

GEÇİCİ KAPAK

*Kapak tasarımı
devam ediyor.*

BİDGE Yayınları

Enerji Sistemleri Mühendisliği Alanında Güncel Çalışmalar

Editör: HASAN ÜZMUŞ

ISBN: 978-625-8567-06-9

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 2025-12-25

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



ÖNSÖZ

Son yüzyılda gelişen teknoloji ile beraber enerji sistemlerinin gelişimi ve sürdürülebilmesi için yapılan çalışmalar hem akademik hem de sanayi alanında çok önemli bir yere sahiptir. Yeni keşfedilen ve mevcut enerji kaynak ve sistemlerinin daha verimli bir şekilde kullanılabilmesi ve böylece her geçen gün artan enerji talebinin karşılanabilmesi için Enerji Sistemleri Mühendisliği alanında geçmişte ve günümüzde yapılan çalışmaların beraber irdelenerek enerji sistemleri alanındaki güncel problemlerin çözümü için büyük bir önem arz etmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar zamanla yaygınlaşmakta ve farklılaşmaktadır. Enerji Sistemleri Mühendisliği Alanında Güncel Çalışmalar” isimli bu kitapta sunulan bölümlerle Enerji Sistemleri Mühendisliği alanında çalışmak isteyenler için önemli bilgiler yer almaktadır.

Dr. Öğr. Üyesi Hasan ÜZMUŞ

VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ

İÇİNDEKİLER

PV/T SİSTEMLERDE SICAKLIK-ELEKTRİK ÜRETİMİ İLİŞKİSİ	1
--	---

ABDULKADİR AYANOĞLU, İBRAHİM BOZ, DAVUT OZHAN

HİDROJENİN ENDÜSTRİYEL KULLANIM ALANLARI VE ENERJİ SİSTEMLERİNE ENTEGRASYONU	14
---	----

AHMET DENİZ

EXERGETIC PERFORMANCE OF HEAT EXCHANGER EFFICIENCY IN WASTE HEAT RECOVERY IN CLEAN WATER PRODUCTION	31
---	----

MEHMET ALTINKAYNAK

EXERGETIC PERFORMANCE OF HEAT EXCHANGER EFFICIENCY IN WASTE HEAT RECOVERY IN ORC POWER PRODUCTION	42
---	----

MEHMET ALTINKAYNAK

HİDROJENİN TEKNİK ALTYAPISI: FİZİKOKİMYASAL ÖZELLİKLERDEN LOJİSTİK SÜREÇLERE	54
---	----

AHMET DENİZ

SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA PERSPEKTİFİNDE TÜRKİYE'NİN YENİLENEBİLİR ENERJİ STRATEJİSİ	76
---	----

AHMET ERHAN AKAN

YENİ NESİL ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARI: KATI HAL TEKNOLOJİLERİ, YÜKSEK ENERJİ YOĞUNLUĞU VE SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİM YAKLAŞIMLARI	96
---	----

AHMET ERHAN AKAN

TARIMSAL SULAMADA SAYISAL TASARIM VE FOTOVOLTAİK SİSTEM MODELLEMESİ: ÇUMRA ÖRNEĞİ	118
---	-----

ABDULLAH AVCU, MUSTAFA TAHİR AKKOYUNLU, FATİH AKKURT

BÖLÜM 1

PV/T Sistemlerde Sıcaklık-Elektrik Üretimi İlişkisi

Abdulkadir AYANOĞLU¹

İbrahim BOZ²

Davut ÖZHAN³

Giriş

Enerji, teknolojinin temeli olup, her gün artan esas bir ihtiyaç haline gelmiştir. Geleneksel kaynakların azalmasından dolayı alternatif kaynaklara yönelme gerçekleşmiştir. Sürdürülebilir kalkınma için alternatif enerji kaynaklarının değer kazanmıştır (Kabul & Duran, 2014). Avrupa’da güneş enerjisi ortalaması yüksek olan ülkelerden biri olan Türkiye; Güney İspanya ve Güney İtalya

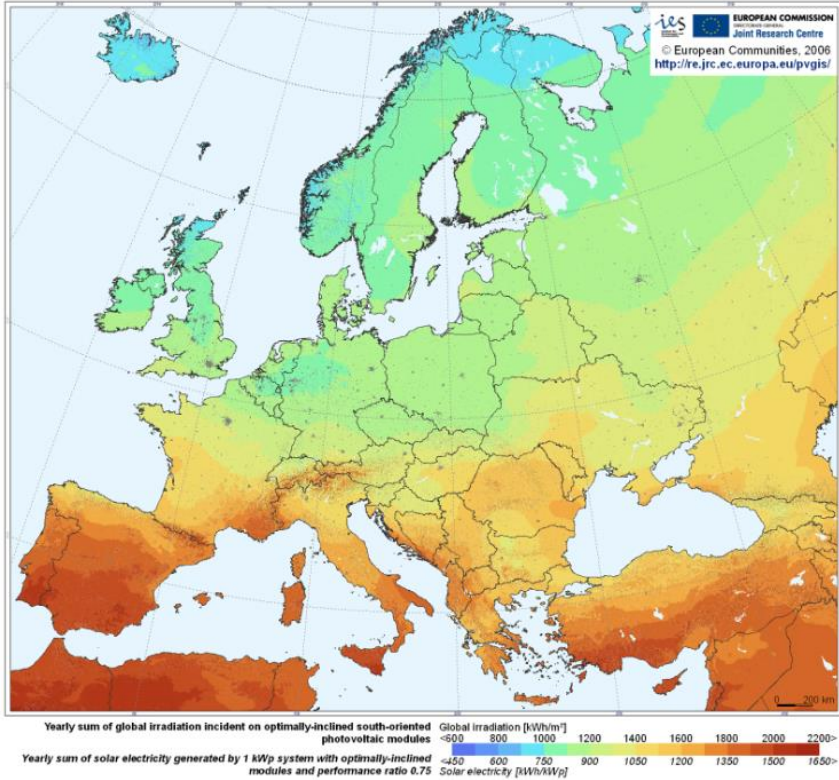
¹Dr.Öğr.Üy. Mardin Artuklu Üniversitesi, OSB-Meslek Yüksek Okulu, Makine Programı, Mardin-Türkiye-Orcid: 0009-0001-2392-7015

²Öğr.Gör. Mardin Artuklu Üniversitesi, OSB-Meslek Yüksek Okulu, Makine Programı, Mardin-Türkiye-Orcid: 0009-0001-2392-7015

³Dr.Öğr.Üy. Mardin Artuklu Üniversitesi, OSB-Meslek Yüksek Okulu, Makine Programı, Mardin-Türkiye-Orcid: 0000-0002-0400-1970

diğer güneşlenen ülkelerdir. Şekil 1’de görülebilmektedir (European Commission Joint Research Centre [JRC], 2010).

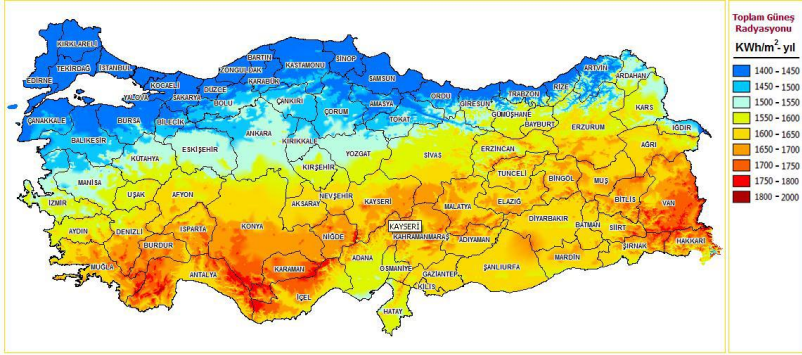
Şekil 1 Avrupa güneş enerji haritası



Kaynak: (European Commission Joint Research Centre [JRC], 2010).

Türkiye Şekil 2’de Orta Anadolu, Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu bölgeleri güneşlenme ortalaması yüksek olan bölgelerimizdir (European Commission Joint Research Centre [JRC], 2010).

Şekil 2 Türkiye güneş enerji haritası



Kaynak: (European Commission Joint Research Centre [JRC], 2010).

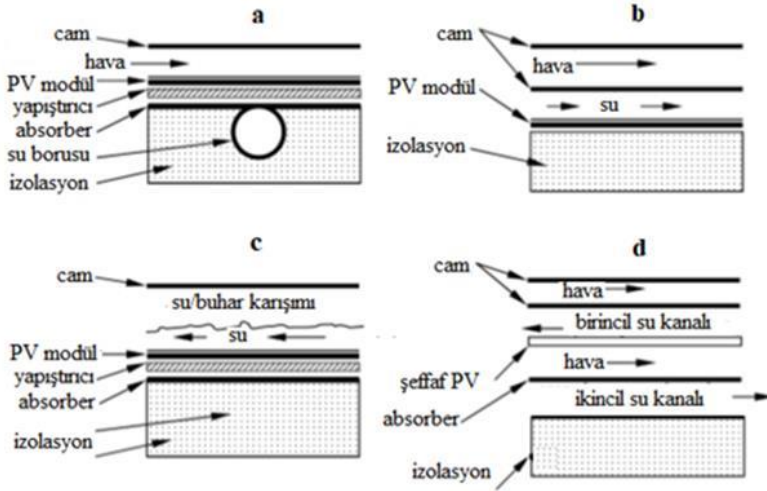
Yenilenebilir enerji kaynakları yaygınlaşırken ülkemizde özellikle Güneş enerjisinden elektrik üretimi için farklı metotlarla uygulanmaktadır yararlanabilmektedir. Fotovoltaik (PV) modüller güneşten elektrik üretmeyi sağlarken, sıcaklıktan ötürü verimi azaltmasıdır (Kostic, Pavlovic, & Pavlovic, 2010).

PV modül güneş radyasyonu emerken hücre sıcaklığının artışıyla PV verimliliği azalmasına neden olur. Bu durumda 1°C'lik yükselmesi, PV verimliliğini %0,5 azalmakta; PV/T hibrit panelleri ise soğutucu görevini yapan termal modül kullanımıyla verimi artırılmıştır (Rachid & Abdin, 2022).

Fotovoltaik/termal (PV/T) hibrit sistemler için araştırma, geliştirme ve uygulanabilirliğine ilişkin genel bir çalışma yapmışlardır (Tyagi, Kaushik, & Tyagi, 2012).

PV/T hibrit sistemlerinde farklı tür soğutucular tarafından soğutulmaktadır. Şekil 3'te Bunların arasında su ile soğutma ile yapılan sistemlerle farklı çalışmalar yapılmıştır. Borulama sistemi dizaynıyla absorber ve cam örtüye göre film tabaka ve borulu şeklinde diyazn edilmiştir (Veeken, 2014).

Şekil 3 PV-termal sistemlerde farklı su kaynakları



Kaynak: (Veeken, 2014).

PV-termal hibrit sistemlerde 4 L kapasiteli su soğutmalı 21 mm çapında bakır borulardan 7 paralel sıra şeklinde dizayn edilerek ışınlım şiddeti, su debisi, su giriş-çıkış sıcaklıkları ölçülmüştür. 0,3 kg/s su debisiyle en yüksek güç çıkışı ve elektriksel verimi elde edilmiştir. Fotovoltaik-termal hibrit sistem suyun farklı debilerde soğutulmasıyla ortam sıcaklığı 39,9°C, panel yüzeyi 95,1°C'den 53,5°C'ye düşünce, güç üretiminde %35 ve panel veriminde %7'lik tespit edilmiştir (Kabul & Duran, 2014).

Chow et al. yapılan teorik ve deneysel çalışmalara göre sıvı ile çalışan PV/T sistemlerinde belirlenen ısıl etkinlik değerinin %45-70 arasında değişim göstermesine karşın düz plakalı ve havalı PV/T sistemlerinde optimum ısıl etkinliğin %55'e kadar yükselebildiğini belirtmiştir (Chow et al., 2012).

PV/T hibrit sistemin anlık güneş ışınlımı, çevre sıcaklığı, akışkan giriş sıcaklığı, PV hücre sıcaklığı ve arka yüzey sıcaklığının ısıl ve elektriksel performansa etkilerini incelenerek; ısıl verimin 09:00'da

% 72 ve 16:00'da %83 iken 11:00-12:00'de %70,6 olarak ölçülmüştür (Alobaid et al., 2018).

Ölçümlerden elde edilen meteorolojik veriler, 11.05.2021 tarihine ait Mardin ili meteorolojik verileriyle karşılaştırılmak üzere kaydedilmiştir. Çift güneş panelinin termal ve elektriksel verimlilikleri tam yük altında değerlendirilmiştir. PV/T hibrit sistem verileri, Mardin Artuklu Üniversitesi-Mardin Meslek Yüksekokulu Kampüsü'nde değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, giriş-çıkış sıcaklıkları, hava sıcaklığı, güneş radyasyonu, su borularındaki panel hücresi sıcaklığı kaydedilmiştir. Sistemin elektriksel performansı, elektriksel çıkış ölçüm verilerinden elde edilen çalışma noktasındaki akım ve gerilim ile tanımlanmıştır. Akım değerleri ayrıca farklı yüklerden ve PV/T sisteminden elde edilen akım değerlerinden de elde edilmiş ve anında kaydedilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Deneysel Düzenek

Mardin Artuklu Üniversitesi-Mardin Meslek Yüksekokulu'nda PV/T deney sistemi elektriksel ve termal verimlilikleri tespit etmek için iki adet PV panelinden birinde su sirkülasyonu için bakır boru kullanırken diğeri ise soğutmasız olmasıyla DC güç ölçüm cihazı, ohm direnç ölçümü, yük direnci, sıcaklık sensörü, pıranometre ve veri kaydedici kullanılarak Şekil 4'te gösterilmiştir (Boz et al., 2022).

Şekil 4 PV/T deney düzeneği (Mardin Artuklu Üniversitesi-Mardin Meslek Yüksekokulu)



Kaynak: (Boz et al., 2022).

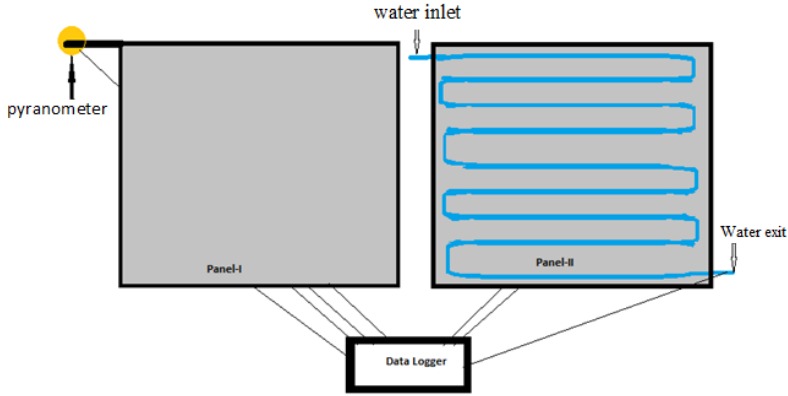
Şekil 5’de ise su sirkülasyonu için fotovoltaiik panelin altına bakır boru paralel olarak yerleştirilerek soğutma gerçekleştirilmesi için montajı yapıldı. Bakır borunun giriş kısmına şebeke suyu bağlanırken, çıkış kısmından çıkan su ise bir depoda depolandı. Şekil 6’da ise şematik gösterimi sağlanmıştır (Boz et al., 2022).

*Şekil 5 PV/T deney düzeneğinin bakır borularla soğutulması
(Mardin Artuklu Üniversitesi-Mardin Meslek Yüksekokulu)*



Kaynak: (Boz et al., 2022).

Şekil 6 PV/T sistemin soğutmalı ve soğutmasız halinin şematik gösterimi



Kaynak: (Boz et al., 2022).

Ayrıca, PV/T deney düzeneği için kullanılan malzeme ve özellikleri Tablo 1 ve 2'de verilmiştir. Tablo 3'te ise PV Sistemde kullanılan Malzeme özellikleri verilmiştir (Boz et al., 2022).

Tablo 1 Malzeme Özellikleri

Malzeme Adı	Özellikler	Nitel Özellikler
Piranometre	ML-01	Radyasyon
Termokupl	J Tipi	Sıcaklık
DC Güç Ölçümü	4-20 mA	----
Data Loger	M70R 6 kanallı	Data Kaydedici

Kaynak: (Boz et al., 2022).

Tablo 2 PV Panel Özellikleri

Boyut	945x675x35 mm
Akım Oranı (A)	5.56
Kısa Devre Akımı (A)	6.06
Voltaj Oranı (V)	18
Açık Devre Voltajı (V)	22

Kaynak: (Boz et al., 2022).

Tablo 3 PV Sistemde kullanılan Malzeme Özellikleri

Malzeme Adı	Özellikler	Nitel Özellikler
Piranometre	ML-01	Radyasyon
Termokupl	J Tipi	Sıcaklık
DC Güç Ölçümü	4-20 mA	----
Data Loger	M70R 6 kanallı	Data Kaydedici

Kaynak: (Boz et al., 2022).

Şekil 4 ve 5'te Panel-I'de ve Panel-II'de panel sıcaklıkları, akımları ve gerilimleri ölçmek için J Tipi termokupl, 4-20 mA DC güç ölçümü kullanılmıştır. Ayrıca, ML-01piranometre ile meteorolojik ölçümler (ışın miktarı, rüzgar hızı ve hava sıcaklığı) ölçülüp bütün veriler Pangu Automation M70R 6 kanallı veri kaydediciyle 60 saniye, 30 ve 60 dakikalık aralıklarla ölçülüm yapılarak kaydedilmiştir. Veri kaydedicinin giriş ve çıkışlar noktaları programlanarak bir yük profili sağlanarak ve kontrolleri sağlanmıştır (Boz et al., 2022).

PV panellerinin elektriksel verimlilik hesaplamaları Denklem 1 (Engin 2006) kullanılarak hesaplandı. PV modülünün çıkış gücü P, aşağıdaki gibi ölçülen voltaj ve akım değerleri kullanılarak hesaplanır.

2.2. PV/T Sistemleri için Enerji Hesaplamaları

PV panellerinin elektrik verimi olan çıkış gücünün (P) hesaplanması için, denklem-1'de kullanılan akım (I) ve voltaj (V) ölçülmüştür (Boz et al., 2022).

$$P=VI \quad (1)$$

Panel verimliliği (η_e) denklem-2 kullanılarak I(t) ise birim alan başına düşen güneş radyasyonu miktarı (W/m^2) ile A_m ise panel yüzey alanının (m^2) çıkış gücüne (P) oranlamasıyla hesaplanır. PV panellerde hücre sıcaklığında artma miktarı açık devre voltajında ve doluluk faktöründe kayda değer bir azalma olurken kısa devre akımında ise dikkate alınmayacak minimal bir artış sağlanır. Bu durum elektriksel verimliliğin azalmasına neden olur (Boz et al., 2022).

$$\eta_0 = P/A_m I(t) \quad (2)$$

Bu nedenle Denklem-1 ve 2 tekrar düzenlenerek Denklem-3 elektriksel verimlilik yeniden elde edilir. Denklem-3'te PV hücrelerinin elektrik verimini (η_0) standart test koşullarında (25 °C hava sıcaklığı ve 1000 W/m² radyasyon) ve T_h ise hücre sıcaklığını belirtmektedir. Termal katsayısı (β_0) olarak hesaba alınır. PV panelinin üretildiği malzemelerin özelliğine göre bir değere sahiptir. (Örnek: CdTe için 0,0025/K) (Boz et al., 2022).

$$\eta_e = \eta_0 (1 - \beta_0(T_h - 25)) \quad (3)$$

PV/T panelindeki verimlilik giriş ve çıkış kütle akış oranı ile sıcaklıkları arasındaki fark, akışkanın özgül ısısıyla doğru orantılı olarak değişirken; toplam yüzeye gelen radyasyonla ters orantılı olarak değişir (Engin & Çolak, 2008).

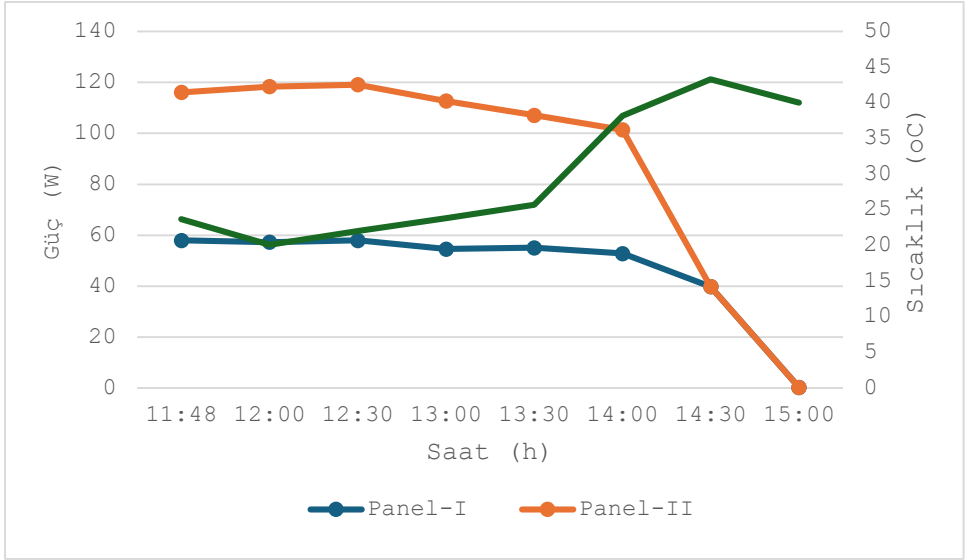
Termal Sistem verimi denklem-4 verilmiştir (Engin & Çolak, 2008).

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m} C_p (T_c - T_g)}{I(t) A_m} \quad (4)$$

3. Araştırma Bulguları

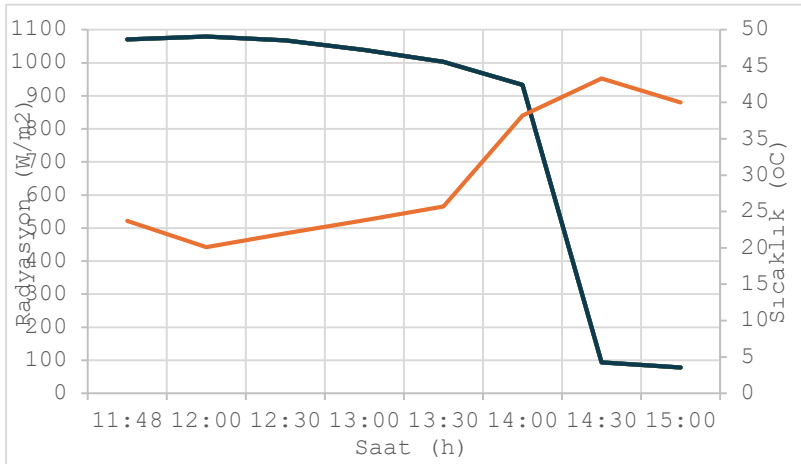
İki adet PV/T panelinden Panel-I arka tarafına herhangi bir soğutma sistemi kurulmazken; Panel-II ise arka kısmına bir akışkan olan su yardımıyla soğutularak ölçümler alınmıştır. 11.05.2021 tarihinde akım-gerilim, sıcaklık ve güç değerleri ölçümü alınmıştır. 29,6 °C ortalama hava sıcaklığında 11:48 ile 15:00 saatleri arasında yapılan ölçümlerde, Panel-I ortalama çıkış gücü değeri 46,98 W iken, Panel-II ortalama çıkış gücü 42,37 W olarak bulunmuştur. Panelin soğutulması durumunda, yaklaşık %10,8'lük bir güç artışı elde edilmiştir. Şekil 7'de verilen grafikte, Panel-I ve Panel-II ile sıcaklık ve çıkış gücü değerleri gösterilmiştir.

Şekil 7 Panel-I ve Panel-II ile Sıcaklık ve Çıkış Gücü Değerleri



Şekil 8’de ise 11.05.2021 tarihinde 11:48 ile 15:00 saatleri arasında Radyasyon ve Sıcaklık Değerleri ölçülmüştür. 29,6 °C ortalama hava sıcaklığında ise en az sıcaklık değeri 20,1 °C ve en fazla 43,3 °C olarak tespit edilmiştir. Ortalama ışıınım radyasyon değeri 795,65 W/m² olup; maksimum 1079,78 W/m² ve minimum ise 78,5 W/m² olarak ölçülmüştür.

Şekil 8 Radyasyon ve Sıcaklık Değerleri



4. Sonuçlar

Bu alışmada, Mardin Artuklu Üniversitesi, Mardin Meslek Yüksekokulu'nun kampüsünde kurulan deneysel düzenekte güneş panelleri kullanıldığı hibrit PV/T sisteminde elektriksel verimlilik ile sıcaklık arasındaki ilişki incelenmiştir. Deneyler ve hesaplamalar sonucunda aşağıdaki hususlar tespit edilmiştir.

İki termal kolektörün veri toplamak için kullanıldığı bir fotovoltaiik-termal (PV/T) sistemde elektriksel verimliliğin sıcaklık değişimiyle ilişkisini göstermektedir. Birinci panel, tek bir bakır boruya dolaştırılan musluk suyu ile soğutulurken, ikinci panel ise elektriksel g ve verimlilik ölçüm sonuçlarını karşılaştırmak amacıyla atmosfer koşullarında doğrudan soğutulmuştur. Ayrıca, daha doğru sonuçlar elde etmek için Mardin Meteoroloji Müdürlüğü verileriyle ölçülen sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Denklem 1'de akım ve voltaja bağlı olarak çıkış gücünün hesabı yapılmıştır. Denklem 2'de ise hesaplanan g ışınım ve yüzey alanıyla orantı sağlanarak elektrik verimliliği hesaplanmıştır. Denklem 3 ise ilk iki denklemin düzenlenerek elde edilmiştir. Panelin zellikleri ile beraber evre şartları ve panel verimliliği sonucuna varılmıştır. Panel zerindeki radyasyon arttığı panel sıcaklığı da artmaktadır. Panel sıcaklığının artması üretilen gücü azaltılmaktadır. Bu durum denklem 3'te açıkça görülmektedir.

şekil 3.1.'de ise Panel-I ve Panel-II verimlilikle beraber ortam sıcaklığına bağlı olarak değişimi grafiksel şeklinde sunulmuştur. Panel-I ve Panel-II g ıkışları hesaplanmıştır. Panel-I'in soğutulmasıyla, yaklaşık %10,8'lk bir güç artışı elde edilmiştir. Panelin arkasına yerleştirilen borulardan şebeke suyu geçirilmesi panelin soğumasına olanak sağlamıştır. Sonuç olarak g artmıştır. G ve sıcaklık arasındaki ilişkiyi gösteren şekil 3.2'de gösterilmiştir.

Bu çalışmada; daha fazla radyasyon ve düşük sıcaklık ile enerji verimliliği artırmak için, deneysel düzeneğe güneş takip sistemi kurulabileceği ve tekrar analizlerin tekrarlanması gelecekte yapılacak çalışmalara fikir vermiştir. Ayrıca sistemde kullanılan ve panel nedeniyle evlerde sıcaklığı artan şebeke suyu yerine atıl enerjinin geri kazanımını sağlanacaktır.

Kaynakça

Kabul, A., & Duran, F. (2014). Isparta ilinde fotovoltaik/termal (PV/T) hibrit sistemin performans analizi. *SDU International Technologic Science*, 6(1), 31–43.

Kostic, L., Pavlovic, T., & Pavlovic, Z. (2010). Optimal design of orientation of PV/T collector with reflectors. *Applied Energy*, 87(10), 3023–3029.

Rachid, A., & Abdin, Z. U. (2022). Solar hybrid PV/T panels for drying. *International Drying Symposium*, Worcester, United States.

Tyagi, V., Kaushik, S., & Tyagi, S. (2012). Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1383–1398.

Veeken, L. (2014). *Technical and economic evaluation of different utilization options based on combined photovoltaic and solar thermal (PVT) systems for the residential sector* (Master's thesis). Utrecht University, Netherlands.

Hussien, H. A., Numan, A. H., & Abdulmunem, A. R. (2015). Improving of the photovoltaic/thermal system performance using water cooling technique. *Materials Science and Engineering*, 78, 1–9.

Chow, T. T., Tiwari, G. N., & Menezo, C. (2012). Hybrid solar: A review on photovoltaic and thermal power integration. *International Journal of Photoenergy*, 2012, 307287.

Alobaid, M., Hughes, B., Connor, D., Calautit, J., & Heyes, A. (2018). Improving thermal and electrical efficiency in photovoltaic thermal systems for sustainable cooling system integration. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 6(2), 305–322.

Boz, İ., Ayanoğlu, A., Ayas, G., & Ünal, F. (2022). Investigation of temperature effect on electrical efficiency for a photovoltaic–thermal hybrid system. *International Journal of Science and Research*, 11(8).

Engin, D. (2006). *Yapı ile bütünleştirilebilir güneş pili/termal toplayıcı (PV/T) hibrid sistemin performans analizi ve optimizasyonu* (Doktora tezi). Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Ceylan, İ., Gürel, A. İ., Demircan, H., & Aksu, B. (2014). Cooling of a photovoltaic module with temperature controlled solar collector. *Energy and Buildings*, 72, 96–101.

Engin, D., & Çolak, M. (2008). Yarı-saydam güneş pili/termal toplayıcı (PV/T) hibrid sistemin İzmir koşullarında analizi. *Celal Bayar Üniversitesi Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 2(10).

European Commission Joint Research Centre. (2010). *PVGIS Europe global optimal angle presentation*. Erişim adresi: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/countries/europe/EUGlob_opta_presentation.png

Elektrik İşleri Etüt İdaresi. (2010). *Yenilenebilir enerji hesaplama aracı*. Erişim adresi: <http://repa.eie.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx>

BÖLÜM 2

HİDROJENİN ENDÜSTRİYEL KULLANIM ALANLARI VE ENERJİ SİSTEMLERİNE ENTEGRASYONU

AHMET DENİZ¹

Giriş

Hidrojen, popüler söylemlerde genellikle geleceğin temiz enerji taşıyıcısı olarak konumlandırılrsa da, teknik açıdan bakıldığında yüzyılı aşkın süredir modern endüstriyel metabolizmanın vazgeçilmez bir yapı taşıdır. Periyodik tablonun en hafif elementi olan hidrojen; 20. yüzyılın başlarından itibaren petrol rafinasyonunda ağır hidrokarbonların işlenmesinden, küresel gıda güvenliğinin teminatı olan sentetik gübre (amonyak) üretimine kadar pek çok kritik süreçte merkezi bir rol üstlenmiştir. Dolayısıyla hidrojen ekonomisini anlamak, sadece potansiyel enerji uygulamalarını değil, halihazırda küresel talebin %90'ından fazlasını oluşturan ve lojistik, depolama ve güvenlik protokolleri açısından muazzam bir bilgi birikimi barındıran mevcut endüstriyel kullanım alanlarını analiz etmeyi gerektirir.

