

T.C.
SİNOP ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİLİĞİ ANABİLİM DALI



GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNDEKİ YENİ GELİŞMELER

FATİH BAŞER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN
DOÇ. DR. MUSTAFA KEMAL BALKİ

SİNOP - 2025

TEZ KABUL

FATİH BAŞER tarafından hazırlanan “**GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNDEKİ YENİ GELİŞMELER**” başlıklı bu çalışma, **07.07.2025** tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak, jürimiz tarafından **YÜKSEK LİSANS tezi** olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin SÖYLER
Sinop Üniversitesi / Gerze Meslek Yüksekokulu

İmza

**Üye
(Danışman)**

Doç. Dr., Mustafa Kemal BALKİ
Sinop Üniversitesi / Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi

İmza

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TEMÜR
İstanbul Gelişim Üniversitesi / İstanbul Gelişim Meslek
Yüksekokulu

İmza

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Hüseyin Turan ARAT

.....

ETİK BEYANI

Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Fatih BAŞER



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNDEKİ YENİ GELİŞMELER

FATİH BAŞER

SİNOP ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: DOÇ. DR. MUSTAFA KEMAL BALKİ

Güneş enerjisi santrallerinde panel verimliliği, üretim maliyetleri ve işletme performansının son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmelere bağlı değişimleri kapsamlı literatür taramasıyla bu çalışmada incelenmiştir. Güneş paneli çeşitleri hem ekonomiklik hem de verimlilik açısından karşılaştırılmıştır. Yapılan kapsamlı incelemelere göre yüksek verimli PERC (Passivated Emitter and Rear Cell), TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) ve HJT (Heterojunction technology) gibi yeni nesil teknolojiler ile üretilen güneş hücrelerinin geleneksel hücrelere kıyasla enerji dönüşüm verimliliğini artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, bu güneş hücrelerinin kullanımıyla beraber elektrik enerji üretim maliyetlerinde önemli düşüşler sağlanmıştır. Özellikle Çin başta olmak üzere Asya ülkelerinde yapılan büyük ölçekli yatırımların küresel panel fiyatlarının düşmesinde belirleyici olduğu gözlemlenmiştir. Panel teknolojilerinin yanı sıra, soğutma ve temizlik sistemlerindeki gelişmeler de santral verimliliğini olumlu yönde etkilemiştir. Otonom temizlik robotlarının kullanımı yaygınlaşırken, hidrofobik yüzey kaplamaları gibi yenilikçi uygulamalar üzerine saha testleri sürmektedir. Ayrıca, perovskit tabanlı hücreler ve tandem yapılar gibi yeni teknolojilerin henüz ticarileşmemiş olsa da gelecek vaat eden alternatifler arasında yer alacağı değerlendirilmektedir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, güneş enerjisi santrallerinde yüksek verimli yeni nesil hücre teknolojilerinin kullanımı, akıllı takip ve temizlik sistemlerinin entegrasyonu ve yerli Ar-Ge'nin desteklenmesi önerilmektedir. Dahası perovskit ve tandem hücreler gibi geleceğin teknolojilerine yönelik stratejik hazırlıkların başlaması gerektiği değerlendirilmektedir.

ANAHTAR KELİMELEER: Güneş enerjisi santrali; Güneş hücresi; Fotovoltaik panel; Güneş enerjisi; Güneş enerjisi panel verimi

