

Ekim 2025

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİNDE YENİLİKÇİ TEKNOLOJİLER VE UYGULAMALAR

EDİTÖRLER

DR. ÖĞR. ÜYESİ BÜŞRA DURMAZ

DR. ÖĞR. ÜYESİ MÜJDAT ÖZTÜRK

YAZARLAR

DOÇ. DR. FARUK KILIÇ

DOÇ. DR. HASAN DİLBAS

DR. ÖĞR. ÜYESİ BÜŞRA DURMAZ

DR. ÖĞR. ÜYESİ FURKAN BİRDAL

DR. ÖĞR. ÜYESİ MÜJDAT ÖZTÜRK

DR. ÖĞR. ÜYESİ SİNAN ÜNVAR

ÖĞR. GÖR. DR. MUSTAFA GÖKTAŞ

ÖĞR. GÖR. DR. RAMAZAN KAYABAŞI

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

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

Birinci Basım / First Edition • © Ekim 2025

ISBN • 978-625-5749-14-7

© 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.seruvenyayinevi.com

e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİNDE YENİLİKÇİ TEKNOLOJİLER VE UYGULAMALAR

EDİTÖRLER

DR. ÖĞR. ÜYESİ BÜŞRA DURMAZ
DR. ÖĞR. ÜYESİ MÜJDAT ÖZTÜRK

YAZARLAR

DOÇ. DR. FARUK KILIÇ
DOÇ. DR. HASAN DİLBAS
DR. ÖĞR. ÜYESİ BÜŞRA DURMAZ
DR. ÖĞR. ÜYESİ FURKAN BİRDAL
DR. ÖĞR. ÜYESİ MÜJDAT ÖZTÜRK
DR. ÖĞR. ÜYESİ SİNAN ÜNVAR
ÖĞR. GÖR. DR. MUSTAFA GÖKTAŞ
ÖĞR. GÖR. DR. RAMAZAN KAYABAŞI

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

GIDA ÜRETİMİNİN KÜRESEL ISINMAYA ETKİSİ VE YENİLENEBİLİR ENERJİ ÇÖZÜMLERİNİN İNCELENMESİ

Ramazan KAYABAŞI7

BÖLÜM 2

ENERJİ TAHMİN MODELLERİNDE YAPAY ZEKÂNIN KATKILARI

Faruk KILIÇ33

Sinan ÜNVAR33

Mustafa GÖKTAŞ33

BÖLÜM 3

GELECEĞİN ENERJİ SİSTEMLERİ: ENERJİ DEPOLAMA VE AKILLI ŞEBEKELER

Büşra DURMAZ51

BÖLÜM 4

YENİLENEBİLİR ENERJİNİN TOPLUMSAL ETKİLERİ VE İŞBİRLİĞİ

Büşra DURMAZ61

BÖLÜM 5

YENİLENEBİLİR ENERJİ ENTEGRASYONLU ISI POMPASI SİSTEMLERİ: TEKNOLOJİK GELİŞMELER VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERSPEKTİFİ

Müjdat ÖZTÜRK71

BÖLÜM 6

SÜRDÜRÜLEBİLİR VE ENERJİ VERİMLİ YAPI TASARIMINDA FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN KULLANIMI

Müjdat ÖZTÜRK87

Hasan DİLBAS87

Furkan BİRDAL87



GIDA ÜRETİMİNİN KÜRESEL ISINMAYA ETKİSİ VE YENİLENEBİLİR ENERJİ ÇÖZÜMLERİNİN İNCELENMESİ

“ ”

Ramazan KAYABAŞI¹

¹ Kayseri Üniversitesi, Tomarza Mustafa Akıncıoğlu MYO, Kayseri, Türkiye,
rkayabasi@kayseri.edu.tr; ORCID NO: 0000-0001-6195-7445

GİRİŞ

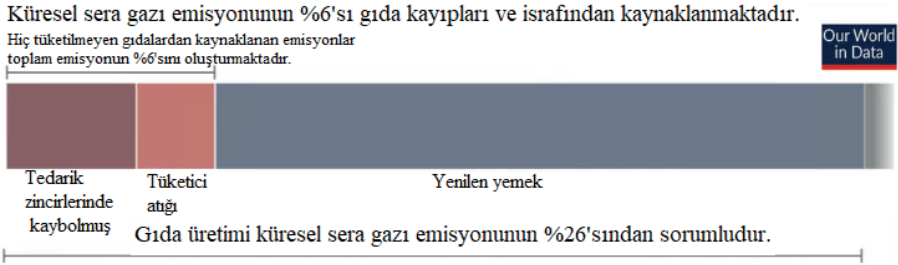
Gıda üretimi, yaşamı sürdürmek için gerekli bir süreç olmakla birlikte, küresel çevre sağlığı üzerinde önemli etkileri vardır. Küresel nüfus artmaya devam ettikçe gıda talebi de artmakta ve bu talep artışı doğal kaynaklar üzerinde büyük baskı yaratarak çevresel bozulmaya olumsuz etkilemektedir. Küresel insan nüfusunun 2050 yılına kadar 9,7 milyara ulaşması beklenmektedir. Bu nedenle hızlı kentleşme ve taze gıdalara yönelik artan talep oluşmaktadır (UN DESA, 2022). Son yıllarda tarım endüstrisi artan talebi karşılamakta zorlanmakta ve yılda yaklaşık 1,3 milyar ton gıda israf edilmektedir (Figueroa-Lopez, Sani, 2024). İsraf edilen gıda üretilen tüm gıdanın üçte birine denk gelmektedir. Gıda kaybı, özellikle bozulabilir ürünlerde, üretim ile tüketim arasındaki süreçte, taşıma ve depolama aşamalarında gerçekleşiyor. Örneğin, meyve ve sebzelerin %47'si ile et ürünlerinin %12'si, kötü depolama ve taşıma koşulları nedeniyle israf edilmektedir (Villalobos vd. 2019). Ayrıca, biyolojik ve kimyasal kontaminasyonlar da gıda israfı ve gıda kaynaklı hastalıkların oluşmasına neden olmaktadır. Sürdürülebilir gıda tedariki için gıda ürünlerinin CO₂ ayak izini azaltmak için üretimden tüketime tüm süreçlerde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırarak küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine neden olan salınımları azaltmak gereklidir. Bu durum ayrıca hava su ve toprak kirliliğine karşı bir mücadele anlamına geldiği için tarım ve gıda üretim süreçlerinde sürdürülebilirliğe katkı sağlayacaktır.

Avrupa Birliği (AB) ve Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO), iklim değişikliğiyle mücadele ve sürdürülebilir kalkınma alanında öncü kurumlar olarak önemli çalışmalar yürütmektedir. AB, Kyoto Protokolü hedeflerinin yetersizliği nedeniyle 2000'de Avrupa İklim Değişikliği Programı'nı (ECCP) başlatarak yenilenebilir enerji kullanımını artırma, enerji verimliliğini geliştirme, ulaşım ve atıklardan kaynaklanan emisyonları azaltma gibi önlemlerle iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini azaltmayı hedeflemiştir. FAO ise açlık ve yoksullukla mücadele, gıda güvenliği ve sürdürülebilir tarımsal kalkınmayı sağlamak amacıyla doğal kaynakların korunmasına, tarımsal üretimin artırılmasına ve ekosistemlerin

güçlendirilmesine odaklanmıştır (FAO, (2019). Her iki kurum da sürdürülebilirlik, doğal kaynakların etkin kullanımı ve gelecek nesiller için sağlıklı bir çevre oluşturma hedefleri doğrultusunda küresel düzeyde politika ve programlar geliştirmektedir. AB 2030 stratejik hedefi, sera gazı salınımlarını 1990 yılındaki seviyelerinin %20 altına çekerek yenilenebilir enerjinin payını %32'ye çıkarmak ve enerji verimliliğini %32,5 oranında arttırmak hedeflemektedir. AB iklim değişikliği ile mücadelede emisyonları azaltmak amacıyla yenilenebilir enerji kullanımını arttırmayı, endüstri alanında enerji verimliliğini arttırmayı, taşıtlarda emisyon salınımlarını azaltılmasını ve atıklardan kaynaklanan emisyonların azaltılması için çalışmaktadır (EU, 2019).

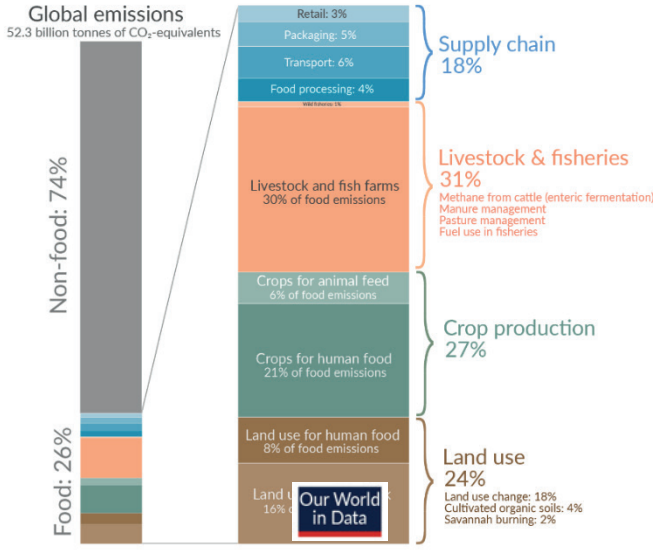
GIDA ÜRETİMİNDE FOSİL YAKITLAR VE SERA GAZI EMİSYONLARI

Fosil enerji kaynaklarını tarımsal üretimde dizel yakıt olarak yaygın kullanıma sahip olduğu gibi imalat süreçlerinde kömür ve doğalgaz olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu kaynaklar teknolojik olarak köklü bir geçmişe sahip ve üretim süreçlerinde sağlam bir altyapıya sahiptir. Sağladığı kolaylıkların yanında çevre için zararlı emisyonlar yayması ve sonucunda sera etkisi ve küresel ısınmayı artırması bu kaynakların sorgulanmasına ve yeni çevreci kaynaklara geçişin hızlanmasına katkı sağlamıştır. Tarım, küresel sera gazı emisyonlarının önemli bir kısmından sorumludur ve bu emisyonlar öncelikle bitkisel ve hayvansal üretim, arazi kullanımındaki değişiklikler ve tedarik zincirindeki verimsizlikler gibi faaliyetlerle bağlantılıdır. Son yıllarda, gıda üretiminin çevresel etkisi, küresel ısınma bağlamında kritik bir endişe haline gelmiştir. Üreticiler giderek yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmekte ve düşük karbonlu ulaşım gibi verimlilik ve temiz enerji çözümlerine odaklanmaktadır. Elektrik üretimi, ısıtma, ulaşım ve endüstriyel süreçleri içeren enerji sektörü (Şekil 1), küresel sera gazı emisyonlarının %76'sını oluşturmaktadır (AR5, 2014). Öte yandan, küresel gıda sistemi toplam emisyonların yaklaşık %26'sının oluşmasını sağlamaktadır (Poore, Nemucek, 2018) (Ritchie, 2020).



Şekil 1. Dünya çapında CO₂ emisyonlarının gıda süreçlerindeki rolü, (Ritchie, 2020).

Poore ve diğ. (2018) göre, gıda emisyonlarının %24'ü (Şekil 2) tedarik zinciri kayıpları ve tüketici atıklarıyla bağlantılıdır; bunların %15'i yetersiz depolama, soğutma ve nakliye, %9'u ise perakendeci ve tüketici atıkları kaynaklıdır (Poore, Nemecek, 2018). Gıda atıkları küresel emisyonların yaklaşık %6'sını oluşturmaktadır ve üretim kayıpları da dâhil edildiğinde gerçek rakam muhtemelen daha yüksektir. Gıda emisyonlarının %21'i doğrudan bitkisel üretimden, %6'sı ise hayvan yemi üretiminden kaynaklanmaktadır. Arazi kullanımı toplam emisyonların %24'ünü oluşturmaktadır; hayvancılık için arazi kullanımı %16 bitkisel üretimden %8 daha fazla emisyon neden olmaktadır (Ritchie, 2019), (Gustavsson vd. 2013). Tedarik zinciri süreçleri (işleme, nakliye, paketleme ve perakende) gıda emisyonlarının %18'ini oluşturmaktadır. Ancak gıda israfı büyük bir sorundur ve üretimden kaynaklanan emisyonların dörtte biri (3,3 milyar ton CO₂ eşdeğeri) kayıplardan veya tüketici israfından kaynaklanmaktadır (Ritchie, 2020). Dayanıklı ambalajlar, soğutma ve işlenmiş gıdalar israfın azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Bu kapsamda ürünlerin tüm aşamalarında israfı önleyecek önleyici faaliyetlerin uygulanması ve bu süreçlerin tamamında yenilenebilir enerji kaynaklarının işletilmesi oluşan toplam zararı azaltacaktır.

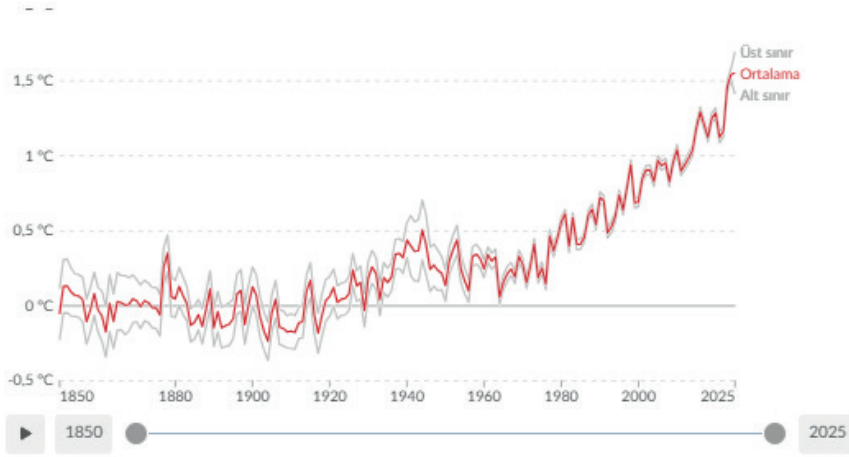


Şekil 2. Gıda üretiminden kaynaklanan küresel sera gazı emisyonları, (Ritchie, 2019).

İnsan kaynaklı sera gazı emisyonları iklim değişikliğinin ana nedenidir ve enerji kullanımı, sanayinin işletilmesi ve gıda üretim süreçleri ile doğrudan ilişkilidir. Yetersiz enerji kaynakları ise gıda yoksulluğu, düşük yaşam standartları ve yetersiz beslenme gibi sorunları oluşturmaktadır. Bu kapsamda ihtiyaç duyulan enerjinin çevreci yollardan elde edilmesinin önemi ortaya çıkmaktadır. Teknolojik gelişmeler, güneş ve rüzgâr enerjisi gibi düşük maliyetli alternatifler sunarak bu dönüşümü mümkün kılmaktadır. Ancak, hızlı karbonsuzlaşmayı destekleyen siyasi değişiklikler de gereklidir. Dünyanın birçok yerinde emisyonlar artmaya devam ederken, bazı ülkeler emisyonlarını azaltmayı başarmış ve düşük karbonlu kalkınma yolları oluşturmuştur.

Sanayi öncesi döneme göre yıllık sıcaklık anomalileri, Dünya

1861-1890 ortalamalarına kıyasla ortalama kara-deniz yüzey sıcaklığı farkı santigrat derece cinsindendir.

Our World
in Data

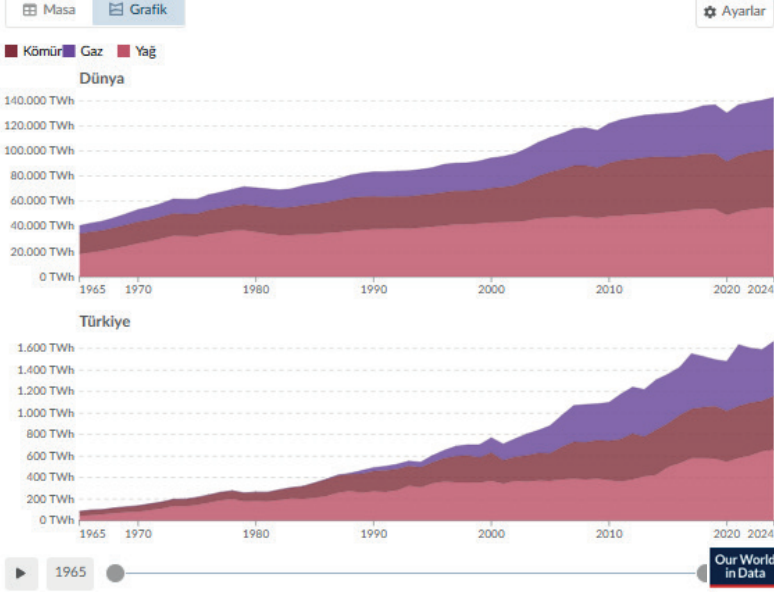
Şekil 3. Sanayi öncesi döneme göre yıllık sıcaklık değişimi, Küresel, (Hannah, 2023).

İnsan kaynaklı karbondioksit ve diğer sera gazı emisyonları, küresel sıcaklık artışının başlıca nedenleridir. Küresel sıcaklıklar, 1961 ile 1990 yılları arasındaki referans değere kıyasla 0,8°C artmıştır ve sanayi öncesi döneme kıyasla toplamda yaklaşık 1,2°C'lik bir artış gözlemlenmiştir (Şekil 3). Bu ısınma, küresel olarak eşit dağılmamıştır; Kuzey Yarımküre ve kutup bölgelerinde daha belirgindir. Bazı bölgelerde sıcaklık değişimi 5°C'den fazla olduğu gözlemlenmiştir (Lacis vd. 2010).

Yakıt türüne göre fosil yakıt tüketimi

Fosil yakıt tüketimi terawatt-saat (TWh) cinsinden verilmiştir.

Our World
in Data



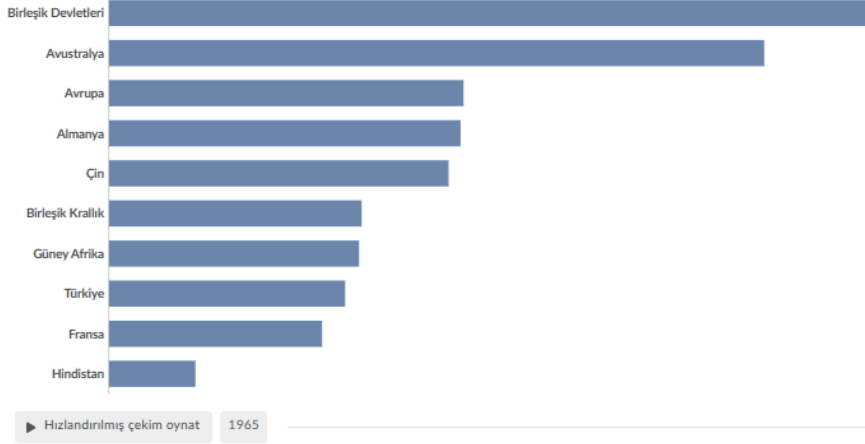
Şekil 4. Yakıt türüne göre fosil yakıt tüketimi, (Lacis vd. 2010).

Küresel fosil yakıt tüketimi hızla artmış, petrol ve gaz tüketimi 2000'li yıllardan itibaren belirgin bir artış göstermiştir (Şekil 4). 2023 itibarıyla fosil yakıt tüketimi 140.000 TWh'yi aşmıştır. Kömür en çok tüketilen fosil yakıt olmaya devam ederken, gaz ve petrol tüketimi de önemli ölçüde artmıştır. Türkiye'de fosil yakıt tüketimi daha düşük seviyelerde kalmaya devam etmekle birlikte, petrol ve gaz tüketimi artarken kömür tüketimi de önemli bir paya sahiptir. Türkiye'nin fosil yakıt tüketimi küresel ortalamanın gerisinde kalmakla birlikte, bu alandaki tüketim son yıllarda hızla artmıştır.

Kişi başına fosil yakıt tüketimi, 2024

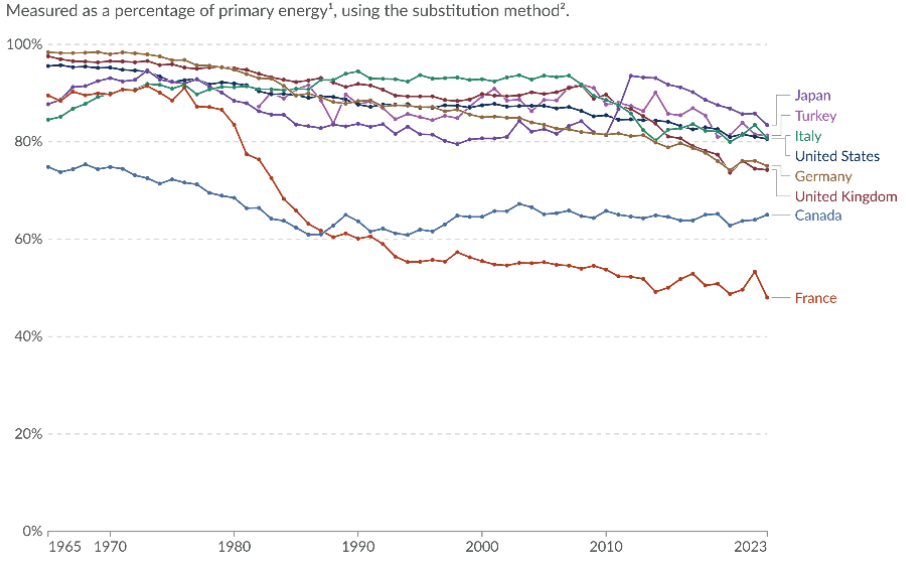
Kişi başına düşen fosil yakıt tüketimi, kömür, petrol ve gazdan elde edilen ortalama enerji tüketimi olarak ölçülür. Kişi başı kilovat saat.

Our World
in Data



Şekil 5. Kişi başına fosil yakıt tüketimi, 2023 (Ritchie, 2019).

ABD 62.066 kWh ile kişi başına en yüksek elektrik tüketimine sahiptir, onu 53.779 kWh ile Avustralya izlemektedir. Almanya ve Avrupa 28.500 kWh civarında benzer seviyelere sahipken, Çin kişi başına 27.129 kWh tüketmektedir (Şekil 5). Birleşik Krallık ve Güney Afrika'nın tüketim seviyeleri yaklaşık 21.000 kWh'dir. Türkiye'nin kişi başına tüketimi 18.429 kWh, Fransa ve Hindistan ise sırasıyla 17.850 kWh ve 7.668 kWh ile en düşük seviyelere sahiptir.



Şekil 6. Fosil yakıtlardan elde edilen birincil enerji tüketiminin payı, (Ritchie, 2019).

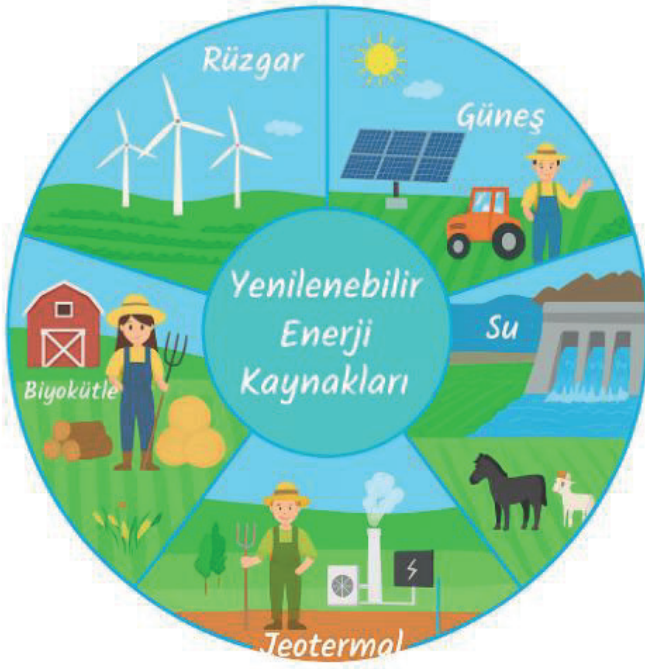
Japonya ve Türkiye gibi ülkelerde birincil enerjinin yüzdesi olarak fosil yakıt tüketiminin önemli ölçüde azaldığını Şekil 6 göstermektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde bu düşüş daha yavaş olmuştur ve %80 civarında sabitlenmiştir. Almanya ve Birleşik Krallık, 1970'lerden bu yana fosil yakıt kullanımını istikrarlı bir şekilde azaltmış ve 2023 yılına kadar %70'in altına düşmüştür. Fransa, büyük ölçüde nükleer enerjinin kullanımının artması nedeniyle fosil yakıtlara olan bağımlılığını önemli ölçüde azaltmış ve bu oran yaklaşık %40'a düşmüştür. Kanada da fosil yakıtlara olan bağımlılığını azaltma konusunda benzer bir eğilim izlemektedir.

Bu zorluklara yanıt olarak, sürdürülebilir tarım uygulamaları ve yenilenebilir enerji çözümlerine olan ilgi artmaktadır. Güneş, rüzgâr ve biyoenerji gibi yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtlara alternatif olarak ortaya çıkmış ve gıda üretiminin karbon ayak izini azaltmıştır. Özellikle güneş ve rüzgar enerjisi, son yıllarda önemli bir büyüme göstermiştir ve sulama sistemleri, seralar ve gıda işleme tesislerine enerji sağlamak için tarım faaliyetlerine entegre edilebilir. Ayrıca, tarımsal atıklardan elde edilen

biyoenerji, biyoyakıt üretimi için kullanılabilir ve tarım sektörü için daha sürdürülebilir bir enerji kaynağı sunar.

GIDA ÜRETİMİNCE YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

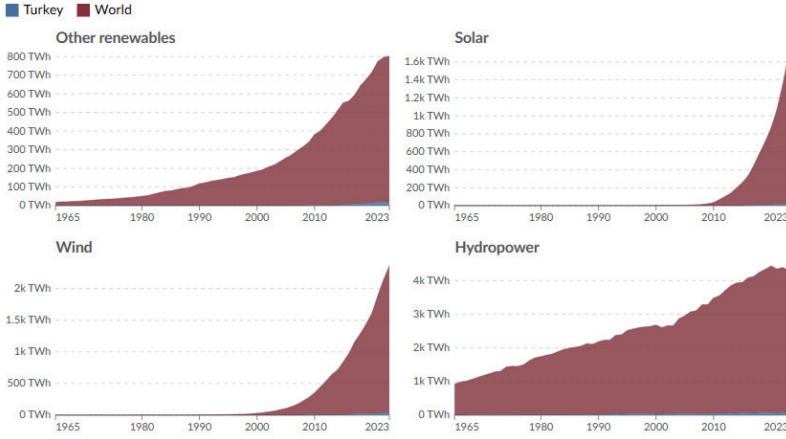
Sanayi Devrimi'nden bu yana, fosil yakıtlar küresel enerji ihtiyacının karşılanmasında hâkim konumda olup, iklim ve insan sağlığı üzerinde önemli olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Fosil yakıtların yakılması, küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %75'ini oluşturmakta ve hava kirliliği nedeniyle her yıl en az 5 milyon erken ölüme neden olmaktadır. Ayrıca son yıllarda meydana gelen iklim değişikliğine bağlı küresel felaketlerin temelinde fosil yakıt kullanımının olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu nedenle hem tarımsal üretim hem de tüm gıda üretim süreçlerinde karbon üretimini azaltmak ve verimli ve çevreci kaynakların kullanılması bir seçenek değil artık bir zorunluluktur. Yenilenebilir enerji kaynaklarından (Şekil 7) hidroelektrik, güneş, rüzgar, jeotermal, biokütle ve diğer küçük ölçekli yenilenebilir kaynaklar çevrecidir ve ayrıca günümüzde üretim süreçlerine küçük veya büyük ölçekli dâhil olmaktadır. Bu kaynakların yanma meydana gelmeden enerji dönüşümünü yapabilme özellikleri ve döngüsünün sürekliliği kaynakların çevreci olmasını sağlamaktadır.



Şekil 7. Yenilenebilir enerji kaynakları, (TÜBİTAK, 2025).

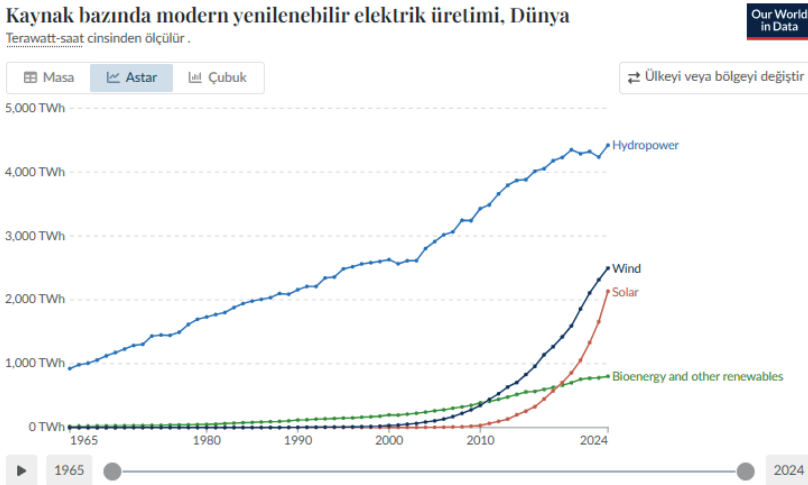
Elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynakları

CO₂ emisyonlarını ve yerel hava kirliliğini azaltmak için, özellikle nükleer ve yenilenebilir teknolojiler olmak üzere düşük karbonlu enerji kaynaklarına hızlı bir geçiş yapılmalıdır. Yenilenebilir enerji teknolojileri hızla yaygınlaşıyor ve bu büyüme küresel enerji sistemlerini giderek daha fazla etkiliyor. Bu yaygınlaşma, hidroelektrik, güneş, rüzgâr, jeotermal ve biyoyakıtlar dâhil olmak üzere düşük karbonlu enerji kaynaklarının payını artırdı. Birincil enerji tüketiminde yenilenebilir enerjinin payı Şekil 8'de gösterilmiştir (Ritchie, Rosado, 2017). Hidroelektrik hariç, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel olarak benimsenmesi oldukça uzun zaman almıştır; ancak güneş ve rüzgâr enerjisinin kullanımı 2000 yılından sonra önemli ölçüde hızlanmıştır.



Şekil 8. Yenilenebilir elektrik üretimi, (Hannah, 2023).

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında, küresel enerji üretiminin en büyük payı hidroelektrikten gelmektedir ve hidroelektrik, diğer kaynaklara kıyasla uzun bir geçmişe sahiptir. Ancak son yıllarda rüzgâr ve güneş enerjisi giderek daha önemli hale gelmiş ve son yirmi yılda kayda değer bir büyüme gözlemlenmiştir (Şekil 8). Bu eğilim, büyük ölçüde bu kaynakların daha geniş çapta kullanılmasını sağlayan verimli teknolojilerin geliştirilmesi nedeniyle oluşmaktadır.



Şekil 9. Kaynak bazında dünya modern yenilenebilir enerji üretimi, (Ritchie, Rosado, 2017).

1965–2024 döneminde modern yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel elektrik üretimindeki gelişimini Şekil 9 göstermektedir. Hidroelektrik uzun yıllar baskın kaynak olurken 2010 sonrası rüzgâr ve özellikle güneş enerjisinin hızlı yükselişi dikkat çekmektedir; biyokütle ve diğer yenilenebilirler ise daha sınırlı artış göstermiştir. Bu dönüşüm, fosil yakıt bağımlılığını azaltarak gıda üretiminde kullanılan sulama, soğutma ve işleme gibi enerjinin yoğun kullanılan süreçlerde karbon azaltımına önemli katkılar sunmaktadır. Özellikle güneş ve rüzgârın hızlı büyümesi, tarımsal üretim sistemlerinin sürdürülebilir enerjiyle bütünleşmesini sağlayarak küresel ısınmanın etkilerini azaltma açısından stratejik bir fırsat oluşturmaktadır.