¹ Dr.Öğr.Üyesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Çay MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Orcid: 0000-0002-0326-3733

Ancak 2020 sonrası literatür ve endüstriyel trendler incelendiğinde, hidrojenin rolünün sadece hacimsel bir artışla sınırlı kalmadığı, aynı zamanda niteliksel bir dönüşüm geçirdiği görülmektedir. Sıkılaştan çevresel regülasyonlar ve dekarbonizasyon hedefleri; hidrojeni basit bir kimyasal hammadde veya indirgeyici ajan olmaktan çıkarıp, enerji sistemleri ile sanayi süreçleri arasında köprü kuran stratejik bir "enerji vektörüne" dönüştürmüştür. Bu kitap bölümü, hidrojenin rafinerilerden demir-çelik sektörüne uzanan mevcut teknik kullanım alanlarını derinlemesine inceleyerek, bu köklü endüstriyel mirasın geleceğin enerji sistemlerine nasıl entegre edileceğini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Hidrojenin Günümüzde Kullanım Alanları

Hidrojen, periyodik tablonun en basit, en hafif ve evrende en bol bulunan elementi olmasının ötesinde, modern endüstriyel metabolizmanın vazgeçilmez bir yapı taşıdır. Tarihsel olarak bakıldığında, hidrojenin endüstriyel kullanımı 20. yüzyılın başlarında amonyak sentezi ve petrol rafinasyonu ile ivme kazanmış, günümüzde ise bu geleneksel rollerin çok ötesine geçerek ileri malzeme teknolojilerinden gıda güvenliğine kadar geniş bir spektrumda kritik bir proses kimyasalı haline gelmiştir. Bu kitap bölümü, hidrojenin enerji vektörü olarak potansiyelinden (gelecek bölümlerde ele alınacaktır) bağımsız olarak, mevcut endüstriyel altyapı içerisindeki somut, teknik ve kimyasal kullanım alanlarını derinlemesine incelemeyi amaçlamaktadır.

2020 sonrası literatür incelendiğinde, hidrojenin kullanım alanlarındaki değişimin sadece hacimsel bir artış olmadığı, aynı zamanda niteliksel bir dönüşüm geçirdiği görülmektedir. Sıkılaştan çevresel regülasyonlar, ultra saf malzeme gereksinimleri ve nanoteknolojideki gelişmeler, hidrojeni basit bir yakıt veya indirgeyici olmaktan çıkarıp, atomik düzeyde yüzey modifikasyonu

yapan, moleküler yapıları yeniden düzenleyen ve hassas üretim süreçlerini mümkün kılan stratejik bir ajana dönüştürmüştür.

Küresel Hidrojen Tüketiminin Sektörel Dağılımı

2023 ve 2024 yılları verilerine göre küresel hidrojen talebi yaklaşık 97-100 milyon ton (Mt) seviyesine ulaşmıştır (IEA, 2025). Bu talebin sektörel dağılımı incelendiğinde, hidrojenin henüz bir "yakıt" olmaktan ziyade, endüstriyel bir "hammadde" olarak konumlandığı görülmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve Hidrojen Konseyi raporlarına dayanan ağırlıklı ortalama kullanım oranları aşağıda sunulmuştur:

1. **Petrol Rafinasyonu (~%42-44):** Küresel tüketimin en büyük payını oluşturan rafineriler, hidrojeni ham petroldeki kükürdü gidermek (hidrodesülfürizasyon) ve ağır hidrokarbonları parçalamak (hidrokraking) için kullanmaktadır (IEA, 2025).
2. **Amonyak Üretimi (~%32-34):** Azotlu gübre endüstrisinin temeli olan amonyak sentezi, küresel hidrojen talebinin üçte birini oluşturur. Bu sektör, gıda güvenliği ile doğrudan ilişkilidir.
3. **Metanol Üretimi (~%14-16):** Olefinler, formaldehit ve asetik asit gibi kimyasalların öncüsü olan metanol üretimi, hidrojenin üçüncü büyük pazarını teşkil eder.
4. **Demir-Çelik Endüstrisi (DRI) (~%5-7):** Doğrudan İndirgenmiş Demir (DRI) üretimi, metalurji sektöründeki ana hidrojen kalemidir. Geleneksel yüksek fırınlara kıyasla daha temiz bir çelik üretimi sağlayan bu yöntem, henüz toplam çelik üretiminin küçük bir kısmını oluştursa da hidrojen yoğunluğu yüksektir (IEA, 2025).
5. **Diğer Endüstriyel Uygulamalar (~%2):** Yarı iletken üretimi, cam sanayi, gıda hidrojeneasyonu ve roket yakıtı

gibi niş ancak katma değeri yüksek alanlar, hacimsel olarak küçük bir paya sahiptir (IEA, 2025).

Petrol Rafinasyonu ve Hidrokarbon İşleme Prosesleri

Petrol rafinerileri, küresel hidrojen ekonomisinin en büyük tüketicisi konumundadır. Rafinerilerde hidrojen, ham petrolün işlenerek nihai yakıt ürünlerine (dizel, benzin, jet yakıtı) dönüştürülmesinde hayati bir role sahiptir. Günümüzde işlenen ham petrolerin giderek ağırlaşması ve çevresel regülasyonların (örneğin Euro 6, IMO 2020) yakıtlardaki kükürt oranlarını ppm seviyesine düşürmesi, rafinerilerin hidrojen ihtiyacını artırmıştır (Precedence Research, 2025) (Credence Research, 2025).

Rafinerilerdeki hidrojen kullanımı temel olarak iki ana süreçte yoğunlaşır: Hidroişlem (Hydrotreating) ve Hidrokraking (Hydrocracking). Hidroişlem süreçlerinde, özellikle Hidrodesülfürizasyon (HDS) ile ham petroldeki kükürt, azot ve metaller gibi istenmeyen safsızlıklar hidrojen ile reaksiyona sokularak uzaklaştırılır. Bu işlem, yakıtların yanması sonucu oluşan asit yağmuru kaynaklı emisyonları önlemek için kritik öneme sahiptir (Kwao, Vedachalam, Dalai, & Adjaye, 2024). Diğer yandan, Hidrokraking prosesi, ağır ve düşük değerli petrol fraksiyonlarını yüksek basınçlı hidrojen altında parçalayarak daha değerli ve hafif ürünlere dönüştürür. Bu süreçte hidrojen, moleküler yapıyı doyurarak ürün verimini ve kalitesini artırır (Precedence Research, 2025). Ayrıca son yıllarda, bitkisel yağların hidrojen ile işlenerek yenilenebilir dizel (HVO) ve sürdürülebilir havacılık yakıtı (SAF) üretilmesi de rafinerilerde yeni bir hidrojen tüketim alanı yaratmıştır.

Kimya Endüstrisi

Kimya sektörü, rafinerilerden sonra hidrojenin en büyük ikinci kullanım alanıdır. Bu sektörde hidrojen, bir enerji kaynağından

ziyade, ürünlerin moleküler yapısını oluşturan temel bir yapı taşı olarak kullanılır.

Sektörün en büyük kalemi, küresel gıda güvenliği için kritik olan azotlu gübrelerin üretiminde kullanılan Amonyak (NH_3) sentezidir. Haber-Bosch prosesi ile havadaki azot ve hidrojenin yüksek basınç altında birleştirilmesiyle elde edilen amonyak, hidrojen pazarının yaklaşık üçte birini oluşturur (Zhang, Zhang, Jiang, & Li, 2024). Son dönemde, "yeşil amonyak" çalışmaları ile bu sürecin karbon ayak izinin düşürülmesi ve amonyağın bir hidrojen taşıyıcısı olarak kullanılması hedeflenmektedir.

Kimya endüstrisindeki diğer önemli kullanım alanı ise Metanol (CH_3OH) üretimidir. Plastik, solvent ve yapı kimyasalları üretiminde temel bir ara madde olan metanol, karbon oksitlerin (CO ve CO_2) hidrojenasyonu ile elde edilir. Özellikle karbondioksitin hidrojen ile metanole dönüştürülmesi (CCU), sürdürülebilir kimya ve karbon döngüsü açısından 2020 sonrası araştırmaların odak noktası haline gelmiştir (Gao, ve diğerleri, 2024).

Metalurji ve Demir-Çelik Endüstrisi

Demir-çelik sektörü, karbon emisyonlarını azaltma baskısı altında büyük bir dönüşüm geçirmektedir. Geleneksel yöntemlerde demir cevherini indirgemek için kömür (karbon) kullanılırken, yeni nesil teknolojilerde bu görev hidrojene devredilmektedir. Doğrudan İndirgenmiş Demir (DRI) üretiminde hidrojen, demir cevherindeki oksijeni, su buharı (H_2O) oluşturarak uzaklaştırır ve metalik demir elde edilmesini sağlar (Diga, ve diğerleri, 2025). Bu yöntem, sektörün dekarbonizasyonu için en umut verici yol olarak görülmekte ve hidrojenin enerji dışı endüstriyel kullanımında en hızlı büyüyen alanlardan biri olarak öne çıkmaktadır (Hasanbeigi, Springer, & Irish, 2024). Hidrojen ayrıca metal işleme tesislerinde, paslanmaz çelik gibi metallerin parlak tavlanması (bright annealing)

ve sinterleme işlemlerinde koruyucu atmosfer gazı olarak da yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Cam Endüstrisi

Cam üretiminde, özellikle düz cam (float cam) prosesinde hidrojen, ürün kalitesini belirleyen kritik bir bileşendir. Erimiş camın üzerine döküldüğü kalay banyosunun oksidasyonunu önlemek amacıyla, ortamda azot ve hidrojen karışımından oluşan indirgeyici bir atmosfer oluşturulur. Hidrojen, banyoya sızan oksijeni yakalayarak kalayın oksitlenmesini ve cam yüzeyinde kusur oluşmasını engeller (Sathyanarayana, 2022). Son yıllarda, cam eritme fırınlarında doğalgaz yerine hidrojen yakılmasına yönelik denemeler de sektörün karbon emisyonlarını düşürme çabalarının bir parçası olarak hız kazanmıştır.

Gıda ve Tarım Teknolojileri

Gıda endüstrisinde hidrojen, uzun yıllardır bitkisel yağların hidrojenasyonu işleminde kullanılarak sıvı yağların margarin gibi yarı katı yağlara dönüştürülmesini sağlamaktadır. Ancak trans yağ oluşumuyla ilgili sağlık endişeleri ve yasal düzenlemeler, bu süreçlerin daha seçici katalizörler ve tam hidrojenasyon yöntemleriyle revize edilmesine yol açmıştır (Thirumdas, 2023). Bunun yanı sıra, gıda paketlenmesinde oksijenin neden olduğu bozulmayı önlemek için kullanılan İndirgeyici Atmosfer Paketleme (RAP) teknolojilerinde ve tarımsal verimliliği artırmak amacıyla bitki büyümesini teşvik eden uygulamalarda hidrojenin antioksidan özelliklerinden yararlanılmaktadır (Alwazeer, 2024).

Hidrojenin bu kullanım alanları, modern endüstride hidrojenin sadece bir enerji taşıyıcısı değil, aynı zamanda vazgeçilmez bir hammadde ve proses ajanı olduğunu göstermektedir. Rafinerilerden gübre fabrikalarına, çelik üretiminden gıda işlemeye kadar uzanan bu geniş yelpaze, hidrojen ekonomisinin mevcut temelini oluşturmaktadır. Tablo 1’de

hidrojenin hangi sektörlerde hangi proseslerde hangi rolde kullanıldığı özetlenmiştir.

Tablo 1: Sektörlere Göre Hidrojenin Temel İşlevleri

Sektör	Temel İşlem / Proses	Hidrojenin Rolü
Rafinasyon	Hidrosülfürizasyon (HDS)	Kükürt ve safsızlıkların giderilmesi.
	Hidrokraking	Ağır moleküllerin parçalanması ve ürün veriminin artırılması.
Kimya	Amonyak Sentezi	Gübre üretimi için azot fiksasyonu.
	Metanol Üretimi	Kimyasal hammadde sentezi.
Demir-Çelik	Doğrudan İndirgeme (DRI)	Demir cevherinden oksijenin uzaklaştırılması (Redüktan).
Cam	Float Banyosu	Kalay banyosunda oksidasyonun önlenmesi.
Gıda	Hidrojenasyon	Yağların yapısının değiştirilmesi ve raf ömrünün uzatılması.

Hidrojenin Enerji Vektörü Olarak Konumu

Küresel enerji sistemlerinin karbondan arındırılması sürecinde, hidrojen (H_2), özellikle doğrudan elektrifikasyonun teknik veya termodinamik açıdan verimsiz kaldığı zorlu sektörlerde kritik bir enerji taşıyıcısı olarak konumlanmaktadır. Periyodik tablonun en hafif elementi olan hidrojen, fosil yakıtların aksine birincil bir enerji kaynağı değil, enerjinin depolanması ve taşınması için kullanılan bir vektördür. Hidrojenin enerji sektöründeki teknik

uygulanabilirliği, onun benzersiz fizikokimyasal özelliklerine dayanmaktadır. Kütlesel enerji yoğunluğunun (Alt Isıl Değeri - LHV) yaklaşık 120 MJ/kg olması, en yakın rakibi olan doğalgazın (metan) yaklaşık 2.4 katı, dizelin ise yaklaşık 3 katı enerji içerdiği anlamına gelmektedir (O'Brien, Hydrogen Economy 2023-2033: Production, Storage, Distribution & Applications, 2023). Ancak bu avantaj, hidrojenin son derece düşük yoğunluğu (Normal Şartlar Altında 0.089 kg/m³) nedeniyle hacimsel enerji yoğunluğundaki dezavantaj ile gölgelenmektedir.

2020 sonrası literatür, hidrojenin enerji sistemlerine entegrasyonunu sadece bir yakıt ikamesi olarak değil, termodinamik döngülerin, malzeme biliminin ve yanma kinetiğinin yeniden tanımlandığı bir mühendislik dönüşümü olarak ele almaktadır. Hidrojenin yüksek difüzyon katsayısı, geniş yanabilirlik sınırları (%4 - %75 hacimsel oran) ve düşük ateşleme enerjisi (0.02 mJ), güvenlik protokollerinden yanma odası tasarımlarına kadar tüm teknik altyapının yeniden değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır (Gkantonas, Talibi, Balachandran, & Mastorakos, 2023).

Elektrik Üretiminde Hidrojen Teknolojileri

Elektrik şebekelerinin kararlılığını sağlamak, yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili doğasını dengelemek ve baz yük santrallerini karbondan arındırmak amacıyla hidrojen tabanlı güç üretim sistemleri geliştirilmektedir. Bu alanda iki ana teknoloji grubu hakimdir: Termokimyasal dönüşüm sağlayan gaz türbinleri ve elektrokimyasal dönüşüm sağlayan yakıt pilleri.

Gaz türbinlerinde hidrojen kullanımı, mevcut doğal gaz santrallerinin dönüşümü için en pragmatik yaklaşım olarak görülmektedir. Ancak hidrojenin yanma kinetiği, metandan (CH₄) radikal biçimde farklıdır. Hidrojenin laminar alev hızı, stokiyometrik koşullarda yaklaşık 3 m/s iken, metan için bu değer 0.3-0.4 m/s civarındadır. Bu fiziksel gerçeklik, mevcut türbin yakıcılarında

(combustor) alevin akış yönünün tersine, yakıt enjektörlerine doğru ilerlemesi riskini doğurur (Gkantonas, Talibi, Balachandran, & Mastorakos, 2023).

%100 hidrojenle çalışan gaz türbinlerinin geliştirilmesinde temel zorluğun alev stabilizasyonu olduğu vurgulanmaktadır. Modern gaz türbinlerinde yaygın olarak kullanılan "Ön Karışım Kuru Düşük NO_x" (Dry Low NO_x - DLN) yakıcılar, yakıt ve havanın yanma odasına girmeden önce karışmasına dayanır. Bu ön karışım, alev sıcaklığını düşürerek termal NO_x oluşumunu engeller. Ancak hidrojenin yüksek reaktivitesi ve düşük tutuşma enerjisi, bu ön karışım bölgesinde erken tutuşmaya (autoignition) veya alevin karıştırma tüplerine geri tepmesine neden olabilir (Gkantonas, Talibi, Balachandran, & Mastorakos, 2023). Bu sorunu aşmak için geliştirilen en güncel teknoloji "Mikro-Karışım" (Micromixing) prensibidir. Mikro-karışım yakıcıları, yakıt ve havayı tek bir büyük alev yerine, binlerce küçük kanaldan geçirerek minyatür alevcikler (micro-flames) oluşturacak şekilde tasarlanır (Fred, Othman, & Yasin, 2024).

Hidrojen yanması, türbin yanma odasında termoakustik kararsızlıklara yol açma eğilimindedir. Yanma sonucu açığa çıkan ısı salınımindaki dalgalanmalar, yanma odasının akustik rezonans frekanslarıyla (Rayleigh kriteri) eşleştğinde, yıkıcı basınç salınımları meydana gelir. Bu salınımlar, türbin kanatçıklarında ve yanma odası astarında metal yorgunluğuna ve yapısal hasara neden olabilir (Cecere, Giacomazzi, Di Nardo, & Calchetti, 2023). Bu kararsızlıkları yönetmek için "Eksenel Hava Kademelendirmesi" (Axial Air Staging) yöntemini önerilmektedir (Gkantonas, Talibi, Balachandran, & Mastorakos, 2023). Bu yöntemde, yanma havası tek bir noktadan değil, yanma odası boyunca farklı eksenel noktalardan enjekte edilir. Bu, alevin ısı salınım profilini yayarak akustik dalgalarla rezonansı bozar ve yanmayı stabilize eder. Ayrıca, yüksek frekanslı dinamik basınç sensörleri ve yapay zeka tabanlı

kontrol algoritmaları ile yanma kararsızlıklarının anlık olarak tespit edilip yakıt akışının modüle edilmesi üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Sabit Yakıt Pili Sistemleri

Sabit yakıt pili sistemleri, hidrojenin kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürerek Carnot çevrimi sınırlamalarını aşmakta ve dağıtık enerji üretiminde, veri merkezlerinde ve mikro şebekelerde yüksek verimli, düşük emisyonlu çözümler sunmaktadır. Bu alanda, çalışma sıcaklıkları ve malzeme yapılarına göre Katı Oksit Yakıt Pilleri (SOFC) ve Proton Değişim Membranlı Yakıt Pilleri (PEMFC) olmak üzere iki baskın teknoloji öne çıkmaktadır.

Yüksek sıcaklıklarda (600–1000°C) çalışan SOFC sistemleri, platin grubu metallere ihtiyaç duymayan seramik yapıları ve yakıt esnekliği (hidrojen, amonyak veya doğalgaz ile çalışabilme) sayesinde baz yük güç üretimi için idealdir. Güncel çalışmalar, SOFC'lerin %60'ın üzerinde elektriksel verimliliğe sahip olduğunu, atık ısının değerlendirildiği Birleşik Isı ve Güç (CHP) modunda ise toplam sistem verimliliğinin %85-90 seviyelerine ulaştığını göstermektedir (Le, Nguyen, Yu, & Le, 2025) (O'Brien, 2024). Buna karşılık, düşük sıcaklıkta çalışan PEMFC sistemleri, hızlı başlatma ve dinamik yük takibi yetenekleri nedeniyle özellikle kesintisiz güç kaynağı (UPS) gerektiren veri merkezleri, hastaneler ve telekomünikasyon altyapıları için kritik bir yedek güç teknolojisi olarak konumlanmaktadır (U.S. Department of Energy, 2024).

Sektördeki temel teknik odak noktası, sistem ömrünü ve maliyet etkinliğini artırmaktır. ABD Enerji Bakanlığı (DOE), sabit uygulamaların fosil yakıtlı jeneratörlerle rekabet edebilmesi için 2030 yılına kadar 80.000 saatlik operasyonel dayanıklılık ve 1.000 \$/kW sermaye maliyeti hedefini belirlemiştir (U.S. Department of Energy, 2024). Bu doğrultuda, malzeme bilimindeki son gelişmeler,

SOFC'lerde termal döngü dayanımını artıracak metal destekli hücrelere ve PEMFC'lerde katalizör degradasyonunu önleyecek nanostrüktürlü elektrot tasarımlarına yoğunlaşmıştır.

Isıtma Sektöründe Hidrojen Kullanımı

Isıtma sektörü, küresel enerji tüketiminin önemli bir bölümünü oluşturmakta olup, bu alanda hidrojen kullanımı, mevcut doğal gaz altyapısının dekarbonizasyonu ve elektrifikasyonun teknik olarak zorlandığı yüksek sıcaklık gerektiren süreçler için stratejik bir çözüm sunmaktadır. Uygulamalar, mevcut doğal gaz şebekelerine hidrojen karıştırılması (blending) ve %100 saf hidrojen yakıcılarının geliştirilmesi olmak üzere iki ana eksenle ilerlemektedir.

Mevcut literatür ve pilot uygulamalar, doğal gaz şebekelerine hacimce %20 oranında hidrojen karıştırılmasının, son kullanıcı cihazlarında veya dağıtım boru hatlarında büyük yapısal değişiklikler gerektirmeden teknik olarak mümkün olduğunu göstermektedir (Maxa & Mařín, 2025). Ancak, hidrojenin hacimsel enerji yoğunluğunun doğal gazın yaklaşık üçte biri olması, aynı ısı çıktısını elde etmek için daha yüksek gaz akış hızlarını gerektirmekte ve bu durum şebeke basınç yönetiminde optimizasyon zorunluluğu doğurmaktadır. Ayrıca, çelik borularda hidrojenin neden olduğu "gevrekleşme" (embrittlement) riski, dağıtım ağlarında polietilen (PE) malzemelerin kullanımını veya özel iç kaplama teknolojilerini gündeme getirmektedir (Schiaroli, Baldassarri, & Ustolin, 2024).

Saf hidrojen kullanımına geçişte ise, hidrojenin yüksek laminer alev hızı ve düşük ısıma (radyasyon) özellikleri, konvansiyonel brülör teknolojilerinde köklü değişiklikler gerektirir. Hidrojen alevinin görünmez yapısı, standart iyonizasyon sensörleri yerine UV (ultraviyole) tabanlı alev algılama sistemlerinin entegrasyonunu zorunlu kılarken; yüksek alev hızı, brülörlerde "geri tepme" riskini artırmaktadır (Vespasiano, Vespasiano, Massulli, &

Ciancio, 2024). Enerji verimliliği açısından, elektrikli ısı pompaları termodinamik olarak daha verimli olsa da, hidrojen kazanlarının, şebeke elektriğinin yetersiz kaldığı soğuk iklimlerde pik yükleri karşılamak için hibrit sistemlerde (ısı pompası + hidrojen kazanı) tamamlayıcı bir rol üstlenmesi öngörülmektedir (Vespasiano, Vespasiano, Massulli, & Ciancio, 2024)

Sonuç ve Değerlendirme

Bu bölümde yapılan incelemeler, hidrojenin günümüzdeki rolünün "endüstriyel bir hammadde" olmaktan çıkıp, stratejik bir "enerji vektörüne" doğru evrildiğini açıkça göstermektedir. Mevcut durumda küresel talebin %90'ından fazlasını oluşturan rafineri ve kimya sektörleri, hidrojen ekonomisinin temelini oluşturmaya devam etse de; teknolojik kırılma noktası enerji sistemlerinde yaşanmaktadır. Özellikle gaz türbinlerinde alev stabilizasyonu ve termoakustik kararsızlıkların yönetimi konusundaki mühendislik başarıları ile yakıt pillerindeki (SOFC/PEM) verimlilik artışları, hidrojenin elektrik şebekelerinde baz yük ve dengeleme gücü olarak fosil yakıtların yerini alabileceğini kanıtlamaktadır.

Demir-çelik (DRI) ve yüksek sıcaklıklı sanayi süreçlerindeki uygulamalar ise, elektrifikasyonun yetersiz kaldığı alanlarda hidrojenin "derin dekarbonizasyon" (deep decarbonization) için tek geçerli alternatif olduğunu doğrulamaktadır. Sonuç olarak, hidrojenin kullanım alanlarındaki bu radikal genişleme; sadece bir yakıt ikamesi değil, metalurjiden gıda güvenliğine, şebeke kararlılığından konut ısıtmaya kadar uzanan çok katmanlı bir endüstriyel dönüşümü temsil etmektedir.

Kaynakça

- Alwazeer, D. (2024). New Applications of Hydrogen in the Food Industry. *7th International Eurasian Conference on Biological and Chemical Sciences (EurasianBioChem 2024)*. www.eurasianbiochem.org adresinden alındı
- Cecere, D., Giacomazzi, E., Di Nardo, A., & Calchetti, G. (2023). Gas Turbine Combustion Technologies for Hydrogen Blends. *Energies*, 16(19), 6829. doi:10.3390/en16196829
- Credence Research. (2025). *Hydro Processing Catalysts Market Size, Growth & Forecast 2032*. <https://www.credenceresearch.com/report/hydro-processing-catalysts-market> adresinden alındı
- Diga, A., Putera, A., Putra, H., Karuana, F., Ghazidin, H., Kuswa, F., . . . Parismantoko, A. (2025). Toward decarbonization in steelmaking: A review on direct reduced iron using biomass-based s. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 82, 104554. doi:10.1016/j.seta.2025.104554
- Fred, A. O., Othman, N., & Yasin, M. (2024). A Layered Taxonomy and Classification of Hydrogen Gas Turbine Combustion for Power Generation Process. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 12(9). doi:10.22214/ijraset.2024.64112
- Gao, B., Wen, Z., Wang, Y., Chen, D., Yang, B., & Ishihara, T. (2024). Recent Advances in Alloy Catalysts for CO₂ Hydrogenation to Methanol. *ChemCatChem.*, 16(19). doi:10.1002/cctc.202400814
- Gkantonas, S., Talibi, M., Balachandran, R., & Mastorakos, E. (2023). Hydrogen Combustion in Gas Turbines. *Green*

Energy and Technology, 407-428. doi:10.1007/978-3-031-28412-0_10

Hasanbeigi, A., Springer, C., & Irish, H. (2024). *Green H2-DRI Steelmaking: 15 Challenges and solutions*. Global Efficiency Intelligence. <https://www.globalefficiencyintel.com/green-h2-dri-steelmaking-15-challenges-and-solutions> adresinden alındı

IEA. (2025). *Executive Summary - Global Hydrogen Review 2025*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025/executive-summary> adresinden alındı

Kwao, S., Vedachalam, S., Dalai, A., & Adjaye, J. (2024). Review of Current Advances in Hydrotreating Catalyst Support. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 135, 1-16. doi:10.1016/j.jiec.2024.01.027

Le, D.-D., Nguyen, H.-L., Yu, S., & Le, H. (2025). Progress and outlook of solid oxide fuel cell technology for stationary power generation applications. *Front. Energy Res.*, 13. doi:10.3389/fenrg.2025.1650696

Maxa, D., & Mašín, M. (2025). Blending hydrogen with natural gas in distribution networks: Technical and safety considerations. *PALIVA*, 17(3), 65-70. doi:10.35933/paliva.2025.03.02

O'Brien, C. (2023). *Hydrogen Economy 2023-2033: Production, Storage, Distribution & Applications*. IDTechEx. <https://www.idtechex.com/en/research-report/hydrogen-economy/946> adresinden alındı

O'Brien, C. (2024). *Stationary Fuel Cell Markets 2025-2035: Technologies, Players & Forecasts*.

<https://www.idtechex.com/en/research-report/stationary-fuel-cell-markets/1037> adresinden alındı

Precedence Research. (2025). *Petroleum Refining Hydrogen Market Size, Share and Trends 2025 to 2034*. <https://www.precedenceresearch.com/petroleum-refining-hydrogen-market> adresinden alındı

Sathyanarayana, A. (2022). Risk Analysis of Unmanned Nitrogen Plant for Float Glass Application -A Case Study. https://www.researchgate.net/publication/358579927_Risk_Analysis_of_Unmanned_Nitrogen_Plant_for_Float_Glass_Application_-A_Case_Study adresinden alındı

Schiaroli, A., Baldassarri, A., & Ustolin, F. (2024). Analysis of accidental hydrogen releases in the glass manufacturing industry. *Chemical Engineering Transactions*, 111, 427-432. doi:10.3303/CET24111072

Thirumdas, R. (2023). Partial hydrogenation of oils using cold plasma technology and its effect on lipid oxidation. *J Food Sci Technol.*, 60(6), 1674-1680. doi:10.1007/s13197-022-05434-z

U.S. Department of Energy. (2024). *Fuel cell technologies: FY 2024 annual merit review and peer evaluation report*. Washington, DC: Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office.

Vespasiano, D., Vespasiano, F., Massulli, A. R., & Ciancio, A. (2024). Impact of hydrogen blending policies on the energy efficiency, environmental and economics parameters of residential gas boilers. *Journal of Physics: Conference Series*, 2893. doi:10.1088/1742-6596/2893/1/012086

Zhang, Z., Zhang, H., Jiang, H., & Li, L. (2024). Green ammonia: revolutionizing sustainable energy for a carbon-free future.

Journal of Materials Chemistry A, 48, 33334-33361.
doi:10.1039/D4TA07339H

BÖLÜM 3

CHAPTER I

Exergetic Performance Of Heat Exchanger Efficiency In Waste Heat Recovery In Clean Water Production

Mehmet ALTINKAYNAK¹

Introduction

Heat transfer via heat exchangers is a widely used method in industry. The purpose is sometimes to heat the product, and sometimes to cool it. Heat transfer in heat exchangers can be achieved through direct contact or by placing a wall or separating layer between them. A hot fluid circulates on one side of these layers, and a cold fluid on the other. The fluids can be of the same type or different types. The equipment that facilitates heat transfer between two fluids at different temperatures is called a heat exchanger. Heat transfer between the two fluids is achieved through conduction and convection across the wall or separating layer. Fluid heat is transferred in heat exchangers using tubular and plate heat exchangers. Of course, the most important parameter here is the rate at which the fluid can transfer heat. For this reason, the efficiency factor becomes important in heat exchangers.

¹ Doç. Dr., Isparta University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Isparta/Turkey, Orcid: 0000-0003-2434-576X, mehmetaltinkaynak@isparta.edu.tr

In the distillation of brine, a high level of product and low waste are obtained by first using reverse osmosis and then followed by highly efficient distillation (Srivastava, 2025). This system, which requires thermal energy, can also be used by utilizing waste heat from industrial facilities (Goodarzi et al, Cuiella-Suarez et al, Wang et al.). The reason why highly efficient distillation is generally applied in addition to reverse osmosis systems is that the output of one process acts as the input of the next (Lin et al., Spinelli et al., Obaidi et al.).

System Description

The flow chart of the clean water production is given in Figure 1. The section called the MED plant contains a condensation system consisting of 3 cells. Here, heat from a heat exchanger designated as HEX is used to send steam to the MED plant. This steam is first used to heat the seawater. Then, using this method applied sequentially, the brine and distilled water are separated and transferred to the collection section with the help of a pump.

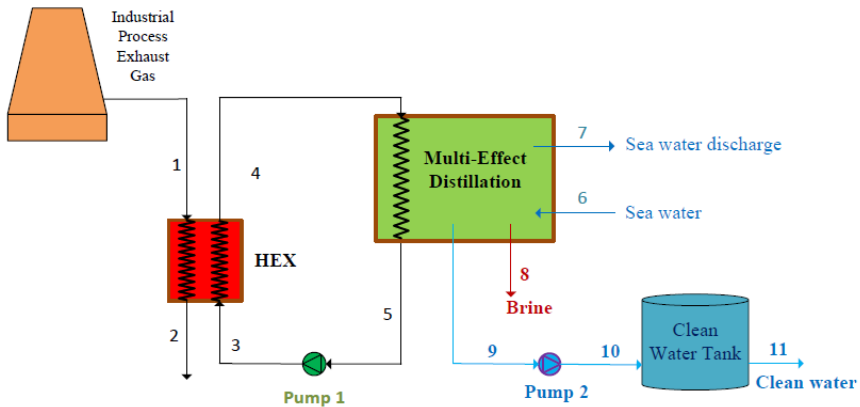


Figure 1. Schematic diagram of multi effect distillation (MED) system.

