dağınık (difüz) yatay ışınlamalar, yatay bir yüzey üzerinde gündüz ortalama küresel ve dağınık bileşenlere dönüştürülmüş ve daha sonra uzun vadeli aylık ortalamalara toplanmıştır. Bu aylık değerler kullanılarak, atmosfer dışı ışınlam, berraklık indeksi ve güneşe bakan eğimli bir düzlemdeki ışınlam değerleri literatürde kabul gören eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır. Her ay için, eğimli yüzeydeki toplam ışınlamı en yüksek seviyeye çıkaran eğim açısı belirlenmiş ve bu aylık optimumlar, mevsimsel ve yıllık temsili eğim açılarını üretmek için kullanılmıştır. Son olarak, ay indeksi ve optimum eğim açısı arasındaki polinom korelasyonları elde edilmiş ve pratik uygulamalar için basit tasarım ifadeleri sağlamak üzere standart istatistiksel göstergelerle değerlendirilmiştir.

İlk olarak, standart Cooper eşitliği kullanılarak deklinasyon açısı (δ) Eşitlik 1 ile hesaplanır (Golding & Hicks, 1992).

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[\frac{360^\circ}{365} (284 + n) \right] \quad (1)$$

Dünya ile Güneş arasındaki ters orantılı mesafe (d_r) Eşitlik 2 yarımıyla hesaplanır (Acar, 2002).

$$d_r = 1 + 0.033 \cos \left(\frac{360^\circ}{365} n \right) \quad (2)$$

Yatay bir yüzeydeki gün batımı saat açısı (ω_s) aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\omega_s = \arccos (-\tan \phi \tan \delta) \quad (3)$$

Bu nicelikler kullanılarak, yatay yüzeydeki günlük atmosfer dışı ışıınım, H_0 , önce birim alan başına enerji olarak hesaplanır ve ardından günlük ortalama güç yoğunluğuna dönüştürülür. Günlük atmosfer dışı ışıınım ($\text{J m}^{-2} \text{gün}^{-1}$),

$$H_{0,J} = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{sc} d_r [\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin \phi \sin \delta] \quad (4)$$

eşitliği ile hesaplanır ve burada G_{sc} güneş sabitidir (1367 W m^{-2}) (John A. Duffie & William A. Beckman, 2013). Buna karşılık gelen günlük ortalama atmosfer dışı ışıınım (W m^{-2}).

$$H_0 = \frac{H_{0,J}}{24 \times 3600} \quad (5)$$

NASA POWER veritabanı, saatlik doğrudan normal ışıınım (DNI) ve dağınık yatay ışıınım (DHI) değerlerini sağlar. Yerel güneş saati (t) olan her saat için, saat açısı (ω) aşağıdaki şekilde yaklaşık olarak hesaplanır (Alam, Saha, Chowdhury, & Rahman, 2005).

$$\omega = 15^\circ (t - 12) \quad (6)$$

Güneş zenit açısının (θ_z) kosinüsü şu şekilde değerlendirilir.

$$\cos \theta_z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (7)$$

Sonraki ortalamalarda yalnızca $\cos \theta_z > 0$ olan gün ışığı saatleri kullanılır ve bu saatler için doğrudan yatay bileşen,

$$I_B = \text{DNI} \cos \theta_z \quad (8)$$

eşitliğiyle elde edilir ve küresel yatay ışıınım şu şekilde yazılır.

$$I = I_B + \text{DHI} \quad (9)$$

Her gün için, gündüz ortalama küresel yatay ışıınım ve gündüz ortalama dağınık bileşen H_d , tüm gün ışığı saatleri boyunca I ve DHI'nin aritmetik ortalamaları olarak $H = \frac{1}{N_{\text{day}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{day}}} I_i$ ve $H_d = \frac{1}{N_{\text{day}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{day}}} (\text{DHI})_i$ eşitlikleri ile hesaplanır. Burada N_{day} , $\cos \theta_z > 0$ olan saat sayısıdır. $H_B = H - H_d$ farkı, yatay bir yüzeydeki gündüz ortalama ışıınım bileşenini temsil eder.

Daha sonra, 2015-2024 yılları arasındaki tüm günler aylara göre gruplandırılarak ve günlük miktarların ortalaması alınarak uzun vadeli aylık ortalamalar $\bar{H}_m = \frac{1}{N_m} \sum H$, $\bar{H}_{d,m} = \frac{1}{N_m} \sum H_d$ ve $\bar{H}_{0,m} = \frac{1}{N_m} \sum H_0$ eşitlikleri ile elde edilir. Burada N_m , m ayına ait toplam gün sayısıdır. Bu aylık ortalamalar şekil ve tablolarda H , H_d ve H_0 olarak gösterilir.

Aylık berraklık indeksi (K_T), küresel yatay ışıınımın atmosfer dışı yatay ışıınım şiddetine oranı olarak olağan şekilde tanımlanır (Ulgen, 2006).

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (10)$$

Yataydan β açısıyla eğimli ve ekvatora bakan bir yüzey için, eğimli düzlemdeki gün batımı saat açısı, $\omega_{s,\beta}$, şu şekilde hesaplanır.

$$\cos \omega_{s,\beta} = -\tan(\phi - \beta) \tan \delta \quad (11)$$

Geometrik oranda kullanılan etkin gün batımı saat açısı ise şu şekilde alınır.

$$\omega'_s = \min(\omega_s, \omega_{s,\beta}) \quad (12)$$

Eğimli yüzeydeki günlük ışıınımı yatay yüzeydeki ışıınımla ilişkilendiren geometrik faktör R_b Eşitlik 13 ile bulunur (Deniz, 2026).