Hidroelektrik Enerji ve Hidroelektrik Enerji Üretimi

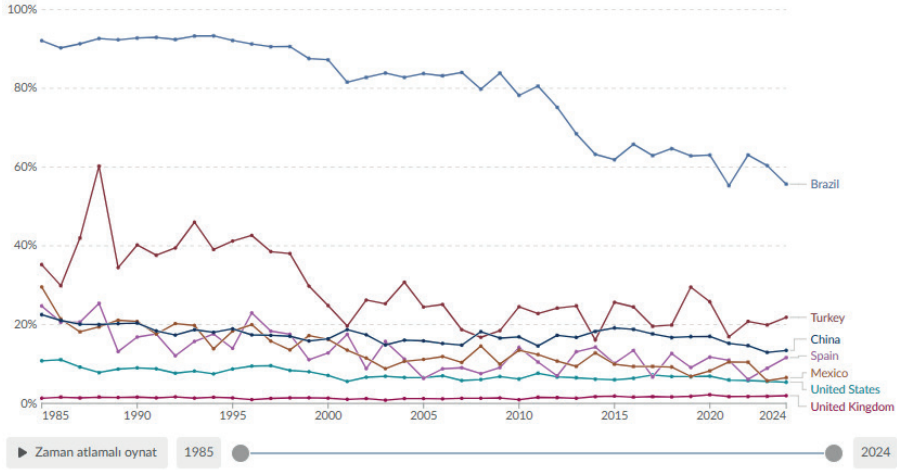
Hidroelektrik enerji, en eski ve en büyük düşük karbonlu enerji kaynaklarından biridir. Bir asırdan fazla bir süredir büyük ölçekte üretilen hidroelektrik enerji, geleneksel biyokütle hariç, yenilenebilir enerji üretiminin yaklaşık yarısını oluşturmaktadır. 1985–2024 döneminde farklı ülkelerde hidroelektrik santrallerinden elde edilen elektriğin toplam elektrik üretimindeki payını (Şekil 10) göstermektedir. Verilere göre Brezilya açık ara önde olup, 1985'te yaklaşık %90 olan hidroelektrik payı yıllar içinde kademeli olarak azalarak günümüzde %55–60 bandına gerilemiştir. Bu durum Brezilya'nın hâlen hidroelektriğe yoğun şekilde bağımlı olduğunu, ancak enerji çeşitliliğini artırma yönünde önemli adımlar attığını göstermektedir.

Türkiye'de ise hidroelektriğin payı 1980'lerin sonunda %30'a yaklaşmış, sonraki yıllarda dalgalanmalarla birlikte %20 civarında sabitlenmiştir. Çin, hidroelektrik kapasitesi açısından dünyada en büyük üreticilerden biri olmasına rağmen elektrik üretimindeki payı %15–20 seviyelerinde kalmıştır. Bu, ülkenin elektrik ihtiyacının büyük bölümünü kömür ve diğer fosil kaynaklardan karşılamaya devam ettiğini ortaya koymaktadır. Hidroelektrik santraller tarım ve üretim süreçlerinde sulama hariç küçük ölçekli yaygın kullanılmamakla birlikte bu süreçlerin elektrik ihtiyacının karşılanmasında önemli bir kaynak görevini üstlenmektedir.

Hidroelektrik santrallerinden elektrik üretiminin payı

Ülke veya bölgede üretilen toplam elektriğin yüzdesi olarak ölçülür.

Our World
In Data



Şekil 10. Hidroelektrik santrallerinden elektrik üretiminin payı, (Hannah, 2023).

İspanya ve Meksika’da hidroelektriğin payı %10–20 arasında değişirken, ABD’de bu oran % 5–10 seviyesinde kalmış ve hidroelektrik enerji karışımında sınırlı bir rol oynamıştır. Birleşik Krallık ise %1’in altında seyreden değerlerle neredeyse hiç hidroelektrik kullanmamaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, 2000’lerden sonra hidroelektrik üretiminin payı birçok ülkede düşüş eğilimi göstermiştir. Bu azalış, rüzgâr ve güneş gibi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının hızla yaygınlaşmasıyla ilişkilidir. Dolayısıyla, hidroelektrik halen önemli bir yenilenebilir kaynak olmakla birlikte, günümüzde ülkelerin enerji sistemlerinde çeşitlendirilmiş bir rol üstlenmekte; tek başına baskınlığı ise giderek azalmaktadır.

Rüzgâr Enerjisi ve Rüzgâr Enerjisi Üretimi

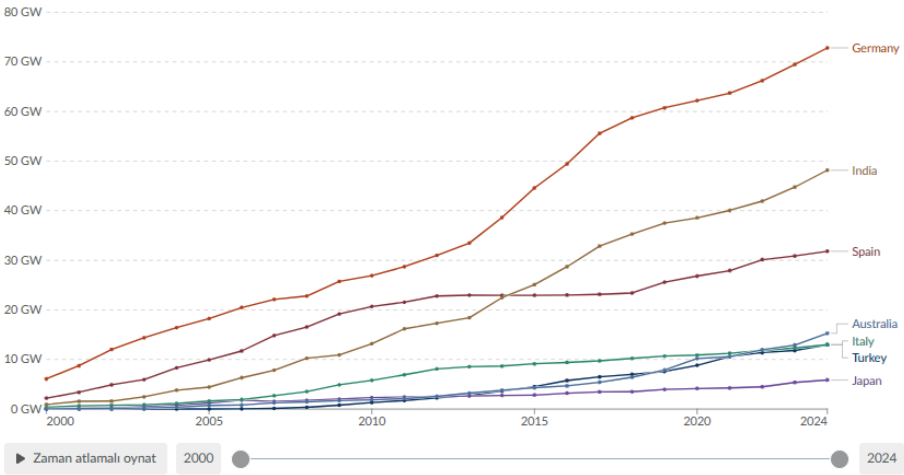
Rüzgâr enerjisi son yıllarda hızla gelişerek yenilenebilir enerji kaynakları arasındaki payını artırmış ve üretim kapasitesini yükseltmiştir. Almanya, yaklaşık 70 GW kurulu kapasitesiyle rüzgâr enerjisi alanında lider konumdadır ve özellikle 2010 yılından bu yana hızlı bir büyüme kaydetmiştir (Şekil 11). Hindistan, özellikle son on yılda önemli bir ivme kazanarak 45 GW’a yaklaşmıştır. İspanya, 2010 yılına kadar büyüme kaydetmiş, ancak o

tarihten bu yana durgun bir seyir izlemiştir. Türkiye, 2010 yılından sonra önemli bir atılım gerçekleştirerek Avustralya'yı geçip İtalya'ya yaklaşmıştır. Öte yandan Japonya ve Avustralya nispeten düşük kapasitelerde kalmıştır. Genel olarak grafik, ülkelerin rüzgâr enerjisi alanındaki ilerlemesini göstermekte ve sürdürülebilir enerji politikalarının etkisini yansıtmaktadır. Almanya ve Hindistan gibi ülkeler öncülük ederken, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkeler de güçlü bir büyüme göstermektedir.

Kurulu rüzgâr enerjisi kapasitesi

Hem kara hem de deniz rüzgâr kaynaklarını içeren toplam kurulu rüzgâr enerjisi kapasitesi, gigawatt (GW) cinsinden ölçülür.

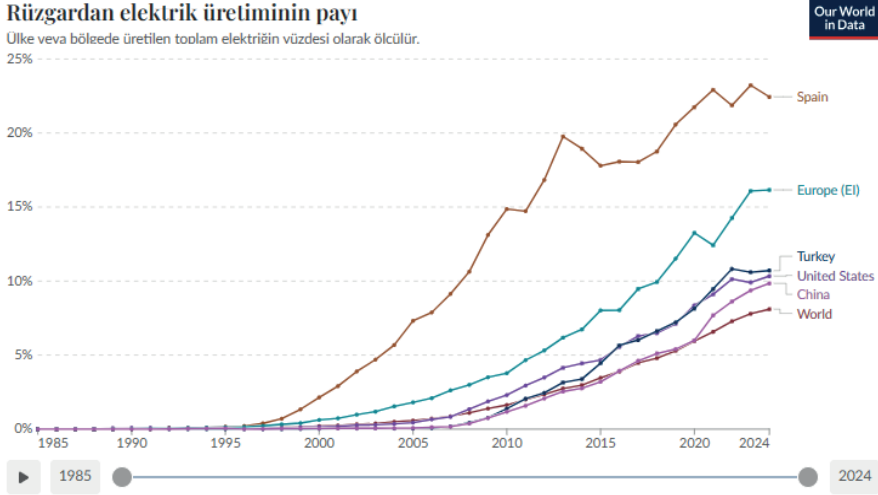
Our World
in Data



Şekil 11. Kurulu rüzgâr enerjisi kapasitesi, (Hannah, 2023).

Son yıllarda rüzgâr enerjisinin elektrik üretimindeki payı küresel ölçekte istikrarlı biçimde artmış, ancak bu artış ülkeler arasında farklılık göstermiştir. İspanya elektrik üretimindeki rüzgârın payını yaklaşık %20 seviyesine ulaştırırken, Avrupa Birliği genelinde elektrik üretimindeki rüzgârın payın %17'ye yaklaşmıştır (Şekil 12). Türkiye ve Amerika Birleşik Devletleri son on yılda benzer bir ivmeyle %10 seviyesini aşarken, Çin 2015 sonrası hızlanarak %8–9 düzeyine çıkmıştır. Dünya ortalaması ise elektrik üretimindeki rüzgârın payın %7–8 civarında seyretmekte, bu da rüzgâr enerjisinin küresel ölçekte henüz sınırlı bir paya sahip olduğunu, ancak hızla büyüyen stratejik bir enerji kaynağına dönüştüğünü göstermektedir. Tarımsal süreçlerde rüzgâr enerjisi küçük ölçekli işletmelerde su temini ve elektrik

üretimi için kullanılırken büyük ölçekli santraller ile tarım alanlarının üzerinde elektrik üretmek amacıyla yaygınlaşmaktadır.



Şekil 12. Rüzgârdan elektrik üretiminin % payı, (Hannah, 2023).

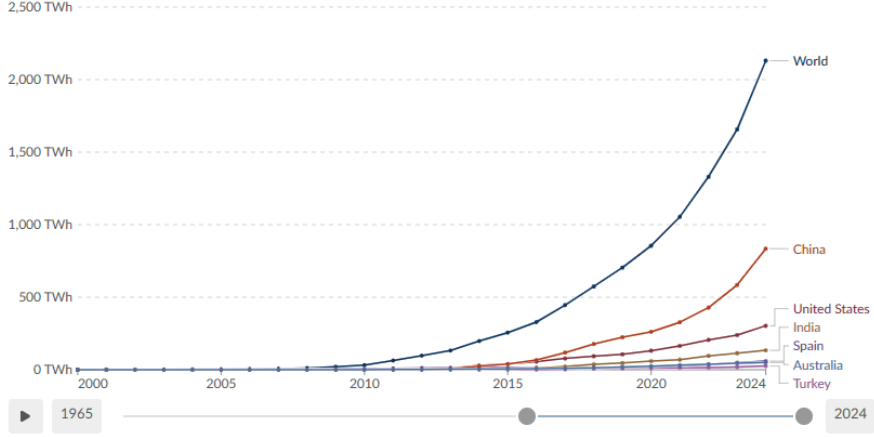
Güneş Enerjisi ve Güneş Enerjisi Üretimi

Her yıl güneş enerjisinden üretilen enerji miktarını ve dünya çapında hızla büyüyen güneş enerjisi üretiminin durumunu Şekil 13 göstermektedir. Artan nüfus artışına bağlı olarak insanın beslenme ihtiyacını karşılamak enerji kaynakları türü ve kaynak verimliliği artırılmaya çalışılmaktadır (Öztürk, Çalışır, Genç, 2021). Güneş enerjisi, büyük ölçekli yenilenebilir enerji kaynakları arasında nispeten modern bir seçenektir ve kurulu kapasite ve üretim süresi dikkate alındığında enerji üretimi artmaktadır. Güneş enerjisinden elektrik üretebilen PV sistemler küçük ölçekli uygulamalardan büyük santrallere kadar yaygın olarak kullanılabilme imkanı sunduğu için hızla yaygınlaşmaktadır (Öztürk, Kayabaşı, 2023). Bu yaygınlaşma dünya çapında kurulu güneş enerjisi kapasitesini enerji üretimini olumlu olarak etkilemektedir.

Güneş enerjisi üretimi

Güneşten elektrik üretimi, teravat-saat cinsinden ölçülür.

Our World
in Data



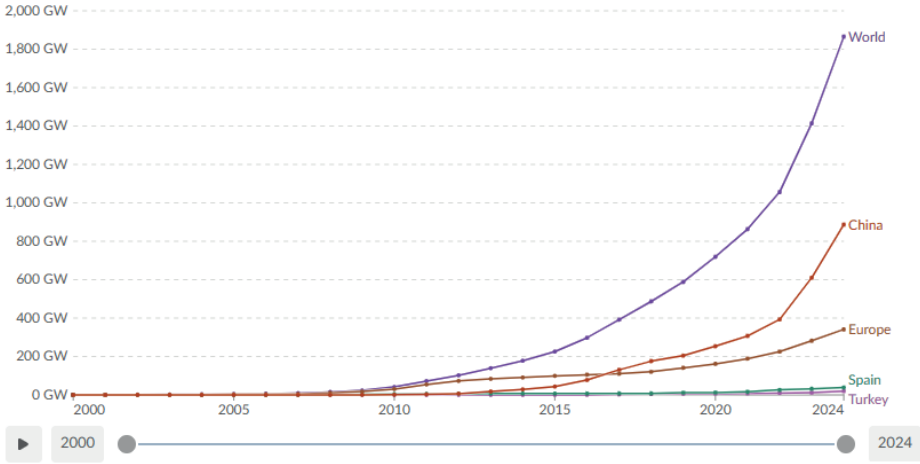
Şekil 13. Güneş enerjisi üretimi, (Ritchie, Rosado, 2017).

Çin, güneş enerjisinden elektrik üretiminde dünya lider durumdadır (Şekil 13). Güneş enerjisi üretimi dünya çapında hızla artarken, bu artışın büyük bir kısmı Çin'in katkısından kaynaklanmaktadır. ABD ve Hindistan'da güneş enerjisi üretiminde artış görülse de, bu ülkeler hala Çin'in üretiminden geride kalmaktadır. Avustralya, İspanya, Türkiye ve Güney Afrika gibi ülkeler de güneş enerjisi üretiminde artışlar kaydetmiştir, ancak üretimleri küresel toplamda daha düşük seviyelerde kalmaktadır. Bu rakamlar, Çin'in güneş enerjisine yaptığı yatırımların küresel ölçekte önemli etkisini ortaya koymaktadır.

Kurulu güneş enerjisi kapasitesi

Toplam kurulu güneş enerjisi kapasitesi, gigawatt (GW) cinsinden ölçülür.

Our World
in Data



Şekil 14. Kurulu güneş enerjisi kapasitesi, (Ritchie, Rosado, 2020).

Küresel olarak, toplam güneş enerjisi kapasitesi 2023 yılında 1.400 GW'yi aşmış olup, (Şekil 14) bu artışın büyük bir kısmına Çin katkıda bulunmuştur. Avrupa'da güneş enerjisi kapasitesinde bir artış görülse de, Çin'in çok gerisinde kalmaktadır. Türkiye, güneş enerjisi kapasitesinde önemli bir artış yaşamış olsa da, kapasite açısından Çin ve Avrupa'ya kıyasla daha düşük seviyelerde kalmaktadır. Güneş enerjisi uygulamaları diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından farklı olarak küçük ve büyük ölçekli elektrik üretim için uygundur. Tarımsal sulamalarda kullanılabileceği gibi kırsalda konutların enerji ihtiyacı veya fabrikaların enerji ihtiyacının karşılanmasında kullanılabilir. Güneş enerji uygulamaları yerinde üret ve yerinde tüket için kurulacak bölgenin güneş potansiyeline bağlı olarak ekonomik olarak kurulabilecek ve ekonomik olarak işletilebilecek yerel bir kaynaktır. Bu kaynağın yaygınlaştırılması hem ekonomik hem de yerel kalkınmaya katkı sunacaktır.

Jeotermal Enerji ve Jeotermal Enerji Üretimi

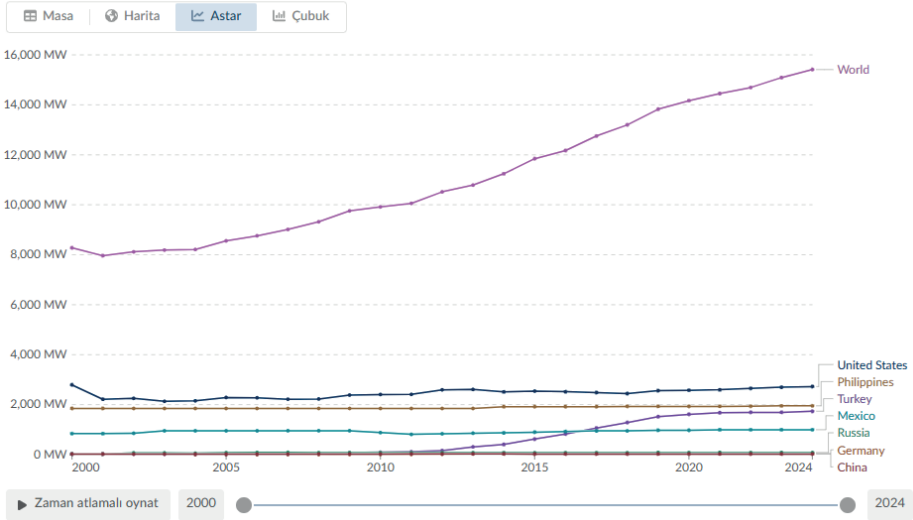
Jeotermal enerji, yer kabuğunun derinliklerinde biriken doğal ısıdan elde edilen yenilenebilir bir enerji türüdür. Bu enerji, yeraltındaki sıcak su, buhar veya sıcak kayalarından çıkarılır ve elektrik üretiminde, ısıtmada ya da

seracılık gibi alanlarda kullanılabilmektedir. Dünya çapında kurulu jeotermal enerji kapasitesi (Şekil 15)'te görülmektedir. Ülkeler potansiyeline ve kaynak termal suyun çıkış sıcaklığına bağlı olarak bağlı olarak var olan bu yenilenebilir kaynağını kullanmaktadır. Türkiye ise özellikle doğrudan ısı enerjisi olarak konutların ve seraların ısıtılmasında ve jeotermal elektrik santralleri ile elektrik üretiminde yaygın olarak kullanmaktadır.

Kurulu jeotermal enerji kapasitesi

Jeotermal enerjinin megavat cinsinden ölçülen toplam kurulu gücü.

Our World
in Data



Şekil 15. Kurulu jeotermal enerji kapasitesi, (Ritchie, Roser, Rosado, 2020).

Dünyada jeotermal enerji kurulu gücü teknolojinin ve sondaj aletlerinin gelişimine de bağlı olarak 2005 yılından sonra hızla artış sağlamıştır (Şekil 13). Filipinler, jeotermal enerji kapasitesinde en yüksek seviyeye ulaşmış olup, 2020'lerden sonra kapasitede önemli bir artış gözlemlenmemiştir. Türkiye, özellikle 2010'lu yıllardan sonra önemli bir artış göstererek yaklaşık 1.500 MW'lık bir jeotermal enerji kapasitesine ulaşmıştır. Öte yandan Rusya, daha yavaş bir hızda büyüme göstermektedir. Jeotermal enerji kapasitesi de, özellikle Filipinler ve Türkiye'de önemli bir büyüme kaydetmiştir, ancak Rusya gibi bazı ülkelerde jeotermal enerji yatırımlarında daha yavaş bir ilerleme görülmüştür. Bu bulgular, yenilenebilir enerji sistemlerinin küresel ölçekte yaygınlaştırılması için sürekli çaba gösterilmesi gerektiğini

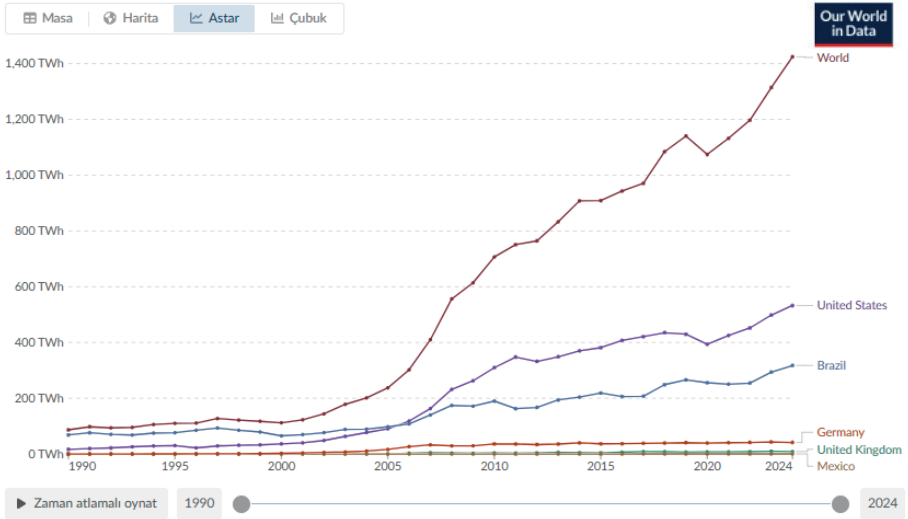
vurgulamaktadır. Bu veriler, jeotermal enerji yatırımlarının coğrafi olarak farklı hızlarda yayıldığını ve bazı ülkelerin bu alanda daha hızlı geliştiğini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda jeotermal suyun sıcaklığına bağlı olarak jeotermal zenginliği olan bölgelerde seralarda fosil kaynaklı ısıtma uygulamaları yerine jeotermal kaynakların kullanılması çevre yenilenebilir bir çözüm olarak uygulanmalıdır.

Biyoyakıtlar

Geleneksel biokütle, kömür, organik atık ve mahsul artıkları yakma, tarihsel olarak önemli enerji kaynakları olmuştur ve halen düşük gelirli bölgelerde kullanılmaktadır. Ancak, yalnızca ticari olarak satılan enerji verileri kaydedildiğinden, bu enerji tüketimi ile ilgili veri elde etmek zor olabilir. Öte yandan, bioetanol ve biyodizel gibi modern biyoyakıtlar, birçok ülkede önemli bir ulaşım yakıtı haline gelmiştir.

Biyoyakıt enerjisi üretimi

Toplam biyoyakıt üretimi yıllık teravat-saat cinsinden ölçülür. Biyoyakıt üretimi hem bioetanolü hem de biyodizeli kapsar.



Şekil 16. Biyoyakıt enerjisi üretimi, (Ritchie, Roser, Rosado, 2020).

Küresel biyoyakıt üretimi 1990'lardan bu yana hızla artarak 2020'lerde 1.200 TWh'yi aşmıştır (Şekil 16). ABD, 2023 itibariyle 400 TWh'yi aşan biyoyakıt üretiminin en büyük payına sahiptir. Brezilya, özellikle etanol

üretimi yoluyla biyoyakıt üretiminde önemli bir oyuncu haline gelmiş ve 2023'te 200 TWh'ye ulaşmıştır. Almanya, Birleşik Krallık ve Meksika gibi ülkeler daha sınırlı artışlar göstermiştir. Bu rakamlar, küresel enerji üretiminde biyoyakıt üretiminin artan rolünü ve bu alanda ABD ve Brezilya'nın liderliğini vurgulamaktadır.

Gıda üretiminin küresel ısınmaya etkisi son yıllarda giderek daha belirgin hale gelmiştir. Gıda üretimi, küresel sera gazı emisyonlarının yaklaşık %26'sını oluşturmaktadır ve bu emisyonların çoğu tarım, hayvancılık, arazi kullanımı ve tedarik zincirindeki verimsizliklerden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, gıda kaybı ve israfı küresel emisyonların yaklaşık %6'sını oluşturmakta ve tedarik zincirindeki verimsizliklerin azaltılmasının önemini vurgulamaktadır. Bu bağlamda, gıda üretiminde sürdürülebilir uygulamaların benimsenmesi, enerji verimliliğinin artırılması ve yenilenebilir enerji çözümlerinin entegre edilmesi, sera gazı emisyonlarının azaltılmasında kritik öneme sahiptir.

SONUÇLAR

Yenilenebilir enerji teknolojileri, özellikle hidroelektrik, rüzgâr, güneş, jeotermal ve biyoyakıtlar, tarım sektöründe önemli bir büyüme göstererek gıda üretim süreçleri için düşük karbonlu alternatifler sunmuştur. Son yirmi yılda, özellikle rüzgâr ve güneş enerjisi hızla büyümüş, tarımsal üretim için temiz enerji seçenekleri sunmuş ve enerji tüketimini ve emisyonları önemli ölçüde azaltmıştır. Güneş enerjisine yaptığı yatırımlarla Çin, küresel güneş enerjisi kapasitesinin büyük bir bölümünü oluştururken, rüzgâr enerjisi Almanya, Hindistan ve Türkiye gibi ülkelerde önemli bir büyüme kaydetmiştir. Ayrıca, Amerika Birleşik Devletleri ve Brezilya'nın öncülüğünde biyoyakıt üretimi 1990'lardan bu yana hızlı bir artış göstermiştir.

Gıda üretimi ile ilgili emisyonları azaltmak için aşağıdaki stratejiler benimsenmelidir:

- Küresel beslenme alışkanlıklarını dengeli beslenmeye dönüştürerek üretim ve tüketim dengesini kurarak israfı önlemek.

- İleri depolama ve nakliye sistemleri kullanarak tedarik zinciri kayıplarını en aza indirmek ve bölgesel üretim ve tüketimi yöneterek nakliye maliyetlerini ve israfı azaltmak suretiyle gıda israfını azaltmak.
- Yeni nesil tarım uygulamalarını benimsemek, verimli gübre kullanımını teşvik etmek ve sürdürülebilir tarım tekniklerini desteklemek suretiyle tarımsal verimliliği artırmak.
- Düşük karbonlu tarım teknolojileri geliştirmek ve bunların yaygın olarak benimsenmesini teşvik etmek.
- Tarımsal üretim süreçlerini yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklemek ve finanse etmek, bu sistemlerin yaygın olarak benimsenmesini kolaylaştırmak.
- Kırsal alanlarda yerinde üretim ve tüketim modellerini teşvik etmek, yerel enerji potansiyeline göre yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanmak.
- Gıda depolama iklim kontrolü için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmek ve tarlada kullanılmak üzere verimli ve tarıma uygun cihazlar geliştirmek.
- Sulama için yenilenebilir enerji kaynaklı alternatifleri kullanarak CO₂ salınımını azaltmak.

Sonuç olarak, gıda sistemlerini dönüştürmek, sera gazı emisyonlarını azaltmak ve sürdürülebilir bir gelecek sağlamak kritik öneme sahip gerekliliklerdir. Gıda üretim teknolojilerin 2100 yılında yaygın olarak benimsenmesi varsayımıyla, kullanılan tarım arazisi alanının, ötrofikasyon emisyonlarının ve kullanılan tatlı suyun sırasıyla %54, %46 ve %32 oranında azalacağını öngörülmektedir (Jebari, Engström, 2025), (Badsha, 2025). Tarım sektörü faaliyetlerinden kaynaklanan toplam sera gazı emisyonlarını karbon eşdeğeri birimleriyle ifade edilmektedir (Menegat, Ledo, Tirado, 2022). Tarımda üretim süreçleri göz önüne alındığında, elektrik üretimi %78,7'lik bir oranla en büyük karbon ayak izini oluşturmaktadır (Sow vd. 2023). Hem gıda tüketiminde hem de gıda üretiminde yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı ve atıkların dönüşümü sürdürülebilirliğe önemli katkılar sunmaktadır

(Taloba, Rayan 2025). Yenilenebilir enerji çözümlerinin benimsenmesi ve sürdürülebilir tarım uygulamalarının yaygınlaştırılması hem çevresel hem de ekonomik sürdürülebilirliği sağlamak için gereklidir. Bu dönüşüm, küresel ısınmayla mücadelede ve gelecekte gıda güvenliğini sağlamada etkili bir strateji sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Badsha, M. M., Maheer, U., Omar, F. M., Ramli, A., Balakrishnan, V., Hamed, Y., Arafath, M. A., & Hossain, M. S. (2025). Sustainable approaches on innovative utilization of household food waste as a renewable biomass for bioenergy production: Potential, challenges and social-environmental impacts. *Biomass & Bioenergy*, 200, 107995.
- European Commission (EU). (2019). How will be affected? https://ec.europa.eu/clima/policies/adaptation/how_en#tab-0-0 Erişim T: (15.09.2025).
- FAO. (2019). About FAO. <http://www.fao.org/about/en/> Erişim T: (18.09.2025).
- Figuerola-Lopez, K. J., & Sani, A. (2024). Evaluation of films made from starches of corn, potato, cassava, yam, and wheat for preserving cherry tomatoes. *Food Chemistry*, 100, 769. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100769>
- Gustavsson, G., Cederberg, C., Sonesson, U., & Emanuelsson, A. (2013). The methodology of the FAO study: Global food losses and food waste - extent, causes and prevention - FAO, 2011. Swedish Institute for Food and Biotechnology (SIK), Report 857.
- Hannah, R. (2023). CO₂ and greenhouse gas emissions. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>
- Jebbari, K., & Engström, E. (2025). Future of food: A technology-centered path towards sustainable production in 2100. *Futures*, 167, Article 103565. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2025.103565>
- Lacis, A. A., Schmidt, G. A., Rind, D., & Ruedy, R. A. (2010). Atmospheric CO₂: Principal control knob governing Earth's temperature. *Science*, 330(6002), 356-359.
- Menegat, S., Ledo, A., & Tirado, R. (2022). Greenhouse gas emissions from global production and use of nitrogen synthetic fertilisers in agriculture. *Scientific Reports*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-1877>
- Öztürk, M., & Kayabaşı, R. (2023). Güneş enerjisinin İç Anadolu bölgesinde kullanılabilirliği ve sistem analizi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(4), 1351-1359. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1310627>
- Öztürk, M., Çalışır, O., & Genç, G. (2021). Energy, exergy and economic (3E) evaluation of the photovoltaic/thermal collector-assisted heat pump domestic water heating system for different climatic regions in Turkey.

- Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 145(3), 1431-1443.
<https://doi.org/10.1007/s10973-021-10675-9>
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987-992.
<https://doi.org/10.1126/science.aag0216>
- Ritchie, H. (2019). Food production is responsible for one-quarter of the world's greenhouse gas emissions. *Our World in Data*. Retrieved from <https://ourworldindata.org/food-ghg-emissions>
- Ritchie, H. (2020). Food waste is responsible for 6% of global greenhouse gas emissions. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/food-waste-emissions>
- Ritchie, H., & Rosado, P. (2017). Fossil fuels. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/fossil-fuels>
- Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. (2020). Renewable energy. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/renewable-energy>
- Sow, S., Ranjan, S., Behera, B., Ghosh, M., Kumar, S., & Dutta, S. (2023). Maintaining agricultural sustainability through carbon footprint management. *Current Science*, 125, 939-944. <https://doi.org/10.18520/cs/v125/i9/939-944>
- Taloba, A. I., & Rayan, A. (2025). Machine learning based on reliable and sustainable electricity supply from renewable energy sources in the agriculture sector. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 18(1), 101282. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2024.101282>
- TÜBİTAK Bilim Genç. (t.y.). Alternatif enerji kaynakları ve Türkiye. <https://bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/alternatif-enerji-kaynaklari-ve-turkiye>
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2022). *World Population Prospects 2022: Summary of Results*. United Nations.
https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf
- Villalobos, J. R., Soto-Silva, W. E., González-Araya, M. C., & González-Ramírez, R. G. (2019). Research directions in technology development to support real-time decisions of fresh produce logistics: A review and research agenda. *Computers and Electronics in Agriculture*, 167.