Thermodynamic analysis

This study aims to evaluate the heat from flue gas in an industrial facility. This waste heat will be passed through a heat exchanger and used for seawater treatment within a MED plant. For this system, a heat exchanger efficiency analysis was performed, considering energy and exergy analysis from a thermodynamic perspective. In general, various assumptions are necessary for thermodynamic analysis and evaluation. Therefore, several assumptions were defined for the thermodynamic analysis of these plant components as follows:

- The kinetic and potential energy and exergy changes are negligible.
- The steady-state working conditions exist.
- The thermal energy losses and pressure drops in the pipe connections are neglected.
- Calculations were made using the Engineering equation Server program (EES,2011).

The balance equations of the mass, energy, entropy and exergy can be given as (Dincer, 2020):

$$\sum_{in} \dot{m} = \sum_{out} \dot{m} \quad (1)$$

$$\sum_{in} \dot{m}h + \sum_{in} \dot{Q} + \sum_{in} \dot{W} = \sum_{out} \dot{m}h + \sum_{out} \dot{Q} + \sum_{out} \dot{W} \quad (2)$$

$$\sum_{in} \dot{m}s + \sum_{in} \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen} = \sum_{out} \dot{m}s + \sum_{out} \frac{\dot{Q}}{T} \quad (3)$$

$$\sum_{in} \dot{m}ex + \sum_{in} \dot{E}x^Q + \sum_{in} \dot{E}x^W = \sum_{out} \dot{m}ex + \sum_{out} \dot{E}x^Q + \sum_{out} \dot{E}x^W + \dot{E}x_D = 0 \quad (4)$$

Here, the exergetic quantities can be defined with:

$$\dot{E}x^Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} \quad (5)$$

$$\dot{E}x^W = \dot{W} \quad (6)$$

$$\dot{E}x_D = T_0 \dot{S}_{gen} \quad (7)$$

and,

$$ex = ex_{ph} + ex_{ch} \quad (8)$$

Here, ex_{ph} and ex_{ch} denote physical and chemical exergies, and can be defined as given below:.

$$ex_{ph} = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \quad (9)$$

$$ex_{ch} = \sum n_i(u_i^0 - u_i^{00}) \quad (10)$$

where u_i^0 and u_i^{00} show chemical potential of i^{th} part of the thermo-mechanical and chemical equilibrium (Dincer & Rosen, 2020). The balance equations of combined system parts are tabulated in Table 1.

Table 1. Thermodynamical balance equations of system parts.

System parts	Balance equations
HEX	MB: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2; \dot{m}_3 = \dot{m}_4$ EB: $\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4$ EnB: $\dot{m}_1 s_1 + \dot{m}_3 s_3 + \dot{S}_{g,HEX4} = \dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_4 s_4$ ExB: $\dot{m}_1 ex_1 + \dot{m}_3 ex_3 = \dot{m}_2 ex_2 + \dot{m}_4 ex_4 + \dot{E}x_{HEX}^D$
Pump 1	MB: $\dot{m}_5 = \dot{m}_3$ EB: $\dot{m}_5 h_5 + \dot{W}_{Pump1} = \dot{m}_3 h_3$ EnB: $\dot{m}_5 s_5 + \dot{S}_{g,Pump1} = \dot{m}_3 s_3$ ExB: $\dot{m}_5 ex_5 + \dot{E}x_{Pump1}^W = \dot{m}_3 ex_3 + \dot{E}x_{Pump1}^D$
Multi-effect distillation	MB: $\dot{m}_4 = \dot{m}_5; \dot{m}_6 = \dot{m}_7 + \dot{m}_8 + \dot{m}_9$ EB: $\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_6 h_6 = \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_9 h_9$ EnB: $\dot{m}_4 s_4 + \dot{m}_6 s_6 + \dot{S}_{g,MED} = \dot{m}_5 s_5 + \dot{m}_7 s_7 + \dot{m}_8 s_8 + \dot{m}_9 s_9$ ExB: $\dot{m}_4 ex_4 + \dot{m}_6 ex_6 = \dot{m}_5 ex_5 + \dot{m}_7 ex_7 + \dot{m}_8 ex_8 + \dot{m}_9 ex_9 + \dot{E}x_{MED}^D$
Pump 2	MB: $\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$ EB: $\dot{m}_9 h_9 + \dot{W}_{Pump2} = \dot{m}_{10} h_{10}$ EnB: $\dot{m}_9 s_9 + \dot{S}_{g,Pump2} = \dot{m}_{10} s_{10}$ ExB: $\dot{m}_9 ex_9 + \dot{E}x_{Pump2}^W = \dot{m}_{10} ex_{10} + \dot{E}x_{Pump2}^D$
	MB: $\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11}$

Clean water tank	EB: $\dot{m}_{10}h_{10} = \dot{m}_{11}h_{11}$ EnB: $\dot{m}_{10}s_{10} + \dot{S}_{g,CWT} = \dot{m}_{11}s_{11} +$ ExB: $\dot{m}_{10}ex_{10} = \dot{m}_{11}ex_{11} + \dot{E}x_{CWT}^D$
<i>MB: Mass balance</i> <i>EB: Energy balance</i> <i>EnB: Entropy balance</i> <i>ExB: Exergy balance</i>	

Efficiencies

The energetic and exergetic efficiency viewpoints are utilized to investigate the performance of the solar energy-based combined plants. Hence, the energetic and exergetic effectiveness can be described as undermentioned:

$$\eta = \frac{\text{Useful energy output in product}}{\text{Energy input}} \quad (11)$$

$$\psi = \frac{\text{Exergy output in product}}{\text{Exergy input}} \quad (12)$$

According to the Eqs. (11) and (12), the energetic and exergetic efficiency equations are tabulated in Table 2. Also, to perform a detailed thermodynamically analysis of multigeneration plant, the energetic and exergetic efficiency equations of the combined system and its subsystems are defined based on the following equations:

Table 2. Energetic and exergetic efficiency equations of system parts

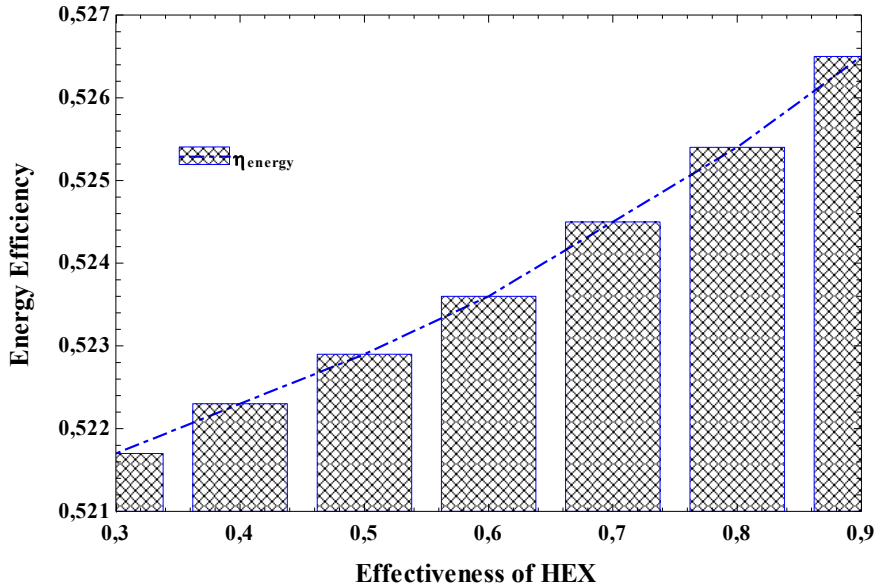
System parts	Energetic and exergetic efficiency equations
HEX	$\eta_{HEX} = \frac{\dot{m}_3h_3 - \dot{m}_4h_4}{\dot{m}_1h_1 - \dot{m}_2h_2}$ $\psi_{HEX1} = \frac{\dot{m}_3ex_3 - \dot{m}_4ex_4}{\dot{m}_1ex_1 - \dot{m}_2ex_2}$
Pump 1	$\eta_{Pump1} = \frac{\dot{m}_3h_3 - \dot{m}_5h_5}{W_{Pump1}}$ $\psi_{Pump1} = \frac{\dot{m}_3ex_3 - \dot{m}_5ex_5}{\dot{E}x_{Pump1}^W}$

Multi-effect distillation	$\eta_{MED} = \frac{\dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_5 h_5}{\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_9 h_9 - \dot{m}_6 h_6}$ $\psi_{MED} = \frac{\dot{m}_4 ex_4 - \dot{m}_5 ex_5}{\dot{m}_7 ex_7 + \dot{m}_8 ex_8 + \dot{m}_9 ex_9 - \dot{m}_6 ex_6}$
Pump 2	$\eta_{Pump2} = \frac{\dot{m}_{10} h_{10} - \dot{m}_9 h_9}{W_{Pump2}}$ $\psi_{Pump2} = \frac{\dot{m}_{10} ex_{10} - \dot{m}_9 ex_9}{\dot{E}x_{Pump2}^W}$
Clean water tank	$\eta_{CWT} = \frac{\dot{m}_{11} h_{11}}{\dot{m}_{10} h_{10}}$ $\psi_{CWT} = \frac{\dot{m}_{11} ex_{11}}{\dot{m}_{10} ex_{10}}$

Result and Discussion

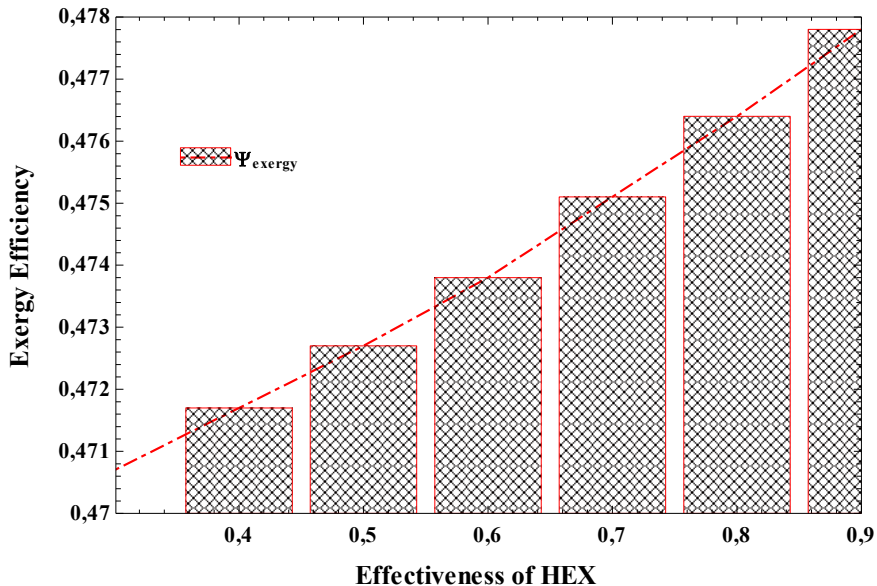
The impact of heat exchanger efficiency on energy efficiency in power generation and power cycles is of great importance, as indicated in many studies. As shown in Figure 2, increasing heat exchanger efficiency also increases energy efficiency. This leads to an increase in the target transfer temperature in the heat exchanger. Consequently, this increase results in an increase in enthalpy. As shown in the figure, increasing heat exchanger efficiency from 30% to 90% increased energy efficiency from 52.17% to 52.65%.

Figure 2. The effect of heat exchanger efficiency on the energy efficiency of a MED plant system.



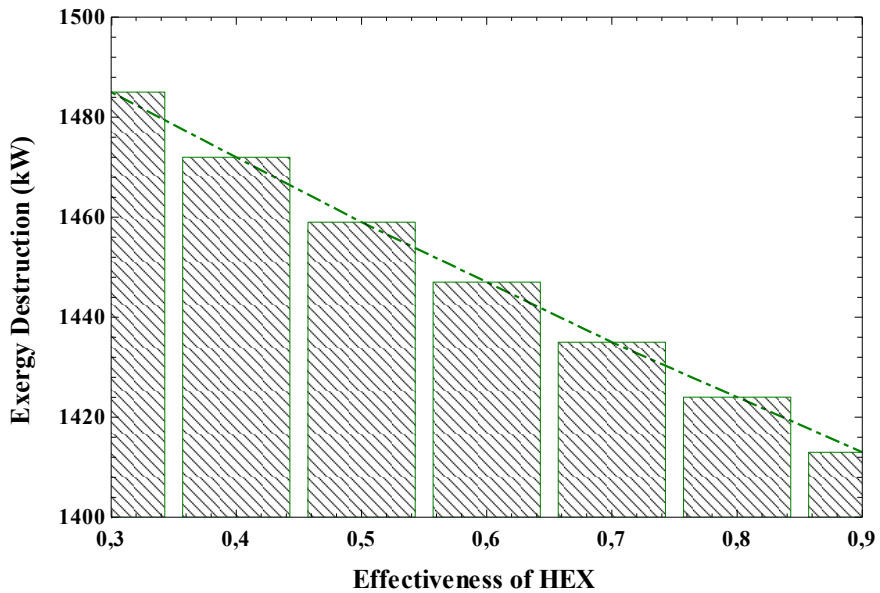
As seen in Figure 3, increasing heat exchanger efficiency also increases exergy efficiency. As shown in the figure, increasing heat exchanger efficiency from 30% to 90% increased exergy efficiency from 47.07% to 47.78%.

Figure 3. *The effect of heat exchanger efficiency on the exergy efficiency of a MED plant system.*



Increasing the exergy efficiency of the MED plant system, which is dependent on the efficiency of the heat exchanger, has also reduced the exergy loss of the system. This is because the production in the MED plant system, which is considered useful work, has also increased. Since increasing the condenser temperature is achieved by increasing the efficiency of the heat exchanger, the exergy loss of the system has decreased proportionally. As seen in Figure 4, increasing heat exchanger efficiency from 30% to 90% increased exergy destruction from 1485 kW to 1413 kW.

Figure 4. *The effect of heat exchanger efficiency on the exergy destruction of a MED plant system.*



Conclusion

Evaporation processes are the most commonly used method in seawater desalination processes. This study investigates the effect of waste heat from flue gas in an industrial facility on the energy efficiency, exergetic efficiency, and exergy destruction in a MED plant, depending on the heat exchanger efficiency. The heat exchanger efficiency was treated as a parametric study. In this parametric study, the heat exchanger efficiency was varied from 30% to 90%, and the effects on energy efficiency, exergy efficiency, and exergy destruction were examined. Increasing the heat exchanger efficiency increased both energy and exergy efficiency while reducing exergy destruction. The increase rates were from 52.17% to 52.65% in energy efficiency and from 47.07% to 47.78%

in exergy efficiency. The decrease in exergy destruction was found to be from 1485 kW to 1413 kW.

In seawater desalination, evaporation is the most common method. As can be seen, increasing the efficiency of the heat exchanger also increases the energy efficiency and exergy efficiency of the system. Naturally, these two increases have led to an improvement in the system's performance.

Referances

Klein, S. A. (2011). *Engineering Equation Solver*. version 9.022-3D, F-Chart Software.

Dincer, I., Rosen, MA. (2020). *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development 3rd*. Oxford: Elsevier

Dincer, I. (2020). *Thermodynamics: A Smart Approach*, John Wiley & Sons Ltd.

S. Goodarzi, E. Jahanshahi Javaran, M. Rahnama, M. Ahmadi, Techno-economic evaluation of a multi effect distillation system driven by low-temperature waste heat from exhaust flue gases, *Desalination* 460 (2019) 64–80.

C. Cuvilla-Suarez, ' A. Colmenar-Santos, D. Borge-Diez, A. ' Lopez-Rey, ' Heat recovery in sanitary-ware industry applied to water and energy saving by multieffect distillation, *J. Clean. Prod.* 213 (2019) 1322–1336.

S. Wang, S. Zhang, X. Cheng, Z. Wang, F. Guo, J. Zhang, An efficient molten steel slag gas quenching process: integrating carbon solidification and waste heat recovery, *Waste Manag.* 186 (2024) 249–258.

S. Lin, M. Elimelech, Staged reverse osmosis operation: configurations, energy efficiency, and application potential, *Desalination* 366 (2015) 9–14. D. Cingolani, F. Fatone, N. Frison,

M. Spinelli, A.L. Eusebi, Pilot-scale multi-stage reverse osmosis (DT-RO) for water recovery from landfill leachate, *Waste Manag.* 76 (2018) 566–574.

M.A. Al-Obaidi, C. Kara-Zaïtri, I.M. Mujtaba, Performance evaluation of multistage and multi-pass reverse osmosis networks for the removal of Nnitrosodimethylamine-D6 (NDMA) from wastewater using model-based techniques, *J. Environ. Chem. Eng.* 6 (2018) 4797–4808.

BÖLÜM 4

CHAPTER I

Exergetic Performance Of Heat Exchanger Efficiency In Waste Heat Recovery In ORC Power Production

Mehmet ALTINKAYNAK¹

Introduction

In waste heat-based power generation systems, ORC (Organic Rankine Cycle) cycles are widely used due to both the inadequacy of the heat source and their low temperature capacities. Of course, the transfer of this waste heat to the coolant fluid occurs through heat exchangers. In heat exchangers, heat transfer can be achieved through direct contact or by placing a wall or separating layer between them. A hot fluid circulates on one side of these layers, and another fluid whose heat is to be transferred circulates on the other. The fluids can be of the same type or different types. The equipment that facilitates heat transfer between two fluids at different temperatures is called a heat exchanger. Heat transfer between the two fluids is achieved through conduction and convection across the wall or separating layer. Some studies in literature related to first and second law analysis of ORC systems were reported in Table 1.

¹ Doç. Dr., Isparta University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Isparta/Turkey, Orcid: 0000-0003-2434-576X, mehmetaltinkaynak@isparta.edu.tr

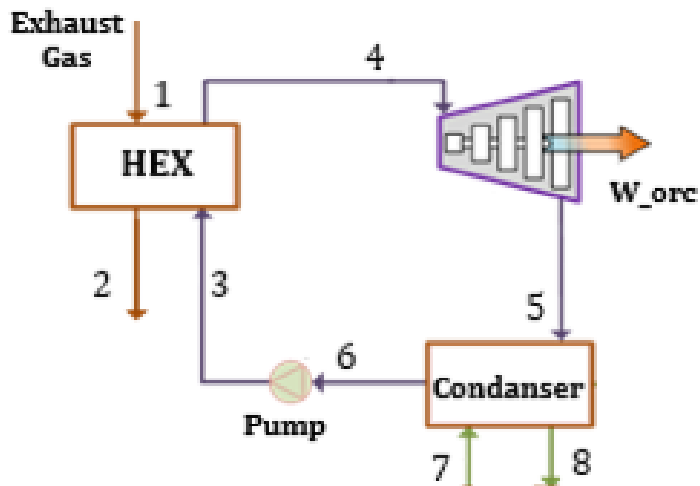
Table 1. Some studies related to ORC systems in literature

Working fluids	Topic	Authors
R601- R245fa R236ea - R123	Energy, exergy, efficiency	Srivastava et al. (2024)
R245fa – R600a - R1234yf	Energy-saving performance	Zhou et al. (2024)
R152a, R1234ze (E), R1243zf, and R1234yf e	Energy, exergy, efficiency	Cao et al. (2025)
R1234ze(Z), R1224ze(Z), R1336mzz(Z), and R1233zd(E)	Energy efficiency	Park et al. (2025)
R152a, R236a, R1234ze(E), R134a and R227a	Energy, exergetic economic	Roumpedakis et al. (2020)
R245fa - R1233zd(e)	Energy, exergy, economic	Lykas et al. (2024)

System Description

The flowchart for waste heat power generation is given in Figure 1. Here, the fluid is first sent to a heat exchanger with the help of a pump. Here, the fluid, exposed to the waste flue gas of the process, is heated to its vaporization temperature and sent to the turbine. After power generation in the turbine, the fluid goes to the condenser, where it is condensed by releasing heat, thus completing the cycle. The fluid is then sent back to the pump by suction, completing the cycle.

Figure 1. Schematic diagram of ORC power generation system.



Thermodynamic analysis

Thermodynamic analyses were applied separately to this system and the equipment comprising its subcomponents. A comprehensive efficiency analysis of the entire system was performed, taking into account energy and exergy analysis from a thermodynamic perspective. In general, various assumptions must be made for thermodynamic analysis and evaluation.

Therefore, the following assumptions were defined for the thermodynamic analysis of the combined plant components:

- The kinetic and potential energy and exergy changes are negligible.
- The steady-state working conditions exist.
- The thermal energy losses and pressure drops in the pipe connections are neglected.
- Calculations were made using the Engineering equation Server program (EES,2011).

The balance equations of the mass, energy, entropy and exergy can be given as (Dincer, 2020):

$$\sum_{in} \dot{m} = \sum_{out} \dot{m} \quad (1)$$

$$\sum_{in} \dot{m}h + \sum_{in} \dot{Q} + \sum_{in} \dot{W} = \sum_{out} \dot{m}h + \sum_{out} \dot{Q} + \sum_{out} \dot{W} \quad (2)$$

$$\sum_{in} \dot{m}s + \sum_{in} \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen} = \sum_{out} \dot{m}s + \sum_{out} \frac{\dot{Q}}{T} \quad (3)$$

$$\sum_{in} \dot{m}ex + \sum_{in} \dot{E}x^Q + \sum_{in} \dot{E}x^W = \sum_{out} \dot{m}ex + \sum_{out} \dot{E}x^Q + \sum_{out} \dot{E}x^W + \dot{E}x_D = 0 \quad (4)$$

Here, the exergetic quantities can be defined with:

$$\dot{E}x^Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \dot{Q} \quad (5)$$

$$\dot{E}x^W = \dot{W} \quad (6)$$

$$\dot{E}x_D = T_0 \dot{S}_{gen} \quad (7)$$

and,

$$ex = ex_{ph} + ex_{ch} \quad (8)$$

Here, ex_{ph} and ex_{ch} denote physical and chemical exergies, and can be defined as given below:.

$$ex_{ph} = (h - h_o) - T_o(s - s_o) \quad (9)$$

$$ex_{ch} = \sum n_i(u_i^0 - u_i^{00}) \quad (10)$$

where u_i^0 and u_i^{00} show chemical potential of i^{th} part of the thermo-mechanical and chemical equilibrium (Dincer & Rosen, 2020).

MB: Mass balance

EB: Energy balance

EnB: Entropy balance

ExB: Exergy balance

Balance equations for the heat exchanger;;

$$\text{MB: } \dot{m}_1 = \dot{m}_2; \dot{m}_3 = \dot{m}_4$$

$$\text{EB: } \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4$$

$$\text{EnB: } \dot{m}_1 s_1 + \dot{m}_3 s_3 + \dot{S}_{g,HEX} = \dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_4 s_4$$

$$\text{ExB: } \dot{m}_1 ex_1 + \dot{m}_3 ex_3 = \dot{m}_2 ex_2 + \dot{m}_4 ex_4 + \dot{E}x_{HEX}^D$$

ORC Turbine balance equations;

$$\text{MB: } \dot{m}_4 = \dot{m}_5$$

$$\text{EB: } \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_5 h_5 + \dot{W}_{ORCT}$$

$$\text{EnB: } \dot{m}_4 s_4 + \dot{S}_{g,ORCT} = \dot{m}_5 s_5$$

$$\text{ExB: } \dot{m}_4 ex_4 = \dot{m}_5 ex_5 + \dot{E}x_{ORCT}^W + \dot{E}x_{ORCT}^D$$

Pump balance equations;

$$\text{MB: } \dot{m}_3 = \dot{m}_6$$

$$\text{EB: } \dot{m}_6 h_6 + \dot{W}_P = \dot{m}_3 h_3$$

$$\text{EnB: } \dot{m}_6 s_6 + \dot{S}_{g,P} = \dot{m}_3 s_3$$

$$\text{ExB: } \dot{m}_6 ex_6 + \dot{E}x_P^W = \dot{m}_3 ex_3 + \dot{E}x_P^D$$

Condanser balance equations;

$$\text{MB: } \dot{m}_7 = \dot{m}_8;$$

$$\text{EB: } \dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_8 h_8$$

$$\text{EnB: } \dot{m}_7 s_7 + \dot{S}_{g,Con} = \dot{m}_8 s_8$$

$$\text{ExB: } \dot{m}_7 ex_7 = \dot{m}_8 ex_8 + \dot{E}x_{Con}^D$$

Efficiencies

The energetic and exergetic efficiency viewpoints are utilized to investigate the performance of the solar energy-based combined plants. Hence, the energetic and exergetic effectiveness can be described as undermentioned:

$$\eta = \frac{\text{Useful energy output in product}}{\text{Energy input}} \quad (11)$$

$$\psi = \frac{\text{Exergy output in product}}{\text{Exergy input}} \quad (12)$$

According to the Eqs. (11) and (12), the energetic and exergetic efficiency equations are tabulated in Table 2. Also, to perform a detailed thermodynamically analysis of multigeneration plant, the energetic and exergetic efficiency equations of the combined system and its subsystems are defined based on the following equations:

Energetic and exergetic efficiency equations;

HEX;

$$\eta_{HEX} = \frac{\dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_3 h_3}{\dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_2 h_2}$$

$$\psi_{HEX} = \frac{\dot{m}_4 ex_4 - \dot{m}_3 ex_3}{\dot{m}_1 ex_1 - \dot{m}_2 ex_2}$$

ORC turbine;

$$\eta_{ORCT} = \frac{\dot{W}_{ORCT}}{\dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_5 h_5}$$

$$\psi_{ORCT} = \frac{\dot{E}x_{ORCT}^W}{\dot{m}_4 ex_4 - \dot{m}_5 ex_5}$$

Pump;

$$\eta_P = \frac{\dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_6 h_6}{\dot{W}_P}$$

$$\psi_P = \frac{\dot{m}_3 ex_3 - \dot{m}_6 ex_6}{\dot{E}x^W}$$

Condenser;

$$\eta_{Con} = \frac{\dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_7 h_7}{\dot{m}_5 h_5 - \dot{m}_6 h_6}$$

$$\psi_{Con} = \frac{\dot{m}_8 ex_8 - \dot{m}_7 ex_7}{\dot{m}_5 ex_5 - \dot{m}_6 ex_6}$$

Moreover, to submit a detailed thermodynamic assessment of the power generation system, the energy and exergy efficiency equations of the system can be written as follows:

ORC plant;

$$\eta_{ORCP} = \frac{(\dot{W}_{ORCT} - \dot{W}_{P2}) + \dot{m}_5 (h_5 - h_6)}{\dot{m}_1 (h_1 - h_2)} \quad (13)$$

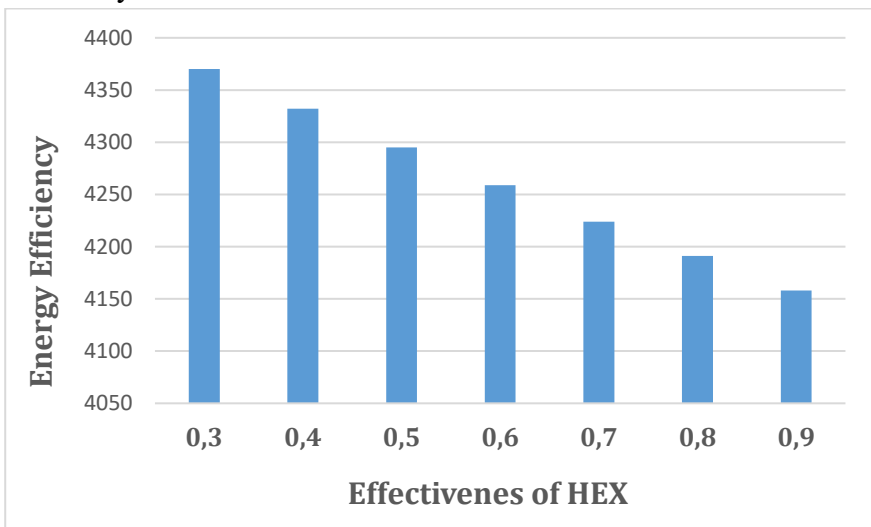
and

$$\psi_{ORCP} = \frac{(\dot{E}x_{ORCT}^W - \dot{E}x_{P1}^W) + \dot{m}_5 (ex_5 - ex_6)}{\dot{m}_1 (ex_1 - ex_2)} \quad (14)$$

Result and Discussion

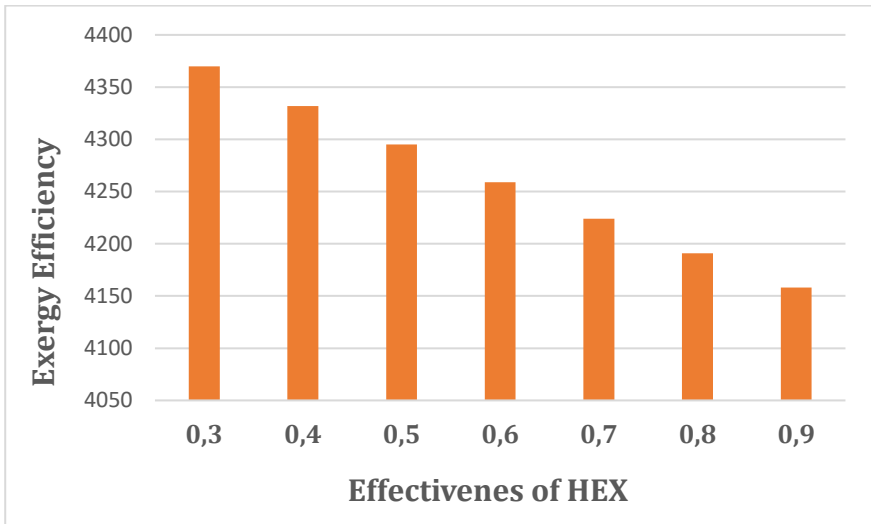
The impact of heat exchanger efficiency on energy efficiency in power generation and power cycles is of great importance, as indicated in many studies. As shown in Figure 2, increasing heat exchanger efficiency also increases energy efficiency. This leads to an increase in the target transfer temperature in the heat exchanger. Consequently, this increase results in an increase in enthalpy. As shown in the figure, increasing heat exchanger efficiency from 30% to 90% increased energy efficiency from 19.44% to 19.73%.

Figure 2. The effect of heat exchanger efficiency on the energy efficiency of a ORC turbine.



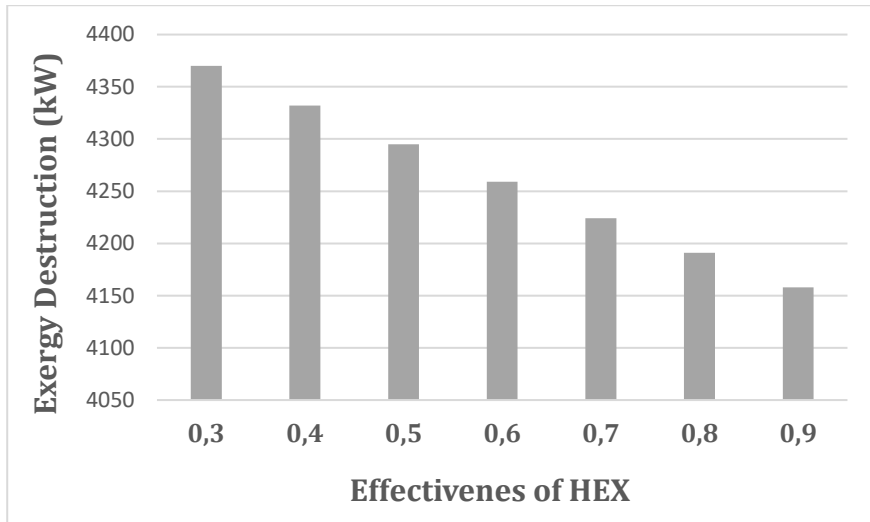
As seen in Figure 3, increasing heat exchanger efficiency also increases exergy efficiency. As shown in the figure, increasing heat exchanger efficiency from 30% to 90% increased exergy efficiency from 18.11% to 18.49%.

Figure 3. The effect of heat exchanger efficiency on the exergy efficiency of a ORC turbine.