Haziran 2025, 107 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

RECENT DEVELOPMENTS IN SOLAR POWER PLANTS

FATİH BAŞER

GRADUATE EDUCATION INSTITUTE OF SINOP UNIVERSITY

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

SUPERVISOR: ASSOCIATE PROFESSOR MUSTAFA KEMAL BALKİ

In this study, the changes in panel efficiency, production costs, and operational performance in solar power plants, driven by recent technological advancements, have been examined through a comprehensive literature review. Various types of solar panels have been compared in terms of both cost-effectiveness and efficiency. According to the findings, new-generation solar cell technologies such as PERC (Passivated Emitter and Rear Cell), TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact), and HJT (Heterojunction Technology) significantly improve energy conversion efficiency compared to conventional cells. Moreover, the adoption of these high-efficiency cells has led to substantial reductions in electricity generation costs. Large-scale investments, particularly in China and other Asian countries, have played a decisive role in driving down global panel prices. In addition to advancements in panel technology, improvements in cooling and cleaning systems have also contributed positively to overall plant efficiency. While the use of autonomous cleaning robots is becoming more widespread, field tests on innovative applications such as hydrophobic surface coatings are ongoing. Furthermore, emerging technologies like perovskite-based cells and tandem structures, although not yet commercialized, are considered promising alternatives for the future. Based on the findings, this study recommends the integration of high-efficiency next-generation cell technologies, smart tracking and cleaning systems, and the promotion of domestic R&D in solar power plants. It is also suggested that strategic preparations should begin for the future commercialization of technologies such as perovskite and tandem solar cells.

KEYWORDS: Solar power plant; Solar cell, PV panel, Solar energy, Panel efficiency

June 2025, 107 Page

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada beni bilgi ve birikimleri ile yönlendiren, yol gösteren, tecrübeleri ile farklı açılardan bakmamı sağlayan, desteğini asla esirgemeyen ve her davranışı ile örnek olan değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mustafa Kemal BALKİ 'ye sonsuz teşekkür ederim. Yüksek lisans eğitimim boyunca bana her zaman yardımcı olan değerli hocam Prof. Dr. Murat SARIKAYA 'a çok teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan değerli anne ve babama, çok kıymetli eşime ve kız kardeşime, sevgili kızım Asya Öykü'ye verdikleri destek ve sonsuz sevgileri için çok teşekkür ederim.

Fatih Başer

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ KABUL	ii
ETİK BEYANI.....	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Yenilenebilir Enerji	3
2.1.1. Dünyada yenilenebilir enerji.....	5
2.1.2. Türkiye’de yenilenebilir enerji	10
2.2. Güneş Enerjisi.....	12
2.2.1. Dünyada güneş enerjisi kullanımı.....	14
2.2.2. Türkiye’de güneş enerjisi.....	15
2.3. Literatür Özetleri.....	18
3. GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİ	23
3.1. PV panellerin çalışma mekanizması	23
3.2. PV hücrede Carnot sınırı.....	28
3.3. Güneş Enerjisi Teknolojileri	29
3.3.1. PV/T sistemler	30
3.3.2. PV sistemler	33
3.3.3. Güneş panellerinin limitleri ve avantajları.....	34
3.4. Türkiye’deki Güneş Enerjisi Santralleri	36
3.5 Dünya’daki Güneş Enerji Santralleri	39
4. GÜNEŞ PANEL TÜRLERİ ve ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ.....	40
4.1. Monokristal ve Polikristal Güneş Panelleri	41
4.1.1. Monokristal panel üretim süreci	41
4.2. İnce Film Güneş Panelleri.....	47

4.2.1. İnce film güneş paneli üretim süreci	48
4.3. Üçüncü Kuşak Güneş Panelleri	48
4.3.1. Organik güneş panelleri	49
4.3.2. Çok katmanlı (tandem) güneş panelleri	49
4.3.3. Perovskit güneş panelleri	50
4.4. Türkiye’de Güneş Paneli Üretimi ve Kullanımı	51
4.5. Güneş Paneli Üretiminde Kullanılan Güncel Teknolojiler	53
4.5.1. Bifacial (çift yüzlü) güneş panelleri.....	54
4.5.2. Takipli (sun tracker) panel sistemleri.....	55
4.6. Güneş Panellerinin Üretimi Ve Fotovoltaik Sistemler.....	57
4.6.1. On-Grid ve off-grid Sistemler.....	58
4.7. Güneş Panellerinde Verim Arttırma Çalışmaları.....	66
4.7.1. Güneş panellerinin temizlenmesi.....	70
4.8. Güneş Panellerinin Ekonomik Analizi.....	74
4.9. Güneş Panel ve Santrallerinin Geleceği.....	77
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	83
KAYNAKLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ	94