ENERJİ TAHMİN MODELLERİNDE YAPAY ZEKÂNIN KATKILARI

“ ”

Faruk KILIÇ¹

Sinan ÜNVAR²

Mustafa GÖKTAŞ³

1 Doç. Dr., Milli Savunma Üniversitesi, Kara Harp Okulu, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID ID. 0000-0002-9978-1972

2 Dr. Öğr. Üyesi, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, ORCID ID. 0000-0002-9144-7638

3 Öğr. Gör. Dr., Gazi Üniversitesi, Ostim Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, ORCID ID. 0000-0001-8742-9114

GİRİŞ

Enerji talebi ve arzı, modern toplumların temel yapı taşlarından biridir. Hızla büyüyen nüfus, sanayileşme ve teknolojik gelişmeler, enerji tüketiminde artışa neden olmaktadır. Bu bağlamda, enerji tahmini, enerji sistemlerinin güvenilirliği ve verimliliği için kritik bir rol oynamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının artışı ve enerji sistemlerindeki karmaşıklık, doğru tahminlerin gerekliliğini artırmıştır. Geleneksel tahmin yöntemleri, genellikle istatistiksel modellere dayalıdır ve karmaşık ilişkileri yeterince yansıtmakta zorlanabilir. Bu noktada yapay zekâ ve makine öğrenimi teknikleri, enerji tahmin modellerinin geliştirilmesinde devrim niteliğinde katkılar sunmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranlarındaki artış, sürdürülebilirlik ve verimlilik taleplerinin yükselmesi küresel çaptaki enerji piyasasında önemli değişikliklere neden olmaktadır. Enerji piyasasındaki arz ve talep süreçlerinin sağlıklı bir şekilde yürütülebilmesi doğruluk oranı yüksek öngörülerle mümkün olabilmektedir. Enerji üretimindeki yetersizlik ve gereksizliklerin önceden belirlenerek uygun planlamaların yapılmasıyla kaynak kullanımları, yatırımlar ve fırsatların değerlendirilmesi daha efektif hale gelmektedir (Carnevale vd., 2024).

Günümüzde pek çok alanda olduğu gibi enerji kaynaklarının yönetimi ve optimizasyonu alanına da entegre edilmesi önemli avantajlar sağlayacaktır. Yüksek karbon salınımına neden olan hidrokarbon bazlı fosil yakıt kullanımının ortaya çıkardığı çevresel sorunlar 21. Yüzyıl da çözülmesi gereken en önemli sorunlardan birisidir. Enerji alanında sağlanacak verimlilik bu çözüme katkı sağlayacaktır (Ngarambe vd., 2020).

Çevresel sorunların yarattığı kaygılar, fosil yakıt kaynaklarının sınırlı oluşu ve jeopolitik dengesizliklerin etkisi ile kaynaklara erişim zorluğu gibi pek çok neden yenilenebilir enerji kaynaklarına olan eğilimi artırmaktadır. Bu sebeple yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji ihtiyaçlarının karşılanma oranı her geçen yıl daha da artmaktadır (Wang vd., 2024).

Gelişmiş ya da gelişmekte olan ülkelerde, resmi, sivil, tarım ve sanayi faaliyetlerinin sağlıklı bir biçimde sürdürülebilmesi düzenli işleyen bir enerji sistemine ihtiyaç duyar (Pao, 2009). Yeryüzündeki doğal enerji kaynaklarının homojen bir şekilde dağılmamış olması farklı bölgelerdeki ülkelerin kendi enerji kaynaklarına sahip olamamasına neden olur. Bu durum bir çok ülkeyi enerji kaynakları bakımından daha zengin ülkelere bağımlı hale getirmektedir (Xie vd., 2015).

Enerji ithalatına ihtiyaç duyan hükümetler sürekli değişen enerji ihtiyaç durumları için yatırım risklerini minimuma indirecek doğru planlamalar yapmak zorundadırlar. Doğru tahminlerin yapılabilmesi için düşük hata payı ile çalışan güçlü modellere gerek duyulmaktadır. Bu modeller arz talep den-

gesini sağlanması, belirsizliklerin önüne geçilmesi ve verimliliğin sağlanması için son derece önemlidir. Güvenli tahmin modelleri sayesinde ihtiyaç duyulan enerji temin süreçleri düşük kayıp ve istikrarlı bir şekilde yürütülmüş olur (Tutun vd., 2015).

Elektrik ve doğalgaz gibi bazı enerji kaynaklarının yeteri miktarlarda depolanmasının mümkün olmayışı ya da karşılanması zor yüksek maliyetler gerektirmesi kesintisiz bir temin sürecini gerekli kılmaktadır. Geleceğe dönük yapılacak planlama ve yatırım tasarımlarının da kesin tahminin yapılması büyük önem taşımaktadır (WECTNC, 2000).

Coğrafi ve jeopolitik konum, nüfus, sanayi büyüklüğü, ekonomik kalkınma durumu, enerji kaynaklarının zenginliği gibi pek çok faktör gereksinim duyulan enerji miktarlarının kesin bir şekilde tahminini oldukça zorlaştırmaktadır. Doğru çalışan güvenilir tahmin modellerinin geliştirilebilmesi için farklı yöntemlerin kullanıldığı pek çok araştırma yapılmıştır. Doğrusal olmayan akıllı modeller, istatistiksel analiz modelleri ve gri tahmin modelleri bu alanda zikredilebilecek ana gruplardır (Li vd., 2024).

Yapılan araştırmalardan elde edilen kanıya göre enerji üretim ve tüketim sistemlerinden derlenen verilerin tasnif edilerek yorumlanması hızlı karar süreçlerinde kullanılabilmesi için inovatif yöntemlerin kullanımına yönelik eğilim artmaktadır (Szczeponiuk ve Szczeponiuk, 2022). Yenilenebilir, hibrit bir sistemin saha verileri ile optimizasyonu denenmiş farklı kapasite ve konumdaki üretim birimlerinin planlaması gerçekleştirilmiştir.

Şebekeye bağlı, farklı hibrit yenilenebilir enerji sistemleri modellerini karşılaştırmak için NASA ve Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'ndan hava ve iklim verileri alınıp kullanılmıştır. Araştırmada, özellikle hibrit fotovoltaik, rüzgar ve hidroelektrik sistemlere odaklanarak farklı yenilenebilir enerji santrali kombinasyonlarının tekno-ekonomik etkinliği simüle edilmiştir (Shahzad vd., 2022).

Akıllı şebeke sistemlerinde de planlama, kontrol ve optimizasyon işlemlerinin gerçekleştirilmesi için yapay zekâ teknolojileri önemli katkılar sunmaktadır. Mühendislik ve enerji alanından yapılan pek çok uygulama yapay zekâ'nın bu alanlarda da başarı ile uygulanabileceğinin kanıtı olmaktadır. Mesela yapılan bir çalışmada enerji hasadı sürecinde iki kararlı yapıların tasarımını optimize edilmiş, yapay zekâ algoritmaları hataları etkili bir şekilde tespit ederek ve yenilenebilir enerji üretimini attırmıştır (Elsheikh, 2022). Ayrıca güneş enerjisiyle çalışan bir tuzdan arındırma ünitesinin performansı ve verimliliğini tahmin etmek için bir yapay sinir ağı modeli önermişlerdir (Moustafa vd., 2022).

Yapay zekâ algoritmalarında yorumlanmak üzere sayaç, sensör ve IoT cihazları ile binalardan alınan veriler ile enerji tüketim karakteristiğini belir-

lenebilmektedir (Marinakis, 2020). Enerji verimliliğinin kontrolü ve geleceğe dönük yapılacak planlamalar için binalara kurulan izleme sistemleri ile önemli miktarda veri toplanarak depolanmıştır. Yapay zekâ algoritmaları ile bu veriler işlenerek tüketim miktarları, dönemsel değişimler ve eğilimler tespit edilmektedir. Geliştirilen makine öğrenimi tabanlı modeller anlamlı olmayan verileri ayıklarken NLP (doğal dil işleme) algoritmaları enerji verimliliği ve optimizasyon için karmaşık kararlar alarak daha kesin tahmine ulaşmayı sağlayan güvenilir çözümler sunarlar (Pancholi, 2014).

ENERJİ TAHMİNİNİN ÖNEMİ

Enerji Talep Tahmini

Yenilenebilir enerji kaynaklarının giderek artan önemi, enerji üretim süreçlerinin daha verimli ve sürdürülebilir hale getirilmesini gerektiriyor. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji üretim tahmini, enerji sistemlerinin planlanması, kaynakların etkin kullanımı ve enerji arz-talep dengesinin sağlanması için kritik bir rol oynar. Güneş, rüzgâr ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynakları, doğaları gereği hava durumu ve çevresel koşullardan etkilenir. Bu nedenle, üretim tahmini karmaşık bir süreç olup, meteorolojik veriler, makine öğrenimi algoritmaları ve istatistiksel yöntemlerin entegrasyonunu gerektirir.

Tahmin yöntemleri genellikle kısa, orta ve uzun vadeli olmak üzere üç ana kategoriye ayrılır. Kısa vadeli tahminler (saatlik veya günlük), enerji şebekesi yönetiminde ani değişikliklere hızlı yanıt vermek için kullanılır. Orta vadeli tahminler (haftalık veya aylık), enerji arzını optimize etmek ve bakım planlaması yapmak için önemlidir. Uzun vadeli tahminler (yıllık veya daha uzun süreli) ise enerji yatırımlarının ve politikalarının belirlenmesinde rehberlik sağlar.

Makine öğrenimi ve yapay zekâ tabanlı yaklaşımlar, yenilenebilir enerji üretim tahmininde devrim yaratmıştır. Derin öğrenme algoritmaları, büyük veri kümelerini işleyerek daha yüksek doğrulukta tahminler sunar. Örneğin, rüzgâr türbinleri için rüzgâr hızı tahmini veya güneş panelleri için güneş radyasyonu tahmini gibi spesifik modeller, enerji üretimini optimize etmek için uygulanır.

Yenilenebilir enerji üretim tahminleri, enerji maliyetlerini düşürmek, karbon emisyonlarını azaltmak ve enerji sistemlerinin güvenilirliğini artırmak için kritik bir araçtır. Ancak, belirsizliklerin ve veri eksikliklerinin üstesinden gelmek için modellerin sürekli iyileştirilmesi gereklidir. Gelecekte, nesnelerin interneti (IoT) ve 5G gibi teknolojilerin entegrasyonu ile tahminlerin doğruluğunun daha da artması beklenmektedir.

Yenilenebilir Enerji Üretim Tahmini

Yenilenebilir enerji kaynakları, doğası gereği belirsizlik taşır. Güneş ve rüzgâr enerjisi üretimi, hava koşullarına bağlı olduğundan, doğru tahminler yapmak sistem güvenilirliği için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, enerji sisteminin verimliliği açısından hayati bir öneme sahiptir.

YAPAY ZEKÂ VE MAKİNE ÖĞRENİMİ

Yapay Zekâ ve Makine Öğrenimi Tanımı

Yapay zekâ, bilgisayar sistemlerinin insan benzeri düşünme ve öğrenme yeteneklerini geliştirmeyi amaçlayan bir alandır. Makine öğrenimi ise, yapay zekâ'nın bir alt dalı olup verilerden öğrenerek kendini geliştirme yeteneğine odaklanır. Enerji tahmin modellerinde yapay zekâ ve makine öğrenimi, büyük veri analizi ve karmaşık ilişkilerin keşfi açısından önemli bir avantaj sunar.

Yapay Zekâ ve Makine Öğrenimi Teknikleri

Enerji tahmin modellerinde yaygın olarak kullanılan yapay zekâ ve makine öğrenimi teknikleri şunlardır:

- Regresyon Analizi: Enerji talebini tahmin etmek için kullanılan temel bir yöntemdir. Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi belirler.
- Zaman Serisi Analizi: Tarihsel verilere dayanarak gelecekteki enerji talebini öngörür. Bu yöntem, mevsimsel ve trend bileşenlerini dikkate alır.
- Yapay Sinir Ağları: Karmaşık ilişkileri öğrenebilme yeteneği ile yüksek doğrulukta tahminler yapar. Özellikle çok katmanlı yapıları sayesinde derin öğrenme uygulamaları için idealdir.
- Destek Vektör Makineleri: Yüksek boyutlu verilerle etkili sonuçlar elde etme potansiyeline sahiptir. Sınıflandırma ve regresyon için yaygın olarak kullanılır.
- Karar Ağaçları ve Random Forest: Verileri sınıflandırma ve tahmin etme amacıyla kullanılır. Random Forest, birçok karar ağacının bir araya gelmesiyle oluşan bir ansambl yöntemidir.

YAPAY ZEKÂNIN ENERJİ TAHMİN MODELLERİNE KATKILARI

Yapay zekâ, enerji tahmin modellerinde doğruluk ve verimliliği artırarak enerji sektörüne önemli katkılar sağlamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken yapısı, üretim ve tüketim tahminlerini karmaşık hale getirirken, yapay zekâ tabanlı modeller bu zorlukları aşmada etkin çözümler sunar. Makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmaları, büyük veri kümele-

rindeki desenleri analiz ederek kısa, orta ve uzun vadeli tahminlerde yüksek performans gösterir.

Güneş ve rüzgâr enerjisi tahmininde meteorolojik veriler, yapay zekâ modelleriyle işlenerek daha hassas sonuçlar elde edilir. Örneğin, yapay sinir ağları (ANN) ve uzun kısa süreli bellek ağları (LSTM), geçmiş verilerden öğrenerek enerji üretim tahminlerini optimize eder. Aynı zamanda, nesnelerin interneti (IoT) cihazlarından gelen gerçek zamanlı veriler, yapay zekâ algoritmalarının sürekli güncellenmesine olanak tanır.

Yapay zekâ, belirsizliklerin yönetiminde probabilistik yaklaşımlar sunarak enerji planlamasını daha güvenilir hale getirir. Bu yöntemler, enerji maliyetlerini düşürmek, karbon emisyonlarını azaltmak ve enerji arz-talep dengesini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Gelecekte, gelişmiş yapay zekâ teknolojilerinin entegrasyonu, enerji sistemlerini daha akıllı ve sürdürülebilir hale getirecektir.

Veri Analizi ve İşleme

Büyük veri setleri, enerji tahmin modellerinin temelini oluşturmaktadır. Yapay zekâ, bu verilerin analiz edilmesinde ve anlamlı bilgilere dönüştürülmesinde büyük kolaylık sağlar. Veri ön işleme adımları (eksik verilerin tamamlanması, anomali tespiti vb.) yapay zekâ teknikleri ile otomatikleştirilebilir.

Veri Kalitesi

Enerji tahminleri, veri kalitesine büyük ölçüde bağımlıdır. Yapay zekâ, verilerin temizlenmesi, düzeltilmesi ve uygun biçimde işlenmesi konusunda yardımcı olur. Eksik verilerin tahmini ve outlier (aykırı) değerlerin tespiti, enerji tahmin modellerinin doğruluğunu artırır.

Veri Zenginleştirme

Veri zenginleştirme, enerji tahmin modellerinin doğruluğunu artırmak için farklı veri kaynaklarının bir araya getirilmesini içerir. Hava durumu verileri, ekonomik göstergeler ve tarihsel tüketim verileri gibi çeşitli veri setleri, yapay zekâ teknikleri ile entegre edilebilir.

Tahmin Doğruluğu

Yapay zekâ, tahmin doğruluğunu artırarak çeşitli sektörlerde karar alma süreçlerini iyileştiren güçlü bir araçtır. Yapay zekâ tabanlı modeller, büyük veri kümelerini analiz ederek, gelecekteki olaylar veya sonuçlarla ilgili daha doğru öngörülerde bulunmayı mümkün kılar. Makine öğrenimi ve derin öğrenme gibi yöntemler, geçmiş verilerden öğrenerek desenleri, eğilimleri ve ilişkileri tanımlar, böylece daha güvenilir tahminler yapılabilir.

Özellikle zaman serisi analizi, finansal piyasa tahminleri, hava durumu

öngörüler ve enerji tüketimi gibi alanlarda yapay zekâ, doğruluk oranlarını önemli ölçüde artırır. Örneğin, LSTM ağları, zamanla değişen verilerdeki bağımlılıkları öğrenerek, gelecekteki olayları daha hassas bir şekilde tahmin edebilir. Ayrıca, yapay zekâ, model doğruluğunu sürekli olarak iyileştiren kendi kendine öğrenme yeteneğine sahiptir, böylece performans zaman içinde artar.

Tahmin doğruluğunun artırılması, risk yönetimi, kaynak tahsisi ve stratejik planlama gibi alanlarda karar vericilere önemli avantajlar sağlar. Yapay zekânın tahmin doğruluğu, sistemlerin esnekliğini ve güvenilirliğini artırarak, daha verimli ve etkili operasyonlar sağlar. Bu da organizasyonların çevresel ve ekonomik hedeflerine ulaşmalarını hızlandırır.

Model Karşılaştırmaları

Yapay zekâ tekniklerinin geleneksel yöntemlerle karşılaştırılması, genellikle daha yüksek başarı oranları ile sonuçlanmaktadır. Örneğin, bir çalışmada yapay sinir ağları kullanılarak yapılan tahminlerin, regresyon analizine göre %15 daha doğru sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Gerçek Zamanlı Tahminler

Yapay zekâ, gerçek zamanlı veri akışlarını analiz ederek anlık tahminler yapma yeteneğine sahiptir. Bu özellik, enerji talep ve arzında anlık değişikliklere hızlı yanıt verme olanağı sunar.

Hız ve Verimlilik

Yapay Zekâ sistemleri, büyük veri setlerini hızla işleyerek anlık tahminler yapma yeteneğine sahiptir. Bu, enerji piyasalarında hızlı karar verme süreçlerini destekler ve sistemlerin verimliliğini artırır.

İşlem Süresi

Yapay zekâ tabanlı sistemler, geleneksel modellere göre çok daha kısa sürede işlem yapabilir. Bu, enerji ticareti ve piyasa analizi gibi alanlarda büyük avantaj sağlar.

Kaynak Yönetimi

Verimlilik, enerji sistemlerinde kaynakların daha etkin bir şekilde yönetilmesi ile doğrudan ilişkilidir. Yapay zekâ ile entegre edilmiş tahmin modelleri, enerji tüketimini optimize ederek maliyetleri düşürebilir.

Dinamik Modeller

Enerji sistemleri dinamik ve karmaşık yapılar olduğundan, yapay zekâ, sürekli öğrenme ve model güncellemeleri sayesinde bu sistemlerin değişen koşullarına uyum sağlamakta etkilidir. Örneğin, hava koşullarındaki değişiklikler veya talep dalgalanmaları yapay zekâ tabanlı modellerle hızlı bir şekilde değerlendirilebilir.

Adaptif Modeller

Yapay zekâ, enerji tahmin modellerini sürekli olarak güncelleyebilme yeteneğine sahiptir. Bu, değişen pazar koşulları ve çevresel faktörlere hızlı bir yanıt sağlar.

Otonom Öğrenme

Yapay zekâ alanında otonom öğrenme, sistemlerin insan müdahalesi olmaksızın kendi kendine öğrenmesini ve karar vermesini ifade eder. Bu yaklaşım, özellikle karmaşık ve dinamik ortamlarda karar alma süreçlerini optimize ederek veri odaklı problemlerin çözümünde güçlü bir araçtır. Otonom öğrenme, genellikle takviyeli öğrenme, derin öğrenme ve çevrim içi öğrenme tekniklerini içerir.

Takviyeli öğrenme, bir ajanın çevresinden gelen ödül veya ceza sinyallerine dayanarak eylemlerini optimize ettiği bir süreçtir. Bu yöntem, robotik, otonom araçlar ve enerji yönetimi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır. Derin öğrenme teknikleri, büyük veri kümelerinden anlamlı özellikler çıkararak otonom sistemlerin daha karmaşık görevleri yerine getirmesini sağlar. Çevrim içi öğrenme ise, sürekli değişen verilere anlık uyum sağlamak için otonom öğrenmenin dinamik bir versiyonudur.

Otonom öğrenme, insan müdahalesini azaltarak sistemlerin daha hızlı, doğru ve esnek çalışmasını sağlar. Özellikle endüstri 4.0, sağlık, finans ve lojistik gibi alanlarda verimliliği artırır. Gelecekte, kuantum hesaplama ve yapay genel zekâ (AGI) ile entegrasyonun, otonom öğrenmenin yeteneklerini daha da ileri taşıması beklenmektedir.

Uygulama Alanları

Yapay zekâ, farklı disiplinlerde karmaşık sorunların çözümüne yönelik yenilikçi çözümler sunarak çok çeşitli alanlarda uygulanmaktadır. Sağlık, finans, eğitim, tarım, ulaşım ve enerji gibi sektörlerde yapay zekâ, verimliliği artırmak ve maliyetleri düşürmek için önemli bir rol oynar.

Sağlık alanında yapay zekâ, hastalıkların teşhisi, kişiselleştirilmiş tedavi ve ilaç geliştirme süreçlerinde kullanılmaktadır. Görüntü işleme ve derin öğrenme teknikleri, radyolojik görüntülerden hastalık tespiti gibi kritik görevlerde üstün başarı sağlamaktadır. Finans sektöründe yapay zekâ, kredi risk analizi, dolandırıcılık tespiti ve algoritmik ticaret gibi uygulamalarda kullanılarak hızlı ve güvenilir sonuçlar sunar.

Eğitimde, yapay zekâ tabanlı kişiselleştirilmiş öğrenme platformları, bireysel ihtiyaçlara göre özelleştirilmiş eğitim içerikleri sunarak öğrencilerin başarısını artırır. Tarımda, yapay zekâ sensör tabanlı izleme ve veri analitiği ile mahsul yönetimi, sulama optimizasyonu ve zararlı kontrolü gibi süreçlerde etkinlik sağlar.

Ulaşımda ise otonom araçlar, trafik yönetimi ve rota optimizasyonu gibi uygulamalar yapay zekâ teknolojileri sayesinde gelişmektedir. Enerji sektöründe, üretim tahmini ve dağıtım yönetimi gibi süreçler yapay zekâ ile daha sürdürülebilir hale gelmiştir.

Gelecekte, yapay zekânın diğer disiplinlerle daha da entegre olması, toplumsal ve endüstriyel dönüşümleri hızlandırarak yaşam kalitesini artıracaktır.

Yenilenebilir Enerji Üretimi

Yapay zekâ, yenilenebilir enerji yönetimini daha verimli ve sürdürülebilir hale getiren güçlü bir araçtır. Yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle güneş ve rüzgâr enerjisi, doğaları gereği değişken ve tahmin edilemez olduğundan, yapay zekâ bu kaynakların entegrasyonu ve optimizasyonunda kritik bir rol oynar. Yapay zekâ tabanlı sistemler, enerji üretimindeki dalgalanmaları analiz ederek, enerji arz ve talebini daha iyi dengeleme imkânı sunar.

Makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmaları, hava durumu verilerini, enerji üretim verilerini ve talep desenlerini analiz ederek, yenilenebilir enerji üretiminin daha doğru bir şekilde tahmin edilmesini sağlar. Bu sayede, şebekedeki dengesizlikler minimize edilir ve enerji santralleri daha verimli çalışır. Ayrıca, enerji depolama sistemleriyle entegre çalışan yapay zekâ, aşırı üretim dönemlerinde enerjiyi depolar, talep düşük olduğunda ise bu enerjiyi serbest bırakır.

Yapay zekâ, enerji verimliliği sağlamanın yanı sıra, yenilenebilir enerji santrallerinin bakım ve arıza tahminlerini de optimize eder. Bu, sistemlerin sürekli olarak yüksek performansla çalışmasını sağlar ve bakım maliyetlerini düşürür. Sonuç olarak, yapay zekânın yenilenebilir enerji yönetimindeki rolü, enerji sektörünün sürdürülebilirliğini artırırken, çevresel etkiyi azaltır ve maliyet verimliliği sağlar.

Rüzgâr Enerjisi Tahmini

Yapay zekâ, rüzgâr enerjisi tahmininde doğruluk ve etkinliği artırarak enerji sektörüne önemli katkılar sağlar. Rüzgâr enerjisinin değişken yapısı, enerji üretimini tahmin etmeyi karmaşık hale getirirken, yapay zekâ tabanlı yöntemler bu zorlukları aşmak için güçlü araçlar sunar.

Rüzgâr enerjisi tahmininde ANN, destek vektör makineleri (SVM) ve LSTM gibi yapay zekâ algoritmaları sıklıkla kullanılır. Bu yöntemler, geçmiş rüzgâr verileri, hava tahmin modelleri, rüzgâr hızı ve yönü gibi değişkenleri analiz ederek kısa, orta ve uzun vadeli tahminler yapar. Özellikle LSTM gibi zaman serisi analizine uygun algoritmalar, rüzgâr üretimindeki dalgalanmaları öngörmede yüksek başarı sağlar.

Yapay zekâ ayrıca, gerçek zamanlı veri işleme ve öngörü kapasitesiyle enerji arz-talep dengesini optimize eder. Sensörler ve IoT cihazlarından elde

edilen anlık veriler, tahmin modellerinin sürekli güncellenmesine olanak tanır. Bu, enerji üretim planlamasının daha güvenilir ve maliyet etkin olmasını sağlar.

Rüzgâr enerjisi tahmininde yapay zekânın kullanımı, yenilenebilir enerji entegrasyonunu hızlandırarak enerji sistemlerinin sürdürülebilirliğine ve karbon emisyonlarının azaltılmasına önemli katkılar sunmaktadır. Gelecekte, daha gelişmiş algoritmalar ve yüksek işlem gücü, bu alandaki potansiyeli daha da artıracaktır.

Güneş Enerjisi Tahmini

Yapay zekâ, güneş enerjisi tahmininde doğruluğu artırarak yenilenebilir enerji sektörüne büyük katkılar sağlamaktadır. Güneş enerjisinin doğası gereği, bulutluluk, sıcaklık ve güneş radyasyonu gibi meteorolojik faktörlere bağımlılığı, enerji üretim tahminlerini karmaşık hale getirir. Yapay zekâ tabanlı modeller, bu değişkenleri analiz ederek enerji üretim süreçlerini optimize eder.

ANN, SVM ve derin öğrenme algoritmaları, güneş enerjisi tahmini için yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. Bu algoritmalar, geçmiş hava durumu verileri ve gerçek zamanlı sensör verileri üzerinde çalışarak kısa, orta ve uzun vadeli tahminlerde yüksek doğruluk sağlar. Özellikle konvolüsyonel sinir ağları (CNN) ve LSTM, güneş radyasyonu ve enerji üretimindeki dalgalanmaları öngörmek için etkili araçlardır.

Yapay zekâ, güneş enerjisi santrallerinde kaynak kullanımını optimize ederken enerji arz-talep dengesini de iyileştirir. IoT cihazları ve bulut bilişim ile entegre çalışan yapay zekâ modelleri, tahmin doğruluğunu sürekli artırır.

Güneş enerjisi tahmininde yapay zekânın kullanımı, enerji maliyetlerini azaltırken sürdürülebilirliği destekler ve karbon emisyonlarını düşürür. Gelecekte, daha gelişmiş yapay zekâ teknolojilerinin bu alanda verimliliği artırması beklenmektedir.

Talep Yönetimi

Enerji talebinin yönetimi, tüketim desenlerini analiz eden yapay zekâ modelleri ile optimize edilebilir. Akıllı şebekeler (smart grids) sayesinde, gerçek zamanlı veri analizi ile talep tahminleri daha etkin bir şekilde yapılabilir.

Talep Tahmin Sistemleri

Talep tahmini, enerji sisteminin en önemli bileşenlerinden biridir. Yapay zekâ destekli sistemler, tüketim verilerini analiz ederek gelecekteki talep tahminlerini yapar.

Dinamik Talep Yönetimi

Akıllı şebekeler, dinamik talep yönetimi sağlayarak enerji arzını optimize eder. Yapay zekâ, bu süreçte önemli bir rol oynar ve enerji dağıtımını optimize eder.

Enerji Fiyatlandırması

Enerji piyasalarında fiyat tahminleri yapmak, yapay zekâ ve makine öğrenimi teknikleri ile mümkün hale gelmiştir. Bu modeller, talep ve arz verilerini dikkate alarak daha doğru fiyat tahminleri sunmaktadır.

Fiyat Tahmin Modelleri

Yapay zekâ, fiyat tahmin modellerinde doğruluk ve etkinliği artırarak finans, enerji, tarım ve perakende gibi sektörlerde önemli katkılar sağlamaktadır. Karmaşık ve dinamik piyasa koşullarında, yapay zekâ tabanlı modeller büyük veri kümelerinden desenleri tanımlayarak gelecekteki fiyat hareketlerini öngörmeye güçlü araçlar sunar.

Makine öğrenimi algoritmaları, zaman serisi analizi ve veri madenciliği teknikleri, fiyat tahmini için yaygın olarak kullanılır. SVM, karar ağaçları ve LSTM gibi yöntemler, piyasa değişkenlerini analiz ederek kısa, orta ve uzun vadeli tahminlerde yüksek performans gösterir. LSTM gibi derin öğrenme algoritmaları, karmaşık zaman serisi verilerinde eğilimleri ve anomalileri etkili bir şekilde yakalar.

Enerji ve tarım sektörlerinde fiyat tahmini, arz-talep dengesi ve dışsal faktörlerin (hava koşulları, politikalar) etkisini dikkate alır. Perakende ve e-ticaret alanında yapay zekâ, tüketici davranışlarını analiz ederek dinamik fiyatlandırma stratejileri geliştirir.

Yapay zekâ tabanlı fiyat tahmin modelleri, risk yönetimini kolaylaştırırken kararlılık ve rekabet avantajı sağlar. Gelecekte, kuantum hesaplama ve daha gelişmiş veri işleme teknikleri, bu modellerin hızını ve doğruluğunu daha da artıracaktır. Bu, daha öngörülebilir ve sürdürülebilir piyasa süreçlerine katkı sağlayacaktır.

Piyasa Analizi

Yapay zekâ, piyasa analizinde büyük veri kümelerini işleyerek hızlı ve doğru öngörüler sunan güçlü bir araçtır. Finans, e-ticaret, tarım ve enerji gibi birçok sektörde, yapay zekâ tabanlı yöntemler karmaşık piyasa dinamiklerini anlamak, eğilimleri öngörmek ve stratejik kararlar almak için kullanılır.

Makine öğrenimi, derin öğrenme ve doğal dil işleme (NLP) gibi yapay zekâ teknikleri, piyasa analizini güçlendiren temel yaklaşımlardır. Makine öğrenimi algoritmaları, geçmiş verilerden öğrenerek fiyat hareketleri, arz-talep dengesi ve tüketici davranışlarını tahmin eder. Derin öğrenme, özellikle

büyük ve karmaşık veri kümelerinde etkili sonuçlar sunarken, NLP finansal raporlar, haberler ve sosyal medya gibi yapılandırılmamış verileri analiz ederek piyasa duyarlılığını ölçer.

Yapay zekâ, risk yönetiminde de kritik bir rol oynar. Portföy optimizasyonu, dolandırıcılık tespiti ve kriz öngörüsü gibi alanlarda yapay zekâ tabanlı analizler, şirketlere daha sağlam stratejiler geliştirme imkânı tanır. Ayrıca, e-ticaret ve perakende sektörlerinde müşteri segmentasyonu ve dinamik fiyatlandırma gibi süreçlerde yapay zekâ, rekabet avantajı sağlar.

Gelecekte, kuantum hesaplama ve gelişmiş yapay zekâ algoritmalarının entegrasyonu, piyasa analizinde doğruluğu artırarak daha öngörülebilir ve sürdürülebilir ekonomik modellerin oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

Enerji Verimliliği

Enerji verimliliği sağlamak için, binalardaki enerji tüketimi yapay zekâ modelleri ile analiz edilebilir. Bu sayede, enerji tasarrufu sağlamak için gerekli önlemler alınabilir.

Akıllı Binalar

Yapay zekâ, akıllı binaların enerji yönetimi, güvenlik, kullanıcı konforu ve sürdürülebilirlik alanlarındaki performansını optimize ederek modern bina teknolojilerinde devrim yaratmaktadır. Akıllı binalar, sensörler ve IoT cihazlarından toplanan verileri işlemek için yapay zekâ tabanlı sistemler kullanarak, çevresel koşullara ve kullanıcı davranışlarına dinamik olarak uyum sağlar.

Yapay zekânın enerji yönetimindeki rolü, enerji tüketim modellerini analiz ederek ısıtma, soğutma ve aydınlatma sistemlerini optimize etmeyi içerir. Makine öğrenimi algoritmaları, geçmiş enerji tüketim verilerini ve hava durumu tahminlerini işleyerek enerji tasarrufu sağlarken, karbon ayak izini azaltır. Ayrıca, otonom kontrol sistemleri, bina içindeki kullanıcıların hareketlerini ve alışkanlıklarını öğrenerek konforu artırır.

Güvenlik alanında yapay zekâ, görüntü işleme ve yüz tanıma teknolojileri ile izinsiz girişleri algılar ve güvenlik ihlallerini hızlı bir şekilde raporlar. NLP tabanlı sistemler, kullanıcıların sesli komutlarla bina sistemlerini kontrol etmesini mümkün kılar.