Increasing the exergy efficiency of the ORC plant system, which is dependent on the efficiency of the heat exchanger, has also reduced the exergy loss of the system. This is because the production in the ORC plant system, which is considered useful work, has also increased. Since increasing the condenser temperature is achieved by increasing the efficiency of the heat exchanger, the exergy loss of the system has decreased proportionally. As seen in Figure 4, increasing heat exchanger efficiency from 30% to 90% increased exergy destruction from 4370 kW to 4158 kW.

Figure 4. The effect of heat exchanger efficiency on the exergy destruction of a ORC plant system



Conclusion

This study investigates the effect of waste heat from flue gas in an industrial facility on the energy efficiency and exergy efficiency of a turbine, the most important piece of equipment in a power generation plant, depending on the heat exchanger efficiency. Furthermore, the overall energy efficiency and overall exergy efficiency of the entire system, i.e., the ORC system, were also examined. Finally, the exergy destruction of the system was calculated. Heat exchanger efficiency was treated as a parametric study. In this parametric study, heat exchanger efficiency was varied between 30% and 90%, and the increase rates in the energy efficiency and exergy efficiency of the turbine were between 19.44% and 19.73%, and between 18.11% and 18.49%, respectively. Another examination was the overall energy efficiency and exergy efficiency of the system. The energy and exergy efficiencies of the ORC overall plant system were found to be 19.14% and 17.36%,

respectively. The reduction in exergy loss of the overall system was found to be between 4370 kW and 4158 kW. In conclusion, increasing the efficiency of the heat exchanger also increases the energy efficiency and exergy efficiency of the turbine, which is the most important equipment for power generation.

Naturally, these two increases led to an improvement in the overall system's performance. This study investigates the effect of waste heat from flue gas in an industrial facility on the energy efficiency, exergetic efficiency, and exergy destruction in a ORC plant, depending on the heat exchanger efficiency.

Referances

Klein, S. A. (2011). *Engineering Equation Solver*. version 9.022-3D, F-Chart Software.

Dincer, I., Rosen, MA. (2020). *Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development 3rd*. Oxford: Elsevier

Dincer, I. (2020). *Thermodynamics: A Smart Approach*, John Wiley & Sons Ltd.

Srivastava, M., Sarkar, J., Sarkar, A., Maheshwari, N.K., A. Antony, A, Thermo-economic feasibility study to utilize ORC technology for waste heat recovery from Indian nuclear power plants, *Energy* 298 (2024) 131338.

Zhou, X., Xin, Z., Tang, W., Sheng, K., Wu, Z., Comparative study for waste heat recovery in immersion cooling data centers with district heating and organic Rankine cycle (ORC), *Applied Thermal Engineering* 242 (2024) 122479.

Cao, Y., Zhang, N., Zhang, X., Bao, J., He, G., Comprehensive design and 3E analysis of an ORC-based waste heat recovery system with multiple waste heat feeds from ammonia production, *Energy Conversion and Management* 327 (2025) 119597.

Park, J.H., Kim, J., Kwon, J.G., 50 kWe R1336mzz(Z) ORC power generation system for industrial waste heat recovery: System design and commissioning test results, *Energy* 323 (2025) 135698.

Roumpedakis, T.C., Loumpardis, G., Monokrousou, E., Braimakis, K., Charalampidis, A., Karellas, S., Exergetic and economic analysis of a solar driven small scale ORC, *Renewable Energy* 157 (2020) 1008-1024.

Lykas, P., Atsonios, K., Gkountas, A., Bakalis, P., Manolakos, D., Grammelis, P., Itskos, G., Nikolopoulos, N., Energy, exergy, and economic comparison of ORC with quasi-isothermal expansion with other ORC designs for low-grade waste heat recovery, *Thermal Science and Engineering Progress* 55 (2024) 103010.

BÖLÜM 5

HİDROJENİN TEKNİK ALTYAPISI: FİZİKOKİMYASAL ÖZELLİKLERDEN LOJİSTİK SÜREÇLERE

AHMET DENİZ¹

Giriş

Yükselen küresel sıcaklıklar ve giderek şiddetlenen aşırı hava olaylarıyla vurgulanan iklim değişikliğinin artan etkileri, küresel ekonomiler, altyapı ve topluluklar için önemli riskler oluşturmaktadır. Güncel durum itibariyle, karbon nötrlüğüne ulaşmak için birleşik küresel eyleme ihtiyaç duyulduğu konusunda yaygın bir fikir birliği oluşmuştur. Bunu teşvik etmek için, küresel CO₂ emisyonlarına birincil katkıda bulunan enerji sektörü kritik bir rol oynayacaktır. Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre, küresel enerji kaynaklı CO₂ emisyonları 2024 yılında 37,8 milyar tonluk rekor seviyeye ulaşarak sektörler genelinde hızlı bir karbonsuzlaştırmaya duyulan kritik ihtiyacı vurgulamıştır (Jia, Ding, & He, 2026). Bu nedenle, daha sürdürülebilir enerji sistemlerine geçiş, emisyonları azaltmak ve net sıfır hedefine ulaşmak için önemlidir.

¹ Dr.Öğr.Üyesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Çay MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Orcid: 0000-0002-0326-3733

Güneş ve rüzgâr gibi Yenilenebilir Enerji Kaynakları (YEK), temiz enerjiye geçişin temel taşları olarak ortaya çıkmıştır. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'na (IRENA) göre, küresel YEK kapasitesi 2024 yılında rekor kıran %15,1 oranında artarak 4448 GW'a ulaşmıştır (IRENA, 2025). Ancak, YEK'lerin düzensizliği, şebekenin enerji istikrarı ve güvenliği açısından önemli zorluklar oluşturmaktadır. Bu bağlamda hidrojen, özellikle YEK kullanılarak su elektrolizi yoluyla üretilen yeşil hidrojen, enerji dönüşümündeki boşlukları kapatabilen çok yönlü, sıfır karbonlu bir enerji taşıyıcısı olarak öne çıkmıştır (Jia, Ding, & He, 2026).

1994 yılında Shelef ve arkadaşları, küresel ısınma zemininde hidrojen enerjisinin küresel enerji krizini hafifletmek için temiz bir enerji kaynağı olarak hizmet edebileceğini belirttiler; molekülleri küçük, yoğunluğu düşük ve yüksek difüzyona sahip olup, difüzyon hızı doğal gazın yaklaşık dört katıdır (Bryden, Ragland, & Kong, 2022). Berry ve arkadaşları, hidrojenin bir yakıt olarak birçok avantajı olduğunu ve fosil yakıtlı araçlardan temiz enerjili araçlara geçişin makul ve genel bir eğilim olduğunu savunmaktadır. Hidrojen enerjisi, gelecekteki enerji dönüşümünün temel unsurlarından biri olarak görülmekte ve küresel ilgi görmektedir (Cui, Jia, & Li, 2024). Kömür, petrol ve doğal gazın yanması yalnızca büyük miktarda karbondioksit emisyonuna yol açmakla kalmaz, aynı zamanda ekosistemler ve hava kalitesi üzerinde de ciddi etkilere sahiptir ve aşırı karbon emisyonları küresel iklim değişikliği ve buzulların hızla erimesi gibi bir dizi soruna yol açmaktadır. Bu nedenle, 2015'teki Paris Anlaşması'nda uzun vadeli bir sıcaklık hedefi önerilmiş, küresel ortalama sıcaklıktaki artışın belirli bir seviyede sınırlanması amaçlanmıştır (Schleussner, Rogelj, Schaeffer, & Lis, 2016). 2021 itibarıyla 130'dan fazla ülke bu hedefe önceden belirlenmiş bir tarihte ulaşmayı taahhüt etmiştir. Beklenen karbon emisyonu hedeflerine ulaşmak için birçok ülke temiz enerjiye yatırım yapmaya başlamıştır (Bello & Ching, 2024). Temiz bir enerji kaynağı olarak

hidrojen enerjisi de, ülkelerin giderek ciddileşen çevre sorunlarını ve enerji güvenliği zorluklarını ele almaları için etkili bir araç olmuştur (Girayhan, Asemgul, & Sadvakasova, 2024).

Çalışmamızın temel amacı; hidrojeni bir enerji kaynağı olarak ele alıp, literatürdeki teknik verileri bir araya getirmektir. Bu kapsamda çalışma; hidrojenin termodinamik özelliklerinden başlayarak, üretim süreçlerine ve üretilen hidrojenin son kullanıcıya ulaştırılmasını sağlayan depolama ve transfer teknolojilerine odaklanarak, konunun teknik boyutunu derinlemesine analiz etmeyi hedeflemektedir.

Hidrojenin Termodinamik Özellikleri

Hidrojen (H_2), benzinin (44 MJ/kg) enerji yoğunluğunu önemli ölçüde aşan yüksek bir enerji yoğunluğuna (142 MJ/kg) sahiptir (Esfandiari, ve diğerleri, 2024). Kullanımı sırasında tek yan ürün Su'dur ve sıfır karbon emisyonu sağlar (Guan, Lang, & Yao, 2026). Bu durum onu fosil yakıtlara temiz bir alternatif konumuna getirir.

Fiziksel olarak doğada en hafif element olan hidrojenin moleküler ağırlığı 2,016 g/mol'dür. Renksiz, kokusuz ve tatsız bir gaz olarak bulunur. Normal şartlar altında (NŞA'da), 0,08375 kg/m³lük son derece düşük bir yoğunluğa sahiptir ve havadan yaklaşık 14 kat daha hafiftir (Bhandari, Trudewind, & Zapp, 2014). Tablo 1'de Hidrojenin diğer termodinamik özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Hidrojenin termodinamik özellikleri

Özellik	Değer
Yoğunluk (Nşa)	0,08375 kg/m ³
Özgül hacim (Nşa)	11,94 m ³ /kg
Kaynama noktası (1 atm)	-252,8 °C
Erime noktası (1 atm)	-259,2 °C
Alt kalorifik değer	120 MJ/kg
Üst kalorifik değer	141,8 MJ/kg
Alev sıcaklığı (hava içinde)	2045 °C
Yanıcılık aralığı	%4–75

Ateşleme enerjisi	0,2 mJ
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı	500 °C
Kritik sıcaklık	-239.95 °C
Kritik basınç	1,3 MPa
Kritik yoğunluk	31 kg/m ³
Isıl kapasite (c _p) (27 °C'de)	14,3 kJ/kg.K
Isıl kapasite (c _v) (27 °C'de)	10,2 kJ/kg.K
Viskozite (Nşa)	8,9 x 10 ⁻⁶ Pa.s
Termal iletkenlik (Nşa)	0,18 W/m.K
Difüzyon katsayısı (hava içinde)	0,61 cm ² /s
Laminer alev hızı	1,7-3 m/s
Alev sıcaklığı	2045 °C
Minimum tutuşma enerjisi	0,017–0,02 mJ
Kimyasal ekserji	236.100 (kJ/kmol)

Nşa (Normal şartlar altında) = 20 °C ve 1 atm.

Kaynak: (Adiga, Shenoy, Salunkhe, & Sampath, 2025) (Levikhin & Boryaev, 2024)

Yanma sırasında hidrojen hava ile temiz bir şekilde yanar ve yan ürün olarak yalnızca su buharı salar. Bu, geleneksel fosil yakıtların kirletici maddeler yayması nedeniyle onu çevre dostu bir seçenek haline getirir. Yanma, yakıtın gaz halinde veya buharlaşmış olmasını gerektirir ve hidrojen, -252,8 °C'lik düşük kaynama noktası nedeniyle bu duruma çok düşük sıcaklıklarda ulaşır. Son derece yanıcıdır ve tutuşmak için daha az enerji gerektirir. Yüksek bir yanıcılık aralığına sahiptir ve hacimce %4 ila %75 aralığında bir oranda hava ile yanabilir (benzin için %1-7,6'dır). 1,7 m/s'lik yüksek bir alev hızına sahiptir, bu da daha hızlı ısı salınımını kolaylaştırır ve eksik yanmayı önler (Guarco, Langstine, & Turner, 2021). 500 °C'lik yüksek bir kendiliğinden tutuşma sıcaklığına sahiptir, bu da yanmalı motorlarda geleneksel yakıtlara kıyasla daha yüksek bir sıkıştırma oranı ve termal verimlilik sağlar. Ek olarak, hidrojenin 130'u aşan son derece yüksek bir oktan sayısı vardır, bu da istenmeyen kendiliğinden tutuşmayı önler (Adiga, Shenoy, Salunkhe, & Sampath, 2025).

Hidrojen üretimi için su gibi bol olan hammaddeler kullanılır. Ayrıca, yanma ürünleri , örneğin hidrokarbon yakıtların yanması

sırasında önemli miktarlarda oluşan toksik veya hava kirletici maddeler içermez. Hidrojen, düşük kaynama noktası ve düşük yoğunluğu, geniş tutuşma konsantrasyon sınırları ve düşük tutuşma enerjisi ile karakterize edilir; bir hidrojen karışımının vuruntusuz yanması, vuruntulu yanmaya dönüşebilir. Hidrojen ayrıca yüksek yangın ve patlama tehlikesine de sahiptir. Bu nedenle, hidrojenle çalışırken, termofiziksel, kimyasal ve operasyonel özelliklerinin iyi bilinmesi, tesis ve ürünlerin yangın ve patlama güvenliğini sağlamak için organizasyonel ve teknik önlemlerin alınması, depolama, taşıma ve yakıt ikmali için özel araçların tasarlanması ve kullanılması gerekir (Levikhin & Boryaev, 2024).

Hidrojen Üretim Yöntemleri

Hidrojen, doğada serbest halde (moleküler olarak H_2 formunda) nadiren bulunur; bu nedenle birincil enerji kaynaklarından ziyade, bir enerji taşıyıcısı olarak kabul edilir (Yardımcıoğlu & Tunçbilek, 2025). Hidrojen; üretiminde kullanılan enerji kaynağı, teknolojik yöntem ve süreç sonucunda oluşan karbon emisyonuna bağlı olarak farklı renk kodları ile sınıflandırılmaktadır (Tablo 2).

Tablo 2. Hidrojen Üretim Spektrumu.

Renk	Kaynak	Kullanılan Yöntem	Üretim Sürecinde Çıkan Ürünler
Kahverengi	Kömür	Gazlaştırma	H_2+CO_2 (atmosfere salınır)
Siyah	Kömür	Gazlaştırma	H_2+CO_2 (atmosfere salınır)
Gri	Doğalgaz	Buhar Reformasyonu	H_2+CO_2 (atmosfere salınır)

Beyaz		Kendiliğinden doğada bulunur	H ₂
Mavi	Doğalgaz	Buhar Reformasyonu	H ₂ +CO ₂ (yakalanır ve depolanır)
Turkuaz	Doğalgaz	Metan Pirolyzi	H ₂ +C (katı)
Kırmızı	Su	Elektroliz	H ₂ +O ₂
Sarı	Su	Elektroliz	H ₂ +O ₂
Yeşil	Su	Elektroliz	H ₂ +O ₂

Tablo 2, hidrojen üretim yöntemlerini karbon yoğunluğuna göre sınıflandırmaktadır. En yüksek emisyonlu kömür tabanlı üretimden (Kahverengi/Siyah) başlayarak, karbon yakalama teknolojilerine (Mavi/Turkuaz) ve nihayetinde sıfır emisyonlu elektroliz yöntemlerine (Yeşil) doğru bir dekarbonizasyon rotası izlemektedir.

Siyah ve Kahverengi hidrojen, hidrojen üretimi spektrumunda en çevre kirleticisi kategoride yer alırlar. Her ikisi de kömür kullanılarak üretilir, ancak aralarındaki temel fark kullanılan kömürün türü (kalitesi) ve buna bağlı olarak ortaya çıkan karbon yoğunluğudur. Gri hidrojen ise, doğalgazdan üretilir. Kömüre göre daha az olsa da hala ciddi oranda CO₂ salınır. Kahverengi, Siyah ve Gri hidrojen maliyet açısından diğerlerine göre düşük olması nedeniyle şu anda dünyadaki hidrojen üretiminin %95'inden fazlasını oluşturur (IRENA Coalition for Action, 2022).

Orta grupta yer alan, düşük karbonlu yöntemlerle üretilen Mavi, Turkuaz ve Beyaz hidrojeninde fosil yakıt kullanılsa dahi karbonun atmosfere salınmasını engelleyen veya doğada hazır bulunan hidrojeni içerir. Mavi hidrojeninde, Gri hidrojen üretimi ile aynı yöntem (Buhar Reformasyonu) kullanılır, ancak çıkan CO₂

bacadan salınmaz, yakalanıp yeraltına gömülür (CCS teknolojisi). Turkuaz hidrojen için Metan Pirolizi yönteminde gaz formunda CO₂ yerine katı karbon (kurum) çıkar, bu yüzden emisyon düşüktür.

Tablo 2'in en altında yer alan renkler (kırmızı, sarı ve yeşil), suyun elektrolizi ile üretilen hidrojenlerdir. Burada çıkan tek yan ürün Oksijen (O₂)'dir. Renk farkı, sadece kullanılan elektriğin kaynağından ileri gelir. Kırmızı hidrojen, nükleer enerji kaynaklı elektrik (Karbon emisyonu yoktur), Sarı hidrojen, şebeke elektriği kullanılır. Enerji kaynağı karma olduğu için karbon ayak izi şebekenin temizliğine bağlıdır. Yeşil hidrojen, ise tamamen yenilenebilir enerji (Rüzgar/Güneş) kullanılır. Nihai hedef ve en temiz yöntemdir.

Teknik literatürde üretim yöntemleri genellikle kullanılan hammaddeye (fosil yakıtlar, su, biyokütle) ve proses türüne (termal, elektrolitik, fotolitik) göre farklı kategorilere ayrılır.

Fosil Kaynaklı Üretim (Termokimyasal Süreçler)

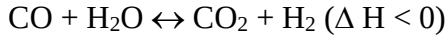
Günümüzde küresel hidrojen talebinin büyük çoğunluğunu, teknolojik olgunluk seviyesi yüksek ve maliyet açısından rekabetçi olmaları nedeniyle fosil kaynaklı yakıtlardan karşılanmaktadır (IEA (International Energy Agency), 2025) (Dinçer & Acar, 2015). Termokimyasal süreçler olarak adlandırılan bu yöntemler; doğalgaz, kömür ve petrol türevleri gibi hidrokarbon yapılı hammaddelerin, yüksek sıcaklık ve genellikle bir oksidan (su buharı veya oksijen) varlığında kimyasal yapılarının bozulması ve hidrojenin ayrıştırılması prensibine dayanır (Veziroğlu & Şahin, 2008). Bu süreçlerde temel amaç, endotermik reaksiyonlar yoluyla fosil kaynağın içerdiği karbon-hidrojen (C-H) bağlarını kırarak moleküler hidrojeni (H₂) serbest hale getirmektir (Bockris, 2013). Ancak bu üretim rotası, hidrojen eldesinin yanı sıra kaçınılmaz bir yan ürün olarak karbon içerikli gazların (özellikle CO₂ ve CO) açığa çıkmasına neden olmaktadır (AlZahrani & Dinçer, 2021). Fosil

kaynaklı termokimyasal yöntemler, enerji verimliliği ve ölçeklenebilirlik açısından avantaj sağlasa da, açığa çıkan yüksek sera gazı emisyonları nedeniyle çevresel sürdürülebilirlik açısından eleştirilmektedir (IRENA, 2020). Bu nedenle literatürde, Karbon Yakalama ve Depolama (CCS) üniteleri entegre edilmediği sürece bu yöntemlerle üretilen hidrojen, kaynağına bağlı olarak "Gri", "Siyah" veya "Kahverengi" kategorisinde sınıflandırılmaktadır.

Buhar Metan Reformlama (Steam Methane Reforming - SMR) en yaygın yöntemdir (Boyano, Marigorta, Morosuk, & Tsatsaronis, 2012). Doğal gaz (CH_4), yüksek sıcaklık ($700\text{-}1000^\circ\text{C}$) ve 15-30 bar basınç altında katalizör eşliğinde su buharı ile aşağıdaki reaksiyon endotermik olarak gerçekleşir.



Ardından, Su-Gaz Değişim Reaksiyonu (Water-Gas Shift) ile karbonmonoksit, su buharı ile tepkimeye sokularak ek hidrojen ve karbondioksit üretilir:

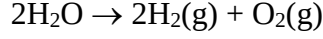


Kömür Gazlaştırma ise bilinen en eski Hidrojen üretim yöntemlerindendir. Kömürün oksijen ve buhar ile yüksek sıcaklıkta tepkimeye sokularak "sentez gazı" ($\text{H}_2 + \text{CO}$) elde edilmesidir. Sanayide kömürün doğalgaz gibi daha ucuz ve çok miktarda erişilebilir olması, bu yöntemleri kullanabilir hale getirmiştir. Fakat Karbon Yakalama ve Depolama (CCS) eklenmediği sürece yüksek karbon emisyonuna neden olmaktadır.

Elektroliz Yoluyla Üretim (Elektrolitik Süreçler)

Elektroliz, su moleküllerinin elektrik akımı uygulanarak hidrojen (H_2) ve oksijen (O_2) olmak üzere iki bileşenine ayrılmasına dayanan elektrokimyasal reaksiyonlardır.

Genel reaksiyon şu şekildedir:



Suyun elektrokimyasal olarak ayrıştırılması işleminde kullanılan elektrolit türü, çalışma sıcaklığı ve yük taşıyıcı iyonların cinsi, elektroliz teknolojilerini birbirinden ayıran temel faktörlerdir. Literatürde ticari olgunluğa erişmiş ve Ar-Ge aşamasında olan üç ana teknoloji öne çıkmaktadır.

- **Alkali Elektroliz (AEC):** Alkali elektroliz, yaklaşık yüz yıllık bir geçmişe sahip olan ve endüstriyel ölçekte en yaygın kullanılan en olgun teknolojidir. Bu sistemlerde genel olarak ağırlıkça %20-30 oranında potasyum hidroksit (KOH) veya sodyum hidroksit (NaOH) sulu çözeltileri elektrolit olarak kullanılır. Anot ve katot bölgeleri, gazların birbirine karışmasını önlemek amacıyla "diyafram" adı verilen gözenekli bir malzeme ile ayrılmıştır. Elektrokimyasal reaksiyon sırasında hidroksil iyonları (OH^-), gözenekli diyafram üzerinden katottan anoda doğru taşınır. Çalışma sıcaklıkları genellikle 60-80°C aralığında olup, sistemin atmosferik basınçta veya 30 bar'a kadar basınçlı koşullarda çalıştırılması mümkündür (Brauns & Turek, 2020)
- **Proton Değişim Membranı (PEM) Elektrolizi:** PEM (Proton Exchange Membrane) elektrolizi, katı bir polimer elektrolitin (genellikle Nafion türevi) kullanıldığı ve protonların (H^+) bu membran üzerinden anottan katoda iletildiği bir teknolojidir. Sıvı elektrolit kullanılmaması, sistemin tasarımı basitleştirir ve kompakt hale getirir. PEM elektrolizörleri, yüksek proton iletkenliği sayesinde çok yüksek akım yoğunluklarında ($>2 \text{ A/cm}^2$) çalışabilir ve yüksek saflıkta hidrojen üretebilir (Carmo, Fritz, Mergela, & Stol, 2013). Ayrıca, diferansiyel basınç altında çalışabilme yeteneği

sayesinde, üretilen hidrojenin mekanik kompresöre ihtiyaç duymadan doğrudan 30-70 bar basınçta depolanmasına olanak tanır (Kumar & Himabindu, 2019).

PEM teknolojisinin akademik ve endüstriyel açıdan en kritik üstünlüğü, milisaniyeler mertebesindeki hızlı tepki süresidir; bu özellik, kesintili üretim yapan yenilenebilir enerji kaynaklarının şebeke dengelemesinde hayati bir rol oynar. Ancak, asidik çalışma ortamı nedeniyle anot ve katotta korozyona dayanıklı ve yüksek aktiviteye sahip İridyum (Ir), Rutenyum (Ru) ve Platin (Pt) gibi pahalı soy metal katalizörlerin kullanılması zorunluluğu, teknolojinin maliyetini artıran en büyük dezavantajdır (Buttler & Spliethoff, 2018). Güncel araştırmalar, bu değerli metallerin kullanım oranını (loading) düşürmeye odaklanmıştır.

- **Katı Oksit Elektroliz (SOEC):** Katı oksit elektroliz hücreleri (SOEC), 700-850°C gibi yüksek sıcaklıklarda çalışan ve elektrolit olarak katı seramik malzemelerin (genellikle Yitria ile stabilize edilmiş Zirkonya - YSZ) kullanıldığı bir teknolojidir. Bu yöntemde su, sıvı formda değil, su buharı formunda katoda beslenir ve oksijen iyonları (O^{2-}) elektrolit üzerinden anoda taşınır. Termodinamiğin temel yasaları gereği, suyun ayrışması için gereken enerjinin bir kısmı elektrik yerine ısı enerjisi (entalpi) olarak sağlandığından, SOEC teknolojisi elektriksel verimlilik açısından diğer yöntemlerden (%100'e varan verimlerle) çok daha üstündür (Laguna-Bercero, 2012). Bu teknolojinin bir diğer önemli özelliği "eş-elektroliz" (co-electrolysis) yapabilme yeteneğidir; yani su buharı ve karbondioksiti aynı anda işleyerek sentez gazı ($H_2 + CO$) üretebilir, bu da onu sentetik yakıt

üretimi için ideal bir aday yapar. Ancak, çok yüksek çalışma sıcaklıkları, malzemeler üzerinde ciddi termal stres ve hızlı degradasyon (bozulma) problemlerine yol açmaktadır (Hauch, Küngas, Blennow, Hansen, & Hansen, 2020). Ayrıca, sistemin ısınması ve soğuması uzun sürdüğü için, sık dur-kalk gerektiren dinamik operasyonlardan ziyade, nükleer santraller veya atık ısısı olan endüstriyel tesislerle entegre sürekli üretim süreçleri için daha uygundur (IEA, 2019).

Alternatif ve Gelişmekte Olan Yöntemler

- Biyokütle Gazlaştırma ve Piroliz: Tarımsal atıklar veya orman ürünlerinin termokimyasal işlemlerle hidrojene dönüştürülmesidir.
- Biyolojik hidrojen üretiminde, fermentasyon veya fotosentez gibi işlemlerle hidrojen üretmek için algler ve bakteriler adı verilen mikroorganizmalar kullanılır. Mikrobiyal elektroliz hücreleri (MEC'ler), elektrokimyasal bir ortamda hidrojen üretimini katalize etmek için bakterileri kullanırken, belirli alg türleri belirli koşullar altında hidrojen üretebilir, ancak ölçeklenebilirlik bir zorluk olmaya devam etmektedir
- Fotoliz (Güneş Enerjisi ile Doğrudan Ayrıştırma): Fotoelektrokimyasal (PEC) hücreler veya fotobiyolojik yöntemler kullanılarak güneş ışığının doğrudan suyu ayrıştırmasında kullanılmasıdır, ancak verimlilik ve malzeme dayanıklılığında iyileştirmeler gerektirir.

Hidrojen Depolama ve Transferi

Hidrojenin kütle başına enerji yoğunluğu (~120 MJ/kg) çok yüksek olsa da, hacim başına enerji yoğunluğu normal şartlar altında

oldukça düşüktür. Bu durum depolama ve transfer süreçlerini, hidrojen ekonomisinin en kritik noktası haline getirmektedir.

Hidrojen depolama hidrojenin üretildiği anda tüketilemediği, taşınması gerektiği veya yüksek basınç/enerji yoğunluğu talep eden uygulamalarda kullanımı için zorunludur. Bu yüzden hidrojenin pratikte bir enerji taşıyıcısı olarak kullanılabilmesi için depolanması şarttır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) istikrarsız yapısı göz önüne alındığında , uzun vadeli ve büyük ölçekli hidrojen depolaması, YEK vadileri sırasındaki fazla enerjiyi pik zamanlarda depolayarak hidrojen talebini karşılayabileceğinden, gelecekte büyük ölçekli bir hidrojen ekonomisinin (GW ölçeğinde) geliştirilmesine önemli ölçüde katkıda bulunabilir. Hidrojen, enerji yoğunluğunu artırmak amacıyla gaz, sıvı veya katı halde depolanabilir.

Fiziksel Depolama Yöntemleri

Hidrojenin moleküler yapısını değiştirmeden, fiziksel koşulların (basınç ve sıcaklık) manipüle edilmesiyle yapılan depolamadır.

- Sıkıştırılmış Gaz (CGH₂): Hidrojen, gaz fazında yüksek basınçlı tanklarda saklanır.
 1. Endüstriyel standartlar genellikle çelik tüplerde 200 bar seviyesindedir.
 2. Mobilite uygulamalarında (otomotiv) karbon fiber takviyeli kompozit tanklar (Tip III ve Tip IV) kullanılarak 350 bar ve 700 bar basınçlara ulaşılır.
- Sıvı Hidrojen (Liquid Hydrogen - LH₂): Hidrojenin kaynama noktası olan -253°C'ye (20 K) kadar soğutulmasıyla elde edilir. Bu işlem yüksek enerji tüketimi gerektirir (sıvılaştırma işlemi, hidrojenin enerji içeriğinin %30-40'ını harcayabilir).

Ancak gaz formuna göre çok daha yüksek yoğunluk sağlar. Kriyojenik tanklarda yalıtım kritik öneme sahiptir.

Malzeme Bazlı Depolama Yöntemleri

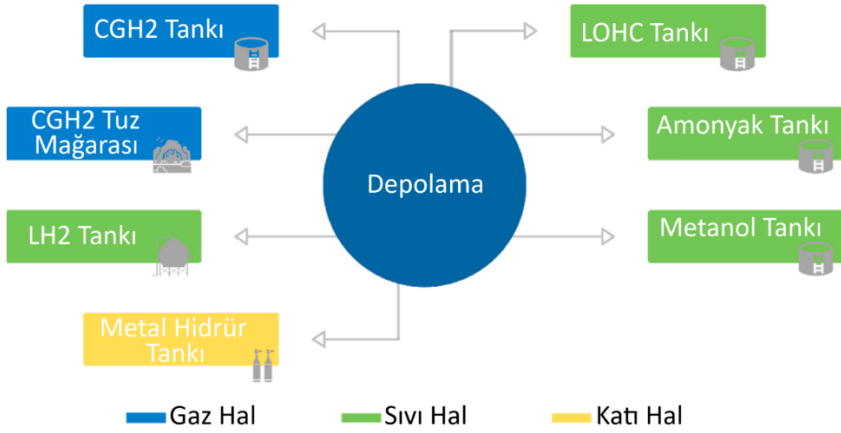
Hidrojenin bir malzeme ile kimyasal veya fiziksel bağ kurarak depolanmasıdır.

- **Metal Hidrürler:** Belirli metallerin veya alaşımların hidrojen atomlarını kristal kafes yapıları içine almasıdır. Güvenli bir yöntemdir (düşük basınçta çalışır), ancak tankın ağırlığı yüksektir. Katı hâl hidrojen taşıyıcıları olan metal hidrürler (MH), hidrojenin metal veya metal alaşımlarında (ör. magnezyum, titanyum) adsorpsiyon teknolojileri kullanılarak depolandığı, daha yakın zamanda incelenen katı hidrojen taşıyıcılarıdır (Kotowicz, Uchman, Jurczyk, & Sekret, 2023).
- **Kimyasal Hidrojen Depolama (Sıvı Organik Hidrojen Taşıyıcıları - LOHC):** Son yıllarda çalışılan diğer potansiyel hidrojen taşıyıcılarıdır. Hidrojenin metanol (CH_3OH), toluen gibi sıvı organik bileşiklere yüklenmesi; hidrojenasyon ve ihtiyaç duyulduğunda ayrıştırılması; dehidrojenasyon işlemidir. Bu taşıyıcıların hidrojenin ortam koşullarında sıvı fazda depolanmasına imkân sağlayarak mevcut akaryakıt altyapısı ile taşınabilir olması en büyük avantajıdır (Reuß, ve diğerleri, 2017).
- **Amonyak (NH_3):** Hidrojenin azot ile birleştirilerek amonyağa dönüştürülmesi, hidrojenin uzun mesafeli transferi için en verimli yöntemlerden biri olarak görülmektedir. Amonyak, hidrojene göre çok daha kolay sıvılaşır ve taşınır. Amonyak ve metanolün sentezinden

depolama ve taşımaya kadar olan tedarik zincirleri, kimya endüstrisinin düzenli talebi nedeniyle endüstriyel olarak olgunlaşmıştır (Lu, Krutoff, Wappler, & Fischer, 2025).