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \omega'_s \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin \phi \sin \delta} \quad (13)$$

Eğimli yüzeydeki kiriş bileşeni daha sonra şu şekilde ifade edilir.

$$H_{B,\beta} = (H - H_d)R_b \quad (14)$$

Eğimli yüzeydeki dağınık (düfız) bileşen izotropik gökyüzü varsayımı ile modellenir.

$$H_{D,\beta} = H_d \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (15)$$

Zeminden yansıyan bileşen (Ulgen, 2006),

$$H_{R,\beta} = H\rho_g \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (16)$$

Burada, ρ_g zemin albedosudur. Eğimli yüzeydeki toplam ışıınım aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$H_T(\beta) = H_{B,\beta} + H_{D,\beta} + H_{R,\beta} \quad (17)$$

Her ay için, $H_T(\beta)$, 1° 'lik artışlarla 0° ile 90° arasındaki eğim açıları için değerlendirilir. Aylık optimum eğim açısı β_{opt} , $H_T(\beta)$ 'yi (β) en yüksek değere çıkaran β değeri olarak tanımlanır,

$$\beta_{\text{opt}} = \arg \max_{\beta} H_T(\beta) \quad (18)$$

ve buna karşılık gelen optimum ışıınım $H_{T,\text{opt}} = H_T(\beta_{\text{opt}})$ ile gösterilir.

Eğim açısının faydasını belirlemek için, yatay bir yüzeye göre optimum eğim kazancı şu şekilde hesaplanır.

$$Gain(\%) = \frac{H_{T,opt} - H}{H} \times 100 \quad (19)$$

Optimum eğim açısı ile ay arasındaki ampirik korelasyonlar, polinomların β_{opt} aylık değerlerine uydurulmasıyla elde edilir. Burada m , ay numarasını göstermektedir ve p derecesinde genel bir polinom yaklaşımı aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\hat{\beta}_{opt}(m) = a_p m^p + a_{p-1} m^{p-1} + \dots + a_1 m + a_0 \quad (20)$$

1, 2 ve 3. derece polinom uyumları hem aylık hem de mevsimsel olarak tanımlanmış optimum açılar için değerlendirilmiştir. Her uyumun kalitesi aşağıdaki istatistiksel göstergeler kullanılarak değerlendirilmiştir. $\beta_{opt,i}$ model değerleri ve $\hat{\beta}_{opt,i}$ i ayı için korelasyonla tahmin edilen değerler ise ($i = 1, \dots, n$) ve ortalama karekök hatası (RMSE) şu şekilde verilmiştir (Alam et al., 2005).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{\beta}_{opt,i} - \beta_{opt,i})^2} \quad (21)$$

Determinasyon katsayısı (R^2) şu şekilde hesaplanır.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\beta_{opt,i} - \hat{\beta}_{opt,i})^2}{\sum_{i=1}^n (\beta_{opt,i} - \bar{\beta}_{opt})^2} \quad (22)$$

burada $\bar{\beta}_{opt}$ model değerlerinin ortalamasıdır.

3. Çıldır Gölü Bölgesi İçin Güneş Enerjisi Özellikleri

Tablo 1, Çıldır gölü çevresi (41.0361°K, 43.2967°D) için 2015-2024 dönemi boyunca hesaplanan aylık ortalama gündüz yatay ışıınım bileşenlerini içermektedir. Atmosfer dışı ışıınım (H_0), yatay global ışıınım (H), yatay direkt bileşen (H_B) ve yatay difüz bileşen (H_D) değerleri birlikte incelendiğinde,

özellikle ilkbahar sonu ile yaz başında H ve H_B bileşenlerinde belirgin bir artış görülmekte, kış aylarında ise difüz bileşenin göreceli payı yükselmektedir. Bu durum, Çıldır gölü çevresinde yaz aylarında daha berrak ve güneşli, kış aylarında ise daha bulutlu atmosfer koşullarının baskın olduğunu ortaya koymaktadır.

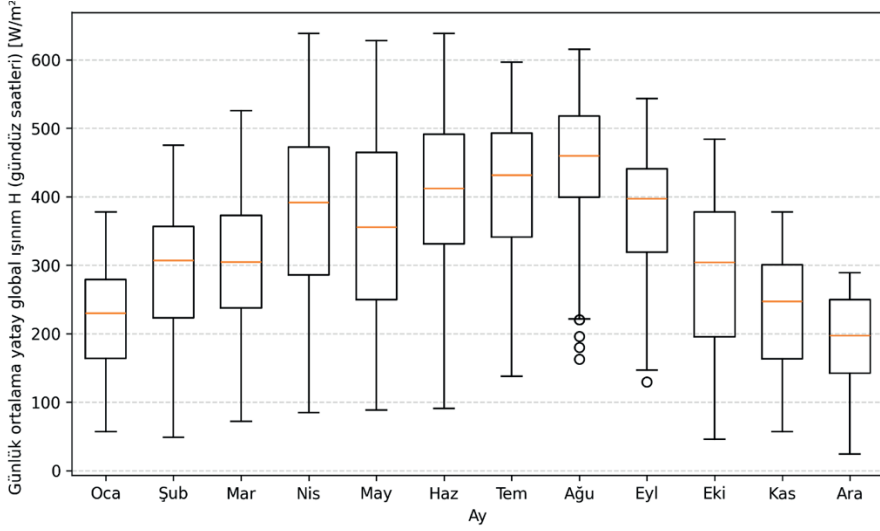
Tablo 1. NASA POWER verilerinden Çıldır bölgesi için aylık ortalama günlük atmosfer dışı, küresel, doğrudan ve difüz güneş ışıınımı (2015–2024) (NASA, 2025).

Ay	H_0 [W/m ²]	H [W/m ²]	H_B [W/m ²]	H_D [W/m ²]	K_T [-]
Ocak	429.988	222.145	94.677	127.468	0.517
Şubat	524.333	289.746	130.929	158.817	0.553
Mart	638.054	303.729	123.135	180.594	0.476
Nisan	726.971	376.994	179.700	197.294	0.519
Mayıs	768.624	355.196	169.600	185.596	0.462
Haziran	777.793	404.518	214.046	190.472	0.520
Temmuz	770.639	416.536	236.111	180.426	0.541
Ağustos	739.022	448.691	282.563	166.128	0.607
Eylül	665.739	373.712	223.747	149.965	0.561
Ekim	555.738	287.543	166.770	120.774	0.517
Kasım	449.710	231.958	127.713	104.245	0.516
Aralık	398.915	189.286	89.451	99.835	0.475