Yapay zekânın akıllı bina uygulamaları, sürdürülebilir şehirler ve enerji verimliliği açısından kritik bir role sahiptir. Gelecekte, gelişmiş yapay zekâ algoritmalarının ve 5G teknolojisinin entegrasyonu, akıllı binaların daha verimli, çevre dostu ve kullanıcı odaklı hale gelmesini sağlayacaktır.

Enerji Yönetim Sistemleri

Yapay zekâ, enerji yönetim sistemlerinde (EMS) verimliliği artırarak enerji üretimi, dağıtımı ve tüketimini optimize etmek için önemli bir araçtır.

Akıllı enerji sistemleri, sensörler ve IoT cihazları tarafından toplanan büyük veri kümelerini işleyerek enerji tüketim desenlerini analiz eder ve dinamik kararlar alır. Yapay zekâ, enerji talebinin öngörülmesi, kaynakların etkin kullanımı ve sürdürülebilirlik hedeflerinin gerçekleştirilmesi konusunda kritik bir rol oynar.

Makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmaları, geçmiş tüketim verilerinden öğrenerek kısa, orta ve uzun vadeli enerji talep tahminleri yapar. Bu tahminler, enerji üretim ve dağıtım süreçlerini daha verimli hale getirir. Ayrıca, yapay zekâ tabanlı sistemler, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu optimize ederek şebeke kararlılığını artırır. Örneğin, güneş ve rüzgâr enerjisi üretiminin değişkenliği, yapay zekâ modelleriyle yönetilerek enerji arzındaki belirsizlikler azaltılır.

Yapay zekâ ayrıca, enerji tüketiminde gerçek zamanlı optimizasyon sağlar. Bina yönetim sistemlerinde, ısıtma, soğutma ve aydınlatma gibi enerji yoğun sistemler yapay zekâ ile otomatik olarak kontrol edilir. Bu, enerji maliyetlerini düşürürken çevresel sürdürülebilirliğe de katkı sağlar. Gelecekte, daha gelişmiş algoritmalar ve 5G gibi yeni teknolojiler, enerji yönetim sistemlerinin daha verimli ve akıllı hale gelmesini sağlayacaktır.

Gelecek Perspektifleri

Yapay Zekâ ve makine öğreniminin enerji tahmin modellerine olan katkıları, gelecekte daha da önem kazanacaktır. Bu bölümde, gelecekteki gelişmeler ve potansiyel yenilikler üzerinde durulacaktır.

Gelişmiş Algoritmalar

Yapay Zekâ alanındaki sürekli yenilikler, daha gelişmiş algoritmaların ortaya çıkmasına olanak tanıyacaktır. Bu yeni algoritmalar, enerji tahminlerinin doğruluğunu artıracak ve daha karmaşık sistemlerin modellemesini kolaylaştıracaktır.

Derin Öğrenme

Derin öğrenme, yapay zekânın bir alt dalı olarak, çok katmanlı yapay sinir ağları kullanarak veriden anlam çıkarma ve öğrenme süreçlerini otomatikleştirir. Geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerinden farklı olarak, derin öğrenme, büyük veri küme ve karmaşık örüntüleri işleyebilme yeteneği ile öne çıkar. Özellikle görüntü işleme, NLP, ses tanıma ve otonom sistemlerdeki uygulamalarıyla dikkat çeker.

Derin öğrenme algoritmaları, katmanlar arasındaki bağlantılar aracılığıyla verilerdeki gizli özellikleri öğrenir. Bu ağlar, verilerin soyut temsilini oluşturur ve çıktıları optimize etmek için geri yayılım algoritması kullanılır. En bilinen derin öğrenme modelleri arasında konvolüsyonel sinir ağları (CNN) ve LSTM yer alır. CNN, özellikle görsel tanıma ve video analizi gibi

alanlarda başarıyla uygulanırken, LSTM zaman serisi verilerindeki bağımlılıkları anlamada etkilidir.

Derin öğrenme, yapay zekânın performansını büyük ölçüde artırarak, daha karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri modelleme yeteneği sağlar. Ancak, büyük veri ve yüksek hesaplama gücü gereksinimleri, bu teknolojinin yaygın kullanımını sınırlandırmaktadır. Gelecekte, bu kısıtlamaların aşılmasıyla derin öğrenmenin daha geniş uygulama alanlarına yayılması beklenmektedir.

Evrimsel Algoritmalar

Evrimsel algoritmalar, optimizasyon problemlerini çözmede kullanılabilir. Bu tür yöntemler, enerji sistemlerinin verimliliğini artırmak için yararlı olabilir.

Entegre Sistemler

Enerji sistemlerinin entegrasyonu, yapay zekâ tabanlı çözümlerle daha etkin hale gelecektir. Farklı enerji kaynaklarının (yenilenebilir, fosil yakıtlar) yönetimi, yapay zekânın sağladığı analizlerle daha verimli bir şekilde gerçekleştirilebilecektir.

Çoklu Enerji Kaynağı Yönetimi

Farklı enerji kaynaklarının entegre yönetimi, yapay zekâ ile daha etkin hale gelecektir. Bu, enerji arzını optimize ederken, maliyetleri de azaltır.

Akıllı Şebekeler

Yapay zekâ, akıllı şebekelerin (smart grids) yönetiminde enerji üretimi, dağıtım ve tüketimini optimize etmek için güçlü bir araçtır. Akıllı şebekeler, yapay zekâ teknolojilerini kullanarak enerji arz ve talep dengesini etkin bir şekilde sağlar, şebeke verimliliğini artırır ve sürdürülebilir enerji kullanımını teşvik eder. Bu şebekeler, IoT cihazları ve sensörlerden alınan gerçek zamanlı verilerle sürekli olarak güncellenir ve dinamik kararlar alır.

Yapay zekâ tabanlı sistemler, enerji tüketim desenlerini analiz ederek şebeke yükünü optimize eder ve enerji kayıplarını en aza indirir. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, yapay zekâ ile daha verimli hale gelir, çünkü güneş ve rüzgâr enerjisi gibi değişken kaynakların tahminleri daha doğru yapılabilir. Makine öğrenimi ve derin öğrenme algoritmaları, enerji talep tahminlerini, üretim yönetimini ve yük dengelemesini iyileştirir.

Otomatik arıza tespiti ve önleme, yapay zekâ sayesinde hızlı bir şekilde yapılabilir, böylece şebeke güvenliği artırılır. Ayrıca, kullanıcıların enerji tüketim alışkanlıkları izlenerek daha verimli enerji yönetimi stratejileri geliştirilir. Akıllı şebekeler, yapay zekânın gücüyle daha dayanıklı, verimli ve çevre

dostu hale gelerek enerji sistemlerinin sürdürülebilirliğine önemli katkılarda bulunur.

Gerçek Zamanlı Analiz

Gerçek zamanlı veri analizi, enerji tahmin süreçlerinde önemli bir rol oynamaya devam edecektir. Bu sayede, anlık durum değişiklikleri hızlı bir şekilde değerlendirilebilecek ve sistemlerin yanıt verme yeteneği artırılacaktır.

Anlık İzleme Sistemleri

Anlık izleme sistemleri, enerji tüketimini gerçek zamanlı olarak izler. Bu, anlık değişimlere hızlı yanıt verme olanağı sağlar.

Proaktif Yönetim

Yapay zekâ, proaktif yönetim anlayışını yeniden şekillendirerek, organizasyonların gelecekteki olası sorunları tahmin etmelerini ve önceden önlem almalarını sağlar. Proaktif yönetim, geçmiş veriler ve analitik modeller kullanılarak gelecekteki fırsatlar ve riskler hakkında stratejik kararlar almayı hedefler. yapay zekâ, bu süreçte büyük veri analizleri, makine öğrenimi ve NLP gibi tekniklerle önemli katkılar sunar.

Yapay zekâ tabanlı sistemler, organizasyonların faaliyetlerini optimize etmek için veri odaklı kararlar alır. Makine öğrenimi algoritmaları, geçmiş verilere dayanarak eğilimleri ve desenleri analiz eder, böylece potansiyel sorunlar erkenden tespit edilir. Örneğin, üretim süreçlerinde arıza tahmini ve bakım önerileri, çalışan performansında potansiyel iyileştirmeler veya müşteri davranışındaki değişiklikler gibi durumlar önceden öngörülebilir.

Ayrıca, yapay zekâ ile dinamik kaynak yönetimi ve strateji geliştirme daha etkili hale gelir. Organizasyonlar, yapay zekânın sağladığı gerçek zamanlı veri analizi ve tahmin yetenekleriyle, daha esnek ve hızlı tepki verebilir. Yapay zekânın proaktif yönetimde kullanımı, verimliliği artırırken, organizasyonları çevresel değişimlere daha hızlı uyum sağlayan ve sürdürülebilir kararlar alabilen yapılar haline getirir. Bu, uzun vadeli başarı için kritik bir faktördür.

Sürdürülebilirlik ve Çevre

Yapay Zekâ destekli enerji tahmin modelleri, sürdürülebilir enerji çözümlerinin geliştirilmesinde önemli bir araç olacaktır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ve enerji verimliliği konularında daha etkin çözümler sunulabilecektir.

Karbon Ayak İzi Azaltma

Yapay zekâ, karbon ayak izinin izlenmesi, analiz edilmesi ve azaltılmasında önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Yapay zekânın, büyük veri analizi, makine öğrenimi ve optimizasyon tekniklerini kullanarak, organi-

zasyonların ve bireylerin çevresel etkilerini daha doğru bir şekilde ölçmelerini sağlar. Karbon ayak izi, enerji tüketimi, ulaşım, üretim süreçleri ve diğer çevresel faktörler tarafından şekillenir; yapay zekâ, bu faktörleri entegre ederek daha verimli bir analiz sunar.

Yapay zekâ tabanlı sistemler, karbon salınımını izleyerek, enerji tüketim desenlerini ve emisyon kaynaklarını belirler. Bu sayede, enerji verimliliğini artıran stratejiler geliştirilebilir. Örneğin, akıllı binalarda enerji tüketimini optimize etmek, endüstriyel üretim süreçlerinde karbon salınımını azaltmak ve ulaşımında emisyonları minimize etmek için yapay zekâ tabanlı çözümler uygulanabilir. Ayrıca, yapay zekâ yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin kullanılmasını sağlayarak, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltabilir.

Yapay zekâ, karbon ayak izini izleme ve azaltma çabalarında yalnızca çevresel fayda sağlamakla kalmaz, aynı zamanda maliyetleri düşürür ve organizasyonların sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmalarını hızlandırır. Bu teknoloji, gelecekte çevre dostu ve karbon nötr bir ekonomi için kritik bir rol oynamaktadır.

Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu

Yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin bir şekilde entegrasyonu, yapay zekâ ile mümkün olacaktır. Bu, enerji sistemlerinin çevresel etkilerini azaltır.

SONUÇ

Yapay Zekâ ve makine öğrenimi, enerji tahmin modellerinin geliştirilmesinde devrim niteliğinde katkılar sağlamaktadır. Doğru enerji tahminleri, enerji sistemlerinin güvenilirliği ve sürdürülebilirliği için kritik öneme sahiptir. Gelecekte, yapay zekânın enerji alanındaki uygulamalarının artması, daha akıllı ve verimli enerji sistemlerinin ortaya çıkmasına olanak tanıyacaktır. Enerji sektöründe yapay zekânın potansiyelini keşfetmek, sürdürülebilir bir gelecek için önemlidir.

Bu makale, enerji tahmin modellerinde yapay zekâ'nın katkılarını ve uygulamalarını kapsamlı bir şekilde ele alarak hem mevcut durumu hem de gelecekteki potansiyel gelişmeleri incelemektedir.

KAYNAKLAR

- Carnevale, D., Cavaola, M., & Mazzino, A. (2024). A novel AI-assisted forecasting strategy reveals the energy imbalance sign for the day-ahead electricity market. *Energy Reports*, 11, 4115-4126.
- Elsheikh, A. (2022). Bistable morphing composites for energy-harvesting applications. *Polymers*, 14(9), 1893.
- Li, X., Wang, Z., Yang, C., & Bozkurt, A. (2024). An advanced framework for net electricity consumption prediction: Incorporating novel machine learning models and optimization algorithms. *Energy*, 296, 131259.
- Marinakos, V. (2020). Big data for energy management and energy-efficient buildings. *Energies*, 13(7), 1555.
- Moustafa, E. B., Hammad, A. H., & Elsheikh, A. H. (2022). A new optimized artificial neural network model to predict thermal efficiency and water yield of tubular solar still. *Case Studies in Thermal Engineering*, 30, 101750.
- Ngarambe, J., Yun, G. Y., & Santamouris, M. (2020). The use of artificial intelligence (AI) methods in the prediction of thermal comfort in buildings: Energy implications of AI-based thermal comfort controls. *Energy and Buildings*, 211, 109807.
- Pancholi, S. (2014). Solving big data challenges us electric utility industry. PES general meeting presentation,
- Pao, H.-T. (2009). Forecast of electricity consumption and economic growth in Taiwan by state space modeling. *Energy*, 34(11), 1779-1791.
- Shahzad, M., Qadir, A., Ullah, N., Mahmood, Z., Saad, N. M., & Ali, S. S. A. (2022). Optimization of on-grid hybrid renewable energy system: A case study on Azad Jammu and Kashmir. *Sustainability*, 14(10), 5757.
- Szczepaniuk, H., & Szczepaniuk, E. K. (2022). Applications of artificial intelligence algorithms in the energy sector. *Energies*, 16(1), 347.
- Tutun, S., Chou, C.-A., & Canıylmaz, E. (2015). A new forecasting framework for volatile behavior in net electricity consumption: A case study in Turkey. *Energy*, 93, 2406-2422.
- Wang, X., Wang, H., Bhandari, B., & Cheng, L. (2024). AI-empowered methods for smart energy consumption: A review of load forecasting, anomaly detection and demand response. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 11(3), 963-993.
- WECTNC. (2000). World Energy Council Turkish National Committee. In.
- Xie, N.-m., Yuan, C.-q., & Yang, Y.-j. (2015). Forecasting China's energy demand and self-sufficiency rate by grey forecasting model and Markov model. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 66, 1-8.



GELECEĞİN ENERJİ SİSTEMLERİ: ENERJİ DEPOLAMA VE AKILLI ŞEBEKELER

“ ”

Büşra DURMAZ¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü. ORCID NO: 0000-0001-6659-1067

GİRİŞ

Küresel enerji sistemleri, iklim değişikliğiyle mücadele ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda, fosil yakıtlara olan tarihsel bağımlılıktan yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru köklü bir dönüşüm yaşamaktadır. Bu geçiş, enerji üretiminin merkezi ve tek yönlü yapısından, çok yönlü bir modele doğru geçişi temsil etmektedir. Ancak, bu geçişin en büyük zorluğu, güneş ve rüzgar enerjisinin doğasında bulunan değişkenliktir. Bu kaynaklar, enerji ürettikleri zaman değil, hava koşullarının elverdiği ölçüde üretim yaptıkları için, elektrik şebekesinde ciddi operasyonel dengesizliklere yol açabilmekte, bu da şebekenin güvenilirliğini ve istikrarını tehdit etmektedir. Bu kritik zorluğun üstesinden gelmek için, enerji depolama teknolojileri, bu dönüşümün başarısı için vazgeçilmez bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Enerji depolama, fazla enerjinin üretildiği dönemlerde depolanarak, talebin yüksek veya üretimin düşük olduğu zamanlarda kullanılmasını sağlayarak, yenilenebilir enerjiden elde edilen gücü yönetilebilir, tahmin edilebilir ve dağıtılabilir bir kaynak haline getirmektedir. Bu sayede, yenilenebilir kaynakların entegrasyonu yalnızca çevresel bir hedef olmaktan çıkıp, teknik ve ekonomik olarak uygulanabilir bir stratejiye dönüşmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından yayımlanan raporlar, enerji depolamanın, şebeke esnekliğini artırmada ve enerji geçişini hızlandırmada oynadığı kritik rolü vurgulamaktadır (IEA, 2023).

Enerji depolama sistemleri, modern enerji şebekelerinin temel bileşenleri olan akıllı sayaçlar, gerçek zamanlı veri analizi ve otomasyon teknolojileriyle birleşerek, enerji akışının optimize edilmesini mümkün kılmaktadır. Roberts ve Sandberg'in (2011) de belirttiği gibi, enerji depolama, akıllı şebekelerin gelişiminde temel bir unsurdur ve frekans regülasyonu, voltaj kontrolü ve tepe talep yönetimi gibi çeşitli şebeke hizmetlerini sağlar. Bu entegrasyon, yalnızca enerji verimliliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda güç kalitesini de iyileştirir. Arun ve ark. (2025) tarafından yapılan son araştırmalar, enerji depolama sistemlerinin ve akıllı şebekelerin entegrasyonunun, gelecekteki enerji sürdürülebilirliği için güvenilir kentsel güç yönetimini nasıl sağladığını göstermektedir. Bu bölümde ele alacağımız konular, sadece lityum-iyon bataryalar gibi en yaygın çözümlerle sınırlı kalmayacak; pompalanmış hidro depolama, sıkıştırılmış hava ve termal depolama gibi diğer mekanik ve kimyasal sistemleri de kapsayacaktır. Sonuç olarak, bu çalışma, enerji depolama sistemlerinin yalnızca yenilenebilir enerji devriminin bir tamamlayıcısı değil, aynı zamanda kararlı, verimli ve esnek bir enerji altyapısı kurmanın anahtarı olduğunu ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Enerji Depolama Teknolojilerindeki Çeşitlilik

Enerji depolama sistemleri, kullandıkları teknolojiye ve depolama süresine göre temel olarak kimyasal (elektrokimyasal), mekanik ve termal olmak üzere üç ana kategoriye ayrılır. Bu çeşitlilik, her bir teknolojinin farklı şebeke

ihtiyaçlarına ve coğrafi koşullara uyum sağlamasını mümkün kılmaktadır.

Batarya teknolojileri, özellikle elektrikli araçlar ve şebeke ölçekli depolama projelerinde en hızlı büyüyen alanı temsil etmektedir. Lityum-iyon bataryalar, yüksek enerji yoğunlukları, verimlilikleri ve düşük maliyetleri sayesinde bu alana öncülük etmektedir. Ancak, lityumun sınırlı kaynak olması ve bazı güvenlik riskleri, bilim insanlarını alternatif çözümler aramaya yönlendirmiştir. Bu arayış sonucunda sodyum-iyon, katı hal (solid-state) ve akışlı bataryalar (flow batteries) gibi yeni nesil batarya teknolojileri geliştirilmektedir. Vedhanarayanan ve Seetha Lakshmi'nin (2024) belirttiği gibi, bu teknolojiler, maliyet etkinliği, çevresel sürdürülebilirlik ve güvenlik açısından lityum-iyon bataryalara kıyasla potansiyel avantajlar sunmaktadır. Örneğin, sodyum-iyon bataryalar, lityuma göre daha bol ve ucuz bir hammadde kullanmaları nedeniyle, özellikle büyük ölçekli ve sabit depolama uygulamaları için cazip bir alternatif haline gelmiştir.

Mekanik depolama sistemleri, enerjiyi kinetik veya potansiyel enerji formunda depolar ve bu sistem en eski enerji depolama yöntemlerinden biridir. Pompalanmış hidro depolama (PHS), küresel ölçekte kurulu en yaygın ve en büyük enerji depolama teknolojisidir. PHS, fazla elektriği suyu daha yüksek bir rakımdaki rezervuara pompalamak için kullanır ve talep arttığında bu suyu serbest bırakarak türbinlerden elektrik üretir. Rehman ve arkadaşlarının (2015) kapsamlı teknolojik incelemesinde belirtildiği gibi, PHS sistemleri, yüksek verimlilikleri ve onlarca yıllık uzun operasyonel ömürleri sayesinde şebeke kararlılığı için önemli bir sistemdir. Diğer bir önemli mekanik depolama sistemi olan sıkıştırılmış hava enerji depolama (CAES) ise, fazla elektriği havayı yeraltı mağaralarında veya özel tanklarda sıkıştırmak için kullanır. Gerektiğinde bu sıkıştırılmış hava, türbinleri çalıştırarak elektrik üretir. Hameer ve Van Niekerk'in (2015) belirttiği gibi, büyük ölçekli mekanik enerji depolama sistemleri, şebeke ölçeğinde enerji yönetimi için ideal çözümler sunmaktadır.

Termal enerji depolama (TES), enerjiyi ısı veya soğuk formunda depolar ve yoğunlukla endüstriyel süreçlerde veya ısıtma/soğutma uygulamalarında kullanılır. Ancak, son dönemde elektrik şebekesi entegrasyonu için de potansiyel göstermektedir. Güneş enerjisi santrallerinde erimiş tuz gibi maddeler kullanılarak elde edilen ısıнын depolanması, elektriğin günün her saati üretilmesini sağlayarak yenilenebilir enerjinin sürekliliğini artırır. Sarbu ve Sebarchievici'nin (2018) kapsamlı incelemesinde belirtildiği gibi, termal enerji depolama sistemleri, yüksek sıcaklıkta buhar veya gaz üreterek geleneksel elektrik santrallerine entegre edilebilir ve şebeke esnekliğine katkıda bulunabilir. Bu çeşitlilik, enerji depolamanın, tek bir teknolojiye bağlı kalmadan, farklı ölçeklerde ve farklı uygulamalarda enerji geçişini destekleyebileceğini göstermektedir.

Enerji Depolamanın Şebeke Entegrasyonundaki Rolü

Enerji depolama teknolojilerinin yaygınlaşması, modern elektrik şebekelerinin tasarım ve işletim şeklini kökten değiştirmektedir. Geleneksel olarak, elektrik üretimi anlık talebe göre ayarlanırken, rüzgar ve güneş gibi değişken kaynakların artan payı, şebekeyi sürekli bir dengesizlik riskiyle karşı karşıya bırakmaktadır. Enerji depolama sistemleri, bu soruna teknik ve ekonomik olarak en uygun çözümü sunar. Bu sistemler, şebeke operatörlerine, elektrik akışını gerçek zamanlı olarak yönetme ve şebeke istikrarını koruma esnekliği sağlar.

Enerji depolamanın şebeke üzerindeki en önemli işlevlerinden biri, tepe talep yönetimidir. Elektrik talebinin en yüksek olduğu saatlerde, enerji depolama sistemleri depoladıkları elektriği serbest bırakarak pahalı ve genellikle fosil yakıtla çalışan santrallerin devreye girmesine gerek kalmadan talebi karşılar. Bu durum, sadece operasyonel maliyetleri düşürmekle kalmaz, aynı zamanda şebekedeki karbon emisyonlarını da azaltır. Şebeke entegrasyonunun bir diğer kritik yönü ise frekans regülasyonu ve güç kalitesi hizmetleridir. Yenilenebilir kaynaklardaki anlık dalgalanmalar, şebeke frekansında bozulmalara yol açabilir. Batarya depolama sistemleri gibi teknolojiler, çok hızlı tepki süreleri sayesinde bu frekans değişimlerini anında dengeleyebilir, böylece şebekenin sağlığını ve bağlı cihazların güvenliğini sağlar. Bu özellik, enerji depolamayı yalnızca bir enerji kaynağı değil, aynı zamanda hayati bir şebeke altyapısı bileşeni haline getirmektedir.

Enerji depolama, aynı zamanda elektrik şebekesinin esnekliğini ve direncini de artırır. Fırtınalar veya doğal afetler gibi durumlarda, merkezi elektrik üretimi kesintiye uğrayabilir. Dağıtık enerji depolama sistemleri, kritik altyapıya (hastaneler, acil durum merkezleri vb.) kesintisiz güç sağlayarak şebekenin dayanıklılığını artırır. Ayrıca, bu sistemler, özellikle uzak bölgelerdeki şebeke ağlarının güçlendirilmesine gerek kalmadan yenilenebilir enerji kaynaklarının dağıtımını kolaylaştırır. Bu yaklaşım, pahalı ve zaman alıcı altyapı yatırımlarına alternatif bir çözüm sunarak, enerji geçişini hızlandırır ve maliyetleri düşürür.

Enerji Depolamanın Ekonomik ve Politik Yönleri

Enerji depolama teknolojilerinin yaygınlaşması, sadece teknik bir sorun olmaktan öte, ekonomik ve politik düzenlemelerle yakından ilişkili bir süreçtir. Bu sistemlerin geniş ölçekli entegrasyonu, yatırım maliyetlerinin düşmesi ve çeşitli şebeke hizmetlerinden gelir elde etme potansiyeli sayesinde mümkün hale gelmektedir. Enerji depolama projelerinin ekonomik fizibilitesi, genellikle Depolamanın Seviyelendirilmiş Maliyeti (LCOS) adı verilen bir metrikle değerlendirilir. LCOS, depolama sisteminin ömrü boyunca ortaya çıkan toplam maliyetlerin (yatırım, işletme ve bakım) depolanan ve serbest bırakılan enerji miktarına bölünmesiyle hesaplanır. Hoppmann ve arkadaşlarının (2014) konut tipi fotovoltaik sistemler için yaptığı inceleme ve simülasyon çalışmaları,

depolama sistemlerinin ekonomik getirisinin, özellikle şebeke elektrik fiyatlarının yüksek olduğu bölgelerde, doğrudan güneş enerjisi tüketimini artırarak sağlanan tasarrufla ilişkili olduğunu göstermektedir.

Enerji depolamanın piyasa entegrasyonu, genellikle uygun politika ve düzenleyici çerçevelerin varlığına bağlıdır. Hükümetler ve düzenleyici kurumlar, depolama sistemlerinin şebeke hizmetlerine katılımını teşvik eden politikalar geliştirerek, bu teknolojinin yaygınlaşmasını hızlandırmaktadır. Bu politikalar arasında, enerji depolama projelerine yönelik vergi indirimleri, sübvansiyonlar ve performans bazlı ödemeler yer almaktadır (Zakeri ve Syri, 2015). Örneğin, frekans regülasyonu gibi şebeke dengeleme hizmetleri için belirlenen özel tarifeler, depolama sistemlerinin gelir modelini güçlendirir ve daha fazla yatırım çekilmesini sağlar. Ayrıca, karbon vergileri ve yenilenebilir enerji hedefleri gibi çevresel politikalarda, enerji depolamayı yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birlikte daha rekabetçi hale getirir.

Enerji depolamanın geleceği, sadece teknolojik ilerlemelerle değil, aynı zamanda bu teknolojilerin ekonomik olarak ne kadar uygun hale geleceğiyle de yakından ilişkilidir. Kamuya açık ve şeffaf piyasa mekanizmaları, enerji depolamanın sunduğu çok yönlü faydaların (enerji arbitrajı, şebeke yedeklemesi, iletim ağı sıkışıklığını giderme) ekonomik değerini ortaya çıkararak, bu alandaki büyümeyi destekler.

Enerji Depolama Sistemlerinde İleri Seviye Optimizasyon ve Yapay Zeka Uygulamaları

Enerji depolama sistemlerinin fiziksel kapasiteleri ne kadar artarsa artsın, bu sistemlerin potansiyelini tam olarak kullanmak, karmaşık operasyonel kararlar ve gerçek zamanlı yönetim becerisi gerektirir. İşte bu noktada yapay zeka (YZ) ve ileri düzey optimizasyon algoritmaları devreye girerek, enerji depolamayı basit bir depolama ünitesinden, akıllı ve dinamik bir şebeke varlığına dönüştürmektedir. YZ, enerji sistemlerinin geleceğini şekillendiren en önemli unsurlardan biri olarak kabul edilmektedir.

Yapay zeka, öncelikle enerji sistemlerinin öngörülebilirliğini artırarak depolama stratejilerini geliştirir. Gelişmiş YZ modelleri, geçmiş enerji tüketim verilerini, hava durumu tahminlerini ve elektrik piyasasındaki anlık fiyat sinyallerini analiz ederek, bir şebekenin veya bir tesisin gelecekteki enerji talebini yüksek doğrulukla tahmin edebilir. Bu tahminler sayesinde, depolama sistemleri en ekonomik ve verimli şekilde ne zaman şarj olacaklarını ve ne zaman deşarj olacaklarını planlayabilir. Örneğin, bir YZ algoritması, ertesi gün rüzgar üretiminin düşeceğini veya güneşli havanın yerini bulutlu bir güne bırakacağını önceden tahmin ederek, bataryaların o gün için fazladan şarj edilmesini sağlayabilir ve böylece olası bir enerji açığını kapatabilir. Bu proaktif yaklaşım, şebeke operatörlerinin ani piyasa dalgalanmalarına veya enerji kıtlığına karşı hazırlıklı olmasını sağlar.

Öngörü yeteneğinin ötesinde, yapay zeka algoritmaları enerji depolama sistemlerinin anlık operasyonlarını optimize eder. Modern bir akıllı şebekede, enerji depolama ünitesi, yalnızca ucuzken depolama ve pahalıyken salma gibi basit bir kurala bağlı kalmaz. Bunun yerine, YZ algoritmaları, mevcut şebeke frekansını, voltaj seviyelerini, iletim hatlarındaki yükü ve hatta bağlı diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının anlık üretimini analiz ederek, saniyelik kararlarla en doğru şarj veya deşarj aksiyonunu belirleyebilir. Bu dinamik optimizasyon, enerji depolamanın şebeke için en yüksek katma değeri yaratmasını sağlar ve sistemin genel verimliliğini maksimize eder. YZ, ayrıca batarya hücrelerinin sağlığını sürekli olarak izleyerek ve şarj/deşarj döngülerini optimize ederek, bataryaların ömrünü uzatmada da kritik bir rol oynar. Bu durum, depolama sistemlerinin ekonomik getirisini artırır ve uzun vadeli sürdürülebilirliğini sağlar.

Enerji depolamanın geleceği, yapay zeka ve makine öğrenmesinin entegrasyonu ile daha da dağıtık hale gelmektedir. Akıllı ev sistemleri, elektrikli araç şarj istasyonları ve endüstriyel tesislerdeki küçük ölçekli batarya depolama üniteleri, merkezi bir sistem tarafından yönetilen sanal santraller (virtual power plants) olarak bir araya getirilebilir. Yapay zeka, bu çok sayıda dağıtık depolama varlığını tek bir bütün olarak yöneterek, bölgesel veya ulusal şebeke ihtiyaçlarına yanıt vermelerini sağlar. Bu yaklaşım, pahalı ve merkezi enerji altyapısı yatırımlarına olan ihtiyacı azaltarak, daha esnek, dayanıklı ve verimli bir enerji ekosistemi oluşturmaya yolunu açmaktadır. Yapay zeka, enerji depolama sistemlerini pasif birer depodan, enerji geçişinin akıllı ve proaktif bir anahtarına dönüştürmektedir.

Enerji Depolamanın Çevresel ve Sosyal Etkileri

Enerji depolama teknolojileri, karbon emisyonlarını azaltma hedefine hizmet etse de, bu sistemlerin kendi çevresel ve sosyal ayak izleri de dikkate alınması gereken önemli bir konudur. Özellikle lityum-iyon bataryaların üretiminde kullanılan lityum, kobalt ve nikel gibi kritik hammaddelerin çıkarılması, ciddi çevresel ve sosyal sorunları beraberinde getirmektedir. Lityum madenciliği, özellikle tuzlu su havzalarında, büyük miktarda su tüketimi ve yerel ekosistemler üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Bu durum, enerji depolamanın temiz enerji geçişine katkısını sorgulamak yerine, üretim ve tedarik zincirindeki etik standartların ve çevresel düzenlemelerin önemini bir kez daha gündeme getirmektedir.

Bataryaların çevresel etkisi, sadece üretim aşamasıyla sınırlı değildir; ömürlerinin sonuna geldiklerinde nasıl yönetildikleri de kritik öneme sahiptir. Kullanılmış bataryaların geri dönüşümü, değerli metallerin yeniden kazanılmasını ve toksik kimyasalların çevreye salınımının önlenmesini sağlamak için hayati bir süreçtir. Ancak, küresel batarya geri dönüşüm altyapısı henüz yeni nesil bataryaların hızla artan hacmine ayak uyduramamaktadır. Bu, özellikle

pil ömrünü tamamlamış elektrikli araç bataryalarının atık yönetimi konusunda gelecekte önemli bir zorluk oluşturabilir. Bu sorunun çözümü, daha verimli geri dönüşüm teknolojilerinin geliştirilmesine ve döngüsel ekonomiyi teşvik eden politikaların oluşturulmasına bağlıdır.