Hidrojenin depolanması aşamasında fiziksel durumları ve taşıyıcıları Şekil 1’de verilmiştir.

Şekil 1. Depolama aşamasında hidrojen taşıyıcı seçenekleri.



Kaynak: (Lu, Krutoff, Wappler, & Fischer, 2025).

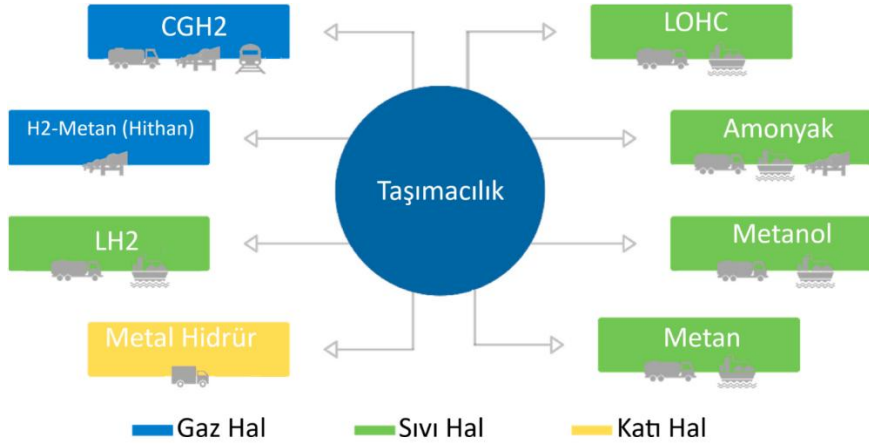
Hidrojen Transferi

Büyük ölçekli hidrojen üretimi, depolanması ve tüketimi, farklı zamanlarda ve farklı yerlerde gerçekleşmesi beklenmektedir. Bu nedenle, hidrojen taşımacılığı, hidrojen talebini doğru zamanda ve doğru yerlerde karşılamayı amaçlayan optimize edilmiş bir tedarik zinciri kapsamında, hidrojen tedarik zincirinin önemli bir sektörüdür. Literatürde, hidrojen taşımacılığı genellikle iletim (transmission) ve dağıtım (distribution) olarak ayrılır; bu, uzun mesafelerdeki büyük ölçekli taşımacılık talebini organize etmek için yapılır (Lu, Krutoff, Wappler, & Fischer, 2025).

Hidrojen iletimi, üretilen hidrojenin depolama noktalarına veya merkezlere taşınmasını ifade ederken; hidrojen dağıtımı,

depolama noktalarından nihai kullanıcılara teslimatı ifade eder. Taşıma aşamasında kullanılan hidrojen taşıyıcılar, hidrojen depolamada kullanılan taşıyıcılarla eşdeğerdir. Bu nedenle hidrojen dört sistem üzerinden taşınabilir: boru hattı, tren, kamyon ve gemi (Şekil 2). Sektörde kullanılan en yaygın taşımacılık araçları kamyonlar ve boru hatlarıdır.

Şekil 2. Transfer aşamasında hidrojen taşıyıcı seçenekleri.



Kaynak: (Lu, Krutoff, Wappler, & Fischer, 2025).

- Karayolu ve Deniz: Karayolu taşımacılığı, CGH₂, LH₂, LOHC, LNH₃, CH₃OH ve metan (CH₄) taşımaya olanak sağlar. Bu hidrojen taşıyıcıları için karayolu taşımacılığı sistemleri benzer yapıya sahiptir; bir taşıyıcıdan bağımsız çekici araç (veya kamyon çekicisi) ve belirli taşıyıcı(lar) için uygun özel treylerlerden oluşur ve ülke bazlı düzenlemelere uygundur. En yaygın taşımacılık aracı, ticari olarak mevcut olması nedeniyle CGH₂ kamyonlarıdır. Kısa mesafeler için tüplü treylerler (gaz) veya kriyojenik tankerler (sıvı) kullanılırken, kıtalararası transferde amonyak veya LOHC taşıyan gemiler ön plana çıkmaktadır.

- **Boru Hatları:** Hidrojen boru hatları ve hidrojen taşımak amacıyla doğal gaz boru hatlarının yeniden kullanımını kapsar. Büyük miktarlarda transfer için en ekonomik yoldur. Hidrojen boru hatları yüksek taşıma kapasitesine, yüksek yatırım maliyetine ve karayolu ve deniz taşımacılığına kıyasla daha uzun inşaat süresine sahiptir. Hidrojen boru hatları, örnekleme en çok çalışılan boru hattıdır ve üretilen hidrojenin basıncını artırmak için yeni inşa edilen borular ve kompresörlerden oluşur.

Mevcut doğalgaz hatlarına da belirli oranlarda (%5-20) hidrojen karıştırılması (blending) veya saf hidrojen hatlarının inşası mümkündür. Çeşitli çalışmalar, mevcut doğal gaz dağıtım ağlarının hidrojen taşımacılığı için yeniden kullanılabilecek kapasiteye sahip olduğunu göstermektedir. Cerniauskas ve arkadaşlarının (2020) yaptıkları çalışma, Almanya'daki boru hattı ağının %80'inin teknik olarak hidrojen taşımacılığına uygun olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, doğal gaz dağıtım ağının hidrojen taşımacılığı için yeniden kullanılması, yeni hidrojen boru hatlarına kıyasla hidrojen iletim maliyetini %60'tan fazla azaltmaktadır. Doğal gaz boru hatlarının hidrojen taşımacılığında kullanılması hâlâ gelişmekte olan bir teknoloji olduğundan, ABD'de HyNTs projesi gibi projelerle teknik ve ekonomik parametrelerin gerçek ortamda değerlendirilmesi sürdürülmektedir.

Sonuç

Bu çalışmada, temiz enerji geçişinin kritik bir unsuru olan hidrojenin teknik altyapısı; termodinamik özellikleri, üretim teknolojileri ve lojistik süreçleri (depolama ve transfer) ekseninde ayrıntılı olarak incelenmiştir. Literatür verileri ışığında yapılan

değerlendirmeler, hidrojenin gravimetrik enerji yoğunluğunun fosil yakıtlara kıyasla üstün olduğunu, ancak düşük hacimsel yoğunluğu nedeniyle depolama ve transfer aşamalarında ileri teknoloji gerektiren (kriyojenik, yüksek basınçlı veya kimyasal) yöntemlere ihtiyaç duyduğunu ortaya koymaktadır. Üretim tarafında ise, mevcut küresel arzın büyük kısmının hala karbon yoğun yöntemlerle (Siyah/Gri) sağlandığı, ancak sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda elektroliz tabanlı (Yeşil) ve karbon yakalama entegreli (Mavi) üretim teknolojilerinin hayati bir rol üstlendiği görülmektedir.

Sonuç olarak, hidrojenin küresel enerji sistemine tam entegrasyonu, sadece üretim maliyetlerinin düşürülmesine değil, aynı zamanda güvenli ve verimli bir depolama-dağıtım ağının kurulmasına bağlıdır. İncelenen üretim yöntemleri (Alkali, PEM, SOEC) ve depolama alternatifleri (Fiziksel, Malzeme Bazlı), hidrojenin sadece bir yakıt değil, aynı zamanda yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili yapısını dengeleyen stratejik bir enerji taşıyıcısı olduğunu kanıtlamaktadır. Bu bağlamda, hidrojen değer zincirindeki teknik darboğazların aşılması, dekarbonizasyon hedeflerine ulaşılmasında belirleyici faktör olacaktır.

Kaynakça

- IRENA Coalition for Action. (2022). *Decarbonising End-use Sectors: Green Hydrogen Certification*. International Renewable Energy Agency. 12 15, 2025 tarihinde <https://www.irena.org/Publications/2022/Mar/The-Green-Hydrogen-Certification-Brief> adresinden alındı
- Adiga, D. D., Shenoy, S. B., Salunkhe, P. B., & Sampath, S. (2025). An overview of the hydrogen value chain in energy transitioning economies: A focus on India. *International Journal of Hydrogen Energy*, 187, 152099. doi:10.1016/j.ijhydene.2025.152099
- AlZahrani, A. A., & Dinçer, İ. (2021). Exergoeconomic analysis of hydrogen production using a standalone high-temperature electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(27), 13899-13907. doi:10.1016/j.ijhydene.2020.04.055
- Bello, M., & Ching, K. (2024). Path to clean and sustainable energy from nuclear and renewable sources: evidence from France. *Utilities Policy*, 101764, 101764. doi:10.1016/j.jup.2024.101764
- Bhandari, R., Trudewind, C., & Zapp, P. (2014). Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – a review. *Journal of Cleaner Production*, 85, 151-163. doi:10.1016/j.jclepro.2013.07.048.
- Bockris, J. O. (2013). The Hydrogen Economy: Its History. *International Journal of Hydrogen Energy*(38), 2579-2588. doi:10.1016/j.ijhydene.2012.12.026
- Boyano, A., Marigorta, A.-M. B., Morosuk, T., & Tsatsaronis, G. (2012). Steam Methane Reforming System for Hydrogen Production: Advanced Exergetic Analysis. *International*

- Journal of Thermodynamics (IJoT)*, 15(1), 1-9. doi: 10.5541/ijot.331
- Brauns, J., & Turek, T. (2020). Alkaline Water Electrolysis Powered by Renewable Energy: A Review. *Processes*(8), 248. doi:10.3390/pr8020248
- Bryden, K., Ragland, K., & Kong, S. (2022). *Combustion Engineering*. CRC Press. doi:10.1201/b22232
- Buttler, A., & Spliethoff, H. (2018). Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2440-2454. doi:10.1016/j.rser.2017.09.003
- Carmo, M., Fritza, D. L., Mergela, J., & Stol, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*(38), 4901-4934. doi:10.1016/j.ijhydene.2013.01.151
- Cerniauskas, S., Jose, C. J., Grube, T., Robinius, M., & Stolten, D. (2020). Options of natural gas pipeline reassignment for hydrogen: Cost assessment for a Germany case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(21), 12095-12107. doi:10.1016/j.ijhydene.2020.02.121
- Cui, Q., Jia, Z., & Li, Y. (2024). Path analysis of using hydrogen energy to reduce greenhouse gas emissions in global aviation. *Cell Reports Sustainability*, 1(100133). doi:10.1016/j.crsus.2024.100133
- Dinçer, İ., & Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal Of Hydrogen Energy*(40), 11094-11111. doi:10.1016/j.ijhydene.2014.12.035

- Esfandiari, N., Aliofkhazraei, M., Colli, A. N., Walsh, F. C., Cherevko, S., Kibler, L. A., . . . Lee, J. (2024). Metal-based cathodes for hydrogen production by alkaline water electrolysis: Review of materials, degradation mechanism, and durability tests. *Progress in Materials Science*, 144, 101254. doi:10.1016/j.pmatsci.2024.101254.
- Girayhan, Y., Asemgul, K., & Sadvakasova, B. D. (2024). Hydrogen energy development in Turkey: challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52 (Part D), 1304-1311. doi:10.1016/j.ijhydene.2023.11.230
- Guan, J., Lang, C., & Yao, X. (2026). Innovative carbon-based materials for efficient hydrogen storage: A review of solid, gaseous, and liquid systems. *Progress in Materials Science*, 157, 101596. doi:10.1016/j.pmatsci.2025.101596
- Guarco, J., Langstine, B., & Turner, M. (2021). Practical considerations for firing hydrogen versus natural gas. *Combust energy assoc.* <https://cea.org.uk/wp-content/uploads/2021/06/Zeeco-Hydrogen-Article.pdf>
adresinden alındı
- Hauch, A., Küngas, R., Blennow, P., Hansen, A., & Hansen, J. (2020). Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis. *Science*, 370(6513). doi:10.1126/science.aba6118
- IEA (International Energy Agency). (2025). Global Hydrogen Review 2025. Paris. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025> adresinden alındı
- IEA. (2019). *The Future of Hydrogen*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
adresinden alındı

- IRENA. (2020). *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal*.
- IRENA. (2025). *Renewable capacity statistics 2025*. <https://www.irena.org/Publications/2025/Mar/Renewable-capacity-statistics-2025> adresinden alındı
- Jia, W., Ding, T., & He, Y. (2026). Synergistic integration of green hydrogen in renewable power systems: A comprehensive review of key technologies, research landscape, and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(226), 116375 . doi:10.1016/j.rser.2025.116375
- Kotowicz, J., Uchman, W., Jurczyk, M., & Sekret, R. (2023). Evaluation of the potential for distributed generation of green hydrogen using metal-hydride storage methods. *Appl. Energy*, 344, 121269. doi:10.1016/j.apenergy.2023.121269.
- Kumar, S. S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis—A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2, 442-454. doi:10.1016/j.mset.2019.03.002
- Laguna-Bercero, M. A. (2012). Recent advances in high temperature solid oxide electrolysis cells for hydrogen production. *Jorunal of Power Sources*, 203, 4-16. doi:10.1016/j.jpowsour.2011.12.019
- Levikhin, A., & Boryaev, A. (2024). Physical properties and thermodynamic characteristics of hydrogen. *Heliyon*, 10, e36414. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e36414
- Lu, X., Krutoff, A.-C., Wappler, M., & Fischer, A. (2025). Key influencing factors on hydrogen storage and transportation costs: A systematic literature review. *International Journal*

of *Hydrogen Energy*, 105, 308-325.
doi:10.1016/j.ijhydene.2025.01.196

Reuß, M., Grube, T., Robinius, M., Preuster, P., Wasserscheid, P., & Stolten, D. (2017). Seasonal storage and alternative carriers: a flexible hydrogen supply chain model. *Appl Energy*, 200, 290-302. doi:10.1016/j.apenergy.2017.05.050

Schleussner, C.-F., Rogelj, J., Schaeffer, M., & Lis, T. (2016). Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. *Nature Climate Change*, 6, 827–835. doi:10.1038/nclimate3096

Veziroğlu, T. N., & Şahin, S. (2008). 21st Century's Energy: Hydrogen Energy System. *Energy Conversion and Management*(49), 1820-1831.
doi:doi:10.1016/j.enconman.2007.08.015

Yardımcıoğlu, M., & Tunçbilek, H. S. (2025). Hidrojen Enerji Sistemleri. *Journal of Western European Social Sciences*, 2(1). doi:10.5281/zenodo.15122919

BÖLÜM 6

SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA PERSPEKTİFİNDE TÜRKİYE'NİN YENİLENEBİLİR ENERJİ STRATEJİSİ

1. Ahmet Erhan AKAN¹

Giriş

21. yüzyılın en önemli küresel gündem maddelerinden biri haline gelen enerji güvenliği ve iklim değişikliği sorunları, ülkeleri enerji politikalarını yeniden yapılandırmaya zorlamaktadır. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynakları hem çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması hem de enerji arz güvenliğinin artırılması açısından kritik bir konuma yükselmiştir.

Sürdürülebilir kalkınma perspektifinde Türkiye'nin yenilenebilir enerji stratejisi, enerji geçişinde karşılaşılan zorluklar ve sağlanan fırsatlar üzerinden şekillenmektedir. Türkiye, enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla fosil yakıtlar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmekte ve bu bağlamda projeler ve politikalar geliştirmektedir. 2035 yılına kadar yenilenebilir enerji tüketiminde %65 oranına ulaşma hedefleri doğrultusunda hızla çalışılmaktadır.

¹ Doç. Dr. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Orcid: 0000-0003-1806-7943

Bölgesel potansiyelin değerlendirilmesi, Türkiye'nin yenilenebilir enerji stratejisi bağlamında önem arz etmektedir. Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde rüzgâr, güneş ve jeotermal gibi kaynakların haritalanması, bölge spesifik stratejilerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Avcı & Aladağ, 2025). Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılması, yatırımcıları çekme potansiyelini artırmakta ve ekonomik büyümeye katkı sağlamaktadır (Raihan & Tuspekova, 2022). Ulusal enerji politikaları, yerel yönetimlerin yenilenebilir enerji kullanımı konusundaki sorumluluklarını da kapsamaktadır. Yerel yönetimlerin fotovoltaik panel kullanımlarının desteklenmesi ve enerji yapılarının çevresel sürdürülebilirliğe uygun bir şekilde tasarlanması, Türkiye'de enerji dönüşümüne katkıda bulunmaktadır (Uçar & Akıner, 2020: 14). Öte yandan, yenilenebilir enerji kaynaklarının efektif bir şekilde entegre edilmesi amacıyla, akıllı şehir uygulamaları ve destekleyici finansal modellerin geliştirilmesi gerekmektedir (Doğanay, Çetinkaya, & Dursun, 2025: 7).

Bu bölümde, Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyeli, mevcut durumu, stratejik hedefleri ve sürdürülebilir kalkınma perspektifinde bu alandaki politikaları ele alınacaktır. Karşılaşılan zorluklar ve fırsatlar değerlendirilerek, ülkenin enerji dönüşümü yolculuğunda atacağı adımlar için bir çerçeve sunulması amaçlanmaktadır.

1. Türkiye'nin Yenilenebilir Enerji Potansiyeli

1.1 Güneş enerjisi potansiyeli

Türkiye, güneş enerjisi potansiyelini değerlendirme konusunda önemli adımlar atmakta ve bu konuda gerçekleştirdiği çalışmalarla hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik kalkınma hedeflerini gerçekleştirmeye çalışmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en büyük paya sahip olan güneş enerjisi, Türkiye'nin coğrafi konumu itibarıyla oldukça elverişli bir iklime

sahiptir. Türkiye, yıllık ortalama 2.640 saat güneşlenme süresi ile bu kaynak açısından önemli bir potansiyele sahiptir (Erken, 2020. 9). Ayrıca, yıllık günlük toplam güneş radyasyonu, 4-7 kWh/m² arasında değişmektedir ki bu da güneş enerjisi sistemleri için oldukça elverişli bir durum oluşturur (Hajou & Mghouchi, 2025).

Güneş enerjisi sistemlerinin etkinliğini artırmak için yer seçimi ve sistem dizaynı büyük önem taşımaktadır. Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde yapılan araştırmalar, güneş enerjisi santralleri için en uygun yerlerin seçilmesi gerektiğini göstermektedir. Örneğin, Erzurum ilinde yapılan bir çalışmada, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ve bulanık mantık kullanılarak, güneş enerjisi santrali için en uygun lokasyonlar belirlenmiştir (Türk, Koç, & Şahin, 2021). Bu tür yer seçimi çalışmaları, güneş enerjisi potansiyelinin artırılması açısından kritik öneme sahiptir.

Türkiye, güneş enerjisi entegrasyonu konusunda yenilikçi yaklaşımlar uygulayarak, elektrik talebinin karşılanmasında güneş enerjisinin rolünü artırmayı hedeflemektedir. Güneş enerjisinin tarımsal üretim ve diğer endüstriyel uygulamalarda kullanımı, enerji maliyetlerini düşürmekte ve enerji güvenliğini artırmaktadır (Erken, 2020). Bunun yanı sıra, yapılan bir araştırmada, Türkiye'nin güneş enerjisi santrallerinin, yıllık toplam elektrik üretiminin %25'ini sağlaması hedeflenmektedir (Uddin, Shaikh, & Khan, 2021).

Ayrıca, Türkiye'deki güneş enerjisi sektörü, devlet teşvikleri sayesinde hızla büyümektedir. Teşviklerin, güneş enerjisi projeleri için yatırımcılara sağladığı destek, potansiyelin gerçeğe dönüşmesi açısından oldukça önemlidir (Erken, 2020). Bu politikalara ek olarak, yenilikçi finansman modellerinin geliştirilmesi ve yerel yönetimlerin desteklenmesi, güneş enerjisi kullanımının yaygınlaştırılması için gereklidir (Akinyemi, Kabeya, & Davidson, 2022). Son yıllarda kurulu güneş enerjisi gücünde gözlenen hızlı artış, Türkiye'nin bu potansiyeli değerlendirme yönündeki kararlılığını ortaya koymaktadır. Güneş enerjisi, kısa kurulum süresi,

modüler yapısı ve hızla düşen birim maliyetleri sayesinde, Türkiye'nin 2035 Ulusal Enerji Planı ve 2053 net sıfır emisyon hedefleri doğrultusunda en kritik yenilenebilir enerji kaynağı olarak konumlanmaktadır.

1.2 Rüzgar enerjisi potansiyeli

Türkiye, coğrafi konumu ve doğal kaynakları sayesinde önemli bir rüzgar enerjisi potansiyeline sahiptir. Rüzgar enerjisi, çevre dostu bir enerji kaynağı olarak, Türkiye'nin enerji ihtiyacını karşılamak ve enerji bağımlılığını azaltmak için kritik bir role sahiptir. Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyelinin değerlendirilmesi, farklı yönlerden ele alınmıştır.

Öncelikle, Türkiye'nin rüzgar enerjisi potansiyeli, coğrafi veriler ve istatistiksel modelleme yöntemleri kullanılarak belirlenmektedir. Örneğin, Çanakkale bölgesinde yapılan bir çalışmada, rüzgar hızları ve enerji potansiyeli Weibull dağılımı kullanılarak analiz edilmiştir (Aslan, 2020, Köroğlu & Ekici, 2024). Özellikle Çanakkale ve İzmir gibi bölgelerde rüzgar enerjisi yatırımları için uygun yerler belirlenmiştir (Eroğlu, 2025). Ülkenin üç tarafının denizlerle çevrili olması, karmaşık topografik yapısı ve bölgesel basınç farkları, özellikle kıyı ve boğaz bölgelerinde yüksek ve süreklilik arz eden rüzgâr rejimlerinin oluşmasını sağlamaktadır. Türkiye genelinde 50 m yükseklikte yıllık ortalama rüzgâr hızı 6–7 m/s, 100 m ve üzeri türbin göbek yüksekliklerinde ise 7,5–9 m/s seviyelerine ulaşabilmektedir. Bu değerler, modern rüzgâr türbinleri için teknik ve ekonomik olarak uygun bir üretim ortamı sunmaktadır.

Bunun yanı sıra, Türkiye'deki rüzgar enerjisi potansiyelinin artırılabilmesi için çeşitli stratejilerin uygulanması gerekmektedir. Örneğin, deniz üstü rüzgar santrallerinin geliştirilmesi, Türkiye'nin toplam enerji karışımında yenilenebilir kaynakların oranını artırmak için önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir (Genç, Karipoğlu, & Koca, 2021: 12).

1.3 Hidroelektrik potansiyeli

Türkiye, sahip olduğu hidroelektrik potansiyeli ile dikkat çeken bir ülkedir. Türkiye'nin hidroelektrik üretim kapasitesi, doğal su kaynaklarının coğrafi dağılımına dayanan büyük bir potansiyele işaret etmektedir. Türkiye'deki mevcut hidroelektrik santralleri, toplam 49.000 MW kurulu güç kapasitesine sahiptir; bu kapasitenin bir kısmı hâlâ kullanılmamaktadır, bu da Türkiye'ye gelecekteki enerji stratejileri için fırsatlar sunmaktadır. Türkiye'de, Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP) gibi önemli projelerle, yıllık yaklaşık 27 milyar kWh hidroelektrik enerji üretimi hedeflemektedir (Gülen & Öztürk, 2025).

Hidroelektrik potansiyelin değerlendirilmesi, hem çevresel hem de ekonomik faktörlerle yakından ilişkilidir. Bu potansiyelin gerçekleştirilmesi için gereken fiziki altyapının oluşturulması, bölgesel su kaynaklarının yönetimi ve iklim değişikliğinin etkilerinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. İklim değişiklikleri, hidroelektrik potansiyelin değişkenliğinde önemli rol oynayabilir; bu bağlamda, hidroelektrik santrallerinin iklim değişikliği ile nasıl başa çıkabileceği konusunda daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır (Jung & ark., 2021). Örneğin, Türkiye'nin iklim değişikliği ile mücadele stratejileri, hidroelektrik potansiyelin artırılması yönünde olmalıdır; bu tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının bütünleşik bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlar (Çelik, Bekçi, & Ichwani, 2023).

Gelecekte, çeşitli hidroelektrik projeleri enerji arzını güvence altına almak ve karbon bazlı enerji kaynaklarını azaltmak için kritik bir rol oynayacaktır (Gülen & Öztürk, 2025). Türkiye'nin enerji bağımlılığını azaltmak için hidroelektrik ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması, çevresel etkilere bağlı olarak önemli faydalar sağlayabilir (Bobat, 2022). Türkiye'nin hidroelektrik potansiyeli, ülkedeki enerji güvenliğini artırmak için atılacak adımlar itibarıyla büyük bir öneme sahiptir. Dolayısıyla,

Türkiye'nin hidroelektrik potansiyelinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi hem mevcut enerji ihtiyacını karşılamak hem de sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için gereklidir.

1.4 Jeotermal enerji potansiyeli

Türkiye, jeolojik ve tektonik özellikleri sayesinde önemli jeotermal enerji potansiyeline sahip ülkeler arasında yer almaktadır. Alp–Himalaya orojenik kuşağı üzerinde konumlanan Türkiye’de, aktif fay sistemleri ve genç volkanik oluşumlar boyunca yüksek ısı akısı değerleri gözlenmekte; bu durum jeotermal kaynakların yaygın ve çeşitli sıcaklık aralıklarında bulunmasına olanak sağlamaktadır (MTA), 2023). Bu özellikleriyle jeotermal enerji, Türkiye’nin yenilenebilir enerji portföyünde sürekli, yerli ve düşük karbonlu bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır.

Türkiye’de tespit edilen jeotermal kaynakların büyük bir bölümü Batı Anadolu graben sistemi içerisinde yoğunlaşmaktadır. Özellikle Büyük Menderes, Gediz ve Simav grabenleri, yüksek sıcaklıklı jeotermal sahaların gelişimine uygun jeolojik koşullar sunmaktadır. Aydın, Denizli, Manisa, İzmir ve Kütahya illeri, elektrik üretimine elverişli yüksek entalpili ($>150\text{ }^{\circ}\text{C}$) jeotermal rezervuarların bulunduğu başlıca bölgeler olarak öne çıkmaktadır. Bunun yanı sıra İç Anadolu, Doğu Anadolu ve Marmara bölgelerinde yer alan orta ve düşük entalpili ($30\text{--}150\text{ }^{\circ}\text{C}$) kaynaklar; konut ısıtması, seracılık, termal turizm ve endüstriyel proses ısısı gibi doğrudan kullanım alanlarında değerlendirilmektedir (ETKB), 2022).

Gelecekte, Türkiye'nin jeotermal potansiyelinin daha fazla değerlendirilmesi, enerji verimliliği ve sürdürülebilir kalkınma için büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, yatırımların artması ve teknolojik gelişmelerin desteklenmesi gerekmektedir. Enerji geçişi sürecinde, jeotermal enerji kaynaklarının etkin bir şekilde

kullanılması hem ekonomik büyüme hem de çevresel koruma açısından stratejik faydalar sağlayabilir (Yüksel & Öztürk, 2020).

1.5 Biyokütle enerjisi ve diğer kaynaklar

Teknik açıdan biyokütle enerjisi; doğrudan yakma, gazlaştırma, piroliz ve anaerobik fermantasyon (biyogaz) gibi farklı dönüşüm teknolojileri aracılığıyla değerlendirilebilmektedir. Türkiye’de mevcut uygulamalar ağırlıklı olarak biyogaz tesisleri ve atık yakma temelli elektrik üretim santralleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. Özellikle belediye katı atıklarından enerji üretimi, hem düzenli depolama alanlarından kaynaklanan metan emisyonlarını azaltmakta hem de yerel ölçekte elektrik üretimine katkı sağlamaktadır (IEA), 2023).

Türkiye'nin biyokütle enerji potansiyeli, ülkenin enerji ihtiyacını sürdürülebilir bir biçimde karşılamak amacıyla büyük bir fırsat sunmaktadır. Biyokütle, çoğunlukla tarımsal atıklardan, orman atıklarından ve hayvansal atıklardan elde edilen yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Türkiye, tarımsal atıklardan elde edilen biyokütle potansiyeli açısından OECD ülkeleri arasında önemli bir sıralamaya sahiptir ve toplamda 9,5 milyon ton petrol eşdeğerine ulaşmaktadır (Gürel, 2020).

Biyokütle enerjisinin avantajlarından biri, yerel halkın ekonomik kalkınmasına katkı sağlamasıdır. Tarımsal atıklardan ve hayvansal atıklardan biyogaz üretimi, hayvancılığın yoğun olduğu bölgelerde enerji üretiminin yanı sıra atık yönetimi konusunda da çözüm sunmaktadır (Gazigil, Yetiş, & Yetiş, 2025: 15). Biyogaz tesisleri, çevresel sürdürülebilirlik sağlarken, aynı zamanda yerel istihdam yaratma potansiyeline sahiptir (Arıkan & Güçyetmez, 2025: 16). Ayrıca, Türkiye'nin biyokütle potansiyelinin artırılması, ülkenin enerji bağımsızlığının sağlaması açısından kritik bir rol oynamaktadır (Gürel, 2020).

Dalga ve gelgit enerjisi gibi okyanus enerjisi kaynakları ise henüz araştırma aşamasındadır. Türkiye'nin üç tarafının denizlerle çevrili olması, gelecekte bu alanda da potansiyel sunmaktadır.

2. Türkiye'de Yenilenebilir Enerjinin Mevcut Durumu

2025 yılı Ekim ayı sonu itibari ile Türkiye'nin elektrik kurulu gücü 121.412 MW'a ulaşmış ve bu kapasitenin yaklaşık %61,6'sını yenilenebilir enerji kaynakları oluşturmaktadır. (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025). Kaynaklara göre Türkiye'nin kurulu güç dağılımı Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Türkiye'de elektrik kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı

Enerji Kaynağı	Kurulu Güç (MW)	Toplam Kurulu Güç İçindeki Pay (%)
Hidroelektrik	32.300	26,6
Güneş	24.500	20,2
Rüzgâr	14.300	11,8
Jeotermal	1.700	1,4
Biyokütle	2.600	2,1
Toplam Yenilenebilir	75.400	61,6
Doğal Gaz	24.000	19,8
Kömür (yerli + ithal)	22.000	18,1
Diğer	0.012	0,5
TOPLAM	121.412	100

(T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2025)

Tablo 1 incelendiğinde, Türkiye'de yenilenebilir enerjinin kurulu güç açısından niceliksel olarak baskın bir konuma ulaştığını, ancak üretim tarafındaki etkinliğin kaynakların kapasite faktörlerine bağlı olarak farklılaştığını göstermektedir. Bu durum, yenilenebilir enerji yatırımlarının şebeke altyapısı, enerji depolama sistemleri ve esneklik mekanizmaları ile bütünleşik biçimde ele alınmasının gerekliliğine işaret etmektedir.