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. 2025 yılı dünyada enerji üretiminde kullanılan kaynaklar	5
Tablo 2.2. 2025 yılı dünyada enerji kaynağına göre maliyet/enerji.....	6
Tablo 2.3. Bazı ülkelerin 2024 yılı yenilenebilir enerji kapasitesi	9
Tablo 2.4. Bazı kıtaların 2024 yılı yenilenebilir enerji kapasitesi	9
Tablo 2.5. Türkiye'nin ve bazı komşularının 2025 yılı yenilenebilir enerji kapasitesi ..	10
Tablo 2.6. Türkiye'nin toplam güneş enerjisi potansiyelinin aylara göre dağılımı.....	17
Tablo 3.1. Türkiye'nin en büyük 10 güneş enerjisi santrali.....	37
Tablo 4.1. 2024 Mart-2025 Mart aralığında lisanslı elektrik enerjisi üretilen kaynakların kurulu güç değişim oranları	52
Tablo 4.2. Laboratuvar ortamında tespit edilen maksimum hücre verimlilikleri-2024 ..	67
Tablo 4.3. Monokristal, polikristal ve ince film güneş panellerinin ömür ve maliyeti...	74
Tablo 4.4. Monokristal ve perovskit teknolojilerinin ekonomik karşılaştırması	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması.....	4
Şekil 2.2. 2024 yılı küresel enerji talep artışının karşılandığı kaynaklar.....	8
Şekil 2.3. Yıllar içerisinde Türkiye'nin biyoenerji grafiği.....	12
Şekil 2.4. Füzyon tepkimesiyle helyum ve enerji oluşumu	13
Şekil 2.5. Dünya yüzeyindeki yıllık ortalama güneş radyasyonunun dağılımı	15
Şekil 2.6. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası.....	16
Şekil 2.7. Türkiye toplam elektrik üretimi ve güneş enerjisi santrallerinin üretimdeki paylarının yılları içerisindeki değişimi	18
Şekil 3.1. Zenith açısı	24
Şekil 3.2. Enerji bandı diyagramı	24
Şekil 3.3. Soldan sağa iletken, yarıiletken ve yalıtkanlar için bant aralığı şeması	25
Şekil 3.4. N Tipi ve P Tipi yarı iletkenlerin yapısı	26
Şekil 3.5. Kristal silikon PV hücrenin yaklaşık QE eğrisi.....	27
Şekil 3.6. Güneş enerjisi teknolojileri.....	29
Şekil 3.7. Standart bir ısıt güneş kolektörü.....	30
Şekil 3.8. Düz plakalı PV/T sistem.....	31
Şekil 3.9. Tipik hava soğutmalı PV/T sistemlerin şematik kesiti	32
Şekil 3.10. Deneyisel bir yoğunlaştırıcı PV/T şeması	32
Şekil 3.11. Geleneksel güneş paneli yapısı	34
Şekil 3.12. Türkiye'de panel üretimi gerçekleştiren fabrikalardan üretim prosesi sırasında çekilmiş fotoğraflar.....	38
Şekil 3.13. SOLTEN I ve SOLTEN II, İspanya	39
Şekil 4.1. 2023 yılında dünyada PV panel üretiminde kullanılan teknolojilerin kıyaslanması.....	40
Şekil 4.2. Monokristal ve polikristal güneş panelleri	41
Şekil 4.3. Monokristal PV panel üretim süreci	42
Şekil 4.4. Czochralski yöntemi ile silikon kütük oluşumu	43
Şekil 4.5. Czochralski yöntemi ile oluşturulmuş bir silikon kütük.....	43
Şekil 4.6. Güneş hücresinden modül, panel ve dizi oluşumu	44
Şekil 4.7. Güneş panelinin yapısı.....	47