Ayrıca, büyük ölçekli enerji depolama tesislerinin inşası, arazi kullanımı ve yerel topluluklar üzerindeki etkileri de beraberinde getirebilir. Pompalı hidro enerji depolama sistemleri, büyük rezervuarların inşasını gerektirerek doğal habitatları ve tarım arazilerini değiştirebilir. Batarya depolama tesisleri ise daha az arazi kullansa da, yangın riski gibi güvenlik endişeleri, bu tesislerin yerleşim yerlerinin yakınında inşa edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu sosyal ve çevresel zorluklar, enerji depolama çözümlerinin planlanmasında, topluluk katılımı ve çevresel etki değerlendirmelerinin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, enerji depolama, yalnızca teknik ve ekonomik faydalarıyla değil, aynı zamanda tüm yaşam döngüsü boyunca sürdürülebilirlik ilkelerine bağlı kalarak değerlendirilmelidir.

Enerji Depolama Sistemlerinde Gelecek Trendler ve İnovasyonlar

Enerji depolama sektörü, teknolojinin ve piyasanın sürekli evrimiyle dinamik bir yapıya sahiptir. Geleceğin enerji depolama sistemleri, sadece bugünün sorunlarına çözüm bulmakla kalmayacak, aynı zamanda enerji altyapısını dönüştürecek yeni trendlere ve inovasyonlara öncülük edecektir. Bu dönüşümün en önemli özelliklerinden biri, uzun süreli enerji depolama (long-duration energy storage - LDES) teknolojileridir. LDES sistemleri, saatler yerine günler, hatta haftalar boyunca enerji depolayarak, mevsimsel ve uzun süreli yenilenebilir enerji boşluklarını doldurmayı hedefler. Sıkıştırılmış hava, sıvı hava, gravitasyonel (yerçekimi tabanlı) depolama ve daha gelişmiş akışlı batarya sistemleri bu alandaki başlıca yeniliklerdir. Bu teknolojiler, lityum-iyon bataryaların kısa ve orta vadeli depolama rollerini tamamlarken, enerji sistemlerinin daha sağlam ve esnek olmasını sağlayacaktır.

İnovasyon, aynı zamanda batarya kimyasının ötesine geçerek, malzemelerin sürdürülebilirliğine odaklanmaktadır. Lityum-iyon bataryalardaki kritik minerallere (kobalt, nikel) olan bağımlılığı azaltmak için, sodyum-iyon ve çinko tabanlı bataryalar gibi daha ucuz ve bol bulunan ham maddeleri kullanan yeni nesil teknolojiler hızla gelişmektedir. Bu yenilikler, sadece batarya maliyetlerini düşürmekle kalmayacak, aynı zamanda tedarik zincirindeki jeopolitik riskleri de azaltacaktır. Öte yandan, katı hal bataryaları, lityum-iyon bataryaların sıvı elektrolit kaynaklı güvenlik risklerini ortadan kaldırarak daha güvenli ve daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip çözümler sunma potansiyeli taşımaktadır.

Gelecekteki bir diğer önemli trend ise, enerji depolamanın Hibrit Enerji Sistemleri ile entegrasyonudur. Bu, rüzgâr ve güneş santrallerinin yanına entegre edilmiş batarya depolama üniteleriyle sınırlı kalmayacak, aynı zamanda

nükleer, hidroelektrik veya jeotermal gibi baz yük kaynaklarıyla depolama sistemlerinin bir araya getirilmesini içerecektir. Bu hibrit sistemler, farklı kaynakların güçlü yönlerini birleştirerek hem temiz hem de kesintisiz enerji üretimini garanti altına alacaktır. Son olarak, enerji depolamanın yaygınlaşması, evlerde ve iş yerlerinde kurulacak küçük ölçekli depolama sistemlerinin, merkezi olarak yönetilen sanal güç santralleri olarak çalışmasını sağlayacak ve enerji piyasalarında yeni iş modellerinin ortaya çıkmasına zemin hazırlayacaktır.

SONUÇ

Enerji depolama teknolojilerinin modern enerji sistemlerinin vazgeçilmez bir parçası olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Elektrik şebekelerinin fosil yakıtlara olan bağımlılıktan yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru evrilmesi sürecinde, enerji depolama, doğal kaynakların doğasında bulunan değişkenliği yönetebilen kritik bir köprü görevi görmektedir. Farklı teknolojiler (batarya, mekanik, termal) sayesinde, bu çözümler enerji depolamayı tek bir teknolojiye bağlı kalmadan, farklı ölçeklerde ve uygulamalarda mümkün kılmaktadır.

Enerji depolamanın şebeke üzerindeki rolü, sadece fazla enerjiyi depolamakla sınırlı değildir; aynı zamanda, tepe talep yönetimini sağlayarak, pahalı santrallerin devreye girmesini önlemekte, frekans regülasyonu gibi şebeke hizmetlerini sunarak güç kalitesini artırmakta ve şebekenin direncini güçlendirmektedir. Ekonomik olarak da, depolama sistemlerinin maliyetleri düşmeye devam ederken, sağladıkları çok yönlü faydalar (enerji arbitrajı, şebeke yedeklemesi vb.) yatırımcılar için giderek daha çekici hale gelmektedir.

Sonuç olarak, enerji depolama sistemleri, yalnızca yenilenebilir enerji devriminin bir tamamlayıcısı değil, aynı zamanda kararlı, verimli ve esnek bir enerji altyapısı kurmanın anahtarıdır. Geleceğin enerji sistemleri, dağıtık, akıllı ve her şeyden önce depolama çözümleriyle güçlendirilmiş sistemler olacaktır. Bu teknolojinin potansiyelini tam olarak gerçekleştirmek için, inovasyonları destekleyen politikalar, doğru piyasa mekanizmaları ve kamu-özel sektör işbirlikleri kritik önem taşımaktadır. Enerji depolama, enerji güvenliği ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için tek başına yeterli olmasa da, yenilenebilir kaynaklarla birlikte çalışarak enerji geçişini hızlandırmanın en önemli yollarından biridir.

KAYNAKLAR

- Arun, M., Samal, S., Barik, D., Chandran, S. S., Tudu, K., & Praveenkumar, S. (2025). Integration of energy storage systems and grid modernization for reliable urban power management toward future energy sustainability. *Journal of Energy Storage*, 114, 115830. doi:10.1016/j.est.2025.115830
- Durmaz, B. (2019). Yüksek mertebeden 1. tip Chebyshev polinomları yaklaşımı ile tek hızlı nötronlar için dilim geometride difüzyon mesafesi hesaplanması (Yayınlanmamış yüksek lisans tezi). Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmaniye.
- Durmaz, B. (2023). Nükleer reaktörlerde enerji üretimi ve Türkiye'deki nükleer gelişim. O. Örnek & M. Özdoğan (Ed.), *Fen mühendislik bilimlerinde güncel gelişmeler* (s. 290). Ankara, Türkiye.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2016). Türkiye'nin nükleer santral projeleri (Nükleer Enerji Proje Uygulama Dairesi Yayın Serisi).
- Hameer, S., & Van Niekerk, J. L. (2015). A review of large-scale electrical energy storage. *International Journal of Energy Research*, 39(9), 1179-1195. doi:10.1002/er.3294
- Hoppmann, J., Volland, J., Schmidt, T. S., & Hoffmann, V. H. (2013). The economic viability of battery storage for residential solar photovoltaic systems—A review and a scenario-based optimization model. In *The role of deployment policies in fostering innovation for clean energy technologies—Insights from the solar photovoltaic industry* (p. 180). doi:10.1016/j.rser.2014.07.068
- IEA. (2023). Energy storage: A key enabler of clean energy transitions. IEA Publications.
- Muray, L. R., & Holbert, K. E. (2015). Nükleer süreçlerin kavramları, sistemleri ve uygulamalarına giriş (A. H. Yılmaz, A. Aydın, T. Bayram, S. Akkoyun, & A. A. Billur, Çev. Ed.). Nobel Yayıncılık.
- Nükleer Enerji Dünyası. (2017). Erişim adresi: <http://www.nukleer.web.tr/index.html>
- Rehman, S., Al-Hadhrani, L. M., & Alam, M. M. (2015). Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 586-598. doi:10.1016/j.rser.2014.12.040
- Roberts, B. P., & Sandberg, C. (2011). The role of energy storage in development of smart grids. *Proceedings of the IEEE*, 99(6), 1139-1144. doi:10.1109/JPROC.2011.2116752
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2018). A comprehensive review of thermal energy storage. *Sustainability*, 10(1), 191. doi:10.3390/su10010191
- Vedhanarayanan, B., & Seetha Lakshmi, K. C. (2024). Beyond lithium-ion: emerging frontiers in next-generation battery technologies. *Frontiers in Batteries and Electrochemistry*, 3, 1377192. doi:10.3389/fbael.2024.1377192

Zakeri, B., & Syri, S. (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 569-596. doi:10.1016/j.rser.2014.10.011



YENİLENEBİLİR ENERJİNİN TOPLUMSAL ETKİLERİ VE İŞBİRLİĞİ

“ ”

Büşra DURMAZ¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi., Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Makine Mühendisliği Bölümü. ORCID NO: 0000-0001-6659-1067

GİRİŞ

Enerji, toplumların ekonomik kalkınması için ve çevre sorunları için temel adımlardır biridir (Dincer, 2000). Sanayileşme, kentleşme ve teknolojik gelişmeler, nüfus artışı enerjiye olan talebin sürekli artmasına sebep olmuştur. Bu artışlar fosil yakıt kullanımının da artmasına neden olmuştur (Szarka, 2004). Ancak fosil yakıtların yaygın kullanımı, karbon salınımını artırmış ve bunun beraberinde küresel iklim değişikliğinin de hızlandırmıştır. Ayrıca fosil yakıtların yaygın kullanımı hava kirliliği, su kaynaklarının kirlenmesi ve ekosistem tahribatı gibi çevresel sorunları beraberinde getirmiştir. Tüm bunlara ek olarak, fosil yakıtlara olan bağımlılık, enerji arz güvenliği konusunda da riskleride beraberinde getirmiş ve birçok ülke dışa bağımlı hale gelmiştir. Bu nedenle, temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelmek, hem çevresel hem de ekonomik ve stratejik bir gereklilik haline gelmiştir (Szarka, 2004).

Yenilenebilir enerji kaynakları ise, fosil yakıtlara alternatif kaynak olarak çevresel sürdürülebilirliği desteklerken, aynı zamanda enerji arz güvenliğini güçlendiren ve ekonomik kalkınmayı teşvik etmektedir (Aykal vd., 2009). Güneş, rüzgâr, biyokütle, hidroelektrik ve jeotermal enerji gibi yenilenebilir kaynaklar, fosil yakıtların yanı sıra daha temiz ve yenilenebilir bir enerji geleceği inşa etmeye olanak tanımaktadır. Bu dönüşüm, yeni teknolojilerin geliştirilmesi, enerji verimliliğinin artırılması ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılması açısından büyük fırsatlar yaratmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları ülkelerde temel enerji kaynağı olarak aktif olarak kullanılmaktadır. Ulusal ve uluslararası birçok şirket, bu kaynaklara yatırım yapmaya devam ederken, devletler de temiz enerji üretmek için belli başlı yatırımlar yapmaktadır (Arslan ve ark, 2017).

Yenilenebilir enerji kaynakları ve teknolojinin kullanımı sürdürülebilir sistemlerinin başarılı bir şekilde hayata geçirilmesi, yalnızca teknolojik ilerlemeye değil, aynı zamanda toplumun tüm kesimlerinin bu sürece dâhil edilmesiyle de mümkündür (Dincer, 2007). Yenilenebilir enerjiye geçiş, yeni istihdam alanları oluşturarak ekonomik kalkınmayı teşvik eder, enerjiye erişimi genişleterek yerel toplulukların güçlenmesine katkıda bulunur. Bu süreçte, hükümetlerin ilerleyici politikaları, özel sektörün yatırımları, akademik dünyada yapılan araştırmalar, sivil toplum kuruluşlarının bilinçlendirme faaliyetleri ve bireylerin enerji tüketim alışkanlıklarındaki değişiklikler kritik bir rol oynamaktadır.

Yenilenebilir Enerjinin Toplumsal Dönüşüme Etkileri

Enerjiye Erişim

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, enerji maliyetlerini düşürerek enerjiyi daha uygun hale getirir ve böylelikle enerjiye erişim noktasında

sıkıntı yaşayan az gelişmiş ülkelerde ve bu ülkelerdeki hanelerde çok daha uygun fiyatlarla erişmesini sağlamaktadır. Fosil yakıtlara bağımlı olan ülkelere, yakıt maliyetleri genellikle değişken ve yüksek olurken, güneş ve rüzgâr enerjisi gibi kaynaklar uzun vadede daha ekonomik ve sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Enerjiye erişimin artması ile birlikte, eğitim, sağlık ve birçok alandaki hizmetlerde de önemli iyileştirmeleri beraberinde getirmektedir. Bunu bir örnek ile ifade etmek gerekirse, elektrikle çalışan tıbbi ekipmanların kullanılabilmesi, sağlık hizmetlerinin kalitesini artırarak hastalıklarla mücadelede önemli bir avantaj sağlar.

Enerji dönüşüm politikalarının düzenli bir şekilde gerçekleştirilmesi için, politikaların ve enerji alanında yapılan yatırımların sosyal boyutunda tüm bunların yanında göz önünde bulundurulmalıdır. Yenilenebilir enerji projelerinin uygulanmasında yerel halkın sürece dahil edilmesi, toplumun bu dönüşümden doğrudan faydalanmasını sağlar. Ayrıca, enerjiye erişim politikalarının yalnızca teknik çözümler ile sınırlı kalmayıp, sürdürülebilir kalkınma kapsamında, sosyo-ekonomik eşitsizlikleri gidermeye yönelik kapsayıcı bir bakış açısıyla ele alınması gerekmektedir (Çevik, 2010). Bu doğrultuda, yenilenebilir enerjiye dayalı çözümler, sadece çevresel sürdürülebilirliği değil, aynı zamanda sosyal adaletin sağlanmasını da destekleyen temel unsurlardan biri olarak ön plana çıkmaktadır.

İstihdam Olanakları ve Ekonomik Büyüme

Yenilenebilir enerji sektörü birçok alanda istihdam sağlamaktadır. Teknik uzmanlığın aktif olarak görev almasının yanı sıra, eğitim, danışmanlık, finans, lojistik ve kamu politikaları gibi alanlarda da geniş bir iş alanı yaratır. Örneğin, enerji verimliliği danışmanları, proje yöneticileri ve çevre mühendisleri gibi meslek grupları, sürdürülebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesi ve uygulanmasında kritik roller üstlenmektedir. Ayrıca, enerji kooperatifleri ve topluluk temelli projeler, yerel girişimciliği teşvik ederek küçük ve orta ölçekli işletmelerin büyümesine de katkı sağlar.

Yenilenebilir enerjiye dayalı istihdamın önemli bir avantajı ise, fosil yakıt sektörüne kıyasla daha sürdürülebilir iş fırsatları sunmasıdır. Geleneksel enerji sektörlerinde ekonomik dalgalanmalar ve arz-talep değişiklikleri nedeniyle iş kayıpları sıkça yaşanırken, yenilenebilir enerji sektöründe istihdam genellikle daha istikrarlıdır. Özellikle enerji dönüşümünün hız kazandığı ülkelerde, bu alana yapılan yatırımların artmasıyla birlikte uzun vadeli istihdam fırsatlarının güçlenmesi de mümkündür. Ancak, bu dönüşümün başarılı bir şekilde gerçekleşebilmesi için iş gücünün yeni teknolojilere uyum sağlaması gerekmektedir. Bu nedenle, yenilenebilir enerji sektöründe istihdamın artırılması için mesleki eğitim programları, sertifikalar ve akademik iş birlikleri büyük önem taşımaktadır (Viardot, 2013). Hükümetler, üniversiteler ve özel sektör tarafından sağlanan eğitim ve sertifika programları, yenilene-

bilir enerji alanında oluşacak iş gücünün çok daha donanımlı hale getirerek istihdam olanaklarını daha da genişletebilmektedir.

Sonuç olarak, yenilenebilir enerji sektöründe sürekli gelişen iş alanları ve bu alanda yapılan yatırımlar günümüzde ve gelecekte de istihdamın önemli ölçüde artmasına olanak tanıyacaktır. Ve geliştirilen yenilikler, sağlanan olanaklarla birlikte enerji teknolojilerinde yatırımların daha hızlı kabul almasını sağlar (Wüstenhagen, 2007).

Toplumsal Çevresel Farkındalığı ve Davranış Değişimi

Yenilenebilir enerjiye geçiş aşamasında, amaç yalnızca temiz enerji üretmek değil aynı zamanda toplumsal farkındalığıda artırarak sürdürülebilir yaşam biçimlerinin benimsenmesinin de sağlanması olmaktadır. Bu doğrultuda, enerji tasarrufu uygulamalarının yaygınlaşması, bireylerin ve işletmelerin bilinçli tüketim alışkanlıkları geliştirmesine katkıda bulunurken aynı zamanda da yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında artmasına katkı sağlayacaktır. Sürdürülebilir enerji politikaları ve teşvik mekanizmaları, hükümetlerin ve bunun yanında bireylerinde yenilenebilir enerji teknolojilerine erişimini kolaylaştırarak enerji kullanımında köklü değişimlere yol açacaktır. Yenilenebilir enerji alanında yapılan yatırımlar, güneş panelleri, rüzgâr türbinleri ve enerji depolama sistemleri, sadece enerji üretiminde değil, aynı zamanda günlük yaşamda da çevre dostu alışkanlıkların benimsenmesini destekleyecektir. Örneğin, akıllı bina sistemleri ve enerji verimliliği uygulamaları sayesinde enerji tüketimi optimize edilebilir ve böylelikle de gereksiz harcamaların önüne geçilebilecektir. Tüm bunların yanında enerji alanında yapılan, eğitim ve farkındalık çalışmaları, toplumun tüm kesimlerinde çevresel bilincin artırılmasının da kritik bir rol oynayacaktır (Mondal ve ark., 2016). Okullarda ve üniversitelerde verilen sürdürülebilir enerji eğitimi, genç nesillerin yenilenebilir enerji teknolojilerine olan ilgisini artırırken, kamuoyuna yönelik bilgilendirme kampanyaları bireyleri daha yeşil ve sürdürülebilir tüketim tercihleri yapmaya yönlenmesini sağlayacaktır. Ayrıca, yerel yönetimler ve sivil toplum kuruluşları tarafından düzenlenen projeler, enerji tasarrufu konusunda bilinç oluşturarak toplumsal dönüşümün hızlanmasında katkı sağlayacaktır. Enerji sistemlerinde yapılan bu değişiklikler yalnızca ekonomik olarak bir değişim yaratmakla kalmaz, çevreye duyarlı bir toplumun da yetişmesine öncülük eder.

Yenilenebilir Enerji Alanında Yapılan İş birlikleri ve Politikalar

Devlet Politikaları ve Teşvik Mekanizmaları

Yenilenebilir enerji politikalarının uzun vadede şekillenebilmesi için, sadece toplumsal bilincin kazanmasının yanı sıra devlet politikaları da önemli bir yer tutmaktadır. Bu enerji kaynaklarının düşük maliyetli ve daha verimli kullanılması için devlet politikaları ve teşvik önemli konular arasın-

da yer almaktadır (Koçaslan, 2014). Yapılan yatırım teşvikleri, yasal düzenlemeler, Ar-Ge çalışmaları, yenilenebilir enerji teknolojilerinin gelişmesine ve yaygınlaşmasına katkıda bulunmaktadır.

Türkiye yenilenebilir enerji politikalarını geliştirmek adına birçok çalışma yürütmektedir. Bu çalışmalar arasında, yenilenebilir enerji yatırımları ön plana çıkmaktadır. Özellikle YEKA ihaleleri ile büyük ölçekli yenilenebilir enerji santralleri kuruluyor. Ve 2023 yılı sonu itibariyle yenilenebilir enerji alanındaki kurulu güç yaklaşık olarak, %56-58 aralığındadır ve buda Türkiye'yi yenilenebilir enerji alanındaki kurulu güç kapasitesi olarak 11.sıraye yükseltmektedir (YEKA, 2023). Bunun yanı sıra Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı ile de sanayi, binalar ve ulaşımda enerji tüketimi oranının artması istenmektedir ve bu doğrultuda yapılan LED sokak lambaları, bina izolasyonları gibi işlemler bu süreci teşvik etmektedir. En önemlisi de yerli ve milli enerji kaynaklarının kullanılmaya başlanmasıdır da denebilir. Karadeniz bölgesinde 710 milyar metreköplük doğalgaz keşfinin yapılmasıyla birlikte büyük bir yatırım gerçekleşmiş ve bu alanda üretim başlamış oldu. Aynı zamanda Mersin bölgesinde bulunan Akkuyu Nükleer Güç Santrali, Türkiye'nin ilk nükleer santrali olacak ve bu sayede enerji güvenliği, ekonomik kalkınma ve dengeli bir enerji portföyünün oluşmasına ve gelişmesine katkı sağlayacaktır. Nükleer enerji büyük oranda karbon salınımının azaltılmasını sağlamaktadır ve yenilenebilir enerji kaynaklarına olan uyumu ile rüzgar, gibi değişken enerji kaynaklarını stabilize edecektir. Nükleer enerjinin bu konuda bazı dezavantajları elbette vardır. Atık yönetimi büyük önem taşımaktadır ve yeni nesil reaktörler de atık yönetimi konusunda verimli çalışmalar çıkarmaktadır (Durmaz ve ark., 2021). Sonuç olarak Akkuyu Nükleer Güç Santrali Türkiye'nin enerji portföyünü önemli oranda değiştirecek ve ekonomik alanda katkı sağlayacaktır.

Özel Sektör ve Yatırımcıların Rolü

Yenilenebilir enerji alanındaki yatırımları ile özel sektör sürdürülebilir enerjiye geçiş noktasında büyük bir öneme sahiptir. Özel şirketler, Ar-Ge çalışmaları ve yenilikçi iş sahaları ile enerji üretim ve depolama teknolojilerini geliştirerek sektörün rekabet gücünü artırmakta ve aynı zamanda da yenilenebilir enerji projelerine sağlamış oldukları sermaye ile projelerin hayata geçirilmesine destek olmaktadır. Özel sektörün girişimleri, enerji altyapısını iyileşmesini hızlandırırken aynı zamanda karbon emisyonlarını azaltma konusunda büyük katkı sağlamaktadır. Öte yandan, özel sektör ve kamu kurumları arasındaki işbirlikleri, enerji piyasasının daha istikrarlı ve güvenilir bir yapıya kavuşmasını sağlamakta, böylece uzun vadeli enerji arz güvenliği-ne katkıda bulunmaktadır.

Uluslararası İş birliği ve Küresel Çözümler

Yenilenebilir enerjiye geçiş noktasında, ülkelerin yalnızca bireysel çabaları sınırlı kalmayıp, uluslararası işbirliği ile de birçok önemli adım atılabilmekte ve bu sayede 'de küresel ölçekte uygulanan politikalar ve düzenlemeler, sürdürülebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşmasını teşvik ederken, ülkeler arası bilgi ve teknoloji paylaşımını da artırmaktadır. Uluslararası kuruluşlar ve finansal anlaşmalar, yenilenebilir enerji projelerine yatırım yapılmasını kolaylaştırarak, düşük karbonlu yenilenebilir enerjiye geçiş sürecini hızlandırmaktadır. Özellikle gelişmekte olan ülkeler için sağlanan finansal teşvikler ve teknik destekler, bu ülkelerin fosil yakıtlara bağımlılığını azaltmasına yardımcı olmakta ve küresel ölçekte enerji arz güvenliğini güçlendirmektedir. Bu bağlamda, sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda ülkeler arasında uzun vadeli iş birliklerinin kurulması, yenilenebilir enerji dönüşümünün başarısı açısından kritik öneme sahiptir.

Yerel Toplulukların Katılımı ve Sürdürülebilirlik

Halkın Yenilenebilir Enerji Projelerine Katılımı

Sürdürülebilir enerji politikası ve projeleri genel olarak yerel halkın ihtiyaçlarına ve beklentilerine uygun şekilde tasarlanmalıdır. Çünkü yerel halkın katılımı ve desteği olmadan, enerji projelerinin uzun vadeli başarısı ve kabulü zorlaşabilir. Ayrıca, bölgesel ekonomik kalkınmayı destekleyen, çevresel etkileri minimize eden ve sosyal faydalar sağlayan projeler, sürdürülebilirlik açısından daha etkili ve kalıcı olmaktadır.

Toplum destekli enerji kooperatifleri, yalnızca ekonomik avantajlar sağlamakla kalmaz, aynı zamanda enerjiye erişim konusunda toplulukların kendi enerji süreçlerini yönetmelerini sağlar. Yapılan her türlü girişimler, yerel ekonomiyi güçlendirirken enerji bağımsızlığını artırarak dışa bağımlılığı da azaltır. Örneğin, biyokütle enerjisi, tarım ve hayvancılıkla geçinen kırsal topluluklar için ek gelir kaynakları oluşturabilir. Bu sayede tarımsal atıklar ve hayvansal yan ürünler enerji üretiminde değerlendirilerek atık yönetimine katkı sağlar, çevresel etkiler azaltılır ve ekonomi desteklenir. Ayrıca, yerel biyokütle kaynaklarının kullanımı, fosil yakıt tüketimini düşürerek karbon salımını azaltır ve sürdürülebilir kalkınmayı teşvik eder. Ve fosil yakıt kullanımını yerine, gelecek nesillere daha temiz yaşanabilir bir gelecek bırakmak adına yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı önemlidir (Öymen, 2020).

Yerel halkın enerji projelerine katılımı, projelere yönelik toplumsal kabullü artırırken, enerji dönüşümünün kapsayıcı bir şekilde gerçekleşmesini sağlar. Özellikle topluluk temelli enerji projeleri, karar alma süreçlerine vatandaşların doğrudan dahil olmasını teşvik ederek, enerji politikalarının daha demokratik hale gelmesine katkıda bulunur. Yerel yönetimlerin, sivil toplum kuruluşlarının ve akademik çevrelerin iş birliği ile geliştirilen projeler, toplu-

mun teknik bilgiye erişimini artırarak enerji okuryazarlığını güçlendirebilir. Ayrıca, yenilenebilir enerji projelerinin yerel ekonomiye katkısı sadece enerji üretimiyle sınırlı kalmaz; aynı zamanda yeni iş imkanları yaratır, teknik eğitim fırsatları sunar.

Sonuç olarak, yenilenebilir enerji dönüşümünün yerel halk tarafından benimsenmesi ve desteklenmesi, projelerin uzun vadeli başarısını belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Toplum temelli enerji girişimleri, sadece sürdürülebilir enerji üretimini değil, aynı zamanda toplumsal dayanışmayı ve ekonomik kalkınmayı da teşvik eden güçlü bir araçtır.

Eğitim ve Farkındalık Programları

Enerji alanında uygulanan eğitim programları, teknik bilginin sağlanmasının yansıra bireylerin ve toplumların enerji dönüşümüne aktif katılımını teşvik etmektedir. Okullarda verilen çevre ve enerji dersleri, genç nesillerin erken yaşta sürdürülebilirlik bilinci kazanmasına yardımcı olurken, meslek okulları ve teknik eğitim kurumları, enerji sektörüne kalifiyeli eleman yetiştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Üniversiteler, araştırma merkezleri ve sivil toplum kuruluşları, yenilenebilir enerji alanında seminerler, atölye çalışmaları ve projeler düzenleyerek toplumun farklı kesimlerine ulaşmayı hedeflemektedir. Özellikle bu alanda uygulanan eğitimler, öğrencilere ve katılımcılara yenilenebilir enerji teknolojilerini yakından tanıma fırsatı sunarak uygulamalı öğrenmeyi teşvik etmektedir (Viardot, 2013).Örneğin, güneş panellerinin nasıl çalıştığını gösteren deneyler, rüzgâr türbinlerinin verimliliğini hesaplama projeleri ve enerji verimliliği analizleri gibi uygulamalar, teorik bilginin pratiğe dökülmesini sağlamaktadır. Ayrıca, kamu kurumları ve özel sektör tarafından düzenlenen farkındalık kampanyaları, yenilenebilir enerjinin uygulanabilirliğini artırmaktadır. Sosyal medya, belgeseller ve kamu spotları gibi araçlar kullanılarak geniş kitlelere ulaşılmakta, bireylerin yenilenebilir enerji çözümlerine yönelik ilgisi artırılmaktadır.

Sosyal Direnç ve Halkın Endişeleri

Yenilenebilir enerji alanında yapılan çalışmalar ve bu çalışmaların başarıları o bölgedeki yerel halkın kabullenmesine de bağlıdır. Bazı topluluklar, özellikle büyük ölçekli rüzgâr ve hidroelektrik santrallerinin doğal yaşam alanları üzerindeki etkilerinden endişe duymakta ve bu projelere karşı önyargı gösterebilmektedir (Wüstenhagen ve ark.,2007). Bu tür durumlarda, toplulukların kaygılarını anlamak ve onları bu projelerin getirilerini iletişim süreci ile ifade etmekte fayda vardır. Toplumun projelere olan desteğini artırmak için, yerel halkın sürece en başından itibaren hakim olmasında fayda vardır. Proje planlamalarında şeffaflık sağlanmalı, yerel halkın görüş ve önerileri dikkate alınmalıdır. Aynı zamanda, çevresel sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla ekosistem dostu teknolojilerin kullanılması, çevresel tahribatı

en aza indirecek çözümler geliştirilmesi ve doğal yaşam alanlarının korunması için gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir (Kuşat, 2013).

Sonuç olarak, yenilenebilir enerji projelerine yönelik yerel halkın sürece aktif katılımı sağlanmalı, şeffaf ve kapsayıcı politikalar benimsenmelidir.

SONUÇ

Yenilenebilir enerji yatırımlarının kalıcı olabilmesi için, toplumun her kesiminin bu sürece dahil ve hakim edilmesi gerekiyor. Yerel yönetimler, enerji kooperatifleri ve bölgesel kalkınma projeleri aracılığıyla toplulukların enerji üretiminde söz sahibi olması sağlanmalı, bireylerin ve işletmelerin yenilenebilir enerji kaynaklarına erişimi kolaylaştırılmalıdır. Özellikle kırsal ve düşük gelirli bölgelerde, güneş enerjisi, rüzgâr türbinleri ve biyokütle sistemleri gibi yenilenebilir enerji çözümlerinin yaygınlaştırılması gerekmektedir. Enerji verimliliğini artırmaya yönelik politikalar ve yenilikçi teknolojilere yapılan yatırımlar, enerji tüketimini azaltarak dönüşüm sürecinin daha verimli bir şekilde gerçekleşmesine katkıda bulunacaktır.

Sürdürülebilir enerji alanında başarıyı sağlamak için başta toplumsal bilincin sağlanması önemli bir adımdır. Bu süreçte eğitim kurumları ve sivil toplum kuruluşları aracılığıyla farkındalık kampanyaları artırılabilir ve bireylerin enerji dönüşümleri konusunda olan ilgileri artırılabilir. Sonuç olarak, yenilenebilir enerjiye geçiş süreci toplumsal farkındalığın ve ekonomik bir değişimin sürecidir. Başarılı bir enerji dönüşüm açısından yatırımlar artırılmalı toplumun her kesimi bu sürece dahil edilmelidir.

KAYNAKLAR

- Durmaz, B. (2019). *Yüksek mertebeden 1. tip Chebyshev polinomları yaklaşımı ile tek hızlı nötronlar için dilim geometride difüzyon mesafesi hesaplanması*, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmaniye.
- Durmaz, B. (2023). Nükleer reaktörlerde enerji üretimi ve Türkiye'deki nükleer gelişim. O. Örnek & M. Özdoğan (Ed.), *Fen mühendislik bilimlerinde güncel gelişmeler* (s. 290). Ankara, Türkiye.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2016). *Türkiye'nin nükleer santral projeleri* (Nükleer Enerji Proje Uygulama Dairesi Yayın Serisi).
- Muray, L. R., & Holbert, K. E. (2015). *Nükleer süreçlerin kavramları, sistemleri ve uygulamalarına giriş* (A. H. Yılmaz, A. Aydın, T. Bayram, S. Akkoyun, & A. A. Billur, Çev. Ed.). Nobel Yayıncılık.
- Nükleer Enerji Dünyası. (2017). Erişim adresi: <http://www.nukleer.web.tr/index.html>.