3. Türkiye'nin Yenilenebilir Enerji Politikaları ve Destek Mekanizmaları

Türkiye'nin yenilenebilir enerji politikaları hem ekonomik büyümeyi desteklemek hem de çevre sorunlarıyla mücadele etmek amacıyla oluşturulmuştur. Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payı %42'yi aşmış olup, bu oran farklı yenilenebilir enerji türlerinin kullanımındaki artışı göstermektedir (Demir, 2025: 9, Şencan, 2022: 16). Özellikle rüzgâr ve güneş enerjisi gibi kaynakların benimsenmesi, ülkenin enerji bağımlılığını azaltma çabalarının bir parçasıdır (Özkan, Uslu, & Gedikli, 2022: 9).

Türkiye'deki yenilenebilir enerji teşvik politikaları, özel sektörden gelen yatırımları artırmak amacıyla önemli bir rol oynamaktadır. Devlet, enerji verimliliğini artırmaya ve yenilenebilir enerji yatırımlarını teşvik etmeye yönelik birçok mekanizma geliştirmiştir (Koyuncu & Karabulut, 2021: 16, Emeksiz & Fındık, 2021: 9). Örneğin, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekânı (YEKDEM) vasıtasıyla, yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi teşvik edilmektedir (Ateş, Çakan, & Kurtoglu, 2023: 19). Bu tür destek mekanizmaları, yatırımcıların yenilenebilir enerji projelerine olan ilgisini artırmakta ve enerji arz güvenliğini sağlamaktadır.

Enerji politikalarında çevresel sürdürülebilirlik de önemli bir yer tutmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi, iklim değişikliği ile mücadele etme çabalarının bir parçası olarak öne çıkmaktadır (Çeştepe & Tatar, 2023: 15). Türkiye, 2030 yılındaki sera gazı emisyonunu azaltma hedeflerini belirleyerek küresel iklim politikalarına katılmıştır (Damar & Yıldırım, 2023: 23). Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının teşviki, çevresel etkilerin azaltılması ve ekonomik büyümenin desteklenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

4. Karşılaşılan Zorluklar ve Sınırlılıklar

Türkiye, yenilenebilir enerji potansiyeli yüksek bir ülke olmasına rağmen, bu kaynakları kullanmak için gereken teknoloji düzeyine ulaşamamıştır (Özkan, Uslu, & Gedikli, 2022: 9). Özellikle rüzgâr ve güneş enerjisi gibi kaynaklar için gerekli altyapının geliştirilmesi zaman almakta ve bu durum, enerji üretiminde beklenen artışı engellemektedir (Koyuncu & Karabulut, 2021: 16). Ayrıca, yeterli Ar-Ge yatırımları yapılmadığı için yeni teknolojilerin geliştirilmesi konusunda geri kalan bir sektör bulunmaktadır (Demir, 2025: 9).

Finansman zorlukları, Türkiye’de yenilenebilir enerji yatırımlarının önündeki başka bir engeldir. Yüksek başlangıç maliyetleri, özel sektörü bu alandaki yatırımlardan uzaklaştırmaktadır (İlgın & Alkan, 2020: 11). Devletin sunduğu desteklerin yetersiz olması ve finansmana erişim konusundaki sıkıntılar, yenilenebilir enerji projelerinin hayata geçirilmesinde önemli bir engel teşkil etmektedir (Özdemir & Koç, 2020: 20). Elde edilen araştırma bulguları, yenilenebilir enerji yatırımlarının artması için finansmanda kolay erişimin sağlanması gerektiğine işaret etmektedir (Ecevit, Çetin, & Yücel, 2022: 18).

Devlet politikaları da yenilenebilir enerjinin gelişiminde belirleyici bir rol oynamakta ancak bu politikaların tutarsızlığı ve değişkenliği sektörde belirsizlik yaratmaktadır (Kılınç Pala, 2024: 11). Yerel yönetimlerin enerji politikalarını desteklemesi ve belirli hedefler koyması kritik olsada enerji politikalarının genellikle yetersiz ve tutarsız olması yatırımları olumsuz etkilemektedir (Arı, 2021: 13). Ayrıca, yenilenebilir enerji teşvik programlarının etkinliği yeterince gözlemlenmediği için projelerin başarısız olması olasılığı artmaktadır (Akça & Beşoluk, 2022: 16).

Çevresel kısıtlamalar da oldukça önemlidir. Yenilenebilir enerji projeleri, çevresel sürdürülebilirlik açısından dikkatli bir

şekilde planlanmadığında doğal yaşam alanlarını tehdit edebilir ve ekosistemlere zarar verebilir (Şimşek & Kurtuluş, 2025: 21). İklim değişikliği ve doğal kaynakların azalması gibi problemler, Türkiye'nin enerji üretim stratejilerinde yapılan planlamaların daha da zorlaşmasına neden olmaktadır (Yağcı & Sözen, 2021).

5. Geleceğe Yönelik Stratejik Öneriler

Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyelini arttırması ve sürdürülebilir kalkınmaya yönelik stratejileri geliştirmesi için bir dizi öneri ve stratejinin belirlenmesi kaçınılmazdır. Bu öneriler, mevcut zorlukların üstesinden gelmek ve gelecekteki fırsatları değerlendirmek adına hayati önem taşımaktadır.

Öncelikle, yenilenebilir enerji alanında teknolojik inovasyonların teşvik edilmesi gerekmektedir. Türkiye'nin enerji sisteminin verimliliğini arttırmak için devlet ve özel sektör iş birliğine dayalı Ar-Ge (Araştırma ve Geliştirme) yatırımlarının artırılması önemli bir stratejidir. Teknolojik ilerlemelerin desteklenmesi, yenilenebilir enerji sistemlerinin etkinliğini artırarak hem enerji verimliliğini yükseltecek hem de ekonomik büyümeye katkı sağlayacaktır (Alam & Murad, 2020: 8). Ayrıca, bu ilerlemeler, uluslararası standartlarda rekabet gücünün artırılması için bir temel oluşturacaktır (İvgin & Demirel, 2025).

Ek olarak, finansal mekanizmaların güçlendirilmesi üzerine yoğunlaşmak gerekmektedir. Yenilenebilir enerji projeleri için uygun maliyetli finansman seçeneklerinin devreye sokulması, yatırımcıların bu alana olan ilgisini artıracaktır. Devlet, vergi teşvikleri ve sübvansiyonlar gibi teşvik mekanizmalarını güçlendirerek özel yatırımları özendirebilir (Michailidis & ark., 2025). Bu tür finansal destek mekanizmaları, uygulanan projelerin başarısını artıracaktır.

Ayrıca, iklim değişikliği ile mücadele konusundaki uluslararası iş birlikleri güçlendirilmelidir. Türkiye hem bölgesel

hem de küresel düzeyde iklim değışikliğı ile ilgili taahhütlerine uyum sağlamak için uluslararası anlaşmalara aktif katılım göstermelidir. Bu bağlamda, geçiş süreçlerini hızlandıracak stratejik iş birlikleri ve bilgi paylaşımının önemi büyüktür (İvgin & Demirel, 2025). Özellikle çevresel sürdürülebilirliği destekleyici politikaların oluşturulması, Türkiye'nin bu alandaki çabalarını uluslararası standartlarla uyumlu hale getirecektir.

Bunun yanı sıra, kamu bilincinin artırılması ve toplumsal katılımın sağlanması için proaktif iletişim stratejileri geliştirilmelidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının faydaları ve kullanımı üzerine toplumun bilinçlendirilmesi, elektrik kullanımında sürdürülebilirlik adına önemli bir adım olacaktır (Firlina, Putra, & Yurnaidi, 2025). Bu bağlamda, eğitim programları ve toplumsal farkındalık kampanyalarının yürütülmesi önerilebilir.

Son olarak, yenilenebilir enerji sektöründe dijital dönüşüm ve teknoloji entegrasyonu önem kazanacaktır. Özellikle yapay zekâ (AI), büyük veri ve blok zinciri gibi teknolojiler, enerji verimliliğini artırmada ve sistem güvenliğini sağlamada kullanılabilir. Bu teknolojilerin entegrasyonu, enerji sistemlerinin daha akıllı, dayanıklı ve etkin olmasını sağlayacaktır (Puma, Salles, & Bragança, 2024).

Sonuç

Türkiye, yenilenebilir enerji kaynakları bakımından zengin bir ülke olmasına rağmen, bu potansiyeli tam olarak değerlendirememekte ve çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. Çin, ABD ve Avrupa ülkeleri gibi gelişmiş ülkeler, yenilenebilir enerji alanında belirgin ilerlemeler kaydetmiş olup, Türkiye'nin mevcut durumu dikkate alındığında, kendisine ait hedeflere ulaşabilmesi için stratejik yaklaşımlar geliştirmesinin kaçınılmaz olduğu görülmektedir.

Bu alışmada, Türkiye'nin yenilenebilir enerji politikaları ve sürdürülebilir kalkınma arasındaki etkileşim, karşılaşılan zorluklar ve sınırlılıklar ile geleceğe yönelik stratejik öneriler kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. ne çıkan unsurları özetleyecek olursak;

Türkiye'nin, özellikle güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarında yüksek bir potansiyeli olmasına rağmen bu kaynakların etkin kullanımı ve enerji sistemlerinin çeşitlendirilmesi için daha fazla yatırıma ihtiyaı vardır. Ayrıca, yenilenebilir enerji alanındaki gelişmelere rağmen finansman sorunları, teknolojik yetersizlikler, düzenleyici belirsizlikler ve çevresel tehditler gibi önemli engeller, yenilenebilir enerji projelerinin hayata geçirilmesini zorlaştırmakta ve sektördeki büyümeyi sınırlamaktadır. Yenilenebilir enerji alanında teknolojik inovasyonların teşvik edilmesi, finansal mekanizmaların güçlendirilmesi, iklim değişikliği ile mücadelede uluslararası iş birliklerinin artırılması ve kamu bilincinin geliştirilmesi gibi stratejik yaklaşımlar geliştirilmeli ve uygulanmalıdır. Ek olarak, diğital dönüşüm ve teknoloji entegrasyonu, enerji sektörünün verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırmak adına önemli fırsatlar sunmaktadır. Yenilenebilir enerji projelerinin çevresel sürdürülebilirliğinin sağlanması ve ekonomik kalkınma ile uyumlu hale getirilmesi, Türkiye'nin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasında kritik bir rol oynayacaktır. Böylece, yenilenebilir enerji kullanımının artması, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına ve doğal kaynakların korunmasına yönelik önemli katkılar sağlayacaktır.

Sonuç olarak, Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarını etkin bir şekilde değerlendirmesi ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşabilmesi için kapsamlı ve bütüncül bir yaklaşım sergilemesi gerekmektedir. Bu bağlamda hem devlet politikaları hem de özel sektör iş birlikleri önem arz etmekte ve yenilenebilir enerjiye yönelik yatırımların artması sağlanmalıdır.

Kaynakça/Reference

Akça, Z., & Beşoluk, Ş. (2022). Eko-Verimlilik Unsurlarının Öğretiminde Okul Dışı Öğrenme Ortamlarının Kullanılması ve Öğrenci Gelişimine Etkileri. *Abant İzzet Baysal Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 22(4), s. 1546-1562. doi:10.17240/aibuefd.2022.22.74506-1100779

Akinyemi, A. S., Kabeya, M., & Davidson, I. E. (2022). Modelling of Solar PV under Varying Condition with an Improved Incremental Conductance and Integral Regulator. *Energies*, 15(7)(2405). doi:10.3390/en15072405

Alam, M., & Murad, M. (2020). The impacts of economic growth, trade openness and technological progress on renewable energy use in organization for economic co-operation and development countries. *Renewable Energy*, s. 382-390. doi:10.1016/j.renene.2019.06.054

Arı, A. (2021). Yenilenebilir Enerji, Turizm, Co2 Ve Gsyh İlişkisinin Türkiye İçin Analizi. *Akademik Yaklaşımlar Dergisi*, 12(2), s. 192-205. doi:10.54688/ayd.880406

Arıkan, Y., & Güçyetmez, M. (2025). Potential, economic and environmental evaluation of biogas energy in provinces where animal husbandry is developed in Türkiye. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 14(1), s. 39-55. doi:10.17798/bitlisfen.1522712

Aslan, A. (2020). Comparison based on the technical and economical analysis of wind energy potential at onshore, coastal, and offshore locations in Çanakkale, Turkey. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 12(6). doi:10.1063/5.0025753

Ateş, M. H., Çakan, C. D., & Kurtoglu, S. (2023). Yenilenebilir Enerji Ve Cari İşlemler Dengesi Analizi: Ardl Sinir Testi Yaklaşımı.

Nişantaşı Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi(11), s. 346-365.
doi:10.52122/nisantasisbd.1352760

Avcı, S., & Aladağ, Z. (2025). Evaluating regional sustainable energy potential through hierarchical clustering and machine learning. *Environmental Research Communications*, 7(1).
doi:10.1088/2515-7620/ada2e5

Bobat, A. (2022). Hydroelectric Power Overview in 2021 of Turkey. *Energy Environment and Storage*, 2(3), s. 30-36.
doi:10.52924/dfhk5620

Çelik, E., Bekçi, U., & Ichwani, T. H. (2023). Current Status of Renewable Energy in Türkiye. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(3), s. 2378-2391.
doi:10.47495/okufbed.1107969

Çeştepe, H., & Tatar, H. E. (2023). Türkiye’de Doğrudan Yabancı Yatırımlar ile Yenilenebilir Enerji Tüketimi Arasında Eşbütünleşme Var Mıdır? *Uluslararası İktisadi Ve İdari İncelemeler Dergisi*, 39, s. 138-153. doi:10.18092/ulikidince.1213546

DAMAR, A., & Yıldırım, F. (2023). Türkiye Enerji İthalatında Yenilenebilir Enerji Üretimi Ve Makro Ekonomik Değışkenler. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 22(48), s. 1077-1100. doi:10.46928/iticusbe.1339691

Demir, E. (2025). Türkiye’de Yenilenebilir Enerji: Mevcut Durum, Sorunlar, Politika Yaklaşımları Ve Küresel Rekabetçilik Performansı. *Erciyes Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 71(1), s. 80-90.
doi:10.18070/erciyesuibd.1661565

Doğınay, A., Çetinkaya, B., & Dursun, M. (2025). Sustainable Energy Management in Leading Smart Cities and Its Application to Eskişehir/Türkiye. *International Journal of Environmental*

Engineering and Development, 3(1), s. 111-118.
doi:10.37394/232033.2025.3.9

Ecevit, E., Çetin, M., & Yücel, A. G. (2022). Türkiye’de Yenilenebilir Enerji ve Sağlık: Eşbütünleşme ve Nedensellik Analizi. *Erciyes Akademi*, 36(1), s. 138-156.
doi:10.48070/erciyesakademi.1039755

Emeksiz, C., & Fındık, M. M. (2021). Sürdürülebilir Kalkınma İçin Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye Ölçeğinde Değerlendirilmesi. *European Journal of Science and Technology*(26), s. 155-164. doi:10.31590/ejosat.948729

Erken, F. (2020). The Impact of the Government’s Incentives on Increasing Investment in Turkey's Solar Photovoltaic Power Plants. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 8(1), s. 40-49. doi:10.17694/bajece.626145

Eroğlu, H. (2025). A spatial decision making framework using neutrosophic VIKOR for wind energy investment in Turkey. *Scientific Reports*, 15(1). doi:10.1038/s41598-025-18799-w

(ETKB), E. v. (2022). *Türkiye Ulusal Enerji Planı (2022-2035)*. Ankara: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.

Firlina, M., Putra, R. A., & Yurnaidi, Z. (2025). 4th ASEAN International Conference on Energy and Environment. *Enhancing Energy Efficiency and Conservation in ASEAN Transportation: Policy Insights and Best Practices* (s. 1-18). Laos: IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.

Gazigil, L., Yetiş, R., & Yetiş, A. D. (2025). Sürdürülebilir Enerji Geleceği: Hayvancılık Atıklariyla Biyogaz Üretimi Ve Enerji Potansiyelinin Araştırılması. *Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering*, 30(1), s. 107-122.
doi:10.17482/uumfd.1610402

Genç, M. S., Karipoğlu, F., & Koca, K. (2021). Suitable site selection for offshore wind farms in Turkey's seas: GIS-MCDM based approach. *Earth Science Informatics*, 14(3), s. 1213-1225. doi:10.1007/s12145-021-00632-3

Gülen, J., & Öztürk, A. B. (2025). Turkey's present hydraulic energy and hydropower potential. *Energy Storage and Conversion*, 3(2)(2232). doi:10.59400/esc2232

Gürel, B. (2020). Türkiye'deki Güncel Biyokütle Potansiyelinin Belirlenmesi Ve Yakılmasıyla Enerji Üretimi İyi Bir Alternatif Olan Biyokütle Atıklar İçin Sektörel Açidan Ve Toplam Yanma Enerji Değerlerinin Hesaplanması. *Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi*, 8(2), s. 407-416. doi:10.21923/jesd.671767

Hajou, A., & Mghouchi, Y. (2025). Solar energy potential assessment in the MENA and Mediterranean Regions. *ournal of King Saud University – Engineering Sciences*, 37(7). doi:10.1007/s44444-025-00052-4

Ilgin, M. A., & ALKAN, E. (2020). Analysis of the Factors Hindering the Widespread Use of Renewable Energy Resources in Turkey Using Multi Criteria Decision Making Techniques and House of Quality. *Uluslararası Muhendislik Arastirma Ve Gelistirme Dergisi*, 12(1), s. 1-12. doi:10.29137/umagd.469519

(IEA), I. E. (2023). *Bioenergy*. Paris: IEA.

İvgin, M., & Demirel, T. (2025). Advancing Sustainable Energy Security in Türkiye: Geopolitical and Policy Perspectives. *Sustainability*, 17(20)(9264). doi:10.3390/su17209264

Jung, J., Jung, S., Lee, J., Lee, M., & Kim, H. S. (2021). Analysis of Small Hydropower Generation Potential: (2) Future Prospect of the Potential under Climate Change. *Energies*, 14(11)(3001). doi:10.3390/en14113001

Kılınç Pala, P. B. (2024). Küresel Enerji Dönüşümü: Yeşil Enerji Kavramı Ve Teşvik Programları. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 23(90), s. 599-610. doi:10.17755/esosder.1362565

Koyuncu, T., & Karabulut, T. (2021). Türkiye’de Sürdürülebilir Kalkınma Ve Yeşil Ekonomi Açısından Yenilenebilir Enerji: Ampirik Bir Çalışma. *International Journal of Management Economics and Business*, 17(2), s. 466-482. doi:10.17130/ijmeb.800169

Köroğlu, T., & Ekici, E. (2024). A Comparative Study on the Estimation of Wind Speed and Wind Power Density Using Statistical Distribution Approaches and Artificial Neural Network-Based Hybrid Techniques in Çanakkale, Türkiye. *Applied Sciences*, 14(7)(1267). doi:10.3390/app14031267

(MTA), M. T. (2023). *Türkiye jeotermal kaynaklar envanteri*. Ankara: MTA Genel Müdürlüğü.

Michailidis, M., Zafeiriou, E., Kantartzis, A., Galatsidas, S., & Arabatzis, G. (2025). Governance, Energy Policy, and Sustainable Development: Renewable Energy Infrastructure Transition in Developing MENA Countries. *Energies*, 18(11)(2759). doi:10.3390/en18112759

Özdemir, B. K., & Koç, K. (2020). Türkiye’de Karbon Emisyonları, Yenilenebilir Enerji Ve Ekonomik Büyüme. *Ege Stratejik Araştırmalar Dergisi*, 11(1), s. 66-86. doi:10.18354/esam.665191

Özkan, A., Uslu, Y. D., & Gedikli, E. (2022). Wind Power in Turkey’s Potential Renewable Energy and The Danish Model. *Akdeniz Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 22(2), s. 26-35. doi:10.25294/auibfd.1111423

Puma, G. C., Salles, A., & Bragança, L. (2024). Nexus between Urban Circular Economies and Sustainable Development Goals: A

Systematic Literature Review. *Sustainability*, 16(6)(2500). doi:10.3390/su16062500

Raihan, A., & Tuspekova, A. (2022). Dynamic impacts of economic growth, renewable energy use, urbanization, industrialization, tourism, agriculture, and forests on carbon emissions in Turkey. *Carbon Research*, 1(1). doi:10.1007/s44246-022-00019-z

Şencan, D. (2022). Yenilenebilir enerjide Türkiye'nin dünyadaki yeri ve uygulanan teşviklerin değerlendirilmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 15(3), s. 693-709. doi:10.25287/ohuiibf.1083332

Şimşek, O., & Kurtuluş, G. (2025). İklim Değişikliği ile Mücadelede Yenilenebilir Enerjinin Gelişimi ve Biyoçeşitliliğin Korunmasına Yönelik Topluluk Temelli Bir Yaklaşım. *Bulletin of Economic Theory and Analysis*, 10(2), s. 435-456. doi:10.25229/beta.1645508

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2025, Aralık 12). Bilgi merkezi- Elektrik: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik#:~:text=2024%20y%C4%B1l%C4%B1nda%20elektrik%20%C3%BCretimimizin%2C%20%34,i%20di%C4%9Fer%20kaynaklardan%20elde%20edilmi%C5%9Ftir>. adresinden alındı

Türk, S., Koç, A., & Şahin, G. (2021). Multi-criteria of PV solar site selection problem using GIS-intuitionistic fuzzy based approach in Erzurum province/Turkey. *Scientific Reports*, 1(1). doi:10.1038/s41598-021-84257-y

Uçar, S., & Akıner, İ. (2020). Yerel Yönetimlerin Kurumsal Çevre Sorumluluğunda Binalarda Fotovoltaik Panel (PV) Kullanımlarının Önemi. *Kent Akademisi*, 13(4), s. 584-598. doi:10.35674/kent.746083

Uddin, R., Shaikh, A. J., & Khan, H. R. (2021). Renewable Energy Perspectives of Pakistan and Turkey: Current Analysis and Policy

Recommendations. *Sustainability*, 13(6)(3349).
doi:10.3390/su13063349

Yağcı, B. E., & Sözen, A. (2021). Türkiye'nin Enerji Verimliliği Etkinlik Analizi. *Journal of Polytechnic*.
doi:10.2339/politeknik.859790

Yüksel, Y. E., & Öztürk, M. (2020). Thermodynamic analysis of a multigeneration energy system based geothermal energy. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26(1), s. 113-121.
doi:10.5505/pajes.2019.98411

BÖLÜM 7

YENİ NESİL ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYALARI: KATI HAL TEKNOLOJİLERİ, YÜKSEK ENERJİ YOĞUNLUĞU ve SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİM YAKLAŞIMLARI

1. Ahmet Erhan AKAN¹

Giriş

Elektrikli araç (EV) teknolojilerinin son on yılda gösterdiği hızlı gelişim, ulaşım sektöründe enerji verimliliği, karbon emisyonlarının azaltılması ve fosil yakıtlara bağımlılığın düşürülmesi açısından kritik bir dönüşümü beraberinde getirmiştir. Küresel ölçekte artan çevresel kaygılar, sıkılaşan emisyon regülasyonları ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri, otomotiv endüstrisini daha temiz ve verimli enerji depolama çözümlerine yönlendirmektedir. Bu dönüşümün merkezinde yer alan batarya teknolojileri, elektrikli araçların menzil, güvenlik, şarj süresi gibi temel performans göstergelerini doğrudan belirleyen kritik bileşenler olarak öne çıkmaktadır.

Mevcut ticari elektrikli araçların büyük çoğunluğunda kullanılan lityum-iyon bataryalar, yüksek enerji verimliliği ve olgun

¹ Doç. Dr. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Orcid: 0000-0003-1806-7943

Üretim altyapısına rağmen; sınırlı enerji yoğunluğu, termal kağak riski, yanıcı sıvı elektrolit kaynaklı güvenlik sorunları ve kritik hammaddelere olan bağımlılık gibi önemli kısıtlamalar barındırmaktadır.

Bu bağlamda katı hal batarya (solid-state battery) teknolojileri, geleneksel lityum-iyon sistemlere kıyasla sunduğu potansiyel avantajlar sayesinde elektrikli araçlar için gelecek vadeden bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

Bu kitap bölümünde, gelecek nesil elektrikli araç bataryalarının temel prensipleri, katı hal bataryalarının bilimsel altyapısı, üretim sreeleri, maliyet ve sürdürülebilirlik kriterleri, mevcut zorluklar ve sektörün 2035 vizyonu kapsamlı Şekilde ele alınmıştır.

Yeni Nesil Batarya Teknolojilerinin Evrimi

Yeni nesil batarya teknolojilerinin evrimi, özellikle lityum-sülfür (Li-S) bataryalarının gelişimi ile önemli bir ilerleme kaydetmiştir. Bataryaların enerji yoğunluğu, çevresel etkileri ve ekonomik faydaları, onları enerji depolama sistemleri için dikkat çekici bir alternatif haline getirmiştir. Bu bağlamda, Li-S bataryalarının teorik kapasitesi yaklaşık 1675 mAh/g ve enerji yoğunluğu ise 2615 Wh/kg olarak belirlenmiştir (Chen & ark., 2021, (Zhang & ark., 2022: 6).

Li-S bataryalarının gelişiminde karşılaşılan en büyük zorluklardan biri, sülfür katotlarının düşük iletkenlik ve çözünürlükleri nedeniyle yavaş redoks reaksiyonlarıdır. Bu durum, "shuttle effect" olarak bilinen, lityum polislfrlerinin çözünerek bataryanın verimliliğini bozmasına neden olabilmektedir. Nano yapılı elektrotlar ve aditifleri gibi yeni malzemelerin kullanımı ile bu sorun zlmeye çalışılmıştır (Liu & ark., 2025, Wang & ark., 2021). Ayrıca, yüksek çözünürlüklü elektrolitlerin kullanımı, bataryaların dnę ömrünü ve verimliliğini artırmakta önemli bir rol

oynamaktadır (Gao & ark., 2023). Bunun yanı sıra, sülfür redoks kinetiğini hızlandırmak için tek atom katalizörlerin (SAC) kullanımı gibi yenilikler, Li-S bataryalarının performansını artırma konusunda önemli bir adım olmuştur (Wang & ark., 2021).

Çevresel sürdürülebilirlik ve döngüsel ekonomi bağlamında Li-S bataryalarının geri dönüşüm potansiyeli büyük önem taşımaktadır. Kullanılan malzemelerin geri dönüşümünün yanı sıra, yeni malzeme geliştirme çalışmalarında çevresel etkilerin azaltılması hedeflenmektedir (López & ark., 2021).

Sonuç olarak, lityum-sülfür bataryalar, yüksek enerji yoğunlukları ve çevre dostu olmaları ile yeni nesil batarya teknolojilerinin önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Ancak, bu bataryaların ticari uygulamaları için hala çözülmesi gereken bir dizi zorluk bulunmaktadır.

Lityum-iyon bataryaların sınırları

Lityum-iyon bataryalar, günümüz enerji depolama teknolojisinin temel taşlarıdır. Ancak, bunların performansı belirli sınırlamalarla karşı karşıyadır. Bu sınırlamalar genellikle enerji yoğunluğu, maliyet, güvenlik ve çevresel etkiler gibi alanlarda yoğunlaşmaktadır. Lityum-iyon bataryaların temel sınırlamalarından biri, mevcut anot malzemelerinin enerji yoğunluğudur. Örneğin, tipik bir grafit anodu 150-250 Wh/kg enerji yoğunluğu sunmaktadır, bu da daha fazla enerji depolama kapasitesine olan talebi karşılamada yetersiz kalmaktadır (Link & ark., 2023). Bunun yanı sıra, lityum anotunun düşük voltaj aralığında (yaklaşık 1,55 V) çalışması, bu bataryaların enerji verimliliğini olumsuz etkilemektedir (Song & ark., 2020). Bu durum, bataryaların güç ve güvenlik arasında bir denge sağlamaya çalışırken enerji yoğunluğunun sınırlı kalmasına neden olmaktadır (Cao & ark., 2021). Bataryaların diğer önemli bir sınırlaması, şarj olma süreleridir. Lityum-iyon bataryalarda mevcut olan yavaş şarj ve

deşarj özellikleri, özellikle elektrikli araçlar (EV) gibi uygulamalar için önemli bir kısıt oluşturur (Cai & ark., 2023: 9). Ek olarak, çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik endişeleri, lityum-iyon bataryaların sınırlı kalmasına neden olmuştur. Lityum madenciliği, çevreye zarar verebilir ve yerel ekosistemleri etkileyebilir. Bu nedenle, alternatif enerji depolama sistemlerine geçiş isteği artmaktadır. Diğer maden temelli enerji depolama sistemlerinin (örneğin, sodyum-iyon veya magnezyum bazlı bataryalar) geliştirilmesi, bu sorunları hafifletme potansiyeli taşımaktadır (Dühnen & ark., 2020).

Sonuç olarak, lityum-iyon bataryalar yüksek enerji yoğunluğu sunmasına rağmen, enerji yoğunluğu, şarj/deşarj hızı, güvenlik ve çevresel etkiler gibi önemli sınırlamalarla karşı karşıyadır. Bu nedenle, enerji depolama alanında daha sürdürülebilir ve verimli alternatif çözümlerin araştırılması kaçınılmazdır.

Katı hal bataryalarının ortaya çıkışı

Katı hal bataryaları (KHB), lityum-iyon bataryalarının sıvı elektrolitlerini katı elektrolitlerle değiştirmesiyle giderek önem kazanmaktadır. Bu bataryaların ortaya çıkışı, enerji depolama çözümlerinde güvenlik, performans ve sürdürülebilirlik arayışının bir sonucu olarak değerlendirilmektedir. KHB'ler, sıvı elektrolitlerin neden olduğu sızıntı sorunlarını ortadan kaldırırken, daha yüksek enerji yoğunlukları ve uzun ömür sunma potansiyeline sahiptir (Huang & ark., 2024, Wen & ark., 2020: 6). 1960'lı yıllara kadar uzanan tarihsel gelişiminde, ilk KHB'lerin yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabileceği keşfedilmiştir. Örneğin, β -alümina ve diğer inorganik katı bileşenler ilk KHB'lerin temelini oluşturmuştur (Wen & ark., 2020: 6). Ancak bu tür bataryaların ticari potansiyel kazanması, katı elektrolitlerin ve düzende kullanılan malzemelerin iyileştirilmesine bağlı olarak 21. yüzyılda hız kazanmıştır (Feng & ark., 2022: 8).

Son yıllarda KHB teknolojisinde önemli gelişmeler yaşanmıştır. Polimer tabanlı katı elektrolitler ve seramik malzemeler, enerji yoğunluğunu artırmak ve şarj/deşarj döngülerini geliştirmek amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca, yeni nesil malzemeler, KHB'lerdeki elektrotların performansını artırmak amacıyla araştırmalara dahil edilmiştir (Man & ark., 2023, Fu & ark., 2022: 9). Bu malzemeler, katmanlı ve nano yapıları olmaları sebebiyle KHB'ların enerji depolama kapasitelerini önemli ölçüde artırma potansiyeline sahiptir.

Özetle, katı hal bataryalarının ortaya çıkışı, güvenlik, enerji yoğunluğu ve çevresel sürdürülebilirlik taleplerinin artmasıyla şekillenen bir gelişimi ifade etmektedir. Gelecekte, bu teknolojilerin daha geniş uygulama alanlarına ulaşması ve verimliliklerinin artırılması beklenmektedir.

Katı Hal Batarya Teknolojisinin Temel Prensipleri

Katı hal batarya teknolojisi, konvansiyonel lityum-iyon bataryalardan temel olarak elektrolit yapısı bakımından ayrılmaktadır. Geleneksel sistemlerde kullanılan yanıcı ve sıvı elektrolitlerin aksine, katı hal bataryalarında iyon iletimini sağlayan ortam tamamen katı fazlı bir elektrolit malzemesinden oluşmaktadır. Bu yapısal farklılık, bataryanın güvenlik, enerji yoğunluğu ve termal kararlılık gibi temel karakteristiklerini doğrudan etkileyerek, katı hal bataryalarını gelecek nesil enerji depolama çözümleri arasında stratejik bir konuma taşımaktadır.