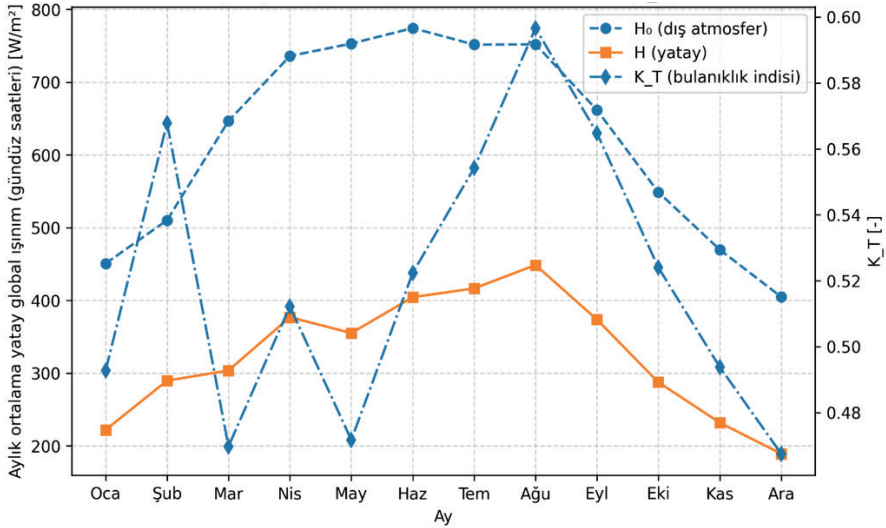
Şekil 1, aynı döneme ait günlük ortalama gündüz yatay global ışıınımı (H) değerlerinin aylara göre dağılımını kutu-grafik (boxplot) biçiminde sunmaktadır. Medyan ve çeyrekler arası aralıklar, Haziran-Ağustos aylarında hem ışıınım seviyesinin hem de gün içi değişkenliğin arttığını ve kış aylarında ışıınımın daha düşük ama görece olarak daha dar bir aralıkta kümелendiğini göstermektedir. Dönemsel olarak genişleyen kutular ve uç değerler, Çıldır gölü bölgesinde özellikle yaz sonu ile sonbahar başında bulutluluk ve atmosferik koşullardaki dalgalanmaların daha belirgin olduğuna işaret etmektedir.

Şekil 2, Çıldır gölü bölgesi için aylık ortalama H ile H_0 ve bunlardan türetilen K_T değerlerini birlikte göstermektedir. H_0 eğrisi yalnızca geometrik faktörlere bağlı değişimi yansıtırken, K_T eğrisinin aylara göre değişimi atmosferik berraklık ve bulutluluk koşullarını ortaya koymaktadır. Özellikle

yaz aylarında K_T değerlerinin yükselmesi, bölgenin bu dönemde daha şeffaf bir atmosfere sahip olduğunu, kış ve sonbahar aylarında ise artan bulutluluğa bağlı olarak güneş ışınımının daha büyük oranda zayıfladığını göstermektedir.



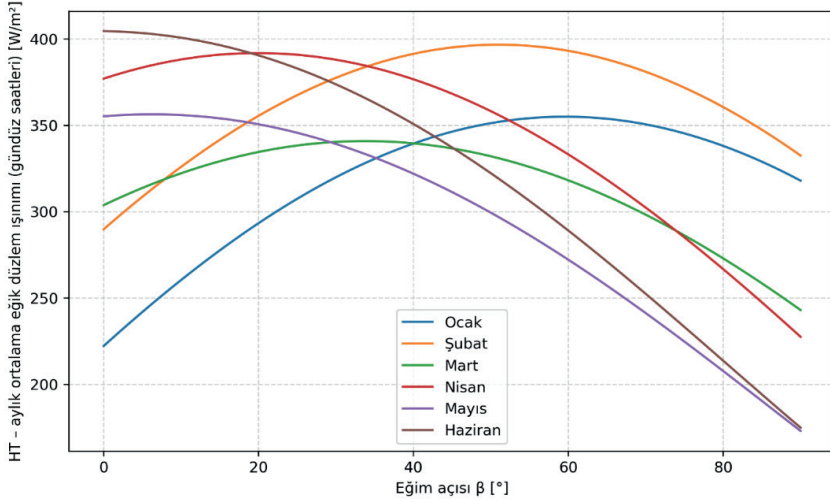
Şekil 1. 2015-2024 döneminde aylara göre günlük ortalama yatay global ışınımının dağılımı



Şekil 2. Aylık ortalama yatay global ışınım, dış atmosfer ışınımı ve bulanıklık indisi değerleri.

4. Optimum Eğim Açısının Tespiti ve Ampirik Eşitliklerle Tahmini

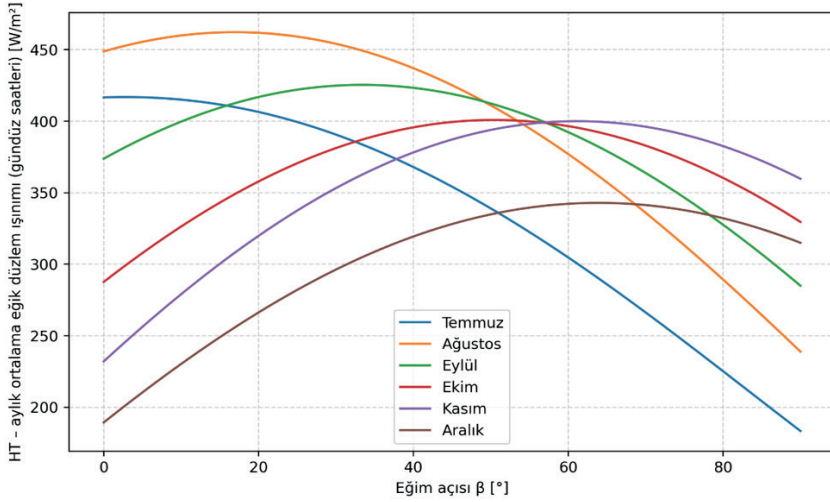
Ocak'tan Haziran'a kadar olan aylar için eğimli bir yüzeydeki aylık ortalama H_T değerinin β eğim açısına bağlı değişimi Şekil 3'te gösterilmektedir. Tüm aylar için eğriler tek ve düzgün bir maksimum değere sahiptir. Ancak, bu maksimum değerlerin konumu mevsimle birlikte açıkça değişmektedir. Ocak ve şubat aylarında optimum eğim açısı yaklaşık $50-60^\circ$ aralığındadır. Mart ve nisan aylarındaki zirveler, kıştan ilkbahara geçişi ve güneş yüksekliğindeki kademeli artışı yansıtan yaklaşık $35-45^\circ$ değerleri aralığındaki orta dereceli eğimlere doğru hareket eder. Mayıs ve haziran aylarında en yüksek H_T değerleri, çok dik yüzeyler yüksek güneş yüksekliklerinde ışıınım kaybetmeye başlarken, daha orta düzeydeki eğimler genel olarak daha fazla radyasyonu engellediğinden, yaklaşık $20-35^\circ$ 'lik daha da küçük eğimlerde meydana gelir.