Şekil 4.8. İnce film güneş paneli.....	48
Şekil 4.9. Döndürerek kaplama ile organik film eldesi	49
Şekil 4.10. Perovskit hücre katmanları	50
Şekil 4.11. Buhar biriktirme yöntemi ile perovskit film üretimi	51
Şekil 4.12. Türkiye 2025 Mart Ayı Lisanssız Elektrik Üretiminde Kullanılan Kaynaklar	52
Şekil 4.13. Çift yüzölçü panel diyagramı	54
Şekil 4.14. Sabit açılı güneş panelleri, İsviçre	55
Şekil 4.15. Tek eksenli panel	56
Şekil 4.16. Çift eksenli güneş paneli.....	56
Şekil 4.17. Bazı PV panel teknolojileri.....	57
Şekil 4.18. Fotovoltaik sistemlerin gruplandırılması.....	58
Şekil 4.19. Off-grid sistem şeması.....	59
Şekil 4.20. On-grid sistem şeması	59
Şekil 4.21. Zemine monteli tarımsal PV sistem.....	60
Şekil 4.22. Bir çatıya sonradan monte edilmiş paneller	61
Şekil 4.23. Dış yüzeyine PV panel entegre edilmiş bir yapı.....	61
Şekil 4.24. Balkon korkuluğu olarak PV panel.....	62
Şekil 4.25. Çatıya entegre PV panel uygulaması, Stockholm.....	62
Şekil 4.26. Avrupa’da kurulu entegre PV sistem kapasitesi	63
Şekil 4.27. Uluslararası Uzay İstasyonu PV panelleri	64
Şekil 4.28. Giyilebilir PV sistem	65
Şekil 4.29. Widya Wahana V model güneş enerjili yarış arabası	65
Şekil 4.30. PV panellerde yıllık performans kaybı oranları.....	68
Şekil 4.31. Çok katmanlı hücre şeması.....	69
Şekil 4.32. Güneş panellerini manuel olarak temizleyen bir işçi.....	71
Şekil 4.33. Bir su püskürtmeli temizlik sistemi	71
Şekil 4.34. Modüler temizlik robotu	72
Şekil 4.35. Dron ile panel temizliği	73
Şekil 4.36. Monokristal panel teknolojileri için LCOE değerleri.....	75
Şekil 4.37. Farklı panel tiplerinin yaklaşık enerji geri dönüşüm oranları.....	76
Şekil 4.38. Çok katmanlı perovskit güneş pili	79
Şekil 4.39. Yüzer güneş santrali.....	80
Şekil 4.40. Çin’de konumlanan bir yüzer GES.....	81

Şekil 4.41. Fresnel lensli CPV sistemi.....	81
Şekil 4.42. Çin’de konumlanan bir agrivoltaik tarım tesisi	82



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

E	: Foton enerjisi
h	: Planck sabiti
v	: Dalga frekansı
λ	: Dalga boyu
AM	: Air mass veya Hava kütlesi
θ_z	: Zenith açısı
QE	: Kuantum verimliliği
q	: Elektron yükü sabiti
A	: Alan
F(λ)	: Dalga boyuna bağlı foton akısı yoğunluğunu
I_{sc}	: Maksimum elektrik akımı
V_{oc}	: Maksimum devre voltajı
W_{PV}	: Fotovoltaik hücre gücü
A_{PV}	: Toplam yüzey alanı
FF	: Fill factor
η_s	: Güneş hücresi verimi
P_{in}	: Hücreye ulaşan toplam ışık gücü
CdTe	: Kadmiyum tellür
H₂	: Hidrojen
CO₂	: CO ₂ Karbon dioksit
Si	: Silisyum
HCl	: Hidrojen klorür
SiCl₄	: Silisyum tetraklorür
GaAs	: Galyum arsenür
MW	: Megawatt