Katı hal bataryalarının temel bileşenlerinden biri, yüksek iletkenliğe sahip katı elektrolitlerdir. Özellikle serumlu metal katotları ile birlikte kullanılan katı elektrolitlerin performansı, elektrot ve elektrolit arasındaki zıt yük iletkenlik özelliklerine bağlıdır. Bu bağlamda, Na-iyon bataryalarında kullanılan polivinil karbonat tabanlı kompozit polimer elektrolitlerin ara yüz stabilitesi bozulmadan gelişmiş elektriksel özellikler sergilediği

belirtilmektedir (Chen & ark., 2019: 9). Ayrıca, katı hal elektrolitlerinin düşük sıcaklıkta yüksek iyon iletkenliği sağlaması, batarya performansını artırmaktadır (Bachman & ark., 2015: 22).

Katı hal bataryalarında diğer bir önemli konu ise elektrot yapılarıdır. Nanostrüktüre sahip malzemelerin katı elektrolitlerle etkileşimleri sonucunda elde edilen elektrotların performansı, geleneksel elektrot tasarımlarına göre önemli ölçüde artmaktadır. Örneğin, seramik katı elektrolitlerde Li penetrasyon analizi, elektrot yüzeyindeki bu değişimlerin elektrokimyasal performansa olan etkisini incelemektedir (Kazyak & ark. 2020: 23). Dendrit oluşumunun önlenmesi, soft LiTFSI-DGM-C₃N₄ gibi kompozitlerin kullanımıyla mümkün hale gelmektedir (Hu & ark., 2017: 10).

Katı hal bataryalarının uygulama alanları, taşıma kolaylığı ve esneklik özellikleri ile genişlemektedir. Şu an için elektrolitlerin uygulanabilirliği, sıvı elektrolitlerle karşılaştırıldığında daha az volatilite (finansal değişkenlik) ve yangın riski taşımaktadır; bu da onları esnek ve taşınabilir enerji depolama cihazları için ideal kılmaktadır (Fan & ark., 2022: 84). Bu kapsamda, çevre dostu biyo bazlı malzemelerin arayışı ve kullanımı da önemli bir trend olarak ortaya çıkmaktadır (Torres & ark., 2020: 15).

Sonuç olarak, katı hal batarya teknolojisinin gelişimi, yüksek performanslı elektrolitlerin ve elektrotların araştırmaları ile doğrudan ilişkilidir. Polimer bazlı ve inorganik katı elektrolitlerin entegrasyonu, güvenliği artırdığı gibi, bataryaların ömrünü ve performansını da önemli ölçüde etkiler (Luo & ark., 2024:16).

Katı elektrolit tipleri

Katı elektrolitler üç ana sınıfta incelenir;

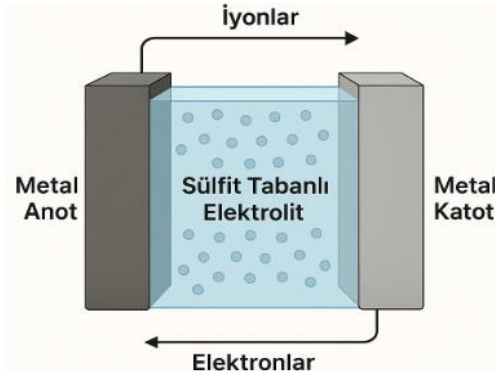
- **Sülfat temelli elektrolitler**

Sülfat temelli elektrolitler, katı hal bataryaları için kritik bir bileşen olarak ön plana çıkmaktadır. Bu elektrolitlerin temel özelliği,

yüksek iyonik iletkenliğe sahip olmalarıdır. Örneğin, $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$ gibi sülfid elektrolitlerin, oda sıcaklığındaki yüksek iyonik iletkenliği ve kolay sentezlenebilirliği, bu materyalleri oldukça çekici kılmaktadır (Li & ark., 2019). Ayrıca, elektrolitlerin katotlar ile uyum kabiliyeti, sülfid elektrolitlerin kullanıldığı katı hal bataryaları için daha geniş bir operasyon sıcaklık aralığında çalışmasını sağlamaktadır (Wu & ark., 2020).

Sülfid tabanlı elektrolitler, metal-anot/metal-katot sistemlerinde iyonik iletkenlik ve kimyasal kararlılık açısından dikkat çeken alternatif elektrolit malzemeleridir. Şekil 1’de gösterildiği üzere, elektrokimyasal reaksiyon döngüsü anot ve katot arasında iki temel taşıma mekanizması ile gerçekleşir: iyon taşınımı ve elektron taşınımı. Oksidasyonun gerçekleştiği metal anotta metal atomları elektron kaybederek metal iyonlarına dönüşür; bu iyonlar sülfid bazlı elektrolit içerisinde çözünerek katoda doğru taşınır. Katotta ise indirgenme reaksiyonları ile iyonlar elektron kazanarak yeniden metalik forma döner. Elektronların dış devre üzerinden katot → anot yönünde hareket etmesi, iyon akışı ile birlikte hücrenin elektrokimyasal dengesini sağlar ve elektrik enerjisinin dış yükte kullanılabilir hâle gelmesine olanak tanır.

Şekil 1. Sülfid tabanlı elektrolit içeren metal-anot/metal-katot yapısının şematik gösterimi.



- **Oksit temelli elektrolitler**

Oksit temelli elektrolitler, yüksek enerji yoğunluğu ve güvenlik özellikleri sayesinde katı hal bataryalarında önemli bir yer tutmaktadır. Bu tür elektrolitlerin temel özelliği, yüksek iyonik iletkenlik sunmaları ve tasarım açısından esneklik sağlamalarıdır. Özellikle, garnet tipi oksit elektrolitler, $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ gibi bileşenlerin kullanılmasıyla oluşturulan bireysel yapıların yüksek kimyasal kararlılığı ve geniş elektro kimyasal pencere sunma gibi avantajları ile dikkat çekmektedir (Wang & ark., 2024). Bu özellikler, oksit temelli elektrolitlerin lityum metal anodu ile etkileşimde bulunmalarını ve böylece kısa devre olasılığını azaltmalarını sağlamaktadır (Rajamani & ark., 2023: 27).

Ayrıca, kompozit elektrolitler hem oksit hem de polimer bileşenlerin bir arada kullanımının sağladığı avantajlarla bu durumların üstesinden gelme potansiyeline sahiptir. Polimer ile oksit bileşenlerin kombinasyonu, mekanik stabiliteyi artırmakta ve ayrıca fleksibilitesi ile uygulama kolaylığı sağlayarak katı hal bataryalarının performansını geliştirmekte önemlidir (Song & ark., 2020). İlave olarak, garnet bazlı kompozit elektrolitlerin, katot ve anot arasındaki arayüzde koruyucu bir etki sağladığı gösterilmiştir (Uchida & ark., 2023).

- **Polimer elektrolitler**

Polimer elektrolitlerin kullanımı, güvenlik, geniş kimyasal stabilite, düşük maliyet ve kolay işlem görme gibi avantajlar sunması nedeniyle oldukça yaygındır (Li & ark., 2023, Fan & ark., 2021). Bu tür elektrolitler, yalnızca iletişim üstünlüğü sağlamakla kalmaz, aynı zamanda katotlarla uyum kabiliyetleri sayesinde pili daha güvenilir hale getirirler (Liang & ark. 2023). Polimer bazlı elektrolitler genellikle katı polimer elektrolitler ve jel polimer elektrolitler olarak iki ana gruba ayrılmaktadır (Chen & ark., 2024). Katı polimer elektrolitler, mekanik dayanıklılıkları ve sağlamlıklarıyla dikkat

ekerken, jel polimer elektrolitler, daha yüksek iletkenlik sağlamak ve hızlı iyon taşınıımı sağlamak amacıyla kullanılan sıvı içerikli bir yapıya sahiptir (Cui & ark., 2021: 10).

Üretim ve Sürdürülebilirlik Yaklaşımları

Sürdürülebilirlik açısından, katı hal bataryalarının çevresel etkilerinin değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Örneğin, yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) yöntemleri kullanılarak, bu bataryaların üretim sürecinde kullanılan malzemelerin çevresel etkileri belirlenebilir. Batarya üretimini için kullanılan lityum ve diğer metalik bileşenlerin çıkarımı ve işlenmesi çevresel kirliliğe yol açabilir (Rietdorf & ark., 2024: 11).

Üretim süreçlerinin optimizasyonuna yönelik, modern tekniklerin ve malzeme bilimindeki yeniliklerin entegrasyonu giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Örneğin, soğuk sinterleme teknikleri, katı elektrolitlerin geri dönüştürülebilmesi ve yeniden işlenmesini sağlamak için kullanılmaktadır (Chen & ark., 2024). Ayrıca, metal-organik ereveler (MOF) tabanlı elektrolitlerin kullanımı, katı hal bataryalarının genel performansını artırmaktadır (Wang & ark.,2022).

Katı Hal Bataryalarının Zorlukları

Katı hal batarya teknolojilerinin uygulamada karşılaşılan zorlukları, üretim ve performans açısından çeşitli engeller içermektedir. Başlıcaları; katı hal bataryalarının zorlukları, elektrolit seçimi, arayüz mühendisliği, üretim süreçleri ve maliyet gibi faktörler olmaktadır.

İlk olarak, elektrolitlerin seçimi ve bunların arayüz özellikleri büyük bir zorluk teşkil etmektedir. Katı hal bataryalarında kullanılan slfıt ve oksit elektrolitlerin iyonik iletkenliği genellikle yüksektir, ancak bu elektrolitlerin elektrotlarla etkileşimleri, arayüzey stabilitesini tehlikeye atabilmektedir (Kim & ark., 2020).

Örneğin, sülfite elektrolitlerin lityum metal anodu ile olan etkileşimleri, Dendrit (dal benzeri yapılar) oluşumunu artırarak güvenliği tehdit edebilir (Golozar & ark., 2020). Dendritlerin oluşumu, pilin içindeki kısa devrelere yol açabilecek bir tehlike oluşturmakta, bu da bataryaların ömrünü ve güvenliğini olumsuz yönde etkilemektedir (Li & ark., 2025).

İkinci zorluk, üretim süreçlerinin karmaşıklığı ve verimliliğidir. Katı hal bataryalarının büyük ölçekli üretimi için, yaygın olarak kullanılan yöntemlerin de revize edilmesi gerekmektedir. Mevcut üretim yöntemleri, genellikle yüksek maliyetler ve uzun işlem süreleri ile ilişkilidir. Bu nedenle, yeni nesil üretim yöntemlerinin, örneğin kuru eleman teknolojisinin (DET) entegrasyonu kritik öneme sahiptir. DET, katı hal bataryalarının üretiminde çözünürlük tabanlı yöntemlere göre daha az çevresel etkiye sahip olma potansiyeli sunmaktadır (Liang & ark., 2025).

Üçüncü olarak, katı hal bataryalarının döngü ömrü ve genel performansı da zorluklar içermektedir. Özellikle, elektrolitlerin ve elektrotların arayüzlerinde meydana gelen bozulmalar, toplam pil dayanıklılığını azaltmaktadır (Mohammed & ark., 2025). Yetersiz arayüz bağlantıları ve yüksek arayüz empedansı, katı hal sistemlerinin verimliliğini etkilemekte ve bu durum, pilin genel çevresel etki değerlendirmelerini de olumsuz yönde etkilemektedir (Alabdali & ark., 2024).

Son olarak, maliyet yönetimi de önemli bir zorluk alanıdır. Katı hal bataryalarının üretim maliyetleri, geleneksel lityum iyon pil üretimlerinden önemli ölçüde yüksektir. Bu nedenlerle katı hal bataryaları, teorik olarak sunduğu büyük avantajlara rağmen hâlen önemli teknik ve ekonomik engellerle karşı karşıyadır. Araştırma topluluğu, özellikle ara yüz mühendisliği, yeni elektrolit bileşimleri, dendrit-önleyici malzemeler ve düşük maliyetli üretim teknikleri üzerine yoğunlaşarak bu engelleri aşmayı hedeflemektedir.

Elektrikli Araçlarda Katı Hal Batarya Uygulamaları

Katı hal bataryalarının, elektrikli araçlara yönelik en önemli katkılardan biri sunduğu yüksek enerji yoğunluğuna bağlı olarak menzil artışıdır. Lityum metal anodu destekleyen stabil katı elektrolitler sayesinde günümüzde 700–1000 km seviyelerine ulaşılabilen teorik sürüş menzilleri, üreticilerin daha hafif batarya paketleri tasarlamasını mümkün kılmaktadır. Bu durum hem araç verimliliğini artırmakta hem de aerodinamik tasarım ve şasi optimizasyonu gibi diğer mühendislik disiplinleri üzerinde olumlu etkiler yaratmaktadır. Bununla birlikte, katı hal bataryalarının yüksek çalışma kararlılığı, ısı yönetimi gereksinimlerini azaltarak termal sistem tasarımlarının daha kompakt ve düşük maliyetli olmasını sağlamaktadır.

Tablo 1’de, dünya genelinde katı hal batarya teknolojisini elektrikli araçlara entegre etmek için aktif biçimde çalışan önde gelen otomotiv üreticilerini ve teknoloji şirketlerini karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Veriler, özellikle Toyota, BMW, Nissan ve Volkswagen-QuantumScape gibi sektör liderlerinin katı hal bataryaları konusunda stratejik yatırımlar yürüttüğünü ve 2027–2035 yılları arasında bu teknolojiyi ticari araç platformlarına dâhil etmeyi hedeflediklerini göstermektedir.

Marka-model bazlı inceleme, her üreticinin farklı bir katı elektrolit mimarisine yöneldiğini ortaya koymaktadır. Toyota ve BMW gibi üreticiler oksit bazlı elektrolitler ile yüksek güvenlik ve mekanik stabilite hedeflerken; QuantumScape ve Solid Power gibi teknoloji şirketleri seramik veya sülfür tabanlı elektrolitler üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bu çeşitlilik, henüz ticari ölçekte “tek bir dominant katı elektrolit malzemesinin” oluşmadığını göstermekte; katı hal bataryalarının Ar-Ge aşamasının çok disiplinli bir yapıda devam ettiğini işaret etmektedir.

Tablo 1. Elektrikli araçlarda katı hal bataryası geliştiren marka ve modeller

Marka	Planlanan / İlgili Model	Katı Hal Batarya Tipi	Hedeflenen Menzil	Notlar / Teknoloji Durumu
Toyota	Toyota Solid-State EV Prototipi (2027–2028)	Oksit Bazlı (LLZO türevleri)	800–1000+ km	Dünyadaki en büyük KHB AR-GE yatırımlarından biri; hızlı şarj hedefi 10 dk.
Nissan	Nissan Leaf Solid-State Versiyonu (2028)	Sülfür ve oksit hibrit elektrolit	700–800 km	2025'te pilot üretim tesisinin açılacağı duyuruldu.
BMW	Neue Klasse Solid-State EV (2030 sonrası)	Oksit Bazlı	800 km	Solid Power ile ortaklık yürütölüyor.
Volkswagen – QuantumScape	VW ID. EV Serisi (2030 sonrası)	Seramik bazlı katı elektrolit (QS)	750–1000 km	QuantumScape'in prototipleri 1000 çevrim üzerinde kararlı sonuçlar verdi.
Solid Power (BMW & Ford)	BMW ve Ford prototip araçlar	Sülfür Tabanlı Katı Elektrolit	700+ km	2023 itibarıyla otomotiv hücre prototiplerinin test süreci devam ediyor.
Honda	2030 sonrası yeni EV platformu	Katı polimer + oksit hibrit	Belirtilmedi	Panasonic ve GS Yuasa ile iş birliği sürüyor.
Hyundai – Kia	E-GMP 2 Platformu (2030)	Oksit Bazlı	700+ km	KHB hücre tasarımında mekanik stabiliteye odaklanan projeler yürütölüyor.
Mercedes-Benz	Vision EQXX (ARAşTIRMA KONSEPTİ)	Katı elektrolitli lityum metal	1000 km (hedef)	Yoğun enerji mühendisliği testleri devam ediyor.
BYD	Blade Solid-State EV (gelecek planı)	Katı polimer elektrolit	600–800 km	LFP tabanlı güvenli hücre mimarisi ile uyumlu prototipler geliştiriliyor.

(Toyota's battery technology, 2025; NISSAN, 2025; Solid-state battery (SSB), 2025; BMW Group, 2025; Quantum Scape, 2025; Honda Sustainability, 2025; (Hyundai, 2025; Mercedes, WikipediaThe Free Encyclopedia, 2025; BYD Confirms All-Solid-State , 2025)

Tabloda dikkat çeken bir diğer unsur, katı hal bataryalarının elektrikli araçlara sağlayacağı menzil avantajıdır. Lityum metal anot kullanımına imkân veren bu teknoloji sayesinde pek çok üretici 750–1000 km aralığında sürüş menzili hedeflemektedir. Bu durum, mevcut lityum-iyon batarya teknolojisinin enerji yoğunluğu sınırlarına yaklaştığını ve yeni nesil EV platformlarının katı hal bataryaları ile daha kompakt, daha hafif ve daha uzun menzil sunabilen araçlara dönüşeceğini göstermektedir.

Ayrıca hızlı şarj kabiliyeti, üreticilerin neredeyse tümünde ortak hedeflerden biridir. Özellikle Toyota ve QuantumScape prototiplerinde 10–15 dakikalık şarj sürelerinin hedeflenmesi, katı hal bataryalarının yüksek iyonik iletkenlik ve daha kararlı ara yüzey performansı sağladığını göstermektedir. Bu da elektrikli araçların yaygınlaşmasında kritik bir eşik olan “şarj süresinin içten yanmalı araç dolum süresine yaklaşması” açısından önemli bir gelişmedir.

Sonuç

Katı hal bataryaları, elektrikli araçlardan taşınabilir elektroniklere ve büyük ölçekli enerji depolama sistemlerine kadar uzanan geniş bir uygulama alanında yeni nesil enerji depolama çözümlerinin merkezinde yer almaktadır. Sıvı elektrolitli lityum-iyon bataryalara kıyasla çok daha yüksek enerji yoğunluğu, gelişmiş güvenlik, uzun çevrim ömrü ve yüksek sıcaklık stabilitesi sunmaları, bu teknolojiyi stratejik bir dönüşüm noktası hâline getirmiştir. Bununla birlikte, elektrot–elektrolit ara yüzeyindeki mekanik ve kimyasal uyumsuzluklar, düşük sıcaklıklarda iyon iletimi, dendrit oluşumu, üretim süreçlerinin karmaşıklığı ve maliyet unsurları gibi önemli teknik zorluklar hâlen çözülmesi gereken temel engellerdir.

Günümüzde hem otomotiv endüstrisi hem de enerji depolama sektörü, katı hal bataryalarının ticarileşmesi için yoğun Ar-Ge faaliyetleri yürütmektedir. Toyota, Nissan, BMW, Volkswagen-QuantumScape ve Solid Power gibi küresel liderlerin

pilot üretim hatları kurmaları, teknolojinin olgunlaşma aşamasına hızla yaklaştığını göstermektedir. Özellikle lityum metal anot kullanımı ile 700–1000 km menzil hedefleyen elektrikli araç tasarımları, katı hal bataryalarının yakın gelecekte ulaştırma sektöründe devrim yaratma potansiyelini ortaya koymaktadır. Aynı zamanda hızlı şarj, termal yönetim kolaylığı ve daha kompakt batarya paketleri, elektrikli araç mimarilerinin yeniden şekillenmesine katkı sağlayacaktır.

Bununla birlikte, teknolojinin yaygınlaşması üretim ölçeklenebilirliğinin artırılmasına, maliyetlerin düşürülmesine ve uzun dönem döngüsel dayanımın saha koşullarında doğrulanmasına bağlıdır. Malzeme bilimi, ara yüzey mühendisliği, ince film teknolojileri ve üretim süreçleri alanında devam eden yeniliklerin önümüzdeki on yıl içinde katı hal bataryalarını ticari standarda dönüştürmesi beklenmektedir.

Kaynakça/Reference

Alabdali, M., Zanotto, F., & Notredame, B. (2024). Experimental and Computational Analysis of Slurry-Based Manufacturing of Solid-State Battery Composite Cathode. *Batteries & Supercaps*, 8(2). doi:10.1002/batt.202400709

Bachman, J. C., Muy, S., Grimaud, A., Chang, H.-H., & Pour, N. (2015). Inorganic Solid-State Electrolytes for Lithium Batteries: Mechanisms and Properties Governing Ion Conduction. *Chemical Reviews*, 116(1), s. 140-162. doi:10.1021/acs.chemrev.5b00563

BMW Group. (2025, Aralık 12). BMW Group and Solid Power deepen Joint Development Partnership: https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0407744EN/bmw-group-and-solid-power-deepen-joint-development-partnership?language=en&utm_source=chatgpt.com adresinden alındı

BYD Confirms All-Solid-State . (2025, Aralık 12). BYD Confirms All-Solid-State EV Batteries To Begin Rolling Out in 2027: <https://evinfo.net/2025/02/byd-confirms-all-solid-state-ev-batteries-to-begin-rolling-out-in-2027/> adresinden alındı

Cai, X., Xu, Y., Fan, M., Kong, F., Fan, L., Tan, Y. J., . . . Song, L. (2023). Toward Highly Selective Heteroatom Dopants in Hard Carbon with Superior Lithium Storage Performance. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 15(24), s. 29204-29213. doi:10.1021/acsami.3c04965

Cao, C., Liang, F., Zhang, W., Liu, H., Liu, H., Zhang, H., & Mao, J. (2021). Commercialization-Driven Electrodes Design for Lithium Batteries: Basic Guidance, Opportunities, and Perspectives. *Small*, 17(43). doi:10.1002/sml.202102233

Chen, S., Che, H., Feng, F., Liao, J., Wang, H., Yin, Y., & Ma, Z.-F. (2019). Poly(vinylene carbonate)-Based Composite Polymer Electrolyte with Enhanced Interfacial Stability To Realize High-Performance Room-Temperature Solid-State Sodium Batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(46), s. 43056-43065. doi:10.1021/acsami.9b11259

Chen, W., Hai, F., Gao, X., & Guo, J. (2024). In Situ Polymerized Zwitterionic Copolymer Ionic Gel Electrolytes with High Performance for Lithium-Ion Batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(28), s. 36696-36704. doi:10.1021/acsami.4c05762

Chen, Y., Wang, T., Tian, H., Su, D., Zhang, Q., & Wang, G. (2021). Advances in Lithium–Sulfur Batteries: From Academic Research to Commercial Viability. *Advanced Materials*, 33(29). doi:DOI: 10.1002/adma.202003666

Chen, Z.-H., Ghasemi, M., Hall, S., Fair, R., Maranas, C., Shi, R., & Gomez, E. (2024). Cold Sintering Enables the Reprocessing of LLZO-Based Composites. *ChemSusChem*, 17(13). doi:10.1002/cssc.202301920

Cui, S.-L., XUE-WEN, W., Yang, Y., Fei, M., Liu, S., & Li, G. (2021). Heterostructured Gel Polymer Electrolyte Enabling Long-Cycle Quasi-Solid-State Lithium Metal Batteries. *ACS Energy Letters*, 7(1), s. 42-52. doi:10.1021/acsenergylett.1c02233

Dühnen, S., Betz, J., Koley, M., Schmuck, R., Winter, M., & Placke, T. (2020). Toward Green Battery Cells: Perspective on Materials and Technologies. *Small Methods*, 4(7). doi:10.1002/smt.202000039

Fan, P., Liu, H., Marosz, V., Samuels, N. T., Suib, S. L., Sun, L., & Liao, L. (2021). High Performance Composite Polymer Electrolytes for Lithium-Ion Batteries. *Advanced Functional Materials*, 31(23). doi:10.1002/adfm.202101380

Fan, X., Zhong, C., Liu, J., Deng, Y., Han, X., Zhang, L., & Hu, W. (2022). Opportunities of Flexible and Portable Electrochemical Devices for Energy Storage: Expanding the Spotlight onto Semi-solid/Solid Electrolytes. *Chemical Reviews*, 122(33), s. 17155-17239. doi:10.1021/acs.chemrev.2c00196

Feng, L., Li, G., Li, Y., Gu, X.-L., Hu, S.-Y., & Han, Y. (2022). MOF-supported crystalline ionic liquid: new type of solid electrolyte for enhanced and high ionic conductivity. *Dalton Transactions*, 51(15), s. 6086-6094. doi:10.1039/d2dt00526c

Fu, B., Man, H., Zhao, J., Wang, F., Fang, F., Sun, D., & Song, Y. (2022). Less Is More: High-Performance All-Solid-State Electrode Enabled by Multifunctional MXene. *ACS Applied Energy Materials*, 5(6), s. 7210-7219. doi:10.1021/acs.aem.2c00760

Gao, X., Yu, Z., Wang, J., Zheng, X., Ye, Y., & Gong, H. (2023). Electrolytes with moderate lithium polysulfide solubility for high-performance long-calendar-life lithium-sulfur batteries. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(31). doi: 10.1073/pnas.2301260120

Golozar, M., Paoletta, A., & Demers, H. (2020). Direct observation of lithium metal dendrites with ceramic solid electrolyte. *Scientific Reports*, 10(1). doi:10.1038/s41598-020-75456-0

Honda Sustainability. (2025, Aralık 12). Electrification Business Strategy:
https://global.honda/en/sustainability/integratedreport/pdf/Honda_Report_2023-en-cs.pdf?utm_source=chatgpt.com adresinden alındı

Hu, J., Tian, J., & Li, C. (2017). Nanostructured Carbon Nitride Polymer-Reinforced Electrolyte To Enable Dendrite-Suppressed Lithium Metal Batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(13), s. 11615-11625. doi:10.1021/acsami.7b00478

Huang, X., Li, T., Fan, W., Xiao, R., & Cheng, X.-B. (2024). Challenges and Solutions of Solid-State Electrolyte Film for Large-Scale Applications. *Advanced Energy Materials*, 14(11). doi:10.1002/aenm.202303850

Hyundai. (2025, Aralık 12). Hyundai Motor Group Drives Next-Generation Battery Innovation with Future Mobility Battery Campus:

https://www.hyundai.com/worldwide/en/newsroom/detail/hyundai-motor-group-drives-next-generation-battery-innovation-with-future-mobility-battery-campus-0000001078?utm_source=chatgpt.com adresinden alındı

Kazyak, E., Mendez, R., LePage, W. S., & Sharafi, A. (2020). Li Penetration in Ceramic Solid Electrolytes: Operando Microscopy Analysis of Morphology, Propagation, and Reversibility. *Matter*, 2(4), s. 1025-1048. doi:10.1016/j.matt.2020.02.008

Kim, K. J., Balaish, M., Wadaguchi, M., kong, I., & Rupp, J. L. (2020). Solid-State Li–Metal Batteries: Challenges and Horizons of Oxide and Sulfide Solid Electrolytes and Their Interfaces. *Advanced Energy Materials*, 11(1). doi:10.1002/aenm.202002689

Li, M., Bai, Z., Li, Y., Ma, L., & Dai, A. (2019). Electrochemically primed functional redox mediator generator from the decomposition of solid state electrolyte. *Nature Communications*, 10(1). doi:10.1038/s41467-019-09638-4

Li, Z., Fu, J., Zhou, X., Gui, S., & Wei, L. (2023). Ionic Conduction in Polymer-Based Solid Electrolytes. *Advanced Science*, 10(10). doi:10.1002/advs.202201718

Li, Z., Peng, S., & Wei, L. (2025). Why Will Polymers Win the Race for Solid-State Batteries? *Advanced Science*, 12(36). doi:10.1002/advs.202510481

Liang, H., Wang, L., Wang, A., Song, Y., Wu, Y., Yang, Y., & He, X. (2023). Tailoring Practically Accessible Polymer/Inorganic Composite Electrolytes for All-Solid-State Lithium Metal Batteries: A Review. *Nano-Micro Letters*, 15(1). doi:10.1007/s40820-022-00996-1

Liang, Y., Hao, L., & Huang, Z. (2025). Solvent-Free Bonding Mechanisms and Microstructure Engineering in Dry Electrode Technology for Lithium-Ion Batteries. *Advanced Functional Materials*. doi:10.1002/adfm.202518619

Link , S., Neef, C., & Wickle, T. (2023). Trends in Automotive Battery Cell Design: A Statistical Analysis of Empirical Data. *Batteries*, 9(5), s. 261. doi:10.3390/batteries9050261

Liu, F., Ji, S., Shao, J., Linkov, V., Feng, L., & Wang, H. (2025). Function-Oriented Electrolyte Additives: Chemical Strategy to Enhance the Performance of Lithium-Sulfur Batteries. *Chemistry – An Asian Journal*, 20(19). doi:10.1002/asia.202500697

López, S. U., Akizu-Gardoki, O., & Lizundia, E. (2021). Comparative life cycle assessment of high performance lithium-sulfur battery cathodes. *Journal of Cleaner Production*, 282(124528). doi:10.1016/j.jclepro.2020.124528

Luo, C., Yi, M., Cao, Z., Hui, W., & Wang, Y. (2024). Review of Ionic Conductivity Properties of NASICON Type Inorganic Solid Electrolyte LATP. *ACS Applied Electronic Materials*, 6(2), s. 641-657. doi:10.1021/acsaelm.3c01747

Man, Q., An, Y., Shen, H., Wei, C., Zhang, X., Wang, Z., . . . Feng, J. (2023). MXenes and Their Derivatives for Advanced Solid-State Energy Storage Devices. *Advanced Functional Materials*, 33(41). doi:10.1002/adfm.202303668

Mohammed, S., Mohammed, A., Abdalla, K., Hamad, D., & Mustafa, F. (2025). Advances in nitrogen-doped carbon dots for electrochemical energy storage: from synthesis to applications. *Materials Advances*. doi:10.1039/d5ma00927h

NISSAN. (2025, Aralık 12). Nissan accelerates solid-state battery development toward commercialization.: https://www2.nissan-global.com/EN/TECHNICALREVIEW/PDF/TOPI/NISSAN_TECHNICAL_REVIEW_91_En_ALL.pdf adresinden alındı

Quantum Scape. (2025, Aralık 12). QuantumScape and PowerCo Expand Collaboration to Accelerate Solid-State Battery Technology Commercialization:

https://www.quantumscape.com/quantumscape-and-powerco-expand-collaboration-to-accelerate-solid-state-battery-technology-commercialization/?utm_source=chatgpt.com adresinden alındı

Rajamani, A., Panneerselvam, T., Abraham, S. E., Murugan, R., & Sivaprakasam, S. (2023). Recent progress in polymer garnet composite electrolytes for solid-state lithium metal batteries. *Sustainable Energy & Fuels*, 7(14), s. 3185-3212. doi:10.1039/d3se00421j

Rietdorf, C., Rúa, C., Kieme, S., & Miehe, R. (2024). Cradle-to-gate life cycle assessment of cylindrical sulfide-based solid-state batteries. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 29(11), s. 1992-2003. doi:10.1007/s11367-024-02355-1

Solid-state battery (SSB). (2025, Aralık 12). Quintus: https://quintustechnologies.com/products/battery-processing-systems/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=BPS_Digital_Always_On_NA_Battery_Global_2024_QUIN0004&utm_term=solid%20state%20battery&gad_source=1&gad_campaignid=21509792110&gbraid=0AAAAA adresinden alındı

Song, L., Zhang, S., Shen, L., Liu, Q., Ma, J., Lv, W., . . . Yang, Q.-H. (2020). Progress and Perspective of Ceramic/Polymer Composite Solid Electrolytes for Lithium Batteries. *Advanced Science*, 7(5). doi:10.1002/advs.201903088