YENİLENEBİLİR ENERJİ ENTEGRASYONLU ISI POMPASI SİSTEMLERİ: TEKNOLOJİK GELİŞMELER VE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK PERSPEKTİFİ

“ ”

Müjdat ÖZTÜRK¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID. 0000-0003-1800-2234

GİRİŞ

Küresel ölçekte enerji sistemleri, özellikle binaların ısıtma ve soğutma taleplerinin karşılanmasında, sürdürülebilir bir geleceğe yönelik köklü bir dönüşümün eşliğindedir. Fosil yakıtlara olan yüksek bağımlılık, iklim değişikliği ve enerji güvenliği gibi kritik sorunları beraberinde getirirken, dekarbonizasyon ve enerji verimliliğinin artırılması uluslararası öncelikler haline gelmiştir (Öztürk ve Kayabaşı, 2023). Binalarda ısıtma ve soğutma gereksinimlerinin daha düşük enerji tüketimiyle karşılanması, günümüzün en önemli enerji verimliliği konularından biri olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, ısı pompaları çevresel kaynaklardan (hava, toprak, su) termal enerjinin büyük bir kısmını transfer ederek çalışan ve fosil yakıt bazlı ısıtma sistemlerine kıyasla çok daha yüksek verimlilik sunan teknolojiler olarak bu dönüşümün merkezinde yer almaktadır (Liu vd., 2023; Lazzarin ve Noro, 2020)

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), ısı pompalarını temiz enerji geçişinin vazgeçilmez bir unsuru olarak konumlandırmaktadır. IEA'nın derinlemesine analizleri, ısı pompalarının küresel çapta yaygınlaşmasının, 2030 yılına kadar yaklaşık 500 milyon ton karbondioksit emisyonunu azaltma potansiyeli taşıdığını ortaya koymaktadır. Bu miktar, Avrupa'daki tüm otomobillerin yıllık emisyonuna eşdeğerdir (IEA, 2022). Bu teknoloji, sadece çevresel faydalarıyla değil, aynı zamanda ulusal enerji güvenliğine sağladığı katkılarla da ön plana çıkmaktadır.

Isı pompalarının çevresel ve ekonomik potansiyelini tam anlamıyla realize edebilmek için, onları besleyen elektriğin temiz ve yenilenebilir kaynaklardan gelmesi elzemdir. Bu gereklilik, güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır. Bu sistemler, termal performanslarını güneş termal enerjisiyle ön ısıtma yaparak optimize ederken, elektrik ihtiyaçlarını ise yerel Fotovoltaik (PV) veya Fotovoltaik/Termal (PV/T) sistemlerle karşılayarak karbon ayak izini minimize etmektedir (Yao vd., 2022; Giama vd., 2025; Öztürk, Çalışır ve Genç, 2021).

Bu hibrit entegrasyon yaklaşımı, sistemin Mevsimsel Performans Katsayısını (SCOP) önemli ölçüde yükseltmekle kalmaz, aynı zamanda işletme maliyetlerini düşürür ve tesisin şebekeden bağımsızlığını artırır. Özellikle PV/T sistemler, hem elektrik hem de termal enerji üretimi yaparak, güneş enerjisinin çok daha etkin kullanımını sağlamaktadır (Chhugani vd., 2023). Bu entegre çözümler, enerji sektöründeki geleceğin düşük karbonlu ve sürdürülebilir binalarına yönelik somut adımları temsil etmektedir.

Bu çalışma, güneş enerjisiyle desteklenen ısı pompalarının farklı kullanım şekillerini ele almakta hava, su ve toprak kaynaklı sistemlerin güçlü yönlerini ve zorluklarını karşılaştırmaktadır. Aynı zamanda, yapay zeka ve enerji depolama teknolojileri sayesinde bu sistemlerin akıllı enerji ağlarında nasıl daha esnek ve verimli çalışabileceği tartışılmaktadır. Enerji verimliliğinde ısı

pompalarının giderek artan önemi ve güneş enerjisinin sağladığı avantajlar dikkate alındığında, bu yaklaşım geleceğin enerji verimli binaları için yol gösterici bir çerçeve sunmaktadır.

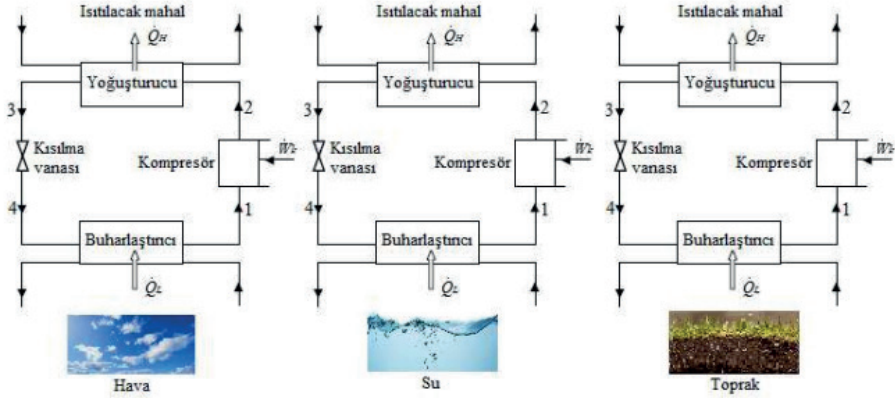
ISI POMPASI SİSTEMLERİNDE KULLANILAN KAYNAK TÜRLE- RİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Isı pompası sistemlerinde kullanılan kaynak türü (hava, su ve toprak) yalnızca teknik performans parametrelerini değil, aynı zamanda yatırım ve işletme maliyetlerini de doğrudan etkileyen en kritik faktörlerden biridir. Kaynak seçimi, sistemin yıllık enerji verimliliğini, çevresel etkilerini ve kullanıcı açısından uzun vadeli ekonomik kazanımlarını belirler. Bu nedenle, farklı kaynak türlerinin avantajları ve sınırlılıkları yalnızca mühendislik bakış açısıyla değil, aynı zamanda kullanıcı beklentileri, bina tipleri ve bulunduğu iklim koşulları çerçevesinde de değerlendirilmelidir.

Hava kaynaklı ısı pompası sistemleri, kolay uygulanabilirlikleri ve düşük ilk yatırım maliyetleri nedeniyle en yaygın tercihlerden biridir. Ancak, verimlilikleri dış hava sıcaklık değişimlerinden etkilenmektedir. Su kaynaklı sistemler ise uygun su kütlelerine erişim sağlandığında en yüksek verimliliği sunar; fakat coğrafi ve çevresel sınırlamalar bu seçeneğin uygulanabilirliğini kısıtlayabilir. Buna karşılık, toprak kaynaklı sistemler uzun vadede en stabil performansı sağlayarak, özellikle yüksek enerji ihtiyacı olan yapılarda öne çıkmaktadır. Ancak bu sistemlerin en büyük dezavantajı, boruların yatay veya dikey döşenmesi için geniş alan gereksinimi ve beraberindeki yüksek ilk yatırım maliyetleridir. Bu durumda, her sistemin kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmakta olup, seçim projenin özel koşullarına göre yapılmalıdır. Bu farklılıklar, aslında ısı pompasının kullanıcı için nasıl bir deneyim sunduğunu da doğrudan şekillendirmektedir. Örneğin, kış aylarında dış hava sıcaklığının çok düştüğü bölgelerde hava kaynaklı bir ısı pompası tercih eden kullanıcı, zaman zaman performans düşüşü ve ek ısıtıcı ihtiyacıyla karşılaşabilir. Buna karşın, aynı koşullarda toprak kaynaklı bir sistem kullanan kullanıcı, daha konforlu ve sabit bir iç ortam sıcaklığı sağlayabilmektedir. Dolayısıyla kaynak türü, yalnızca mühendislik hesaplarının değil, insan yaşam kalitesinin de önemli bir belirleyicisidir.

Isı pompasının evaporatör, kompresör, kondenser ve genleşme vanası gibi temel elemanlarının çevrim boyunca nasıl bir enerji dönüşümü gerçekleştirdiği de bu bağlamda kritik öneme sahiptir. Kaynağın türü, evaporatöre aktarılan ısı miktarını ve sürekliliğini belirlerken, sistemin genel verimliliğini de doğrudan etkilemektedir. Bu işleyişin kavramsal düzeyde anlaşılması, hem teknik açıdan hem de kullanıcı deneyimi bakımından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle ısı pompası çevriminin farklı kaynaklara göre genel gösterimi Şekil 1’de sunulmuştur. Şekil, sistemin temel elemanları arasındaki enerji transferini görselleştirerek, farklı kaynak türlerinin çevrim üzerindeki

rolünü daha anlaşılır bir şekilde ortaya koymaktadır. Burada sistem elemanlarının benzer olması verimliliğin kaynağa bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.



Şekil 1. Isı pompası sisteminin kaynaklara göre genel çevrim şeması (Bilen ve Demir, 2021).

Hava Kaynaklı Isı Pompaları

Hava kaynaklı ısı pompaları, dış ortam havasını doğrudan ısı kaynağı olarak kullanır. Kurulum maliyetleri diğer sistemlere göre daha düşüktür ve ulaşılabilirlikleri yüksektir, bu da onları konut ve küçük ticari binalar için cazip kılar. Ancak performansları dış hava sıcaklığına güçlü şekilde bağlıdır; özellikle soğuk havalarda COP değerlerinde önemli düşüşler gözlemlenmektedir. Nitekim, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ gibi düşük hava sıcaklıklarında bile sistem kapasitesinde kayıplar yaşandığı ve COP'in düştüğü deneysel verilere dayanarak gösterilmiştir (Koopman, Zhu ve Rohlf, 2024). Ayrıca hava kaynaklı sistemlerde dış ünite çevresindeki havalandırma koşulları da performansı etkileyebilmektedir. Yapılan bir çalışmada yetersiz hava dolaşımı, COP değerini %26,2 oranında azalttığı görülmüştür (Zou, Liu Long, 2021).

Hava kaynaklı sistemleri genellikle ılıman veya orta iklim şartlarında, apartman dairelerinde, ofis binalarında ve mevcut binalarda retrofite uygun çözümler sunar. Ancak soğuk iklim bölgelerinde, düşük sıcaklık dönemlerinde verim düşüşü nedeniyle destek ısıtıcı gereksinimi de dikkatle ele alınmalıdır.

Su Kaynaklı Isı Pompaları

Su kaynaklı ısı pompaları eğer uygun bir su kaynağına erişim mevcutsa yüksek performans sunarak tercih sebebi olabilmektedir. Göller, nehirler veya yer altı suyu gibi doğal rezervuarların kararlı sıcaklıkları sayesinde bu

sistemler, ısı pompaları arasında en yüksek SCOP değerlerine ulaşabilmektedir. Ancak, güvenilir bir su kaynağına erişim her zaman mümkün değildir ve çevresel mevzuat da bu uygulamaların yaygınlığını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle su kaynaklı sistemler daha çok belirli coğrafyalarda, su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımına olanak tanıyan bölgelerde uygulanabilmektedir.

Toprak Kaynaklı Isı Pompaları

Toprak kaynaklı ısı pompaları, yer altındaki sabit sıcaklık değerlerinden faydalanır. Toprak derinliklerindeki termal kararlılık sayesinde, mevsimsel sıcaklık dalgalanmalarından daha az etkilenirler ve böylece yüksek SCOP değerleri elde edilmektedir. Bununla birlikte, toprak kaynaklı sistemlerin en büyük dezavantajı yüksek ilk yatırım maliyetidir. Dikey sondaj uygulamaları ciddi maliyetleri getirirken, yatay borulama uygulamaları geniş arazi gereksinimi doğurur. Ayrıca toprak özellikleri (iletim katsayısı, nem, kaya yapısı vb.) sistem performansını doğrudan etkiler. Hatta toprak içi boruların dağılım biçimi, verim üzerinde anlamlı değişikliklere neden olduğu yapılan çalışmalardan görülmektedir (Brbhan, Omle Szamosi, 2025). Bu sistemler, müstakil konutlar, kampüsler, oteller ve yüksek ısıtma-soğutma yüküne sahip yapı tipleri için uygundur. Uzun vadeli işletme maliyetlerinin düşük olması, yatırım geri dönüş süresini cazip kılabilmektedir. Örneğin, büyük bir bina için yapılan bir ekonomik analizde toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin ekonomik olarak rekabetçi olduğu ifade edilmiştir (Risinggård vd., 2023).

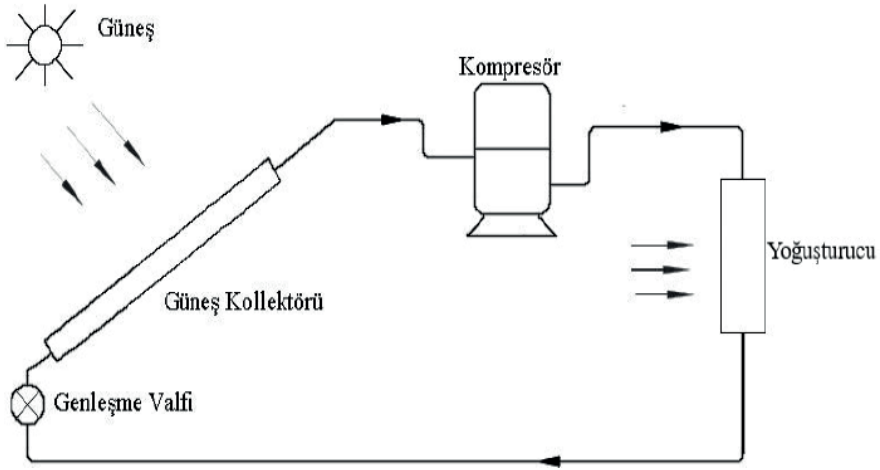
Sonuç olarak hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompası sistemleri aşağıdaki şekilde avantaj ve dezavantajları ifade edilebilir;

- **Hava kaynaklı ısı pompası:** Düşük maliyet, kolay kurulum avantajına sahiptir. Ancak soğuk iklim koşullarında performans kayıpları görülebilmektedir.
- **Su kaynaklı ısı pompası:** Yüksek performans potansiyeline sahiptir. Fakat uygun su kaynağına erişim gerekliliği nedeniyle coğrafi ve çevresel sınırlamalarla karşılaşabilmektedir.
- **Toprak kaynaklı ısı pompası:** Yüksek verim ve termal kararlılık sunmaktadır. Ancak yüksek ilk yatırım maliyeti ve geniş arazi ihtiyacı önemli dezavantajlardır.

GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ ISI POMPASI SİSTEMLERİ

Güneş Enerji Sistemlerinin Isı Pompasını Doğrudan Termal Beslemesi

Isı pompaları, farklı kaynaklardan düşük sıcaklıktaki ısıyı alarak kullanılabilir sıcaklık seviyelerine taşıyan sistemlerdir. Bu kaynaklar genellikle hava, su veya toprak olabilir ve her birinin avantajları ile sınırlılıkları bulunmaktadır. Sistemin performansı, seçilen kaynağın sıcaklığına ve yıl boyunca bu sıcaklığın ne kadar stabil kalabildiğine doğrudan bağlıdır. Güneş enerjisiyle entegrasyon ise bu kaynakların verimliliğini artıran tamamlayıcı bir çözüm olarak öne çıkar. Güneş enerjisi destekli direkt genleşmeli ısı pompası sisteminin şematik gösterimi Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Direkt genleşmeli güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemi (Özenen, 2021)

Hava kaynaklı ısı pompaları, en yaygın kullanılan sistemlerden biridir. Ancak dış ortam havası kış aylarında ciddi şekilde soğuduğunda cihazın performansı düşer. Güneş kolektörleri veya hibrit PV/T sistemleri bu noktada devreye girerek, dış hava ile pompa arasına ek bir ısı katmanı sağlar. Böylece evaporatöre giren hava önceden ısıtılır, ısı pompası kompresörü daha düşük enerji tüketerek ve soğuk iklim koşullarında bile daha yüksek verimlilik elde edilir. Bu entegrasyon, özellikle sert kışların yaşandığı bölgelerde, donma riskini azaltarak sistem güvenilirliğini de artırır.

Su kaynaklı ısı pompaları ise göller, nehirler veya yeraltı suları gibi doğal rezervuarları kullanmaktadır. Bu sistemler genellikle hava kaynaklı sistemlere kıyasla daha kararlı performans sunar, çünkü su kütlelerinin sıcaklığı mevsimsel değişimlere daha yavaş tepki verir. Güneş entegrasyonu burada ara bir depolama tankı üzerinden sisteme ön ısıtma sağlamaktadır. Bu durum özellikle ılıman iklimlerde yıl boyu daha dengeli bir enerji performansı elde edilmesine katkıda bulunur.

Toprak kaynaklı ısı pompaları, yer altındaki görece sabit sıcaklıktan yararlanarak yüksek verimlilik sağlayan sistemlerdir. Bu sistemlerde performans, pompaya iletilen kaynağın sıcaklığına bağlı olarak değişir. Güneş enerjisi bu noktada önemli bir destekleyici unsur olarak devreye girmektedir. Güneş kolektörleri ya da hibrit sistemlerle toplanan ısı, doğrudan ısı pompasının ısıtacağı suya aktarılabilir. Böylece suyun sıcaklığı, pompanın çalışmasından önce belirli bir seviyeye yükseltilmiş olur.

Bu ön ısıtma sayesinde ısı pompası daha düşük bir yük altında çalışır, yani aynı miktarda ısıyı sağlamak için daha az elektrik tüketir. Bunun sonucunda sistemin genel verimliliği artar, enerji faturaları düşer ve cihazın ömrü uzar. Ayrıca güneşten gelen katkı, özellikle uzun ısıtma sezonlarının yaşandığı bölgelerde ya da kış aylarında daha belirgin hale gelir. Çünkü pompa, soğuk koşullarda daha zorlu şartlarda çalışmak zorunda kalırken güneş desteği bu yükü hafifletmektedir. Bu yaklaşım, toprak kaynaklı sistemlerin istikrarlı performansını korurken aynı zamanda güneş enerjisinin doğrudan suya entegre edilmesiyle daha çevreci ve ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Böylece kullanıcılar hem yenilenebilir kaynaklardan maksimum düzeyde yararlanır hem de yıl boyunca daha güvenilir ve sürdürülebilir bir ısıtma elde etmiş olurlar.

İklim koşulları, bu entegrasyonların etkilerini belirleyen en kritik faktörlerden biridir. Soğuk iklimlerde güneş desteği, ısı pompalarının zayıfladığı dönemlerde performansı yukarı çeker. Sıcak iklimlerde ise güneşin yoğunluğu sayesinde daha az pompa yükü ile soğutma ve sıcak su üretiminde yüksek verimlilik elde edilir. Ilıman bölgelerde ise hem ısıtma hem soğutma süreçlerinde dengeli bir kazanç sağlanır. Kısacası, güneş entegrasyonu farklı kaynak türlerine göre uyarlanarak her iklim kuşağında sistemin etkinliğini artırmaktadır.

Genel olarak bakıldığında, güneş enerjisiyle desteklenen hava, su ve toprak kaynaklı ısı pompaları, daha yüksek mevsimsel verimlilik, daha düşük enerji tüketimi ve daha az karbon emisyonu gibi çok boyutlu avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, iklimsel farklılıklara uyum sağlayabilen esnek yapılarıyla enerji güvenliği ve sürdürülebilirlik hedeflerine doğrudan katkı sağlanmaktadır. Bu nedenle, geleceğin enerji sistemlerinde ısı pompalarının güneş entegrasyonu, hem mühendislik hem de çevre yönetimi açısından stratejik bir bileşen haline gelmektedir.

PV Sistemlerinin Isı Pompasını Çalıştırmak için Elektrik Üretimi ve Şebeke Etkileşimi

PV sistemler ile ısı pompalarının birlikte kullanımı, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından güçlü bir çözüm sunar. Bu yaklaşımda, ısı pompasının çalışması için gereken elektrik doğrudan çatılara ya da bina yüzeylerine yerleştirilen güneş panellerinden elde edilir. Böylece ısı pompası-

nın tükettiği enerji, fosil yakıtlara dayalı elektrik yerine temiz ve yenilenebilir bir kaynaktan sağlanmış olur. Bu durum, ısı pompasının gerçek çevresel katkısını belirleyen en önemli faktörlerden biridir, çünkü kullanılan elektriğin karbon yoğunluğu ne kadar düşükse, sistemin toplam karbon ayak izi de o kadar azalmaktadır.

Isı pompasının fotovoltaiik panellerle desteklenmesi, sadece çevresel fayda değil aynı zamanda ekonomik avantaj da sağlar. Yerinde üretilen elektrik, kullanıcıların şebekeden çektiği enerji miktarını azaltarak bağımsızlık oranını artırır ve enerji faturalarını önemli ölçüde düşürür. Özellikle elektrik üretiminin yoğun şekilde fosil yakıtlara dayandığı bölgelerde, PV desteği sayesinde ısı pompası sistemleri çok daha düşük iklim değişikliği etkisine sahip hale gelir. Bu da elektrifikasyonun, fosil yakıt kullanımını aşamalı olarak ortadan kaldırma sürecinde stratejik bir araç olduğunu ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte, fotovoltaiik entegrasyonu ısı pompalarını sadece enerji tüketen cihazlar olmaktan çıkarıp, akıllı enerji ağlarının aktif bir bileşeni haline de getirir. PV elektrik üretimi, özellikle gündüz saatlerinde tüketimden fazla olduğunda, bu fazla enerji ısı pompaları aracılığıyla değerlendirilebilir (Kayabaşı ve Kaya, 2023). Pompa bu elektriği kullanarak suyu veya farklı bir ısı taşıyıcı akışkanı ısıtır ve bu enerji termal depolama sistemlerinde saklanır. Böylece güneşin yoğun olduğu saatlerde üretilen elektrik doğrudan kullanılmakla kalmaz, aynı zamanda daha sonra ihtiyaç duyulacak ısıya dönüştürerek depolanmış olur.

Bu mekanizma, enerji ağının esnekliğini artıran önemli bir avantaj sağlar. Güneş ve rüzgâr gibi değişken yenilenebilir kaynaklardan gelen dalgalanmalar, ısı pompalarının esnek yük olarak devreye girmesiyle dengelenebilir. Bu sayede, enerji arzının daha öngörülebilir ve güvenli hale gelmesi mümkün olur. Ayrıca, önümüzdeki yıllarda elektrik üretiminde güneş ve rüzgârın payının artması beklendiğinden (Öztürk, Kayabaşı, ve Taşdemir, 2025), ısı pompalarının PV sistemlerle birlikte çalışması enerji dönüşümünün en kritik yapı taşlarından biri haline gelmektedir.

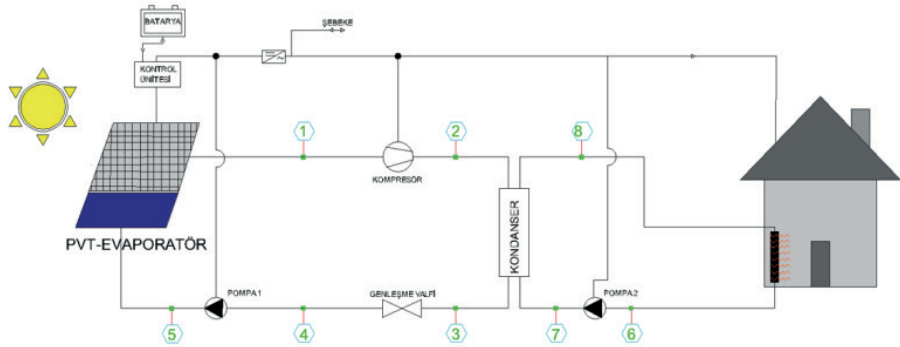
Sonuç olarak, fotovoltaiik destekli ısı pompası sistemleri, hem enerji tüketimini azaltan hem de iklim değişikliğine karşı mücadelede somut katkılar sunan yenilikçi bir sistem olarak öne çıkmaktadır. Bu entegrasyon, sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşmak için önemli bir araç olmanın yanı sıra, bireysel kullanıcılar için ekonomik tasarruf ve enerji güvenliği anlamına da gelmektedir.

PV/T Entegreli Isı Pompası Sistemlerinin Termal ve Elektrik Üretimine Etkisi

PV/T entegreli ısı pompası sistemleri, hem elektriksel hem de termal enerji üretimini aynı panel yüzeyinde gerçekleştiren hibrit bir teknoloji olup,

geleneksel PV ve güneş kollektörlerinin avantajlarını birleştirmektedir. Bu sistemlerde PV/T üniteleri tarafından üretilen elektrik doğrudan ısı pompasını beslerken, panel yüzeyinde açığa çıkan atık ısı ise ısı pompasının buharlaştırıcı tarafında ek bir kaynak olarak kullanılabilir (Chow, 2018). Böylece, PV/T ve ısı pompası entegrasyonu, yalnızca elektriksel şebekeye bağımlılığı azaltmakla kalmaz, aynı zamanda ısı pompasının enerji tüketimini de düşürerek sistemin toplam verimliliğini artırmaktadır.

Enerji tüketim performansının değerlendirilmesinde en kritik parametrelerden biri SCOP değeridir. PV/T destekli ısı pompaları, özellikle düşük sıcaklıkta çalışan yerden ısıtma veya düşük sıcaklıklı radyatör sistemlerinde, geleneksel PV destekli ısı pompalarına kıyasla daha yüksek SCOP değerleri sunabilmektedir. Bunun nedeni, PV/T panellerinin bir yandan elektrik üretirken diğer yandan ısı pompasının evaporatörüne daha kararlı sıcaklık koşulları sağlamasıdır. Bu durum, özellikle soğuk iklim bölgelerinde ısı pompasının sık sık defrost moduna geçme ihtiyacını azaltarak enerji tüketimini optimize etmektedir (Choi vd., 2020). PV/T entegreli ısı pompası ısıtma sisteminin detaylı şematik gösterimi şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. PV/T entegreli ısı pompası sistemi (İncili ve Aktar, 2022)

Bununla birlikte, PV/T destekli ısı pompası sistemlerinin enerji tüketim avantajları yalnızca iklim koşullarına değil, aynı zamanda bina tipine ve kullanım profilinin sürekliliğine de bağlıdır. Örneğin, tek aileli konutlarda günlük enerji talebi daha düzensiz olduğundan, PV/T panellerin ürettiği ısının kısa süreli depolanması kritik hale gelir. Buna karşılık, oteller, hastaneler veya üniversite kampüsleri gibi sürekli sıcak su ve ısıtma ihtiyacı olan yapılarda, PV/T destekli ısı pompası sistemleri çok daha yüksek verimlilikle işletilebilmektedir (Belmonte vd., 2022).

Literatürde yapılan deneysel ve sayısal çalışmalara bakıldığında, PV/T entegreli sistemlerin yıllık enerji tüketiminde önemli iyileşme sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, yaşam döngüsü analizleri bu tür sistem-

lerin, elektrik şebekesinin karbon yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde, iklim değişikliği potansiyelini anlamlı ölçüde düşürdüğünü göstermektedir (Battisti ve Corrado, 2005). Bu durum, yalnızca enerji verimliliği açısından değil, aynı zamanda sürdürülebilirlik ve karbon azaltım hedefleri açısından da PV/T ve ısı pompası entegrasyonunun stratejik bir rol oynadığını teyit etmektedir.

Sonuç olarak, PV/T entegreli ısı pompası sistemleri, yenilenebilir kaynakların birlikte kullanımına dayalı bütünleşik bir yaklaşım sunarak, hem enerji tüketiminde hem de çevresel etkilerde önemli kazanımlar sağlamaktadır. Özellikle akıllı şebekelerle entegre edildiğinde, bu sistemler esnek yük yönetimi ve enerji depolama olanaklarıyla geleceğin düşük karbonlu enerji mimarisinde önemli bir dönüştürücü rol üstlenecektir.

GÜNEŞ DESTEKLİ ISI POMPASI SİSTEMLERİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK DEĞERLENDİRMESİ

Güneş enerjisi destekli ısı pompası sistemleri, binaların ısıtma, soğutma ve sıcak su ihtiyaçlarını karşılamada sürdürülebilir bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu entegre sistemler, geleneksel ısı pompalarının verimliliğini güneş enerjisi ile birleştirerek önemli avantajlar sunarken, bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir.

Yüksek Enerji Verimliliği ve İşletme Maliyetlerini düşürme

Güneş enerjisinden elde edilen ısı enerji ile ön ısıtma yapılarak ısı pompasının COP değerinde önemli ölçüde iyileştirme gerçekleştirilmektedir. Güneş kolektörleri veya PV/T paneller aracılığıyla toplanan ısı enerji, ısı pompasının evaporatörüne sağlanan ısı kaynağının sıcaklığını yükseltir, bu da kompresörün daha az enerji harcaması ve daha yüksek verimlilikle çalışması anlamına gelmektedir. Özellikle soğuk iklimlerde veya düşük kaynak sıcaklıklarında, güneş enerjisi entegrasyonu sistemin buzlanma riskini azaltır ve defrost döngülerine olan ihtiyacı minimize eder. Bu yüksek enerji verimliliği, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltarak işletme maliyetlerinde belirgin bir düşüş sağlar ve bina sahipleri için uzun vadede ekonomik kazançlar sunar. Hava kaynaklı sistemlerde dış hava ile pompa arasına ek bir ısı katmanı sağlanarak evaporatöre giren havanın önceden ısıtılması, pompanın daha düşük enerjiyle çalışması ve soğuk iklim koşullarında bile daha yüksek verimlilik elde edilmesi bu durumun somut örnekleridir. Toprak kaynaklı sistemlerde de güneş kolektörleri ya da hibrit sistemlerle toplanan ısı doğrudan ısı pompasının ısıtacağı suya aktarılması, pompanın yükünü azaltarak genel verimliliği artırmaktadır.

Sıfır Fosil Yakıt kullanımı ile Karbon Nötr Binalara Ulaşma Potansiyeli

Güneş destekli ısı pompası sistemleri, binaların çevresel ayak izini azaltma konusunda kritik bir rol oynamaktadır. Fosil yakıtlara olan bağımlılığı mini-

muma indirerek veya tamamen ortadan kaldırarak sera gazı emisyonlarının azalmasına doğrudan katkıda bulunurlar. Özellikle ısı pompasının elektrik ihtiyacının PV veya PV/T panellerden karşılandığı durumlarda, sistemin karbon ayak izi önemli ölçüde azalır ve sıfır emisyonlu veya karbon nötr binalara ulaşma potansiyeli ortaya çıkar. Bu durum, Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) ısı pompalarını temiz enerji geçişinin kritik bir unsuru olarak tanımlaması ve 2030 yılına kadar karbondioksit emisyonlarını azaltma potansiyeli taşıdığını belirtmesiyle de desteklenmektedir. Fosil yakıtlı kazanların aşamalı olarak kaldırılması hedefinde kilit bir kilometre taşı olan bu teknoloji, sadece çevresel faydalarıyla değil, aynı zamanda ulusal enerji güvenliğine sağladığı katkılarla da dikkat çekmektedir. Literatürdeki çalışmalar, PV/T entegreli sistemlerin iklim değişikliği potansiyelini anlamlı ölçüde düşürdüğünü göstermektedir. Bu alanda yapılan bir çalışmada, PV/T ısı pompası sistemleri ile R152a gibi düşük küresel ısınma potansiyeline sahip soğutucu akışkan kullanımı sonucu, R134a'ya kıyasla yaklaşık %20.8'lik iklim değişikliği potansiyeli azalması sağlanmıştır : (Kim vd., 2023). PV/T ile bir hava kaynaklı ısı pompasının birleşik kullanımının incelendiği bir çalışmada yıllık CO₂ emisyonunu yaklaşık %19.3 azaltmıştır (Kamel ve Fung, 2014).

PV paneller ile ısı pompalarının birlikte kullanımı, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından güçlü bir çözüm sunarak, ısı pompasının tükettiği enerjinin temiz ve yenilenebilir bir kaynaktan sağlanmasını garanti eder ve böylece toplam karbon ayak izini minimize eder.