Kısaltmalar

OECD	:Ekonomik Kalkınma ve İş Birliği Örgütü
LCOE	:Birime İndirgenmiş Elektrik Üretim Maliyeti
DSİ	:Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü
BP	:British Petrol
IEA	:International Energy Agency
MMO	:Makine Mühendisleri Odası
GES	:Güneş Enerjisi Santrali
EVA	:Etilen Vinil Asetat
EPDK	:Enerji piyasası düzenleme kurulu
YZ	:Yapay zekâ

1 GİRİŞ

Fosil yakıtlardan enerji elde etmek, çevresel zorluklara ilaveten kaynakların sınırlı olması ve gerekli kaynaklara sahip olmayan ulusların ekonomide dışa bağımlılığın artması gibi güçlükler de yaratmaktadır. Bu tür yapısal zorluklar, birçok ülkeyi sürdürülebilir, yenilenebilir ve çevresel açıdan duyarlı çözüm arayışlarına yönlendirmiştir. Bu bağlamda güneş enerjisi, çevreyi en az zarar veren temiz enerji kaynaklarının başında gelmektedir. Günümüzde birçok ülke, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmak için güneş enerjisine yönelmiş ve yerli enerji üretimini teşvik edecek programlar hazırlamıştır. Gerek ulusal gerek küresel çapta güneş enerjisi santrallerine yapılan yatırımlar hızla yükselme eğilimindedir. Yıl içerisinde toplam 2 741 saat güneşlenen ve yıl genelinde toplam 1 527 kWh değerinde güneş enerjisi alan Türkiye'nin yerli temiz enerji üretiminde güneş enerjisinin potansiyeli son derece önemlidir. (Saidur vd., 2011; Sağlam, 2022)

Güneş enerjisinden elde edilen verimin artırılmasına yönelik çalışmaların günden güne ivme kazanmaktadır. Araştırmalar, güneş enerjisinin gelişmekte olan ülkelerin ülke ekonomisine katkı yapabilecek önemli bir araç olduğunu göstermektedir. Farklı yenilenebilir enerji kaynakları arasında erişilebilirlikten kapasiteye, maliyet dengesinden verimliliğe pek çok alanda üstün olması sebebiyle güneş enerjisi gelecekteki enerji ihtiyacına yanıt vermek için en iyi alternatiflerdendir. British Petrol Energy 2024 araştırmasına göre, dünya genelinde karbon salınımını azaltmaya ve yenilenebilir enerji üretimini arttırmaya yönelik yatırımlar 2019 yılından 2023 yılına kadar neredeyse %50 artarak 1,9 trilyon dolara dayanmıştır. Söz konusu yatırımın önemli bir bölümü rüzgâr ve güneş enerjisine ayrılarak 2019-2023 yılları arasındaki rüzgâr ve güneş enerjisi üretimi yaklaşık 2 kat artış göstermiştir. Söz konusu yükselişe güneş enerjisi sektörü öncülük etmiş, üretim ve kurulum maliyetlerinin düşürülerek kâr marjının artırılması güneş enerjisine olan yatırımları arttırmıştır. Güneş enerjisi eldesinde kullanılan panellerin üretim maliyetleri son dört yıl içinde %60 kadar azalmıştır. Güneş enerjisine en çok yatırım yapan ülke Çin olurken gelişmekte olan ülkelerin bu alandaki yatırımları yüksek maliyetler sebebiyle düşük kalmıştır. (Kannan ve Vakeesan, 2016; BP, 2024)