Şekil 3. Ocak-Haziran için eğik düzleme gelen güneş ışıının eğime bağlı değişimi

Şekil 4'te Temmuz-Aralık aralığındaki dönem için aynı ilişkiyi sunmakta ve Şekil 3 ile ters mevsimsel eğilimi ortaya koymaktadır. Temmuz ve ağustos aylarında ışıınım şiddeti genel itibariyle yüksektir. Bu dönemde optimum eğim açısı yaklaşık $15-30^\circ$ aralığında oldukça düşüktür ve eğimin bu aralığın üzerine çıkması ile H_T değeri hızla azalmaktadır. Eylül ve Ekim aylarına gelindiğinde en yüksek değerler $35-50^\circ$ aralığında orta düzey eğim açılara doğru kayar ve bu da güneş yükseklik açısı azaldıkça daha yüksek bir eğim açısı değerinin enerji girdisi değerlerinin arttırılabilmesi için gerekli olduğu anlamına gelir. Kasım ve aralık aylarında optimum eğimler yaklaşık $55-70^\circ$ seviyelerine ulaşır. Şekil 3 ve 4 optimum eğim açısının zamana bağlı

değişimini göstermekte olup, güneş enerji sistemlerinin mevsimsel veya aylık optimum eğim açısı değerlerinde kullanımlarının sistemlerin üretkenliklerine sağlayacağı katkılar görülebilmektedir.



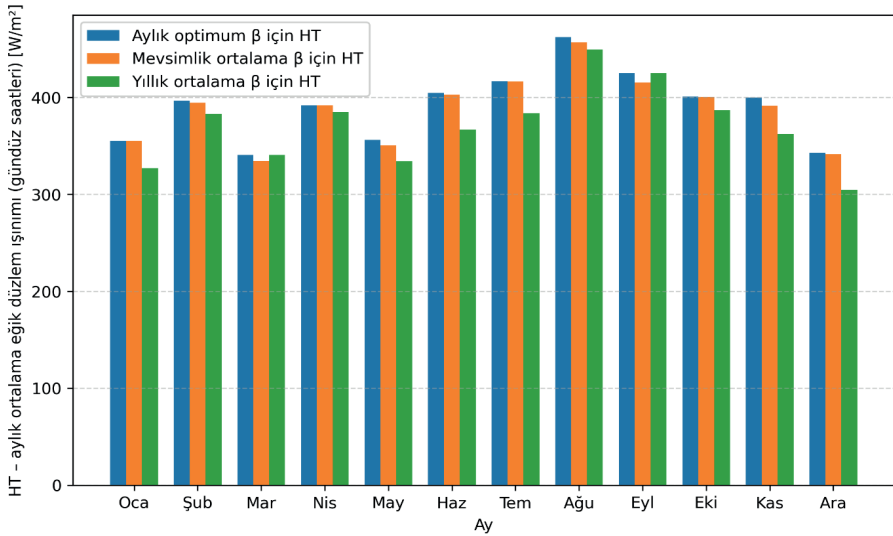
Şekil 4. Temmuz-Aralık için eğik düzleme gelen güneş ışınlamının eğime bağlı değişimi

Tablo 2, hesaplanan aylık, mevsimlik ve yıllık optimum eğim açılarını ve bunlara karşılık gelen aylık ortalama ışınlam şiddeti değerlerini özetlemektedir. İlk iki sütunda aylık optimum sonuçlar listelenmiştir. Optimum eğim açısı kışın daha dik olup, ocak ayında yaklaşık 60° , şubat ayında 51° ve kasım ve aralık aylarında tekrar 60° 'nin üzerindedir. Mart ayından haziran ayına kadar optimum eğim açısı kademeli olarak azalarak, ilkbahar sonu ve yaz başında $0-6^\circ$ aralığına ulaşır ve ardından sonbahara doğru tekrar artar. Tablonun orta kısmı mevsimsel ortalama optimum eğimleri ve ışınlamı bildirmektedir. Optimum açı kış için yaklaşık 58° , ilkbahar için 20° , yaz için $6-7^\circ$ ve sonbahar için 48° 'dir. Bu durum tercih edilen eğimin güçlü mevsimsel değişimini doğrulamaktadır. Son iki sütun, $33,25^\circ$ 'lik tek bir yıllık optimum eğim için ışınlam değerlerini verir. Bu sütunların karşılaştırılması, sabit bir yıllık eğimin çoğu ayda, özellikle kış ve yaz aylarında, aylık veya mevsimsel optimumlardan daha düşük H_T sağladığını göstermektedir.