Şebekeden Bağımsızlık ve Enerji Güvenliği

Özellikle PV veya PVT panellerin ısı pompalarına entegrasyonu sayesinde, binaların enerji şebekesinden bağımsızlığını artırır. Güneş enerjisinden üretilen elektrik, ısı pompasının çalışması için gerekli enerjiyi doğrudan sağlayabilir veya enerji depolama sistemleri ile birleştirilerek kullanılabilir. Bu durum, şebeke kesintileri sırasında bile binaların ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarının karşılanmasına olanak tanır ve enerji güvenliğini artırır. Ayrıca, enerji fiyatlarındaki dalgalanmalara karşı daha dayanıklı bir yapı sunar ve uzun vadede enerji maliyetlerini öngörülebilir kılmaktadır. Akıllı enerji yönetim sistemleriyle entegre edildiğinde, güneş destekli sistemler, binaların kendi enerjisini üreten ve tüketen statüsüne geçişini hızlandırır. PV/T panel entegrasyonu ısı pompalarını sadece enerji tüketen cihazlar olmaktan çıkarıp, akıllı enerji ağlarının aktif bir bileşeni haline getirmektedir. PV/T panellerinin ısı enerji üretimi fazla olduğunda, bu enerji termal depolama sistemlerinde saklanarak şebekenin esnekliğini artırır ve enerji arzını daha öngörülebilir ve güvenli hale getirir.

Yüksek İlk Yatırım Maliyeti ve Geri Ödeme Süreleri

Güneş destekli ısı pompası sistemlerinin en önemli dezavantajlarından biri, geleneksel ısıtma veya sadece standart bir ısı pompası sistemine kıyasla

daha yüksek ilk yatırım maliyetidir. Bu maliyet, güneş kolektörleri, PV veya PV/T panellerin, ek borulama ve kontrol sistemlerinin ve bazen de enerji depolama çözümlerinin kurulumundan kaynaklanmaktadır. Yüksek başlangıç maliyeti, potansiyel yatırımcılar veya bina sahipleri için bir engel teşkil edebilir ve sistemin geri ödeme süresinin uzamasına neden olabilmektedir. Örneğin, toprak kaynaklı ısı pompaları için yüksek başlangıç yatırım maliyetleri, dikey sondaj uygulamalarıyla ciddi kazı maliyetleri veya yatay borulama uygulamalarıyla geniş arazi gereksinimi nedeniyle önemli bir dezavantaj olarak görülmektedir. Güneş enerjisi entegrasyonunda bu maliyetlere eklenerek toplam yatırım yükünü artırır, ancak enerji tasarrufu ve çevresel faydalar göz önüne alındığında, uzun vadede bu maliyetin amorti edilmesi mümkündür.

Yer Gereksinimi ve Çevresel Kısıtlamalar

Güneş kolektörleri, PV veya PV/T paneller için geniş yüzey alan ihtiyacının olması özellikle kentsel alanlarda veya sınırlı çatı alanına sahip binalarda bir zorluk teşkil etmektedir. Güneş panellerinin optimal performansı için güney yönelimli ve gölgelenmemiş alanlar tercih edilirken, toprak kaynaklı sistemlerde yeraltı boru döngüleri için geniş toprak alanlarına ihtiyaç duyulabilir. Toprak kaynaklı ısı pompalarının en büyük dezavantaj, boruların yatay veya dikey döşenmesi için geniş alan gereksinimi olmaktadır. Ayrıca, su kaynaklı sistemler için uygun bir su kütlesine erişim sağlanması gerekir ki bu da coğrafi ve çevresel kısıtlamaları beraberinde getirmektedir. Su kaynaklı ısı pompalarının yüksek performans potansiyeline rağmen, güvenilir bir su kaynağına erişimin her zaman mümkün olmaması ve çevresel mevzuatın bu uygulamaların yaygınlığını sınırlaması, yer gereksinimi ve çevresel kısıtlamaların önemli bir yönünü oluşturmaktadır.

Enerji Yönetimindeki Yeri ve Güncel Teknolojik Gelişmeler

Güneş destekli ısı pompası sistemleri, modern bina enerji yönetim sistemlerinde merkezi bir rol oynamaktadır. Akıllı kontrol algoritmaları ve sensör teknolojileri sayesinde, güneş enerjisi toplama ve ısı pompası çalışma modları, bina içi ısıtma/soğutma talebi ve dış hava koşullarına göre dinamik olarak optimize edilmektedir. Bu, sistemin genel verimliliğini artırır ve enerji tüketimini minimize eder. Güncel teknolojik gelişmeler arasında, mevsimsel enerji depolama çözümleri, termal depolama malzemelerinin (faz değiştiren malzemeler) kullanımı, akıllı şebekelerle entegrasyon ve yapay zeka tabanlı tahmin ve optimizasyon algoritmaları yer almaktadır. Özellikle PV ve PV/T sistemlerinin ısı pompalarını sadece enerji tüketen cihazlar olmaktan çıkarıp akıllı enerji ağlarının aktif bir bileşeni haline getirmesi, enerji ağının esnekliğini artıran ve değişken yenilenebilir kaynaklardan gelen dalgalanmaları dengeleyen önemli bir avantaj sağlamaktadır.

SONUÇLAR

Bu bölümde ele alınan analizler, ısı pompalarının küresel enerji dönüşümünde ve düşük karbonlu bina teknolojilerinin yaygınlaşmasında oynadığı stratejik rolü açıkça ortaya koymaktadır. Hava, toprak ve su kaynaklı ısı pompalarının farklı iklim koşulları ve bina tiplerine göre sunduğu avantajlar ile karşılaştıkları sınırlamalar, doğru kaynak seçiminin sistem performansı ve ekonomik fizibilite açısından kritik olduğunu göstermektedir. Özellikle hava kaynaklı sistemlerin düşük kurulum maliyeti ve kolay entegrasyon avantajına karşın, soğuk iklimlerde verimlilik kaybı yaşaması; toprak kaynaklı sistemlerin yüksek verimi ve kararlılığına rağmen yüksek yatırım maliyeti gerektirmesi; su kaynaklı sistemlerin ise en yüksek verim potansiyelini sunmasına rağmen coğrafi ve çevresel kısıtlamalarla sınırlandırılması, her uygulamanın kendine özgü bir değerlendirme gerektirdiğini ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte, güneş enerjisi ile entegrasyon, bu sınırlılıkların önemli ölçüde aşılmasına olanak tanımaktadır. PV panellerden sağlanan elektrik ile ısı pompasının beslenmesi, PV/T veya güneş termal sistemlerle sağlanan termal ön ısıtma çözümleri, sistemlerin hem enerji verimliliğini hem de çevresel sürdürülebilirliğini artırmaktadır. Ayrıca, yapay zeka tabanlı kontrol stratejileri ve termal enerji depolama uygulamaları sayesinde ısı pompaları, akıllı enerji ağlarında esnek bir yük olarak çalışabilmekte ve yenilenebilir enerji kaynaklarının dalgalı yapısını dengeleyerek şebeke istikrarına katkı sunmaktadır.

Sonuç olarak, güneş termal, PV ve PV/T entegreli ısı pompası sistemleri, sadece bireysel binalar için değil, aynı zamanda kentsel ölçekte enerji yönetimi ve karbon emisyonlarının azaltılması için de önemli bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Bu bütünleşik yaklaşım, geleceğin enerji verimli, düşük karbonlu ve sürdürülebilir sistemlerin inşasında kritik bir rol üstlenecek, enerji dönüşüm hedeflerine ulaşmada güçlü bir araç olarak görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Battisti, R., & Corrado, A. (2005). Evaluation of technical improvements of photovoltaic systems through life cycle assessment methodology. *Energy*, 30(7), 952–967.
- Belmonte, J. F., Díaz-Heras, M., Almendros-Ibáñez, J. A., & Cabeza, L. F. (2022). Simulated performance of a solar-assisted heat pump system including a phase-change storage tank for residential heating applications: A case study in Madrid, Spain. *Journal of Energy Storage*, 47, 103615.
- Bilen, K., & Demir, O. (2021). Hava, Su ve Toprak Kaynaklı Isı Pompalarının Farklı Soğutucu Akışkanlar için Enerji ve Ekserji Analizi. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 8(2), 688–705.
- Brbhan, S., Omle, I., & Szamosi, Z. (2025). Enhancement of a heat pump's efficiency COP operating on the water-soil principle. *Pollack Periodica*, 20(2), 73–78.
- Chhugani, B., Pärish, P., Helmling, S., & Giovannetti, F. (2023). Comparison of PVT-heat pump systems with reference systems for the energy supply of a single-family house. *Solar Energy Advances*, 3, 100031.
- Choi, H. U., Kim, Y. B., Son, C. H., Yoon, J. I., & Choi, K. H. (2020). Experimental study on the performance of heat pump water heating system coupled with air type PV/T collector. *Applied Thermal Engineering*, 178, 115427.
- Chow, T. T. (2018). A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Renewable Energy*, Vol4_88–Vol4_119.
- Giama, E., Sittas, K., Chantzis, G., & Papadopoulos, A. (2025). Carbon neutrality in the building sector: Optimization of heat pumps operation in combination to PV/T as auxiliary renewable energy system. *Energy*, 136726.
- International Energy Agency (IEA). (2022). *The Future of Heat Pumps*. IEA Publishing.
- İncili, V., & Aktar, A. K. (2022). Akıllı Şebeke Ortamında PV/T Destekli Isı Pompası ile Bir Müstakil Evin Elektrik ve Isı Enerjisi Yönetimi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 15(3), 889–903.
- Kamel, R. S., & Fung, A. S. (2014, June). Case Study on Cost Saving and GHG Emission Reduction From Coupling Air Source Heat Pump With Photovoltaic/Thermal.
- Kayabaşı, R., & Kaya, M. (2023). Effect of module operating temperature on module efficiency in photovoltaic modules and recovery of photovoltaic module heat by thermoelectric effect. *Journal of Thermal Engineering*, 9(1), 191–204.
- Kim, J., Lee, M., Lee, D., Han, C., & Kim, Y. (2023). Energy, economic, and environmental evaluation of a solar-assisted heat pump integrated with photovoltaic thermal modules using low-GWP refrigerants. *Energy Conversion and Management*, 293, 117512.
- Koopman, T., Zhu, T., & Rohlf, W. (2024). Performance evaluation of air-source heat pump based on a pressure drop embedded model. *Heliyon*, 10(4).

- Lazzarin, R., & Noro, M. (2020). Photovoltaic/Thermal (PV/T)/ground dual source heat pump: Optimum energy and economic sizing based on performance analysis. *Energy and Buildings*, 211, 109800.
- Liu, W., Yao, J., Jia, T., Zhao, Y., Dai, Y., Zhu, J., & Novakovic, V. (2023). The performance optimization of DX-PVT heat pump system for residential heating. *Renewable Energy*, 206, 1106–1119.
- Özenen, D. (2021). Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompası Modellemesi (Yüksek Lisans Tezi). Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Öztürk, M., & Kayabaşı, R. (2023). Güneş enerjisinin İç Anadolu bölgesinde kullanılabilirliği ve sistem analizi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(4), 1351–1359.
- Öztürk, M., Çalışır, O., & Genç, G. (2021). Energy, exergy and economic (3E) evaluation of the photovoltaic/thermal collector-assisted heat pump domestic water heating system for different climatic regions in Turkey. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 145(3), 1431–1443.
- Öztürk, M., Kayabaşı, R., & Taşdemir, O. (2025). Kırşehir'in rüzgar enerjisi potansiyeli ve İç Anadolu Bölgesi kurulu rüzgar enerjisi santrallerinin güç analizi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(1), 189–201.
- Risinggård, V. K., Sivertsen, O., Thisted, U., & Midttømme, K. (2023). Performance study and life-cycle cost analysis of a ground-source heat-pump system in a commercial building in Norway. *Science and Technology for the Built Environment*, 29(2), 131–145.
- Yao, J., Dou, P., Zheng, S., Zhao, Y., Dai, Y., Zhu, J., & Novakovic, V. (2022). Co-generation ability investigation of the novel structured PVT heat pump system and its effect on the “Carbon neutral” strategy of Shanghai. *Energy*, 239, 121863.
- Zou, H., Liu, Z., & Long, E. (2021). An experimental study on external ventilation to the heating performance of household air source heat pump. *Frontiers in Energy Research*, 9, 785461.



SÜRDÜRÜLEBİLİR VE ENERJİ VERİMLİ YAPI TASARIMINDA FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN KULLANIMI

“ ”

Müjdat ÖZTÜRK¹

Hasan DİLBAS²

Furkan BİRDAL³

1 Dr. Öğr. Üyesi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID. 0000-0003-1800-2234

2 Doç. Dr., Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ORCID. 0000-0002-3780-8818

3 Dr. Öğr. Üyesi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ORCID. 0000-0002-2243-418X

GİRİŞ

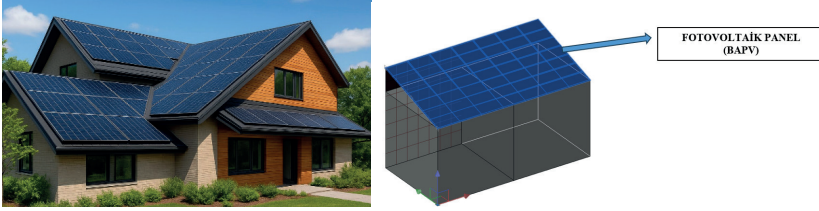
Küresel enerji krizinin derinleşmesi, hızlanan iklim değişikliği etkileri ve karbon nötr şehirler hedeflerine ulaşma taahhüdü, yapı sektörünün temelden bir dönüşüm geçirmesini ve bu noktada karbona bağlı enerji kaynaklarından (kömür, doğalgaz vb.) geri dönüştürülebilir enerji kaynaklarına (güneş, jeotermal, vb.) geçişi zorunlu kılmaktadır (Kuhn vd., 2021; Öztürk ve Kayabaşı, 2023). Günümüzde binalar, sadece birer barınma alanı olmaktan çıkarak aktif enerji üretebilen, çevresel etkileri minimum ve kendi kendini yönetebilen sürdürülebilir dinamik sistemlere dönüşmektedir. Bu dönüşümün merkezinde yer alan teknolojilerden biri, Bina Entegreli Fotovoltaik (BIPV) sistemler olarak öne çıkmaktadır. Geleneksel güneş paneli uygulamaları, genellikle binanın mevcut yüzeyine sonradan eklenen ve ana yapıdan ayrı duran elemanlar, BIPV sistemler binanın bir parçası haline gelerek enerji üretimini yapısal tasarımın ayrılmaz bir parametresi haline getirmektedir. Bu işlevsellik, BIPV'yi sadece bir enerji üretim kaynağı olmaktan çıkarıp, hava koşullarına karşı koruma, termal yalıtım, gürültü azaltma, gün ışığı yönetimi ve güvenlik gibi kritik bina kabuğu fonksiyonlarını da yerine getiren bir konsept haline getirmektedir (Dawnice, 2025).

BIPV'nin bu çok katmanlı rolü, onu sürdürülebilir yapı tasarımı ve enerji verimliliği hedefleri için benzersiz bir çözüm haline getirmektedir. Bu teknoloji, ek bir arazi veya alan gereksinimi olmaksızın, bir binanın dış yüzeyini bir enerji üretim santraline dönüştürmesine olanak tanır. Böylece, özellikle kentlerde sınırlı olan yapısal alandan maksimum verim elde edilmesini sağlamaktadır. Binalarda enerji verimliliği için yeni nesil ısıtma sistemleri, termal aktif bina sistemleri ve güneş enerjisi destekli sistemlerin entegrasyonu ile tasarım ve verimlilik konularında yapılan çalışmalar günümüzde birçok araştırmacının dikkatini çekmektedir (Çalışır, Öztürk ve Genc, 2021; Durmaz ve Ekici-oğlu-Küzeci, 2025). Bu çalışmalar binaların sürdürülebilirlik ve yeşil bina tasarımına önemli katkılar sunmaktadır. Literatür araştırmaları, BIPV'nin sadece teknik bir ürün değil, aynı zamanda disiplinler arası iş birliği ve güncel regülasyon gerektiren karmaşık bir sistem çözümü olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, sürdürülebilir yapı tasarımı ve enerji performansı açısından binaya entegre fotovoltaik (PV) sistemlerin değerlendirilmesi başlığı altında BIPV sistemlerinin yapıya entegrasyon ilkelerini, güncel uygulama teknolojilerini, uygulama alanlarını ve bu teknolojinin yaygınlaşmasının önündeki karmaşık ekonomik ve düzenleyici engelleri incelemeyi amaçlamaktadır.

BIPV SİSTEMİNİN KAVRAMSAL ÇERÇEVESİ

PV sistemlerin binalarda kullanımı, kurulumu ve entegrasyon yöntemi-ne bağlı olarak, Bina Uygulamalı Fotovoltaik (BAPV) ve BIPV sistemler gibi iki farklı biçimde gerçekleştirilmektedir. BAPV sistemlerinde PV modüller, hareketli raylar veya montaj aparatları kullanılarak doğrudan mevcut yapı

elemanlarının (örneğin kiremit, cephe kaplaması) üzerine eklenmektedir. Bu yöntemde paneller, binanın işlevsel veya yapısal özelliklerini değiştirmemekte; yalnızca ek bir enerji üretim çözümü olarak çatıya ya da cepheye uygulanmaktadır (Şekil 1).

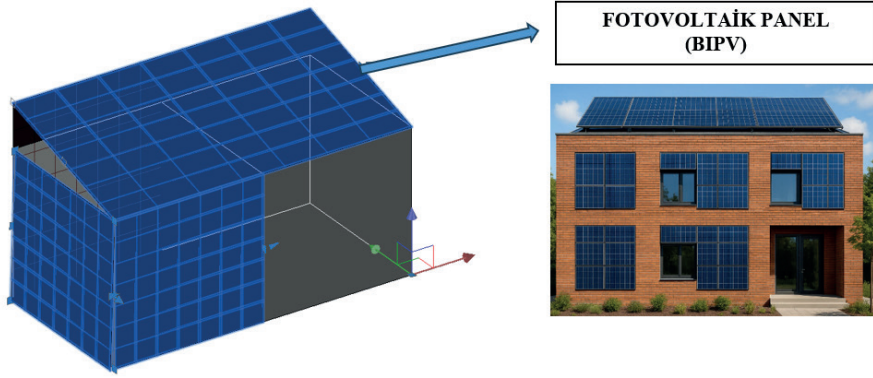


Şekil 1. BAPV sistemli yapı örneği konsepti.

BIPV sistemlerinde ise PV modüller, geleneksel yapı malzemelerinin (kiremit, cam, cephe kaplaması, korkuluk vb.) yerini alacak şekilde doğrudan yapının bir bileşeni olarak tasarlanmakta ve entegre edilmektedir. Böylece PV modülleri, yalnızca enerji üretmekle kalmaz, aynı zamanda çatı veya cephe gibi yapı elemanlarının esas işlevini de üstlenmektedir.

Yenilenebilir enerji sistemlerine geçişin küresel ölçekte hız kazanmasıyla, binaların enerji dengesindeki geleneksel rolleri radikal bir dönüşüm sürecine girmiştir. Bugüne kadar enerji tüketiminin pasif birer unsuru olarak değerlendirilen binalar, artık enerji üretiminde de aktif rol üstlenmektedir. Bu dönüşümün merkezinde ise BIPV teknolojileri yer almaktadır.

BIPV sistemleri, bir binanın dış kabuğuna (çatı, cephe, pencere ya da gölgeleme sistemlerine) doğrudan entegre edilen PV elemanlardan oluşmaktadır (Şekil 2). Bu yaklaşımın en temel özelliği, PV modüllerinin yalnızca elektrik üretmekle sınırlı kalmayıp aynı zamanda binanın yapısal bütünlüğüne de katkı sağlamasıdır. Yani BIPV elemanları, su yalıtımı, rüzgâr bariyeri, ısı yalıtımı veya gölgeleme gibi mimari ve mühendislik açısından kritik işlevleri yerine getirirken, eşzamanlı olarak yenilenebilir elektrik de üretmektedir. Bu çift işlevli yapı, BIPV teknolojilerini klasik bina üzerine monte edilen PV çözümlerine kıyasla çok daha değerli ve yenilikçi bir noktaya taşımaktadır.



Şekil 2. BIPV sistemli yapı örneği konsepti.

Ayrıca BIPV'nin getirdiği avantaj yalnızca enerji üretimi ile sınırlı değildir. Estetik çeşitlilik, farklı renk ve dokularda üretilebilen modüller sayesinde yapı tasarım sürecine yeni ufuklar katmaktadır. Bu sayede BIPV, hem modern mimaride hem de mevcut yapı sistemlerinin korunması gereken alanlarında uygulanabilmektedir. İlavenen, enerji performansına katkısının yanında, kullanıcıların yaşam konforunu artıran doğal aydınlatma, gölgeleme ve ısıl denge gibi ek faydalar da sağlamaktadır. BIPV sistemleri yalnızca bir enerji teknolojisi değil; kentlerin ve binaların sürdürülebilirlik vizyonunu destekleyen bütüncül bir tasarım yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, geleceğin şehirlerinde BIPV'nin yalnızca enerji üretiminde değil, estetik, işlevsellik ve çevresel performans açısından da belirleyici bir rol oynaması beklenmektedir.

ENERJİ ETKİN BİNA TASARIMINDA BIPV'NİN ÖNEMİ

BIPV sistemler, binaların geleneksel olarak yalnızca enerji tüketen pasif yapılar olmaktan çıkarak, aynı zamanda enerji üreten aktif yapılara dönüşmesinde temel bir rol üstlenmektedir. Bu dönüşüm, yalnızca teknolojik bir ilerleme olarak değil, aynı zamanda sürdürülebilir kentleşme ve düşük karbon ekonomisi hedefleri doğrultusunda kritik bir adım olarak değerlendirilmektedir. Özellikle Avrupa Birliği'nin Neredeyse Sıfır Enerjili Bina (nZEB) politikaları ile küresel karbonsuzlaşma stratejileri (Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları) düşünüldüğünde, BIPV'nin enerji etkin bina tasarımındaki stratejik önemi daha da belirgin hale gelmektedir. BIPV teknolojisinin sağladığı en önemli avantajlardan biri, binaların kendi enerji tüketimlerini büyük ölçüde yerinde üretebildikleri temiz enerji ile dengeleme kapasitesidir. Bu özellik, şehirlerin enerji arz güvenliğini ve dayanıklılığını artırmakta, merkezi enerji üretim sistemlerine bağımlılığı azaltmaktadır. Özellikle yoğun kent dokularında, mevcut enerji altyapısına ek yük bindirmeden ve ayrıca enerji üretimi için ek bir alana gereksinim duymadan yeni-

lenebilir enerji üretimini mümkün kılması, BIPV'yi geleceğin akıllı şehirleri için vazgeçilmez bir çözüm haline getirmektedir (Chen vd., 2024; Bonomo ve Frontini, 2024).

Aynı zamanda, BIPV sistemleri yalnızca çevresel faydalarla sınırlı kalmayıp ekonomik ve toplumsal açıdan da cazip bir seçenek sunmaktadır. Merkezi olmayan üretim modeli, iletim hatlarıyla enerji taşınması gibi konular ve işlemler olmadığı için enerji kayıplarını en aza indirirken, enerji fiyatlarındaki dalgalanmalara karşı kullanıcıları korumaktadır. Buna ek olarak, bina sahiplerine enerji maliyetlerinde uzun vadeli tasarruf olanağı sağlamakta ve gayrimenkullerin piyasa değerini artırmaktadır.

Sonuç olarak, BIPV'nin enerji etkin bina tasarımındaki rolü salt teknik bir yenilikten ibaret değildir. Bu teknoloji, çevresel sürdürülebilirliği, ekonomik faydayı ve toplumsal refahı aynı anda hedefleyen bütüncül bir stratejinin parçası olarak görülmelidir. Dolayısıyla, gelecekte enerji verimliliği ve karbonsuzlaşma hedeflerine ulaşmada BIPV'nin, sadece mühendislik açısından değil, politika ve planlama düzeyinde de merkezi bir konumda olması beklenmektedir.

BIPV SİSTEMLERİNİN YAPISAL TASARIM BOYUTU, ESTETİK VE TASARIM BÜTÜNLÜĞÜ

BIPV sistemlerin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için, yapısal tasarım sürecinin en erken aşamalarında dikkate alınması gerekmektedir. Bu yaklaşım, BIPV'nin binanın inşa sistemi, güneş ışığına göre konumu, güneş ışınımına maruziyeti ve dış kabuk bileşenleri gibi temel yapısal faktörlerle uyumlu şekilde tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Dolayısıyla BIPV, yalnızca sonradan eklenen bir enerji teknolojisi değil, binanın tasarım felsefesinin ayrılmaz bir parçası olarak ele alınmalıdır.

PV'nin yapıya entegrasyonu, yalnızca görsel tanınırlık ve estetik katkıyla sınırlı değildir. Kullanılan PV yüzey malzemelerinin türü, renk ve dokusu, aynı zamanda binanın formunun kavramsallaştırılması üzerinde doğrudan etkili olabilmektedir. Böylece, PV panelleri sadece enerji üretim araçları değil, aynı zamanda yapısal elemanlar olarak da değerlendirilebilmektedir. Bu durum, mimarların ve mühendislerin, optimum PV verimliliğini sağlayacak stratejiler (örneğin uygun eğim ve güneş ışığına göre yönelme açıları) ile binanın estetik ve fonksiyonel gereksinimlerini bir araya getirmelerini gerektirmektedir.

Bu bağlamda, Bütünleşik Bina Tasarım Yaklaşımı (BBYT), BIPV'nin enerji ve çevresel performansa katkısını en üst düzeye çıkarmak için önemli bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. BBYT bina geliştirme, tasarım, yapım ve işletme süreçlerinde yer alan mimarlar, mühendisler ve yatırımcılar gibi tüm paydaşların etkin iş birliği teşvik eden süreç odaklı bir çerçeve sunmakta-

dır. Bu yaklaşımın en kritik özelliği, tasarımın erken aşamalarında disiplinler arası koordinasyonu (örneğin, makine mühendisliği-inşaat mühendisliği-mimar-elektrik mühendisi ve çevre mühendisi-peyzaj mimarı koordinasyonu) sağlamasıdır. Böylelikle, binanın yaşam döngüsü boyunca göstereceği enerji performansı simülasyonlarla önceden tahmin edilebilmekte ve alternatif tasarımlar test edilerek enerji verimliliği ve maliyetler optimize edilebilmektedir.

Geleneksel iş süreçlerinde mimari ve mühendislik çalışmaları çoğu zaman birbirinden ayrı yürütülürken, BIPV uygulamaları bu iki disiplinin bütünleşmesini zorunlu kılar. Mimarlar, BIPV panellerin estetik ve boyutsal esnekliğini (örneğin renk, şeffaflık ve boyut seçenekleri) tasarımlarına dahil ederken; mühendisler aynı anda yapısal yükler, elektrik bağlantıları ve termal performans gibi teknik detayları dikkate almak durumundadır. Bu eşzamanlı iş birliğinin eksikliği, proje maliyetlerinin yanlış belirlenmesine, teknik uyumsuzluklara ve uzmanlık boşluklarına yol açabilmektedir.

Dolayısıyla, BIPV'nin başarılı bir şekilde hayata geçirilebilmesi için multidisipliner bir işbirliği ekosistemi şarttır. Tasarım aşamasında kurulacak bu koordinasyon, BIPV sistemlerinin hem yapısal hem de teknik gereksinimlere eksiksiz uyum sağlamasına imkân verir. Aksi takdirde BIPV uygulamaları yalnızca “ek bir teknoloji” olarak kalabilmekte, sunduğu çok yönlü avantajlar göz ardı edilebilmekte ve projenin maliyet etkinliği azalabilmektedir.

BIPV UYULAMALARINDA GİYDİRME CEPHELERİN ÇEŞİTLERİ VE MALZEME ÖZELLİKLERİ

BIPV'nin en yaygın ve etkili kullanım alanlarından biri, özellikle ticari ve ofis binalarında sıkça rastlanan cam giydirme cephelerdir. Bu uygulamalar, yalnızca estetik bir dış görünüş sağlamanın ötesinde, binaları aynı zamanda enerji üreten yapılar haline dönüştürmektedir. PV cam teknolojisi, doğal ışığın iç mekânlara girmesine izin vermekte ve eşzamanlı olarak elektrik üretebilmektedir; böylece binanın görsel bütünlüğü korunmakta ve hatta artırılmaktadır (Duyan ve Bayrakdarlar, 2022). Bu durum, BIPV sistemlerinin yalnızca teknik bir enerji çözümü değil, aynı zamanda yapı estetiği ve sürdürülebilirlik açısından stratejik bir bileşen olduğunu ortaya koymaktadır.

Cam giydirme cephelerde en sık kullanılan PV teknolojiler, kristal silisyum hücreler (mono veya polikristal) ve ince film teknolojileridir (örneğin, amorf silisyum, CdTe). Kristal silisyum modüller, standart test koşullarında çok kristallide %12–17 ve monokristallide %20'ye kadar verimlilik sunarken; ince film teknolojilerinde bu oran amorf silisyum için %6–8, CIGS için %13'e kadar çıkabilmektedir. İnce film paneller, düşük ısınım koşullarında ve yansayan ışıktaki dahi çalışabilmeleri, ayrıca yüksek sıcaklıklarda daha düşük performans kaybı göstermeleri nedeniyle cephe uygulamaları için avantaj sağlamaktadır. Kristal silisyum modüllerde ışık geçirgenliği, hücreler arasındaki

boşlukların artırılmasıyla sağlanırken; ince filmde aktif katmanın kısmen kaldırılması veya ultra ince katmanlarla şeffaf iletken kaplamaların birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Renk seçenekleri de bu teknolojilerde çeşitlenmekte; siyah, mavi ya da kahverengi tonların yanında kaplamalar ve filmler aracılığıyla farklı estetik çözümler uygulanabilmektedir (Karasu, Oytaç, Ergani ve Buluç, 2020).

Son yıllarda geliştirilen en yeni teknolojilerden biri olan organik fotovoltailer (OPV), BIPV uygulamalarında gelecek vadeden önemli bir teknolojiye sahiptir. Organik kimya tabanlı malzemelerden üretilen OPV sistemleri, ultra-hafif, esnek ve şeffaf olmaları sayesinde yalnızca düz cam yüzeylerle sınırlı kalmaz; kavisli cepheler, kompleks mimari yüzeyler hatta tekstil tabanlı uygulamalara kadar geniş bir yelpazede kullanılabilir (Bagher, 2014). Bu teknolojik esneklik, BIPV'nin geleneksel sınırlamalarını aşarak; yeni form, renk ve doku olanakları sunmaktadır. Böylece enerji üreten yüzeyler artık estetikten ödün vermeyen, hatta estetiği yeniden tanımlayan öğelere dönüşmektedir. OPV ve benzeri yeni nesil teknolojiler, BIPV sistemlerinin kullanım alanlarını yalnızca binalarla sınırlı tutmamaktadır. Kent mobilyaları (otobüs durakları, aydınlatma direkleri), elektrikli araç entegrasyonu, taşınabilir cihazlar ve hatta giyilebilir teknolojiler bu gelişmelerin açtığı potansiyel yeni pazarlar arasında yer almaktadır. Bu sayede BIPV, yapı tasarımı ve sürdürülebilirlik bağlamında niş bir uygulama olmaktan çıkarak, enerji üretimi ve tüketiminin mekânsal bütünleşmesine yönelik geniş ölçekli bir dönüşümün öncüsü haline gelmektedir.

BIPV SİSTEMLERİNDE ELEKTRİK ÜRETİM VERİMLİLİĞİ

BIPV sistemlerde elektrik üretim verimliliği, teknolojinin başarısını belirleyen temel performans göstergelerinden biridir. BIPV'nin en önemli katkısı, yerinde elektrik üretimi sağlaması ile bu sayede binaların enerji ihtiyacını doğrudan karşılayarak merkezi şebeke üzerindeki yüklerini azaltma potansiyeli sunmasıdır. Özellikle enerji talebinin yüksek olduğu gündüz saatlerinde BIPV ile üretim kapasitesinin artırılması, şebeke güvenliği ve enerji arzı açısından kritik bir avantaj oluşturmaktadır. Bununla birlikte, BIPV modüllerinin performansı yalnızca kullanılan hücre teknolojisine değil, aynı zamanda çevresel koşullara ve entegrasyon tasarımına da doğrudan bağlıdır. Gölgeleme etkisi, sistem konfigürasyonu, yetersiz hava akımı nedeniyle yükselen modül sıcaklıkları ve kısmi gölgelenme sonucu hücreler arasındaki gerilim uyumsuzlukları, elektrik üretim verimliliğini önemli ölçüde düşürebilmektedir. Özellikle cephe entegrasyonlarında, dikey konumlandırma nedeniyle doğrudan ışıının daha az alınması verimliliği sınırlandırırken, şeffaf veya yarı şeffaf BIPV uygulamalarında ışık geçirgenliği ile elektrik üretimi arasında bir denge kurulması gerekmektedir. Bu performans kayıplarını en aza indirmek için BIPV sistemlerinde hassas mühendislik analizleri yapılması zorunludur. Optimum yönelim ve eğim açıları, uygun havalandırma boşluk-

larının tasarlanması, hücrelerin bypass diyotlarıyla korunması ve gölgeleme senaryolarının detaylı şekilde modellenmesi, verimliliğin korunması açısından kritik önlemler arasında yer almaktadır (Skandalos ve Karamanis, 2015). Ayrıca, bina enerji simülasyonları ile PV performans tahminlerinin entegre edilmesi, yapı tasarım sürecinde hem enerji üretimini hem de kullanıcı konforunu optimize etme olanağı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, BIPV elektrik üretim verimliliği yalnızca panel teknolojisine değil; yapı tasarımı, iklim koşulları, yönelim, soğutma stratejileri ve sistem mühendisliği gibi çok boyutlu parametrelere bağlıdır. Bu nedenle, BIPV'nin enerji etkin bina tasarımında başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için disiplinler arası işbirliği ile geliştirilen bütüncül bir tasarım yaklaşımı gereklidir.