1.1 Çalışmanın Amacı

Günümüzde teknolojik araç ve gereçlerin gündelik yaşamın her alanında yaygınlaşması, bu sistemlerin çalışması için gerekli enerji talebini önemli ölçüde artırmaktadır. Enerji

retiminin büyük oranda fosil kaynaklara dayalı olması, ülkeler üzerinde ekonomik, çevresel, iklimsel ve ekolojik açılardan olumsuz baskılar oluşturmaktadır. Bu baēlamda yenilenebilir enerjiye yönelik çalışmaların yakından takip edilmesi, bilimsel trendlerin izlenmesi ve uygulanması, maliyetlerin düşürülmesi ve sektörün büyüyerek yerli enerjiyle birlikte ülke ekonomisine katkıda bulunarak dışa baēımlılıēı azaltması açısından elzemdir. Bu çalışmada, güneş enerjisi santrallerinde verimliliēi artırmaya yönelik en güncel yöntemler literatürdeki çalışmalar doērultusunda incelenmiş ve derleme şeklinde sunulmuştur. Gelişmiş ülkelerde artan yatırım ve Ar-Ge faaliyetlerinin analiziyle, yenilenebilir enerji alanındaki eēilimlere yön verecek öngörüler sunulması amaçlanmıştır.



2 GENEL BİLGİLER

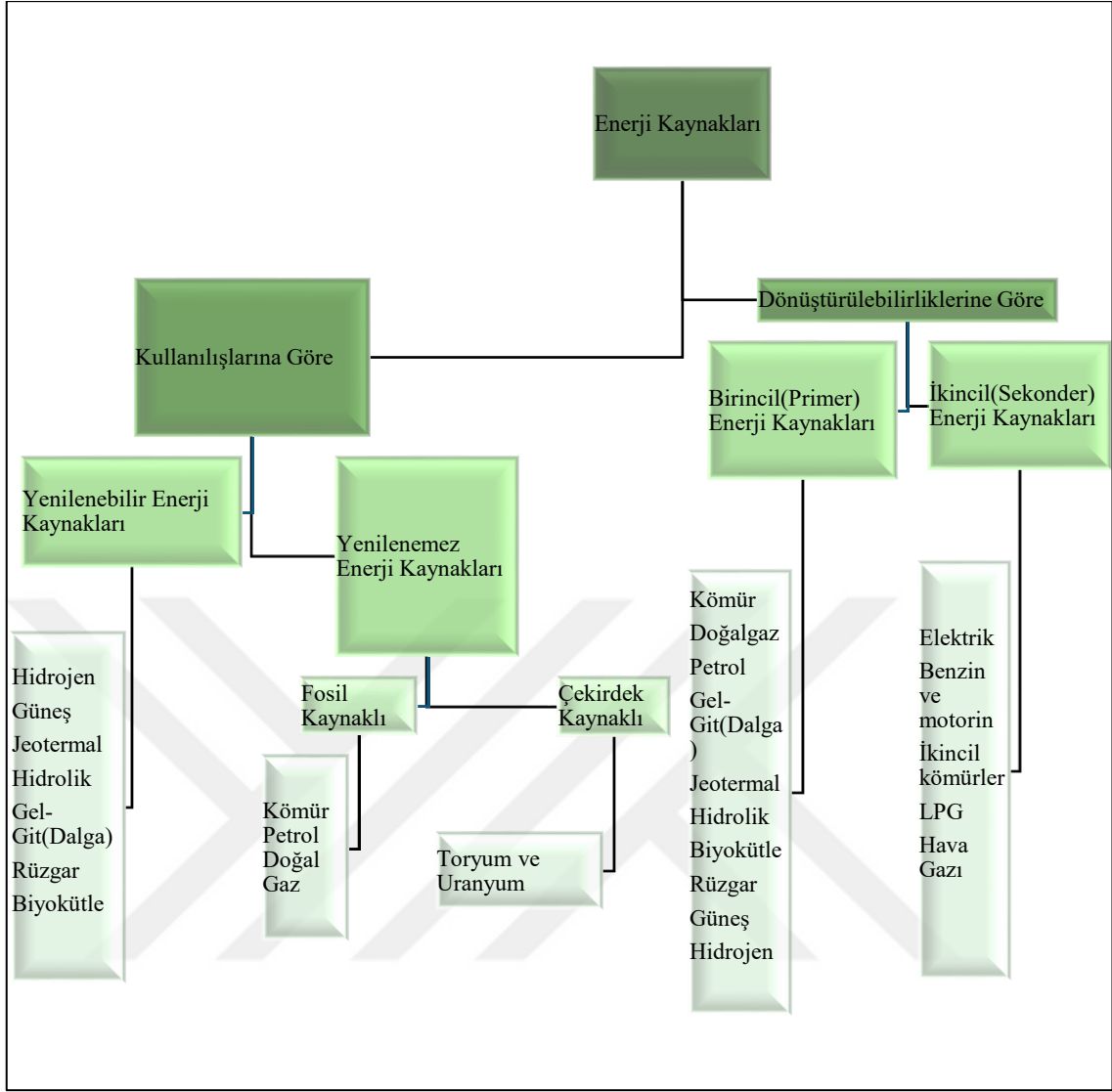
Bu bölümde, yenilenebilir enerjinin küresel ve ulusal ölçekte mevcut durumu, potansiyeli, önemi, avantajları ve dezavantajları özetlenmiştir. Devamında, güneş enerjisinin dünyadaki ve Türkiye'deki yeri incelenmiştir. Son olarak, tez konusuyla doğrudan ilişkili literatür çalışmaları derlenmiştir.