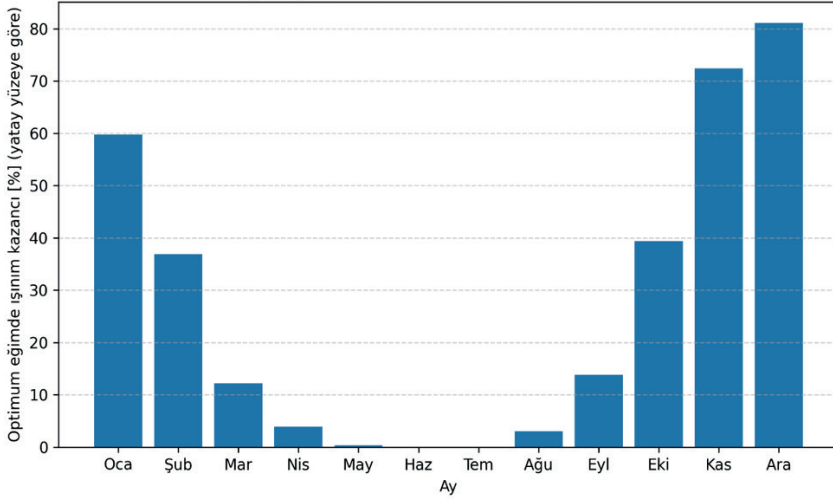
Şekil 5, üç farklı eğim açısı (aylık optimum eğim, mevsimsel ortalama eğim ve tek bir yıllık optimum eğim) stratejisiyle elde edilen eğimli düzlemdeki aylık ortalama ışınlamı değerlerini karşılaştırmaktadır. Şekil, aylık optimizasyonun sürekli olarak en yüksek H_T değerlerini, yıllık eğimin ise en düşük değerleri ürettiğini göstermektedir.

Tablo 2. Aylık, mevsimlik ve yıllık optimum eğim açıları ve karşılık gelen ışınım şiddeti değerleri

Ay	Aylık Ortalama		Mevsimler	Mevsimsel Ortalama		Yıllık Ortalama	
	β_{opt} (°)	H_T (W/m ²)		β_{opt} (°)	H_T (W/m ²)	β_{opt} (°)	H_T (W/m ²)
Ocak	60	354.95			354.89	33.25	327.04
Şubat	51	396.66	Kış	58.33	394.31		382.91
Mart	34	340.83			334.52		340.82
Nisan	20	391.80			391.80		385.08
Mayıs	6	356.32	İlkbahar	20	350.58		334.20
Haziran	0	404.51			402.66		366.89
Temmuz	3	416.78			416.26		383.90
Ağustos	17	462.14	Yaz	6.66	457.13		449.49
Eylül	33	425.31			415.23		425.32
Ekim	50	400.76			400.49		386.82
Kasım	61	399.92	Sonbahar	48	391.42		362.20
Aralık	64	342.80			341.50		304.48

**Şekil 5.** Aylara göre optimum eğim açılarında eğik düzleme ulaşan güneş ışınımının dağılımı.

Şekil 6, yatay bir yüzeye göre optimum eğim açısında elde edilen aylık ışınlım kazanımını yüzde olarak göstermektedir. Şekil 6'da eğim optimizasyonunun özellikle kış aylarında oldukça önemli olduğunu göstermektedir. Optimum eğim açısı uygulaması ile ocak ayında yaklaşık %60 ve şubat ayında neredeyse %40'lık kazanımlar elde edilebilir ve bu avantaj kasım ayında tekrar %70'in aralık ayında ise %80'in üzerine çıkabilmektedir.

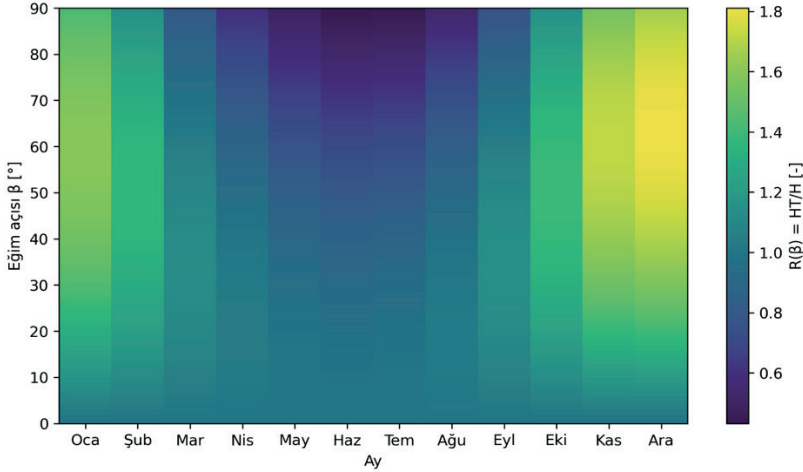


Şekil 6. Yatay düzleme göre aylık optimum eğimde ışınlım kazancı

Şekil 7'de, aylara ve panel eğim açısına göre eğik düzlem ışınlımının yatay düzleme oranı olarak tanımlanan $R(\beta) = H_T/H$ değerinin ısı haritası sunulmaktadır. Burada H_T , kullanılan yöntemle göre hesaplanan, seçilen β eğim açısındaki aylık ortalama gündüz eğik düzlem ışınlımını ve H aynı döneme ait yatay global ışınlımın aylık ortalama değerini ifade etmektedir. Renk skalasında 1'in üzerindeki değerler, ilgili ay ve eğim açısı için eğik düzlemin yatay düzleme göre daha yüksek ışınlım aldığı bölgeleri, 1'in altındaki değerler ise yataya göre ışınlım kaybını göstermektedir.

Isı haritası, kasım-şubat aralığındaki kış aylarında yaklaşık 50-80° değerlerine sahip yüksek eğim açıları için $R(\beta)$ değerinin 1.5 ile 1.8 aralığına kadar çıktığını ortaya koymaktadır. Bu durum, Güneş'in ufka göre düşük yüksekliklerde seyrettiği kış koşullarında panelin daha dik konumlandırılmasının yatay yüzeye kıyasla belirgin bir ışınlım kazancı sağladığını göstermektedir. Buna karşılık mayıs-ağustos aralığındaki yaz aylarındaki ise yüksek eğim açıları $R(\beta)$ değerinin 1'in oldukça altına düştüğü ve optimumun daha yatık konumlara kaydığı görülmektedir. İlkbahar ve sonbahar aylarında ise yaklaşık 25 ile 45° aralığındaki orta eğim açıları

boyunca $R(\beta)$ değerlerinin 1'e yakın veya bir miktar üzerinde seyretmesi, bu eğim aralığının yıl boyunca dengeli bir performans sunduğuna işaret etmektedir.



Şekil 7. Aylara ve eğim açısına bağlı olarak eğik düzlemdeki ışıının yatay düzleme göre oranının ısı haritası.