BIPV sistemlerin enerji etkinliğini belirleyen temel performans kriteri, yerinde üretilen elektrik miktarı ve bu üretimin şebeke üzerindeki tepe talep yüklerini azaltma potansiyelidir. Bununla birlikte, BIPV modüllerinin elektiriksel verimliliği yalnızca hücre teknolojisine değil, aynı zamanda yapısal entegrasyon ve çevresel koşullara da doğrudan bağlıdır.

Araştırmalar, sıcaklık artışı, gölgeleme, modül oryantasyonu ve hava akışının yetersizliği gibi faktörlerin BIPV sistemlerinde enerji üretiminde önemli kayıplara yol açtığını göstermektedir (Peng, Huang ve Wu, 2011). Özellikle cephe uygulamalarında, modüllerin dış ortam havasıyla doğrudan temasının sınırlı olması nedeniyle sıcaklık yükselmekte ve buna bağlı olarak verimlilik düşmektedir. Bu nedenle, BIPV sistemlerinin tasarımında doğal veya mekanik havalandırma çözümleri kritik bir rol oynamaktadır.

Yürütülen çalışmalardaki deneysel bulgular, çift kabuklu cephe sistemlerinde PV modüllerin arkadan havalandırılması sayesinde modül sıcaklığının düşürüldüğünü ve elektrik verimliliğinin anlamlı şekilde iyileştirildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, gölgeleme senaryolarının ve hücreler arasındaki eşleşme kayıplarının performans üzerinde doğrudan etkili olduğu, bu nedenle entegrasyon sürecinde hassas mühendislik hesaplamalarının zorunlu olduğu belirtilmektedir (Peng, Huang ve Wu, 2011).

Sonuç olarak, BIPV'nin elektrik üretim verimliliği; hücre tipi, yapı tasarımı, havalandırma çözümleri, cephe konumlandırması ve iklimsel koşullar gibi çok boyutlu faktörlerin etkileşimine bağlıdır. Verim kayıplarını en aza indirmek için, tasarım aşamasında enerji simülasyonları ve çok disiplinli mühendislik analizleri yapılmalı, böylece BIPV'nin hem estetik hem de enerji performansı optimize edilmelidir.

BIPV İLE ISIL KONFOR VE GÖLGELEMENİN ETKİSİ

BIPV sistemleri, yalnızca elektrik üretimi aracılığıyla değil, aynı zamanda pasif enerji stratejilerine katkı sağlayarak binaların toplam enerji dengesinde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle BIPV panjurlar ve gölgelikler, güneş

ışınımına karşı etkili bir gölgeleme sağlayarak iç mekânlarda termal konfor koşullarını iyileştirmektedir. Bu sistemler, doğrudan güneş kazançlarını sınırlandırarak yaz aylarında soğutma yüklerinin azaltılmasına, kış aylarında ise istenmeyen aşırı ısınmanın önlenmesine yardımcı olur. Gölgeleme işlevine ek olarak BIPV panjurlar, aynı anda elektrik üretimi de gerçekleştirdikleri için geleneksel gölgeleme sistemlerinden ayrılmaktadır. Optimum tasarlanmış BIPV panjur sistemleri, binaların soğutma enerjisi ihtiyacını önemli oranda azaltarak ve bu sayede yıllık toplam enerji tüketiminde kayda değer tasarruf sağlamaktadır. Ancak, gölgeleme elemanlarının tasarımı enerji üretimi ile gölgeleme etkisi arasında hassas bir denge kurulmalıdır. Panjurun derinliği, eğim açısı, modül aralığı ve yönelimi gibi geometrik parametreler hem iç mekân aydınlatma koşullarını hem de elektriksel performansı doğrudan etkilemektedir. Örneğin, daha geniş panjurlar gölgeleme verimliliğini artırırken, aynı zamanda ışık geçirgenliğini azaltarak iç mekân aydınlatmasını düşürebilmektedir. Benzer şekilde, eğim açısının yanlış seçilmesi, PV hücrelerinin güneş ışığına maruziyetini sınırlandırarak elektrik üretim kapasitesini azaltabilmektedir.

Dolayısıyla BIPV panjur ve gölgelik sistemlerinin tasarımı, yalnızca estetik kaygılarla değil, termal konfor, gün ışığı performansı ve elektrik verimliliği gibi çok boyutlu hedefler dikkate alınarak yapılmalıdır. Bunun için gelişmiş enerji simülasyon araçları ve çok disiplinli tasarım yöntemleri kullanılmalı, farklı iklim senaryoları ve kullanıcı ihtiyaçları göz önünde bulundurulmalıdır. Bu yaklaşım, BIPV sistemlerinin binalarda sadece enerji üretim teknolojisi değil, aynı zamanda konfor artırıcı ve enerji tasarrufunu destekleyen çok işlevli bir tasarım elemanı olmasını sağlamaktadır.

ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE KARBON AZALTIM POTANSİYELİ

BIPV sistemlerinin en önemli çevresel katkılarından biri, sera gazı (GHG) emisyonlarının azaltılmasına yönelik sunduğu potansiyeldir. Yapılan yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) çalışmaları, tam cephe kaplamalı PV uygulamalarında bina kaynaklı sera gazı emisyonlarının %30'a kadar azalabileceğini göstermektedir (Amoruso ve Schuetze, 2023). Bu sonuç, BIPV'nin yalnızca enerji üretiminde değil, aynı zamanda karbon ayak izinin küçültülmesinde de etkili bir çözüm olduğunu ortaya koymaktadır. Geleneksel çatı kurulumu ile sınırlı PV sistemlerin aksine, BIPV teknolojisi yüksek katlı apartman cephelerinde merkezi olmayan elektrik üretimini mümkün kılarak, yerinde enerji tüketimini artırmakta ve şehir ölçeğinde enerji dayanıklılığını güçlendirmektedir. Bu durum, özellikle yoğun nüfuslu kentsel alanlarda Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları ile doğrudan ilişkilidir.

Ancak, güneş enerjisi üretiminin doğası gereği kesintili olması (gece saatlerinde üretim yapılamaması veya bulutlu günlerde verimin düşmesi), BIPV sistemlerinin tek başına sürekli bir enerji kaynağı olmasını engellemek-

tedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için BIPV sistemleri, genellikle enerji depolama çözümleri ile hibrit bir yapı içinde tasarlanmaktadır. Batarya Enerji Depolama Sistemleri (BESS), BIPV tarafından üretilen fazla enerjiyi depolayarak, enerji talebinin yüksek olduğu saatlerde veya güneş ışığının yetersiz olduğu dönemlerde kullanılmasını sağlamaktadır. Böylece, kullanıcılar kesintisiz enerjiye erişebilmekte ve şebekeye bağımlılık azalmaktadır.

Batarya teknolojileri arasında en yaygın kullanılan seçenek, yüksek enerji yoğunluğu, uzun döngü ömrü ve teknolojik olgunluğu sayesinde lityum iyon bataryalardır. Bununla birlikte, maliyet kısıtlarının ön planda olduğu projelerde daha uygun fiyatlı ve güvenilirliği kanıtlanmış kurşun-asit bataryalar da tercih edilebilmektedir. Batarya kapasitesinin belirlenmesinde, yalnızca teknik parametreler değil; aynı zamanda iklim koşulları, kullanıcı profili, enerji depolama hedefleri ve bütçe sınırları da kritik rol oynamaktadır. Dolayısıyla, enerji depolama tasarımı salt bir mühendislik kararı olmanın ötesinde, ekonomik ve sosyal boyutlarıyla birlikte ele alınmalıdır.

BIPV projelerinin başarısında bir diğer kritik unsur, inverter seçimidir. Bu sistemlerin yapısal çeşitliliği, farklı panel teknolojilerinin kullanımı ve yapıyla bütünleşme zorunluluğu, inverter performansını doğrudan etkileyen faktörlerdir. Çoklu Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT) özelliğine sahip inverterler, farklı eğim ve yönelimlere sahip panellerin verimliliğini optimize etmek için en uygun çözümlerden biridir (Abojela, Desa, ve Sabry, 2023). Bununla birlikte, ince film panellerin tercih edilmesi, artan kaçak akım riski nedeniyle özel güvenlik önlemleri gerektirmektedir. Bu riski en aza indirmek için güçlü kaçak akım önleme fonksiyonlarına sahip ya da özel tasarlanmış inverterlerin kullanımı zorunlu hale gelmektedir. Dolayısıyla, estetik ve teknolojik bir tercih olan ince film panellerin kullanımı, yalnızca görsel tasarımı değil, aynı zamanda mühendislik yaklaşımını, maliyet yapısını ve güvenlik gerekliliklerini de doğrudan etkilemektedir.

Sonuç olarak, BIPV sistemleri yalnızca enerji üretim teknolojisi değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik, kullanıcı güvenliği, estetik tasarım ve ekonomik uygulanabilirlik boyutlarını içeren çok yönlü bir çözümdür. Bu nedenle, BIPV projelerinin planlanması ve uygulanması sürecinde mühendislik kararlarının, çevresel hedeflerin ve kullanıcı odaklı yaklaşımların bir arada düşünülmesi ve dikkate alınması gerekmektedir.

MALİYET, BAKIM VE DAYANIKLILIK SORUNLARI

BIPV sistemlerin yaygınlaşmasının önündeki en önemli engellerden biri, yüksek başlangıç maliyetleridir. Özellikle yapı ile entegre şekilde tasarlanan özelleştirilmiş BIPV ürünleri, geleneksel PV panellere kıyasla daha yüksek üretim, tasarım ve montaj maliyetleri gerektirmektedir. Bu durum, yatırımcılar açısından ilk kurulum aşamasında önemli bir finansal yük oluşturmaktadır. Bununla birlikte, BIPV sistemlerinin uzun vadeli faydaları (enerji

tasarrufu, estetik katkı, karbon ayak izinin azaltılması vb.) çoğu zaman bu başlangıç maliyetlerini dengeleme potansiyeline sahiptir.

Finansal açıdan dikkat çeken bir diğer husus, Geri Ödeme Süresi (PBT) değerlerinin bina tipine bağlı olarak ciddi değişkenlik göstermesidir. Örneğin, tam PV kapsamına sahip binalarda geri ödeme süresinin apartmanlar için ortalama 12 yıl iken, karma kullanımlı binalarda 41 yıla kadar uzayabildiği rapor edilmiştir (Amoruso ve Schuetze, 2023). Benzer şekilde, Katar'daki mesken binaları için yapılan bir çalışmada geri ödeme süresi 34 yıl olarak bulunmuş, bu da ekonomik uygulanabilirlikte yerel koşulların belirleyici rolünü ortaya koymuştur (Chamoun ve Chakroun, 2013).

BIPV sistemlerinde yalnızca kurulum maliyeti değil, aynı zamanda işletme ve bakım (O&M) giderleri de önemli rol oynamaktadır. Özellikle yüksek kentsel yoğunluğa sahip bölgelerde, hava kirliliğinin paneller üzerinde yarattığı kirlenme, enerji üretim verimliliğini düşürmekte ve daha sık temizlik ile bakım ihtiyacı doğurmaktadır. Yüksek katlı binalarda ise bakım faaliyetleri, erişim zorlukları nedeniyle hem daha maliyetli hem de daha riskli olabilmektedir (Amoruso ve Schuetze, 2023). Avrupa bağlamında yapılan kapsamlı bir analiz, BIPV sistemlerinin cephe kaplaması olarak kullanılmasının uzun vadede ekonomik olabileceğini, ancak bakım ve erişim maliyetlerinin bu dengeyi etkileyebileceğini ortaya koymuştur (Gholami ve Røstvik, 2020).

BIPV'nin uzun vadeli başarısı açısından dayanıklılık da ayrı bir tartışma konusudur. Panellerin, bina cephelerine doğrudan entegre edilmesi, onları dış etkilere (örneğin, UV ışınımı, rüzgâr yükleri, sıcaklık değişimleri ve nem) karşı sürekli maruz bırakmaktadır. Bu durum, panel ömrünü ve performansını doğrudan etkileyebilmektedir. İsviçre'de yapılan uzun dönemli bir çalışmada, 55 farklı BIPV sisteminin 5–10 yıl boyunca performans kaybı medyan değeri (ortalama değeri) olarak yalnızca %0,06/yıl bulunmuş olsa da gölgeleme ve bakım eksikliği gibi faktörlerin sistem veriminde önemli rol oynadığı gösterilmiştir (Fairbrother vd., 2022). Dolayısıyla, BIPV sistemlerinin dayanıklılığı yalnızca malzeme kalitesi ile değil, aynı zamanda etkin bakım stratejileri ile de yakından ilişkilidir.

Sonuç olarak, BIPV sistemlerinin ekonomik açıdan rekabetçi hale gelebilmesi için yalnızca ilk yatırım maliyetlerinin değil; aynı zamanda bakım stratejilerinin, dayanıklılık kriterlerinin ve kullanıcı odaklı finansman modellerinin dikkate alınması gerekmektedir. Bu süreçte devlet teşvikleri, uygun finansman mekanizmaları ve yenilikçi mühendislik çözümleri, BIPV'nin yaygınlaşmasında belirleyici rol oynayabilecektir.

BIPV SİSTEMLERİNDE YASAL ZORUNLULUKLAR, YÖNETMELİKLER VE SERTİFİKALAR

BIPV sistemleri, yalnızca enerji üretim teknolojisi değil aynı zamanda bina kabuğunun ayrılmaz bir parçası olarak çevreci yeşil binalar için değerlendirilebilmektedir. Bu nedenle, BIPV uygulamaları hem elektrik üretim sistemleriyle ilgili mevzuata hem de yapı yönetmelikleriyle ilgili standartlara tabidir. Yasal zorunluluklar, esas olarak güvenlik, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik ekseninde şekillenmektedir.

İlk olarak, BIPV sistemleri elektrik altyapısına entegre edildiğinde ulusal elektrik şebekesine bağlantı standartlarına uygun olmalıdır. Bu kapsamda inverterler, kaçak akım koruma cihazları, yangın güvenliği önlemleri ve harmonik sınırlamalar gibi teknik gereklilikler yerine getirilmelidir. Şebekeye enerji satışı veya çift yönlü sayaç kullanımı söz konusu olduğunda ise, ilgili enerji piyasası düzenlemelerine uyum zorunludur. İkinci olarak, BIPV ürünleri aynı zamanda yapı malzemesi olarak kabul edildiğinden, yapı yönetmelikleri ve yangın güvenliği standartlarına uygunluk büyük önem taşımaktadır. Panellerin cephe veya çatıya entegre edilmesi durumunda, rüzgâr yükleri, su sızdırmazlığı, mekanik dayanıklılık ve yangına dayanıklılık gibi kriterler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu çerçevede, BIPV panellerinin bina kabuğu performans testlerinden geçirilmesi ve yapı ruhsatı süreçlerinde gerekli belgelerin sağlanması gerekir. Üçüncü olarak, BIPV ürünlerinin sertifikalandırılması hem üretici hem de kullanıcı açısından güvence sağlayacaktır. Uluslararası düzeyde IEC (International Electrotechnical Commission) standartları, BIPV panellerinin elektriksel performans ve güvenlik testlerini belirlerken; CE işareti, ürünlerin Avrupa Birliği mevzuatına uygun olduğunu garanti etmektedir. Ayrıca, diğer ülke standartlarına uygunluk, yangın ve iklimsel dayanıklılık için ek sertifikalar da talep edilebilir. Dördüncü ve son olarak, BIPV sistemlerinin çevresel boyutu göz ardı edilmemelidir. Birçok ülkede sürdürülebilir bina sertifikaları kapsamında BIPV kullanımı teşvik edilmekte ve bu tür uygulamalar yeşil bina puanlamasına katkı sağlamaktadır. Dolayısıyla, BIPV projelerinde yalnızca teknik gerekliliklerin değil, aynı zamanda çevresel ve sürdürülebilirlik kriterlerinin de dikkate alınması zorunludur.

Genel olarak, BIPV sistemlerinin uygulanabilirliği yalnızca teknolojik veya ekonomik faktörlere değil, aynı zamanda uyulması gereken yasal çerçevelere ve sertifikasyon süreçlerine bağlıdır. Bu nedenle proje geliştiriciler, mühendisler ve yatırımcılar, tasarım aşamasından uygulamaya kadar her adımda ulusal ve uluslararası standartları dikkate almak zorundadır.

ARTAN ENERJİ İHTİYACI VE SÜRDÜRÜLEBİLİR TASARIM ZORUNLULUĞU, NET SIFIR KARBON HEDEFİ VE YERİNDE YENİLENEBİLİR ENERJİNİN ROLÜ

Endüstri Devrimi'nden bu yana teknolojik gelişmeler ve değişen yaşam biçimleri, küresel enerji gereksinimini sürekli olarak artırmıştır. Bu talebin büyük ölçüde fosil yakıtlarla karşılanması, sera gazı salınımını artırarak iklim değişikliği ve küresel ısınma gibi ciddi çevresel sorunları beraberinde getirmiştir. Hammadde çıkarımından yapım, kullanım ve yıkım aşamalarına kadar yoğun enerji ve doğal kaynak tüketen yapı sektörünün çevre üzerindeki olumsuz etkisi bu bağlamda kritik bir öneme sahiptir. Bu çevresel baskılara yanıt olarak iki temel çözüm çerçevesi ortaya çıkmıştır: Gelecek nesiller için kaynakların korunmasını hedefleyen sürdürülebilir yapı tasarımı ve enerjinin verimli kullanımına odaklanan enerji etkin yapı tasarımı. Bu hedeflere ulaşmada, binaların pasif tüketiciler olmaktan çıkıp kendi enerjilerini üretme kapasitesine sahip olmaları, modern mimari yaklaşımların merkezine yerleşmiştir.

Sürdürülebilirlik hedefleri, günümüzde “Net Sıfır Karbon (NZC)” binalar standardında somutlaşmaktadır. Sürdürülebilir tasarımda “altın standart” olarak kabul edilen NZC binaları; pasif tasarım stratejileri, enerji verimliliği ve bina elektrifikasyonu gibi yaklaşımları yerinde yenilenebilir enerji teknolojileri ile birleştirerek karbonsuz enerji kaynaklarıyla işletilmeyi amaçlamaktadır. Bu vizyon doğrultusunda, yeni inşa edilen NZC binaları için yerinde yenilenebilir enerji sistemlerinin entegrasyonu, mümkün olan durumlarda temel bir gereklilik olarak kabul edilmektedir (Atelier Ten, 2021). PV sistemler, yapıların bu temel gerekliliği karşılayarak kendi enerjilerini üretmelerini sağlayan en etkili teknolojilerin başında gelmektedir.

BİNAYA ENTEGRE FOTOVOLTAİK (BIPV) SİSTEMLER: NZC BİNALAR İÇİN KRİTİK BİR TEKNOLOJİ

Güneş enerjisi, sürdürülebilir binalarda yerinde enerji üretimi için basit bir strateji olarak öne çıkmaktadır. İncelenen 30 sürdürülebilir yapı örneğinin 26'sında güneş enerjisinden yararlanıldığı görülmüş, bu da güneş enerjisi kullanımının çok etkili bir parametre olduğunu ortaya koymuştur (Gökşen, Güner ve Koçhan, 2017). BIPV sistemler, bu stratejinin en gelişmiş ve sinerjik uygulamasını temsil eder. Bu sistemler, panelleri yalnızca bir yapıya monte etmekten öteye geçerek, onları doğrudan bina zarfının işlevsel bir bileşeni haline getirmekte ve çok yönlü faydalar sunmaktadır. Bunlar:

- 1. İkili İşlevsellik:** BIPV sistemleri, yalnızca elektrik üretmekle kalmaz, aynı zamanda bina kabuğunun ayrılmaz bir parçası olarak çatı kaplamaları, cephe panelleri ve hatta pencere camları gibi geleneksel yapı malzemelerinin yerini alarak işlev görür. Bu entegrasyon, ek arazi gereksinimini ortadan kaldırır ve binanın yapısal tasarımıyla bütünleşik bir enerji üretim çözümü sunar.

2. Entegrasyon Yöntemleri: BIPV sistemlerinin uygulanmasında en yaygın yöntemler şunlardır:

- **Çatılar:** En yaygın uygulama alanıdır. İncelenen 30 örnekten 23'ünde çatıya entegre güneş paneli veya güneş pili kullanımı tespit edilmiştir (Gökşen, Güner ve Koçhan, 2017). Bu yöntem, geniş ve engelsiz yüzeyler sunarak enerji üretimini maksimize eder.
- **Cepheler:** Düşey yapı elemanlarına entegrasyon, özellikle kentsel alanlardaki yüksek binalar için değerli bir alternatiftir. Analiz edilen projelerden üçünde cephede PV panel kullanımına rastlanmıştır (Gökşen, Güner ve Koçhan, 2017).

3. Uygulama Örnekleri: Türkiye'de ve dünyada bu teknolojinin başarılı uygulamaları mevcuttur. SIEEB Ekolojik ve Enerji Etkin Binası, İTÜ Eko-yapı ve Varyap Meridian AVM gibi projeler, güneş panellerini tasarımlarına entegre ederek sürdürülebilirliğe önemli katkılar sağlamıştır. Bu teknolojik entegrasyon, binaların enerji performansını artırırken çevresel ve ekonomik kazanımları da beraberinde getirmektedir.

ENERJİ TÜKETEN BİNALARDAN ENERJİ ÜRETEYEN YAPILARA GEÇİŞ: BİNALARDA YEŞİL DÖNÜŞÜM

BIPV sistemler, yapı sektöründe geleneksel yapı anlayışından yeşil binalara bir paradigma değişimini temsil etmektedir. Bu değişim, binaların izole ve kaynak tüketen unsurlar olmaktan çıkıp, sürdürülebilir bir enerji ekosisteminin aktif ve entegre bileşenleri haline gelmesidir. BIPV teknolojisi, binaları pasif enerji tüketicileri olmaktan çıkarıp, kendi enerjisini üreterek kaynak korunumuna aktif katkıda bulunan yapılara dönüştüren stratejik bir araç olarak tanımlanabilir. Fosil yakıt kullanımını ve ilişkili karbon emisyonlarını azaltarak iklim değişikliğiyle mücadeleye doğrudan destek olan BIPV sistemleri, net sıfır karbon hedeflerine ulaşmada ve yapı sektörünün çevresel ayak izini en aza indirmede merkezi bir öneme sahiptir (Dikmen, 2011). Teknoloji, artık sadece bir araç değil, aynı zamanda sürdürülebilir bir geleceğin mimari dilinin de temel bir parçasıdır.

SONUÇLAR

BIPV sistemler, günümüzde sürdürülebilir bina tasarımı ve enerji verimliliği stratejilerinin merkezinde yer alan yenilikçi çözümlerden biri olarak öne çıkmaktadır. BIPV teknolojisi, yalnızca elektrik üretmekle kalmayıp aynı zamanda binanın kabuğuna yapısal, estetik ve çevresel katkılar sunarak çok işlevli bir yapı bileşeni olma özelliği taşımaktadır. Yapısal tasarımıyla bütünleşmiş bu yaklaşım, binaları enerji tüketen pasif unsurlar olmaktan çıkarıp, enerji üreten ve kendi kendini destekleyen aktif sistemlere dönüştürmektedir.

Yapılan değerlendirmeler, BIPV'nin karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltma, enerji arz güvenliğini artırma, ısı konforu iyileştirme ve kullanıcı konforunu yükseltme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, yüksek başlangıç maliyetleri, uzun geri ödeme süreleri, bakım zorlukları ve dayanıklılık ile ilgili belirsizlikler, teknolojinin yaygınlaşmasının önünde engel teşkil etmektedir. Ayrıca, yasal düzenlemeler, güvenlik standartları ve sertifikasyon süreçleri de BIPV'nin yaygın uygulamaları için kritik rol oynamaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, BIPV sistemleri yalnızca teknik bir enerji çözümü değil, aynı zamanda estetik, ekonomik sürdürülebilirlik ve toplumsal faydayı bir arada sunan çok boyutlu bir yaklaşımdır. Bu nedenle, gelecekte bina tasarımında disiplinler arası iş birliği, doğru mühendislik çözümleri ve uygun finansman modelleri ile desteklendiğinde BIPV teknolojilerinin yaygınlaşması kaçınılmaz görünmektedir.

GELECEK PERSPEKTİFİ

BIPV sistemlerinin geleceği, hem teknolojik yenilikler hem de politika yönelimleri açısından umut verici bir seyir izlemektedir. Malzeme bilimindeki gelişmeler, OPV, perovskit tabanlı hücreler ve şeffaf ince film teknolojileri sayesinde, BIPV uygulamaları yalnızca düz çatı ve cephelerle sınırlı kalmayacak; kavisli yüzeylerden tekstil tabanlı sistemlere kadar çok daha geniş bir yelpazede kullanılabilecektir. Bu çeşitlilik, estetik ve işlevsellik açısından daha özgür tasarım imkânları sunacaktır.

Enerji depolama sistemlerinin gelişimi, BIPV'nin kesintili üretim sorunlarını azaltacak ve binaların enerji öz yeterliliğini artıracaktır. Akıllı şebekelerle bütünleşen BIPV çözümleri, enerji paylaşımı ve talep tarafı yönetimi açısından geleceğin şehirlerinde kritik bir rol üstlenecektir. Ayrıca, yeşil bina sertifikasyon sistemleri ve ulusal enerji verimliliği politikaları, BIPV yatırımlarını teşvik ederek yaygınlaşmasını hızlandıracaktır.

Bununla birlikte, teknolojinin ekonomik olarak daha erişilebilir hale gelmesi için finansal destek mekanizmaları, devlet teşvikleri ve maliyet azaltıcı üretim tekniklerinin devreye alınması gereklidir. Yasal çerçevelerin uyumlu hale getirilmesi, güvenlik ve performans standartlarının küresel ölçekte birleştirilmesi uygulamada karşılaşılan engelleri azaltacaktır.

Gelecekteki Net Sıfır Karbon hedeflerine ulaşmak için, sürdürülebilir tasarımın altın standardı olan enerji etkin binaların ve derin enerji tadilatlarının yaygınlaşması esastır. Bu binalar, enerji verimliliği ve elektrifikasyonun yanı sıra, yerinde yenilenebilir enerji teknolojilerini kullanarak karbonsuz enerji kaynaklarıyla çalışması kuvvetli bir ihtimal olarak karşımıza çıkmaktadır. Enerji etkin yapı tasarımının temel amacı, yapısal tasarım sürecinin tüm evrelerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımına özen

göstererek kaynak korunumunu sağlamaktır. Güneş enerjisi sistemlerinin (PV gibi) yapı kabuğuna entegrasyonuyla, enerji girdileri minimize edilirken, operasyonel maliyetler düşmekte ve binalar kendi enerjilerini üretebilir konuma gelmektedirler. Bu sayede, yapısal tasarımlar çevresel duyarlılığa sahip, insan sağlığı ve konforunu koruyan, gelecek nesiller için yaşıanabilir ve sağlıklı çevreler oluşturmayı hedefleyen bir anlayışla şekillendirilecektir.

Sonuç olarak, BIPV teknolojileri, geleceğin sürdürülebilir şehirlerinin ayrılmaz bir parçası olmaya adaydır. Doğru politikalar, disiplinler arası işbirliği ve kullanıcı odaklı yaklaşımlarla desteklendiğinde, BIPV sistemlerinin yalnızca enerji üretiminde değil, aynı zamanda yapısal estetik, çevresel koruma ve toplumsal refah alanlarında da belirleyici bir katkı sağlaması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Abojela, Z. R. K., Desa, M. K. M., & Sabry, A. H. (2023). Current prospects of building-integrated solar PV systems and the application of bifacial PVs. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1164494.
- Amoruso, F. M., & Schuetze, T. (2023). Carbon life cycle assessment and costing of building integrated photovoltaic systems for deep low-carbon renovation. *Sustainability*, 15(12), 9460.
- Atelier Ten, New Buildings Institute, & Pathfinder Engineers & Architects LLP. *Energy Efficiency Design Guide For Net Zero Carbon Buildings and Deep Energy Retrofits*. The State University of New York and State University Construction Fund.
- Bagher, A. M. (2014). Comparison of organic solar cells and inorganic solar cells. *International Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 3(3), 53–58.
- Bonomo, P., & Frontini, F. (2024). Building integrated photovoltaics (BIPV): analysis of the technological transfer process and innovation dynamics in the Swiss building sector. *Buildings*, 14(6), 1510.
- Chamoun, R., & Chakroun, W. (2013). Cost-efficiency study of BIPV systems in Qatar Residential Houses. *International Journal of Renewable Energy Research*, 3(3), 732–739.
- Chen, L., Baghoolizadeh, M., Basem, A., Ali, S. H., Ruhani, B., Sultan, A. J., ... & Alizadeh, A. A. (2024). A comprehensive review of a building-integrated photovoltaic system (BIPV). *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 159, 108056.
- Çalışır, O., Öztürk, M., & Genc, G. (2021). Investigation of thermal performance of double-layered thermally activated building system in heating mode. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(21), 5866–5876.
- Dikmen, Ç. B. (2011). Enerji Etkin Yapı Tasarım Ölçütlerinin Örneklenmesi. *Politeknik Dergisi*, 14(2), 121–134.
- Durmaz, B., & Ekicioğlu-Küzeci, Z. (2025). Assessment of the Solar Energy Potential of Kırşehir Province. *Ahi Evran 5th International Conference on Scientific Research*, Dubai, UAE, June 2025.
- Duyan, F., & Bayrakdarlar, K. P. (2022). Enerji Etkin Bina Tasarımında Yapı Elemanı olarak Fotovoltaik Sistemler. *Mimarlık ve Yaşam*, 7(3), 965–980.
- Fairbrother, A., Quest, H., Özkalay, E., Wälchli, P., Friesen, G., Ballif, C., & Virtuani, A. (2022). Long-term performance and shade detection in building integrated photovoltaic systems. *Solar RRL*, 6(5), 2100583.
- Gökşen, F., Güner, C., & Koçhan, A. (2017). Sürdürülebilir Kalkınma İçin Ekolojik Yapı Tasarım Kriterleri. *Akademia Disiplinlerarası Bilimsel Araştırmalar Dergisi*, 3(1), 92–107.

- Gholami, H., & Røstvik, H. N. (2020). Economic analysis of BIPV systems as a building envelope material for building skins in Europe. *Energy*, 204, 117931.
- Karasu, B., Oytaç, Z., Ergani, E., & Buluç, A. (2020). Solar glass panels: A review. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (20), 548–565.
- Kuhn, T. E., Erban, C., Heinrich, M., Eisenlohr, J., Ensslen, F., & Neuhaus, D. H. (2021). Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV). *Energy and Buildings*, 231, 110381.
- Öztürk, M., & Kayabaşı, R. (2023). Güneş enerjisinin İç Anadolu bölgesinde kullanılabilirliği ve sistem analizi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(4), 1351–1359.
- Peng, C., Huang, Y., & Wu, Z. (2011). Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China. *Energy and Buildings*, 43(12), 3592–3598.
- Skandalos, N., & Karamanis, D. (2015). PV glazing technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 306–322.
- Application and Design Considerations of BIPV Building Integrated Photovoltaics - Dawnice. (2025, September 22). Retrieved from <https://www.energydawnice.com/application-and-design-considerations-of-bipv-building-integrated-photovoltaics/>