2.1 Yenilenebilir Enerji

Enerji hem sosyal hem de ekonomik açıdan bakıldığında ülkelerin gelişimindeki ve bireylerin yaşam standartlarındaki ilerlemeyi sağlayan temel unsurlardan biridir. Üretim sektörlerindeki büyük gelişim ve değişimlerin yanı sıra artan dünya nüfusu devamlı enerji ihtiyacına sebep olmaktadır. Günlük yaşamın hemen her saniyesini etkileyen enerji, geçmiş zamanlarda ağırlıklı olarak fosil yakıtlardan elde ediliyorken son yıllarda fosil yakıtların yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı için çalışmalar yürütülmektedir. (Koç vd., 2018; Koç ve Kaya, 2015).

Enerji kaynaklarının gruplandırılması Şekil 2.1'de sunulmuştur. Bu kaynaklar, temel olarak kullanım amaçlarına ve dönüştürülebilirlik özelliklerine göre iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Günümüzde en yaygın kullanıma sahip olan gruplandırma çeşidi enerji kaynaklarını kullandıktan sonra kaynakların tükenip tükenmediği dikkate alınarak yapılmaktadır. Söz konusu gruplandırma şekli; kullanıldıkça tükenmeyen, doğal bir devir süresince aynen kalabilen enerji kaynaklarını yenilenebilir olarak adlandırmaktadır. Kullanımı sonucunda tükenen ve kendini tekrar yenileme özelliği olmayan enerji kaynakları ise yenilenemez olarak nitelendirilmektedir (Koç vd., 2018; Koç ve Kaya, 2015).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının doğal yollar ile elde edilebilmesi, özel üretim proseslerine ihtiyaç duymaması ve enerji ihracatını azaltma potansiyeli taşıması en önemli özellikleri arasındadır. İlaveten, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerji çevre hasarı oluşturmamak amacıyla karbon salınım miktarını azaltma potansiyeline sahip olmasıyla da dünya genelinde yatırım toplamaktadır (Koç vd., 2018; Koç ve Kaya, 2015). Şekil 2.1'de enerji kaynaklarının sınıflandırılması yer almaktadır.



Şekil.2.1. Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması (Gross vd., 2003)

Şekil 2.1’deki sınıflandırmada enerji kaynakları dönüştürülebilirliklerine ve kullanışlarına göre olmak üzere ikiye ayrılmış ve güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarında yer almıştır.