Bu sonuçlar, aylık optimum eğim açılarının yanı sıra, sabit veya mevsimsel ayarlı düzlemsel sistem tasarımları için de önemli tasarım ipuçları sağlamaktadır. Özellikle kış üretiminin kritik olduğu uygulamalarda daha yüksek eğim açıları tercih edilerek yatay sistemlere göre anlamlı ışıının artışları elde edilebileceği ve buna karşılık yaz ağırlıklı uygulamalarda daha düşük eğim açılarına yönelmenin toplam enerji kazanımı açısından daha uygun olacağı söylenebilir.

Düzlemsel güneş enerji sistemleri için hesaplanan optimum eğim açısı değerlerinin uygulamalar için daha pratik ve kullanışlı olabilmeleri amacıyla aylık ve mevsimsel değerlerin tespiti amacıyla regresyon analizi yapılarak eşitlikler elde edilmiştir. Bu eşitlikler, Çıldır gölü bölgesinde kurulumu yapılacak düzlemsel sistemlerin kurulumları aşamasında eğim açısının belirlenmesi ve uygulamalar için pratik bir yol olmasından dolayı örnek bir çalışma olarak sunulmuştur.

Tablo 3, ay endeksi m 'nin bir fonksiyonu olarak optimum eğim açısı β_{opt} 'yi temsil etmek için önerilen regresyon denklemlerini ve ilgili uyum göstergelerini sunmaktadır. Aylık β_{opt} verileri için, birinci dereceden doğrusal ifade oldukça düşük seviyede değerleri temsil edebilmektedir ($R^2 = 0,034$ ve $RMSE \approx 22,4^\circ$). Bu da optimum eğimin mevsimsel evriminin düz bir çizgiyle

yeterince yakalanamayacağını göstermektedir. İkinci dereceden bir terimin eklenmesi uyumu önemli ölçüde iyileştirirken ($R^2 = 0,896$, $RMSE \approx 7,4^\circ$), üçüncü dereceden bir denklem biraz daha iyi bir açıklama sağlamaktadır ($R^2 = 0,915$, $RMSE \approx 6,6^\circ$). Bu sonuçlar, üçüncü dereceden eşitliğin, optimum eğimin aylık değişimini sadece birkaç derecelik hatayla tahmin etmek için yeterli olduğunu göstermektedir.

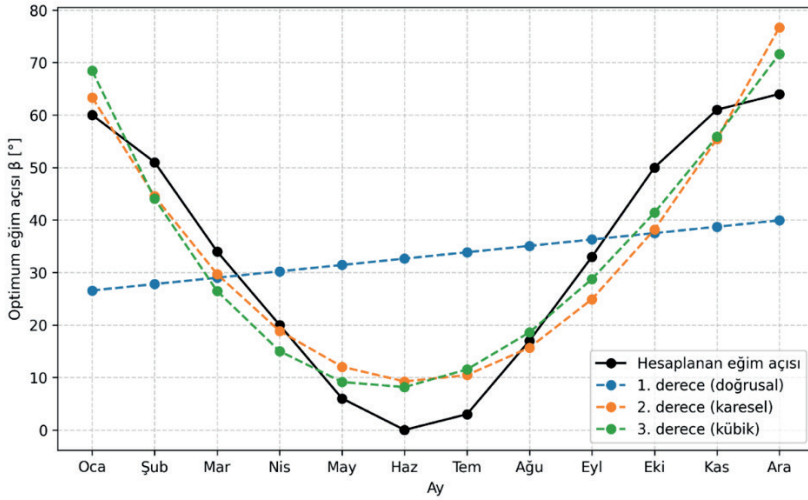
Aylara eşlenen mevsimsel β_{opt} verileri için de aynı eğilim gözlemlenmektedir. Buna karşın aylık eşitliklere göre genel olarak daha düşük bir performans görülmektedir. Doğrusal model yine çok zayıf performans göstermektedir ($R^2 = 0,014$, $RMSE \approx 20,6^\circ$). İkinci dereceden ve üçüncü dereceden regresyonlar, $RMSE$ 'yi sırasıyla yaklaşık $10,5^\circ$ ve $9,7^\circ$ 'ye düşürürken, R^2 'yi sırasıyla $0,745$ ve $0,782$ 'ye yükseltmektedir. Bu durum, temel mevsimsel açıların parça parça sabit olduğu ve dolayısıyla m ile daha az düzgün değiştiği gerçeğini yansıtmaktadır. Genel olarak tablo, ay sayısındaki üçüncü dereceden bir polinomun aylık optimum eğim için pratik bir ampirik korelasyon sunduğunu, mevsimsel olarak ayarlanmış sistemlerde ise daha yüksek dereceli polinomların faydasının daha sınırlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 3. Optimum eğim açısı için polinom regresyon denklemleri ve hata ölçütleri

Veri türü	Derece	Denklem (β_{opt})	R^2 [-]	RMSE [°]
Aylık β_{opt}	1	$\beta_{opt} = +1.2133 \cdot m + 25.3636$	0.034	22.397
Aylık β_{opt}	2	$\beta_{opt} = +2.0057 \cdot m^2 - 24.8614 \cdot m + 86.2045$	0.896	7.362
Aylık β_{opt}	3	$\beta_{opt} = -0.1022 \cdot m^3 + 3.9982 \cdot m^2 - 35.6409 \cdot m + 100.1515$	0.915	6.642
Mevsimlik β_{opt}	1	$\beta_{opt} = +0.7098 \cdot m + 28.6364$	0.014	20.645
Mevsimlik β_{opt}	2	$\beta_{opt} = +1.6851 \cdot m^2 - 21.1961 \cdot m + 79.7500$	0.745	10.508
Mevsimlik β_{opt}	3	$\beta_{opt} = -0.1300 \cdot m^3 + 4.2196 \cdot m^2 - 34.9084 \cdot m + 97.4916$	0.782	9.701