Song, Z., Li, H., Zhang, H., Yan, J., Tang, Y., Huang, J., . . . Li, X. (2020). Ultrafast and Stable Li-(De)intercalation in a Large Single Crystal H-Nb₂O₅ Anode via Optimizing the Homogeneity of Electron and Ion Transport. *Advanced Materials*, 32(22). doi:/doi.org/10.1002/adma.202001001

Torres, F. G., De-la-Torre, G. E., Gonzales, K., & Troncoso, O. (2020). Bacterial-Polymer-Based Electrolytes: Recent Progress and Applications. *ACS Applied Energy Materials*, 3(12), s. 11500-11515. doi:10.1021/acsaem.0c02195

Toyota's battery technology. (2025, Aralık 12). Toyota outlines next-generation battery roadmap: <https://www.toyota-europe.com/news/2023/battery-technology> adresinden alındı

Uchida, G., Habu, Y., Hayashi, J., Nagai, K., & Ikebe, Y. (2023). Fabrication of amorphous LiPON, LiAlGePO, and GeSn films in low-temperature plasma sputtering process for all-solid-state Li⁺-ion battery. *Japanese Journal of Applied Physics*, 62(SL). doi:10.35848/1347-4065/acd55d

Wang, J., Ding, B., Lu, X., Nara, H., Sugahara, Y., & Yamauchi, Y. (2021). Single Atom-Based Nanoarchitected Electrodes for High-Performance Lithium–Sulfur Batteries. *Advanced Materials Interfaces*, 8(8). doi:10.1002/admi.202002159

Wang, X., Chi, X., Li, M., Guan, D.-H., Miao, C.-L., & Xu, J.-J. (2022). Metal–Organic Frameworks Derived Electrolytes Build Multiple Wetting Interfaces for Integrated Solid-State Lithium–Oxygen Battery. *Advanced Functional Materials*, 32(30). doi:10.1002/adfm.202113235

Wang, S., Zeng, T., Wen, X., Xu, H., Fan, F., Tian, G., & Liu, S. (2024). Optimized Lithium Ion Coordination via Chlorine Substitution to Enhance Ionic Conductivity of Garnet-Based Solid Electrolytes. *Small*, 20(31). doi:10.1002/sml.202309874

Wen, J., Zhang, R., Zhao, Q., Liu, W., Lu, G., Hu, X., . . . Xu, C. (2020). Hydroxyapatite Nanowire-Reinforced Poly(ethylene oxide)-Based Polymer Solid Electrolyte for Application in High-Temperature Lithium Batteries. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 12(49), s. 54637-54643. doi:10.1021/acsami.0c15692

WikipediaThe Free Encyclopedia. (2025, Aralık 12). Mercedes-Benz Vision EQXX: https://en.wikipedia.org/wiki/Mercedes-Benz_Vision_EQXX?utm_source=chatgpt.com adresinden alındı

Wu, J., Liu, S., Han, F., Yao, X., & Wang, C. (2020). Lithium/Sulfide All-Solid-State Batteries using Sulfide Electrolytes. *Advanced Materials*, 33(6). doi:10.1002/adma.202000751

Zhang, B., Zhang, M., Song, L., & Jin, Y. (2022). Ion Channel Engineering in Super Thick Cathodes toward High-Energy-Density Li-S Batteries. *Energy Fuels*, 36(7), s. 4087-4093. doi: 10.1021/acs.energyfuels.2c00413

BÖLÜM 8

TARIMSAL SULAMADA SAYISAL TASARIM VE FOTOVOLTAİK SİSTEM MODELLEMESİ: ÇUMRA ÖRNEĞİ

1. ABDULLAH AVCU¹

2. MUSTAFA TAHİR AKKOYUNLU²

3. FATİH AKKURT³

Giriş

Dünya çapındaki nüfus artışı ve buna bağlı olarak hızla artan gıda ihtiyacı, tarımsal üretimin önemini ve yeni yaklaşımları ortaya çıkarmıştır (Malaslı vd., 2025). Tarımsal üretimin en önemli maddelerinden biri olan sulama, üretim aşamasının temel ve maliyet doğuran girdisidir. İklim değişiklikleri, kuraklık, fosil yakıtların ve su kaynaklarının tükeniyor oluşu bu kaynakların verimli kullanılmasını zorunlu hale getirmektedir (Akkoyunlu, Akkoyunlu, Pusat, & Özkan, 2015; Pusat vd., 2016). Tarımsal

¹ Yüksek Lisans Öğrencisi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Orcid: 0009-0003-3207-9147

² Prof. Dr., Necmettin Erbakan Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-5748-6759

³ Dr. Öğr. Üyesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Orcid: 0000-0001-8727-8854

sulamanın verimliliği, suyun kaynaktan alınıp bitkiye ulaştırılmasına ve bu süreçteki kullanılan enerjiye doğrudan bağlıdır. Enerji verimliliği açısından yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaktadır. Bu bağlamda, bazı yenilenebilir enerji kaynaklarının da temelini oluşturan güneşten yararlanılmaktadır.

Güneş, dünyadaki en önemli enerji kaynağı olarak karşımıza çıkmaktadır. Dünyadaki enerji ve madde akışları güneş enerjisinin sayesinde gerçekleşmektedir. Dalga, biokütle ve rüzgâr gibi enerji türleri, güneş enerjisinin değişim geçirmiş varyasyonları olarak değerlendirilmektedir. Günümüzde güneş enerjisinden elektrik üretimi ve ısınma gibi amaçlarla yararlanılmaktadır (Koroğlu, Teke, Bayındır, & Tümay, 2010; Varınca & Gönüllü, 2006). Güneş enerjisinin haricinde fosil yakıtlardan da uzun süreler boyunca ısınma ve elektrik üretimi için yararlanılmaktadır. Fakat fosil yakıtların hızla tükeniyor oluşu ve çevreci olmaması sebebiyle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim zorunlu hale gelmiştir. Bu bağlamda, yakın geçmişten günümüze güneş, rüzgâr, biokütle, hidrolik ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talepler artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında maliyet ve erişilebilirlik açısından avantajlı olması sebebi ile güneş enerji sistemleri ön plana çıkmaktadır. Güneş enerji sistemleri, güneşten gelen yüksek ve yeterli ışınları elektrik enerjine dönüştürerek elektrik üreten sistemlerdir. Üretilen elektrik evlerde, sanayide ve tarımda kullanılmaktadır (Atmaca, Yusufoglu, & Kurtuluş, 2014).

Fotovoltaik sistemlerin ilk yatırım maliyetleri yüksek olmakla beraber, uzun vadede fosil yakıtlı enerji kaynaklarına göre hem ekonomik hem de çevresel açıdan daha sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. İlk yatırım maliyetlerinin yüksek olması, sistemlerin doğru ve verimli tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Sistem tasarlanırken derin su kuyusunun yüksekliği, farklı bitki türleri için gerekli debi ve güneş miktarı dikkat edilmesi

gereken hususlardandır. Bu hususlar doğrultusunda sistem tasarımı yapılmaktadır.

Güneş enerjili tasarımsal sulama sistemleri hakkında ulusal ve uluslararası alanda yapılan bazı çalışmalar özetlenmiştir. Söz konusu bu çalışmalar, yaptığımız çalışmanın yorumlanmasına önemli ölçüde katkı sağlayacaktır. Vilela ve ark. (2003) su pompaj sistemine entegre tek eksenle güneşi izleyen bir güneş panel sistemini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, 5000 Wh/m^2 ve 6000 Wh/m^2 güneş ışınım enerjisi olduğu durumlarda toplanan enerjinin %19 ve %24 oranında arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, pompalanan su miktarı %37 ve %41 oranında arttığı kaydedilmiştir. Fiaschi vd. (2005) santrifüj pompalar kullanarak güneş enerji sistemleri ile derin su kuyu pompalarının verimlerinin artırılmasına yönelik araştırmalar yapmıştır. Yeşilata ve Fıratoğlu (2008) güneşin ışınım şiddetiyle ilgili bazı veriler kullanarak, güneş enerjili su pompa sisteminden üretilen güç miktarının değişimini incelemiştir. Güneş ışının şiddetinin güneş enerji sistemlerinin tasarımlarında belirleyici bir faktör olduğuna değinmiştir. Bouzidi vd. (2009) Cezayir Sahra bölgelerinde PV su pompalama sistemlerinin Hem teknik hem de ekonomik açıdan incelemektedir. Bu çalışma ortalama $60 \text{ m}^3/\text{gün}$ büyüklüğündeki bir sistemin maliyet analizi gibi değerlendirmelerini raporlamıştır. Gençoğlu ve Cebeci (2010) Doğu Anadolu Bölgesi'nde güneş enerji sistemlerinin potansiyellerini yorumlamak amacıyla küçük ölçekli tüketicilerin beslenmesinde güneş enerji sistemlerinin kullanılmasını araştırmıştır. Bu sistemleri PLC aracılığıyla kontrol edilebilen yedek enerji kaynaklarından yararlanılmasını hedeflemiştir. Ayrıca PV ile beslenen su pompalama sistemlerinin kullanımlarını araştırmıştır. Mokeddem vd. (2011) Sistem 1,5 kWp'lik PV dizisi santrifüj pompa ve DC motordan oluşan basit bir sistem ile sistemin verimini yorumlamak amacıyla deneysel çalışma yapmıştır. Çalışma süresi 4 ay sürmüştür. Farklı statik

basınçlarda ve farklı iklim koşullarında değerlendirmiştir. Belgacem (2012) çalışmasında gelişmekte olan ülkelerde kırsal arazilerde, fotovoltaik sistemlerle su pompalamanın daha ekonomik olarak uygulanabileceğini savunmuştur. Tunus koşullarında, bir yılda 3000 saat güneşlenme süresi ve 6 kWh/m²/gün olan güneş enerjisinden, su pompalama amacıyla yararlanılabileceğine değinmiştir. Benghanem vd. (2013) yaptığı çalışmada, bir helisel pompayı, fotovoltaik olarak güneş ışınlamından üretilen DC elektrik enerjisi ile çalıştırabilmek ve tasarım etkenlerini belirlemek hedefiyle dört farklı fotovoltaik panel dizi tasarımı gerçekleştirmişler. 80 m basma yüksekliğinde birçok deneme yapmıştır. Fotovoltaik paneller tarafından üretilen elektrik enerjisi ile çalıştırılan helisel pompa ile günlük ortalama olarak 22m³ su basılması mümkün olmuştur. Yusufoglu (2013) fotovoltaik sistem kullanarak üretilen elektrik ile tarımsal sulama için kullanılacak pompaların enerji ihtiyacı karşılanmıştır. Bu çalışma Güney Doğu Anadolu Bölgesi'nde gerçekleştirilerek bu bölgenin enerji potansiyelini değerlendirmek amacıyla yapılmıştır. Güre (2018) çalışmasında tarımsal sulamadaki enerji ihtiyacını fotovoltaik sistem ile karşılamıştır. Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerji sistemlerinin kullanılabilirliğini artırmayı amaçlamıştır. Osama vd. (2024) algoritmalarından faydalanan 50 dönümlük tarım arazisi için fotovoltaik pompa sistemi tasarlamıştır. Bu tasarımda, uygun pompa gücü ile panel entegrasyonunun, su ihtiyacına göre belirlenmesi gerektiğini vurgulamıştır. Ahmed vd. (2025) hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinde su pompalama üzerine yaptıkları çalışmalarında, doğru pompa seçiminin sistemdeki genel verimliliği %30'a kadar etkilediğini tespit etmişleridir. Özellikle dalgıç pompaların, düşük bakım maliyetleri ve yüksek performansları nedeniyle tarımsal sulamada doğru bir tercih olacağını belirtmişlerdir.

Bu çalışmada Konya ili Çumra ilçesinde belirlenen bir tarımsal araziye ait sulama sisteminin sayısal tasarımı ve fotovoltaik modellemesi yapılmıştır. Analizler neticesinde, su kuyusunun derinliği ve bitkinin su ihtiyacının sistem tasarımında belirleyici parametreler olduğu ortaya konmuştur. Elde edilen hesaplama ve modelleme sonuçları, kurulan sistemin yatırım maliyetini yaklaşık 7 yıl içerisinde karşıladığını ve yıla 54.324 kg CO₂ emisyonunun önlenmesine katkı sağladığını göstermektedir.

Materyal ve Yöntem

Güneş enerji sistemleri temel olarak; güneş panelleri, kablolar ve dönüştürücüden (invertör) oluşur. Sistemin tasarımına bağlı olarak akü ve şarj regülatörü sisteme eklenebilir. Sistem tasarımında kullanılacak ekipmanların seçimi çok önemlidir. Yapılacak yanlış seçimler sistem verimliliği ve maliyeti doğrudan etkilemektedir.

Güneş enerji sistem entegrasyonu ile yapılacak tarımsal sulama sistemleri ise; motor-pompa ünitesi, kablolar, güneş panelleri ve dönüştürücüden (invertör) oluşur. Sistemin tasarımına bağlı olarak; akü, şarj regülatörü ve su deposu da kullanılabilir.

Şekil 1 Güneş Enerji Sistemi



Konya, İç Anadolu Bölgesi'nin güneyinde bulunur. 36°41' ve 39°16' kuzey enlemleri ile 31°14' ve 34°26' doğu boylamlarının arasında yer almaktadır (“Konya İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü”, t.y.). Konya'nın Çumra ilçesi ise Konya'nın 43 km güneydoğusunda yer almaktadır. Çumra'nın yüzölçümü 2330 km² olup, bu arazinin %90'ı düzlükten oluşmaktadır (“T.C. Konya Valiliği”, t.y.). Bölge, karasal iklime sahiptir. Çalışmamızda Çumra ilçesinde Apasaraycık mahallesinde bulunan 262/14 ada/parsel numaralı arazide buğday yetiştirilmesi için su ve enerji ihtiyacına göre örnek pompaj hesaplaması ve program aracılığı ile güneş enerji sistemi tasarımı yapılacaktır.

Şekil 2 Tarımsal Arazi Görseli



Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan veriler kapsamında bölge, yıllık ortalama 325.3mm yağış almaktadır (“Meteoroloji Genel Müdürlüğü”, t.y.). Yıllık güneşlenme süresi saat/gün cinsinden Şekil 3'te görülmektedir (“MGM”, t.y.).

YILLIK ORTALAMA GÜNEŞLENME SÜRESİ (1991-2020) (saat/gün)

4.22 - 4.50
4.51 - 4.75
4.76 - 5.00
5.01 - 5.25
5.26 - 5.50
5.51 - 5.75
5.76 - 6.00
6.01 - 6.25
6.26 - 6.50
6.51 - 6.75
6.76 - 7.00
7.01 - 7.25
7.26 - 7.50
7.51 - 7.75
7.76 - 8.00
8.01 - 8.25
8.26 - 8.50

Şekil 4 Ortalama Global Güneş Radyasyonu Dağılımı (2004-2021)



Fotovoltaik sulama sistemi tasarımı yapılırken şu hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir;

- Güneşlenme süresi,
- İhtiyaç olan su miktarı,
- Sistemin toplam dinamik yüksekliği (TDY),
- Suyun kalitesi,
- Kullanılacak güneş paneli,
- Panellerin kurulacağı alan ve montaj tipi.

Arazideki bitkinin sulanma süresi ve arazi koşulları vb. durumlarına göre su ihtiyacı değişkenlik göstermektedir. Su miktarının değişmesi tasarımın değişmesine sebep olmaktadır (Peren, Kuyumcu, & Gündoğan, 2019).

Örnek uygulamamızda Konya ili Çumra ilçesi Apasaraycık mahallesi 262/14 ada/parsel numaralı arazi için buğday yetiştirilmesi amaçlanmıştır.

Birim ağırlıktaki su için enerji talebi, su çekilecek kuyunun derinliğine (H_p), su deposu yüksekliği (H_y), yerel kayıplara ve düz borunun sürtünme kayıplarına bağlıdır.

$$H_m = H_g + H_{dk} + H_{yk}$$

Bu denklemde H_m birim ağırlık su için verilen enerjidir. H_g ($H_p + H_y$) geometrik yükseklik (m), H_{yk} lokal kayıplar (mSS) ve H_{dk} düz boru kayıplarını (mSS) belirtir.

Düz boru kayıplarını bulmak için aşağıdaki formül kullanılır.

$$H_{dk} = f \frac{L}{D_e} \frac{v^2}{2g}$$

Bu formülde f , boru sürtünme katsayısıdır. L , toplam borunun uzunluğunu metre cinsinden ifade eder. D_e metre cinsinden boru çapıdır. v , m/s cinsinden hızdır. g ise m/s^2 cinsinden yerçekimi ivmesidir.

Yerel boru kayıpları, sulama sisteminde kullanılan fittings malzemelerden kaynaklanan kayıplardır ve hesaplamasında aşağıdaki formül kullanılır.

$$H_{yk} = \sum K \frac{v^2}{2g}$$

Bu denklemde K , boru bağlantı malzemesi kayıp katsayısıdır. Verilen denklemler doğrultusunda H_m denklemi yeniden yazılacak olursa yeni denklem aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$H_m = H_P + H_y + f \frac{L}{D_e} \frac{v^2}{2g} + \sum K \frac{v^2}{2g}$$

Suyu pompalamak için hidrolik güç hesabı aşağıdaki formüle göre bulunur ve P_h ile gösterilir. Birimi ise Watt'tır (W).

$$P_h = Q \cdot H_m \cdot \rho \cdot g$$

Bu formülde Q , debidir (m^3/h). ρ , suyun yoğunluğudur ($1000 \text{ kg}/m^3$). g , yer çekimi ivmesidir (m/s^2). Pompa miline elektrik motoru tarafından uygulanan güce efektif güç denir ve P_e

ile gösterilir. Hidrolik gücün (P_h) pompa verimine (η_p) oranlanması ile elde edilir.

$$P_e = \frac{P_h}{\eta_p}$$

Elektrik motorunun gücü ise efektif gücün motor verimine (η_{elk}) oranlaması ile bulunur ve P_{elk} ile gösterilmektedir.

$$P_{elk} = \frac{P_e}{\eta_{elk}}$$

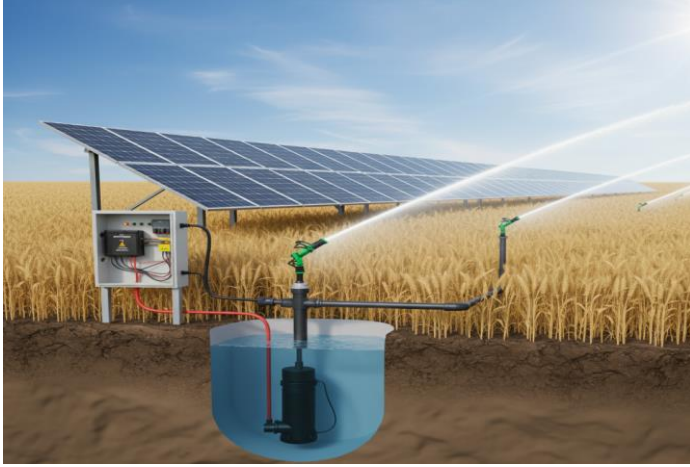
Elektrik motorunun gücünü (P_{elk}) dönüştürücünün (invertör) verimine (η_{FV}) oranladığımızda ise güneş panellerinden çekilecek gücü (P_{FV}) elde edilir.

$$P_{FV} = \frac{P_{elk}}{\eta_{FV}}$$

Belirlenen Arazi İçin Sayısal Tasarım

262/14 ada/parsel numaralı arazi 18.321 m² yüz ölçümüne sahiptir. Bu arazide buğday yetiştirilmesi planlanmakta ve bu üretimin tarımsal sulaması güneş enerji sistem entegrasyonu ile yapılması amaçlanmaktadır. Bu amaca göre hesaplamalar yapılmaktadır.

Şekil 5 Buğday Ekili Arazinin Temsili Görseli



Yapılan hesaplamalar ve seçimler Tablo 1’de açıklamaları ile birlikte verilmiştir.

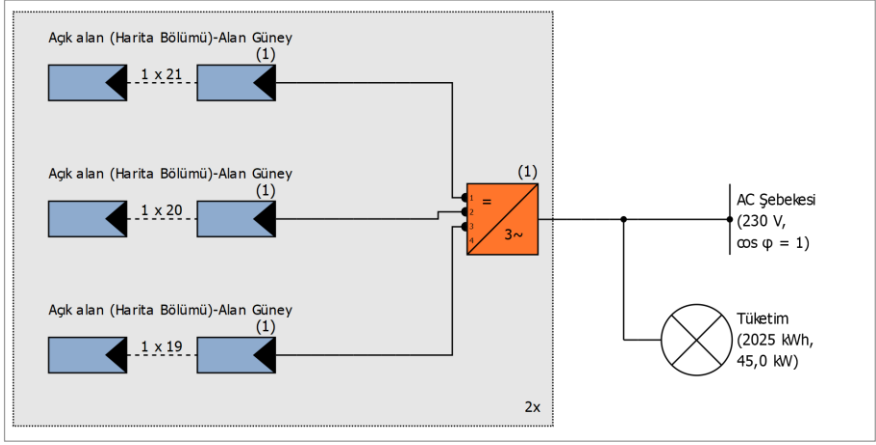
Tablo 1 Sayısal Hesaplamalar

Hesaplama Adımı	Açıklama	Değer/Sonuç
Su İhtiyacı	60 adet sprik x 2m ³ /h su tüketimi	120 m ³ /h
Toplam Yük (H _m)	Kayıplar ve geometrik yükseklik dikkate alınarak	100 m
Hidrolik Güç (P _h)	Mühendislik hesaplamaları	32,7 kW
Efektif Güç (P _e)	Pompa verimi katalog değeri %80	40,875 kW
Elektrik Motor Gücü (P _{elk})	Elektrik verimi katalog değeri %92	44,4 kW 45 kW elektrik motor seçimi yapılır
Fotovoltaik Güç (P _{FV})	Dönüştürücü verimi katalog değeri %98	45,92 kW 60 kW dönüştürücü seçimi yapılır

Simülasyon Sonuçları

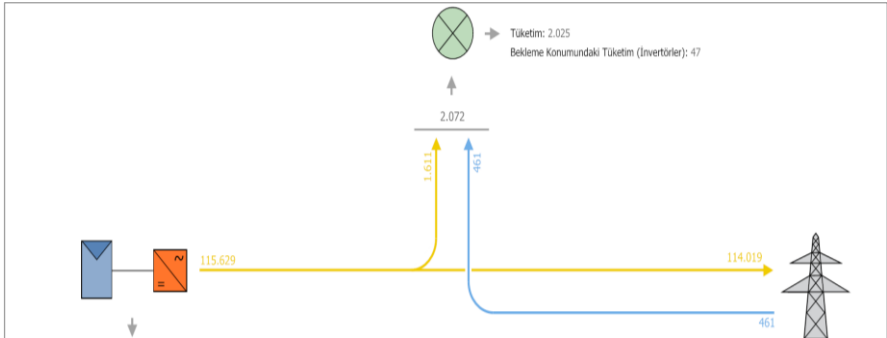
Yapılan sayısal hesaplamalara göre, sistem PV*SOL programı ile simüle edilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi sistem mahsuplaşma yöntemine göre tasarlanmış olup, sistemin ihtiyacı karşılanırken geri kalan dönemlerde ise kazanç elde edilmesi hedeflenmiştir.

Şekil 6 Şematik Diyagram



Şekil 7'de ise sistemde enerji akışı görülmektedir.

Şekil 7 Enerji Akışı



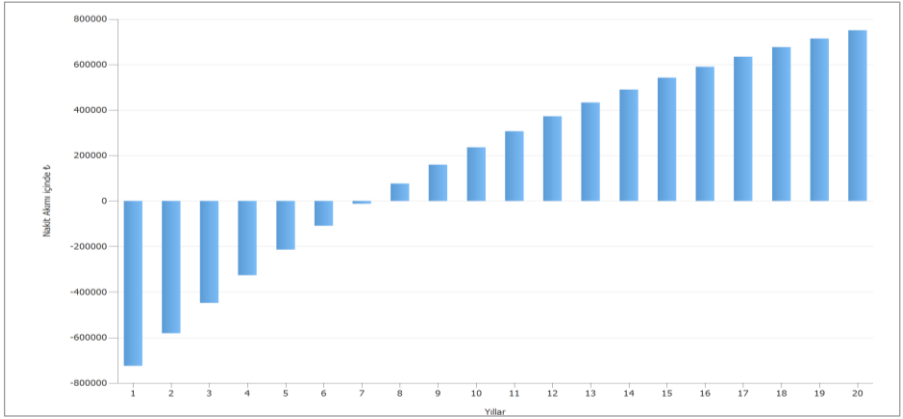
Arazide yetiştirilmesi gereken buğday 20 gün aralıklarla sezonda 5 kere ve bu sulamanın yapıldığı günlerde ise 9 saat sulandığı bilinmektedir. Bu verilere göre sistemdeki elektrik motoru yılda 2025 kWh tüketim gerçekleştirmektedir. Bekleme konumundaki invertörlerin tüketimi ise yılda 47 kWh belirlenmektedir. İki cihazın toplam tüketimi 2072 kWh/yıl olarak bulunmaktadır. Tasarlanan güneş enerji sistemlerinde 545 Wp'lik paneller kullanılmıştır. Sistem tasarımında elektrik motoruna göre invertör seçimi yapılmış ve invertörün MPPT girişlerine göre panel konfigürasyonu yapılmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda ise sistemdeki kullanılması gerek panel sayısı 120 olarak belirlenmiştir. Panellerden 115629 kWh/yıl üretim sağlanmaktadır. Üretim ve tüketim verilerine ait simülasyon sonucu Şekil 8'de verilmiştir.

Şekil 8 Simülasyon Sonuçları

PV sistemi	
PV jeneratör çıkışı	65,40 kWp
Yıllık Özgül Kazanç	1.767,31 kWh/kWp
Sistem kullanım oranı (PR)	90,76 %
Gölgelemeden dolayı oluşan kazanç kaybı	1,1 %
PV jeneratör enerjisi (AC şebekesi)	115.629 kWh/Yıl
Besleme noktasındaki düzenleme	0 kWh/Yıl
Önlenen CO ₂ emisyonu	54.324 kg/yıl
Tüketici	
Tüketici	2.025 kWh/Yıl
Bekleme Konumundaki Tüketim (Invertörler)	47 kWh/Yıl
Toplam tüketim	2.072 kWh/Yıl
Enerji fazlası	113.557,1 kWh
Güneş Enerjisi Oranı	5.579,7 %

Simülasyon sonuçları incelediğinde, fotovoltaik sistemler kullanarak yapılan sulamada yılda 54.324 kg CO₂ emisyonu önlendiği gözlemlenmektedir. Yine simülasyon sonuçlarına göre sistemin amortisman süresi 7.1 yıl olarak hesaplandığı Şekil 9'da görülmektedir.

Şekil 9 Nakit Dengesi



Sonuç

Bu çalışmada, tarımsal sulama sistemlerinde enerji verimliliği sağlanması için dalgıç pompaların güneş enerjisi ile entegrasyonu ele alınmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda su ihtiyacının doğru belirlenmesi, su ihtiyacına bağlı olarak doğru pompanın seçilmesi sistemin performansı açısından çok önemli olduğunu ortaya koymuştur.

Konya ili Çumra ilçesi Apasaraycık mahallesinde seçilen örnek araziler buğday yetiştirilmesi için yapılan modelleme bitkilerin su taleplerinin sistem tasarımıdan doğrudan belirleyici bir faktör olduğunu göstermiştir. 18.321 m² yüz ölçümüne olan, 100m derin kuyuya sahip arazi için 45 kW elektrik motor ihtiyacı hesaplanmış; elde edilen bu sonuç bitki türüne ve arazi şartlarına bağlı olarak enerji gereksiniminin farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca hesaplaması yapılan sistemde pompa, motor ve invertör verimlerinin katalogdan belirlenmiş olması, sistemin gerçekçi ve uygulanabilir modellemesini sağlamıştır. Bu çalışmada, sistemin yaklaşık olarak 7 yılda amorti ettiği ve yılda 54.324 kg CO₂ emisyonu önlendiği belirlenmiştir.

Çalışma sonucunda elde edilen bulgular, yenilenebilir enerji kaynaklarının tarımsal sulamada uygulanabilirliğini desteklemektedir. Güneş enerjisi sisteminden üretilen enerji ile çalışan sulama sistemleri, fosil yakıtlara bağımsızlığı minimize ederek çevresel etkileri azaltmakta ve ekonomik avantajlar sunarak ülke ekonomisine doğrudan olumlu etki sağlamaktadır. Bu sebepten dolayı doğru tasarlanmış güneş enerji sistemli sulamaların tarımsal üretimde yaygınlaştırılabileceği sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma tarımsal sulamada enerji verimliliğini artırmaya yönelik özgün bir yaklaşım sunmakta, tarımsal sulama yapılacak tasarımlarda güneş enerji sistemlerinin güvenilir olduğunu, her projeye özel mühendislik hesaplamalarının yapılması gerektiğini göstermektedir.

Kaynakça

- Akkoyunlu, M. T., Akkoyunlu, M. C., Pusat, S., & Özkan, C. (2015). Prediction of Accurate Values for Outliers in Coal Drying Experiments. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(9), 2721-2727. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1746-2>
- Atmaca, M., Yusufoglu, G., & Kurtuluş, A. B. (2014). Güneş Enerjili Sulamanın Tarım Sektöründe Uygulaması. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(2). <https://doi.org/10.17798/beufen.40454>
- Global Güneş Radyasyonu—Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (t.y.). Geliş tarihi 07 Kasım 2025, gönderen https://www.mgm.gov.tr/kurumici/radyasyon_iller.aspx?il=konya
- Konya İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü. (t.y.). Geliş tarihi 05 Kasım 2025, gönderen <https://konya.ktb.gov.tr/TR-370533/cografi-konum.html>

Köroğlu, T., Teke, A., Bayındır, Ç., & Tümay, M. (2010). Güneş Paneli Sistemlerinin Tasarımı, Elektrik Mühendisliği, 439. Sayı, Temmuz.

Malaslı, M. Z., Akkoyunlu, M. C., Pekel, E., Taşova, M., Dursun, S. K., & Akkoyunlu, M. T. (2025). Prediction of drying kinetics and energy consumption values of purple carrots dried in a temperature-controlled microwave dryer by decision tree, random forest and ada boost approaches. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 260, 105352. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2025.105352>

Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (t.y.). Geliş tarihi 05 Kasım 2025, gönderen <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=H&m=KONYA>

MGM. (t.y.). Geliş tarihi 05 Kasım 2025, gönderen <https://www.mgm.gov.tr/kurumici/turkiye-guneslenme-suresi.aspx>

Peren, V., Kuyumcu, F. E., & Gündoğan, Ç. (2019). Fotovoltaik Enerjinin Sulama Amaçlı Uygulama İçin Kurulacak Bir Sistemin Sayısal Tasarımı ve Model Çalışması.

Pusat, S., Akkoyunlu, M. T., Pekel, E., Akkoyunlu, M. C., Özkan, C., & Kara, S. S. (2016). Estimation of coal moisture content in convective drying process using ANFIS. Fuel Processing Technology, 147, 12-17.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.12.010>

T.C. Konya Valiliği. (t.y.). Geliş tarihi 05 Kasım 2025, gönderen
<http://www.konya.gov.tr/cumra>

Varınca, K. B., & Gönüllü, M. T. (2006). Türkiye’de güneş enerjisi potansiyeli ve bu potansiyelin kullanım derecesi, yöntemi ve yaygınlığı üzerine bir araştırma. Ulusal güneş ve hidrojen enerjisi kongresi, 21, 23.