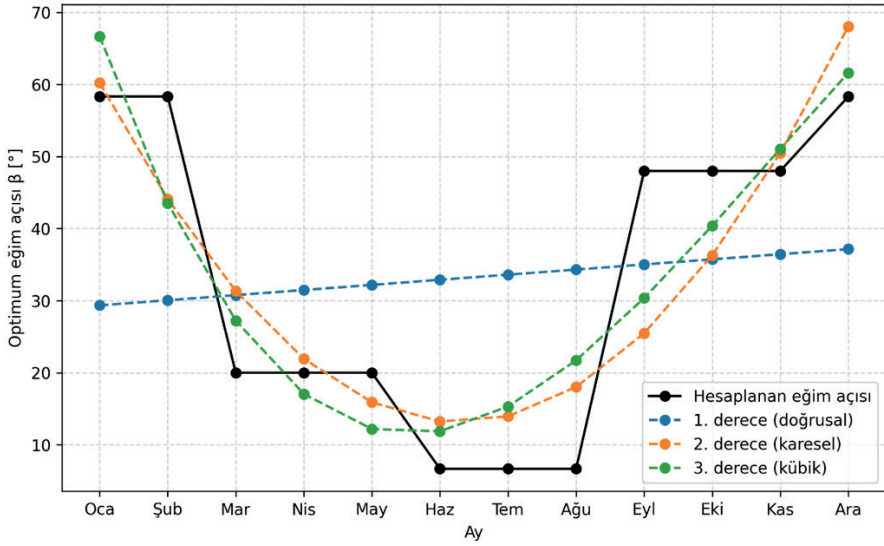
Şekil 8, hesaplanan aylık optimum eğim açılarını birinci, ikinci ve üçüncü dereceden polinom korelasyonlarıyla tahmin edilen değerlerle karşılaştırmaktadır. Siyah çizgi referans β_{opt} değerlerini temsil ederken, kesikli

eğriler polinom uyumlarına karşılık gelmektedir. Doğrusal model neredeyse düz, yavaşça değişen bir eğilim üretmekte ve optimum eğimin belirgin kış-yaz eğriliğini, özellikle haziran civarındaki keskin minimumu yeniden üretememektedir. İkinci dereceden ve üçüncü dereceden uyumlar mevsimsel deseni çok daha yakından takip etmektedir. Özellikle üçüncü derece korelasyon, referans eğrisini neredeyse tüm aylarda iyi bir şekilde takip etmekte ve uç noktalarda yalnızca küçük sapmalar göstermektedir. Bu durum, ay numarasındaki üçüncü dereceden bir polinomun aylık optimum eğimi iyi bir doğrulukla tanımlayabileceğini doğrulamaktadır.



Şekil 8. Aylık optimum eğim açısının hesaplanan değerleri ile birinci, ikinci ve üçüncü dereceden polinom yaklaşımlarının karşılaştırılması.

Şekil 9, aylara dağıtılmış mevsimsel olarak tanımlanan optimum eğim açıları için benzer bir karşılaştırma sunmaktadır. Burada referans eğrisi, dört mevsime karşılık gelen parça parça sabit kademeler sergilerken, polinom yaklaşımları bunlar arasında yumuşak geçişler sağlamaktadır. İkinci dereceden ve kübik polinomlar, mevsimler arasındaki keskin kırılmaları tam olarak yakalayamamaları da mevsimsel kademelerin seviyesini ve yıllık döngünün genel şeklini yeniden üreterek daha iyi bir uyum sağlamaktadır. Bu şekil, polinom ifadelerinin mevsimsel olarak ayarlanmış eğim açıları için basit tasarım eşitlikleri olarak kullanılabileceğini, ama bunların temeldeki adım adım davranışla uyumunun, tamamen aylık olarak çözümlenmiş verilere göre doğası gereği daha sınırlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 9. Mevsimlik optimum eğim açısının hesaplanan değerleri ile birinci, ikinci ve üçüncü dereceden polinom yaklaşımlarının karşılaştırılması.

5. Sonuçlar ve Genel Değerlendirme

2015-2024 yıllarına ait uzun vadeli NASA POWER verileri ve literatürde kabul görmüş yöntemler kullanılarak, seçilen yer için aylık, mevsimsel ve yıllık optimum eğim açıları elde edilmiştir. Aylık optimum açılar yıl boyunca büyük ölçüde değişmekte olup, kışın dik eğimler, yazın ise neredeyse yatay yüzeyler, güneş yolunun mevsimsel değişimini yansıtmaktadır. Beklendiği gibi, optimum eğimli düzlemdeki karşılık gelen ışınlım, atmosfer dışı radyasyonun yıllık değişimini yakından takip etmektedir. Ancak, küresel yatay bileşenden sürekli olarak daha yüksek kalmaktadır.

Aylık, mevsimsel ve yıllık eğimler arasındaki karşılaştırma, yatay yüzeye göre en büyük göreceli kazanımların, optimum eğimin %60-80'den fazla ek ışınlım sağlayabildiği kış aylarında meydana geldiğini göstermektedir. İlkbahar sonu ve yaz aylarında, optimum eğimli yüzeyin kazanımı azalır ve yatay ışınlım zaten yüksek olduğundan ve Güneş tepe noktasına yakın konumlandığından, marjinal hale gelebilir. Mevsimsel ve yıllık sabit eğimler, toplanan enerjide yalnızca mütevazı kayıplarla, tamamen aylık optimizasyonun sağladığı faydaların çoğunu yeniden üretir. Bu durum mekanik ayarlamaların sınırlı olduğu pratik tasarımlar için önemlidir.

Berraklık endeksi analizine göre, atmosferin daha saydam olduğu aylarda hem gerekli optimum eğim açısı daha küçük olmakta hem de yatay düzlemde

ulaşılan günlük ortalama ışıınım düzeyleri artmaktadır. Ay endeksi ile optimum eğim açısı arasındaki polinom korelasyonları, standart istatistikler (R^2 ve RMSE) kullanılarak türetilmiş ve değerlendirilmiştir. İkinci ve üçüncü dereceden polinomlar, aylık ve mevsimlik optimum eğim açılarını yüksek doğrulukla yeniden üretebilmektedir. Bu durum, elde edilen ampirik ifadelerin enlemi ve iklim özellikleri benzer olan bölgelerdeki sabit eğimli fotovoltaik ve güneş kolektörlerinin tasarımında pratik ve basit bir hesaplama aracı olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Semboller ve Kısaltmalar

Sembol	Açıklama	Birim
n	Yılın günü (1-365)	-
φ	Çalışma sahasının enlemi	°
δ	Güneş deklinasyon açısı	°
d_r	Dünya–Güneş göreceli uzaklık çarpanı	-
ω_s	Yatay düzlem için güneş batım saat açısı	°
G_{sc}	Güneş sabiti	$W m^{-2}$
$H_{0,J}$	Yatay düzlemde günlük atmosfer dışı ışıınım	$J m^{-2} gün^{-1}$
H_0	Yatay düzlemde günlük ortalama atmosfer dışı ışıınım şiddeti	$W m^{-2}$
t	Yerel güneş zamanı	Saat
ω	Saat açısı	°
θ_z	Güneş zenit açısı	°
DNI	Doğrudan normal ışıınım	$W m^{-2}$
DHI	Dağınık yatay ışıınım	$W m^{-2}$
I_B	Yatay düzlemde ışıınının direkt bileşeni	$W m^{-2}$
I	Yatay düzlemde küresel (global) ışıınım şiddeti	$W m^{-2}$
N_{day}	Bir gün içindeki gündüz saatlerinin sayısı ($\cos \theta_z > 0$)	-
H	Yatay düzlemde günlük ortalama küresel ışıınım (gündüz)	$W m^{-2}$
H_d	Yatay düzlemde günlük ortalama dağınık ışıınım (gündüz)	$W m^{-2}$
H_B	Yatay düzlemde günlük ortalama direkt ışıınım (gündüz)	$W m^{-2}$
N_m	İncelenen dönem boyunca m ayına ait gün sayısı	-
$\bar{H}_m$	Yatay düzlemde uzun dönem aylık ortalama küresel ışıınım	$W m^{-2}$

$\bar{H}_{d,m}$	Yatay düzlemde uzun dönem aylık ortalama dağınık ışıınım	$W m^{-2}$
$\bar{H}_{0,m}$	Yatay düzlemde uzun dönem aylık ortalama atmosfer dışı ışıınım	$W m^{-2}$
K_T	Aylık bulanıklık indisi	-
β	Yüzey eğim açısı (yataydan itibaren)	°
$\omega_{s,\beta}$	Eğik düzlem için güneş batım saat açısı	°
ω'_s	R _b hesabında kullanılan etkin güneş batım saat açısı	°
R_b	Eğik ve yatay düzlemdeki günlük direkt ışıınım oranı	-
$H_{B,\beta}$	Eğik düzlemde günlük ortalama direkt ışıınım	$W m^{-2}$
$H_{D,\beta}$	Eğik düzlemde günlük ortalama dağınık ışıınım	$W m^{-2}$
$H_{R,\beta}$	Eğik düzlemde günlük ortalama zemin yansımali ışıınım	$W m^{-2}$
ρ_g	Zemin yansıtma katsayısı (albedo)	-
$H_{T(\beta)}$	Eğik düzlemde günlük ortalama toplam ışıınım	$W m^{-2}$
β_{opt}	Aylık optimum eğim açısı	°
$H_{T,opt}$	Aylık optimum eğim açısında günlük ortalama ışıınım	$W m^{-2}$
Gain	Optimum eğimli düzlemin yatay düzleme göre görelili kazancı	%
m	Ay numarası (1–12)	-
$a_p, \dots, a_0$	β_{opt} polinom bağıntısının katsayıları	-
$\hat{\beta}_{opt}$	Polinom korelasyon ile tahmin edilen optimum eğim açısı	°
RMSE	Kök ortalama kare hatası (root mean square error)	°
R^2	Belirleme katsayısı (coefficient of determination)	-

Kaynaklar

- Acar, H. I. (2002). *Estimation of Global Monthly Irradiation From Sunshine Duration Data At Sivas, Turkey. Politeknik Dergisi Journal of Polytechnic Cilt* (Vol. 5).
- Alam, M. S., Saha, S. K., Chowdhury, M. A. K., & Rahman, M. (2005). Simulation of Solar Radiation System. *American Journal of Applied Sciences*, 2(4), 751–758.
- Atiz, A. (2025). Evaluation of energy, exergy, economic, and carbon savings analyses, along with green hydrogen production of PVs and PVTs under daily solar radiation for various tilt angles and mass flow ratios. *International Journal of Hydrogen Energy*, 98, 657–672. doi:10.1016/j.ijhydene.2024.12.079
- Choudhary, S., Lal, S., & Verma, S. (2025). Seasonal optimization of solar PV tilt angles for enhanced energy efficiency in Rajasthan, India. *Unconventional Resources*, 8. doi:10.1016/j.uncres.2025.100230
- Deniz, E. (2026). Comparative energy, exergy, and thermoeconomic evaluation of NaCl and Na₂CO₃ based salt gradient solar ponds. *Solar Energy*, 303, 114143. doi:10.1016/J.SOLENER.2025.114143
- Ferry, A., Parenti, M., Thebault, M., Ménéz, C., & Fossa, M. (2025). Optimal tilt angles for bifacial photovoltaic plants across Europe based on cumulative sky and Typical Meteorological Year data. doi:10.57745/8I4MZ
- Golding, P., & Hicks, M. C. (1992). *One-Dimensional Transient Finite Difference Model of An Operational Salinity Gradient Solar Pond*. In *The Fourth Annual Thermal and Fluids Analysis Workshop* (pp. 207–219).
- John A. Duffie, & William A. Beckman. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (Fourth Edition). New Jersey: John Wiley & Sons.
- Khatib, A. T., Samiji, M. E., & Mlyuka, N. R. (2024). Optimum Solar Collector's North-South Tilt Angles for Dar es Salaam and their Influence on Energy Collection. *Cleaner Engineering and Technology*, 21. doi:10.1016/j.clet.2024.100778
- NASA. (2025, May 8). Surface meteorology and solar energy – a renewable energy resource. Retrieved 8 May 2025, from <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Ulgen, K. (2006). Optimum tilt angle for solar collectors. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 28(13), 1171–1180. doi:10.1080/00908310600584524