Dünya genelinde hükümetler ve politik karar alıcılar, enerjiyle alakalı çevresel hasarın, özellikle karbondioksit salınımının azaltılması konusunda yenilenebilir enerji kaynaklarını önemli bir teknolojik hamle olarak görmekte ve yenilenebilir enerji kaynaklarına büyük güven duymaktadır. Pek çok OECD ülkesinin yenilenebilir enerji teknolojilerine yönelik iddialı hedefleri ve ayrıntılı planları bulunmaktadır. Avrupa Birliği’nde, ABD’de ve Çin’de yenilenebilir enerji kaynaklarıyla ilgili çalışmalara kayda değer politikalarla desteklenmektedir (Gross vd., 2003).

Yenilenebilir enerji alanındaki gelişmeleri ve potansiyeli anlamlandırabilmek için bu enerji kaynaklarının kullanılmasını sağlayan teknolojileri yakından takip etmek gerekmektedir. En hızlı gelişim gösteren ve en büyük potansiyele sahip yenilenebilir enerji teknolojileri arasında biyokütle, fotovoltaik (PV), rüzgâr türbinleri ve gelgit enerjisi sistemleri yer almaktadır (Gross vd., 2003).

2.1.1 Dünyada yenilenebilir enerji

Sürdürülebilir kalkınma hedefleri ve iklim değişikliği alanlarındaki küresel gündemler, son yıllarda önemli bir ivme kazanmıştır. Bu ivme, doğaya verilen zararın azaltılması ve ekonomik refahın sağlanması amacıyla dönüştürücü eylemlerin aciliyetine dair artan farkındalıkla doğrudan ilişkilidir. Doğal gaz, kömür ve petrol gibi fosil yakıt kökenli ürünlerin tüketilmesi küresel ısınmaya yol açan sera gazlarının doğaya salınmasına sebebiyet vermektedir. Küresel ısınma, yalnızca iklim değişikliğiyle sınırlı kalmayıp; su kaynaklarında bozulmalar, tarım arazilerinin verim kaybı gibi zincirleme sonuçlar doğurmaktadır. Bu yüzden, iklim değişikliğine karşı verilen mücadelede yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş, çevresel sorumluluk ve ekonomik kalkınma açısından kritik öncelikler haline gelmiştir. Bu bağlamda, Avrupa Yeşil Mutabakatı, Avrupa'nın 2050 yılına kadar iklime verilen hasarı nötrlemesini ve sera gazı salınımının net 0'a düşürülmesini hedeflemektedir (Solangi ve Magazzino, 2025).

Günümüzde, küresel çapta enerji üretmek için kullanılan sekiz büyük enerji kaynağı bulunmaktadır. Tablo 2.1'de, bu kaynakların toplam enerji üretimindeki payları büyüktten küçüğe doğru sıralanmaktadır. Diğer kategorisindeki enerji kaynakları arasında hidrojen, jeotermal, dalga, gelgit enerjisi ve elektrik enerjisine dönüştürülebilir atık yakıtlar bulunmaktadır.

Tablo 3.1. 2025 yılı dünyada enerji üretiminde kullanılan kaynaklar (Evrin Ağacı, 2025)

Enerji Kaynağı	Toplamdaki Payı (%)
Kömür	35,2
Doğalgaz	22,5
Hidroelektrik	14,3
Nükleer	9,1
Rüzgâr	7,8
Güneş/PV	5,5
Petrol	2,7
Biyoyakıt	2,3
Diğer	0,3

Tablo 2.1’de küresel enerji arzının büyük ölçüde kömür, doğal gaz ve hidroelektrik ile sağlandığı anlaşılmaktadır. Fotovoltaik sistemlerin katkısı %5,5’te kalmıştır.

Enerji üretiminde kullanılan kaynaklar, toplam üretim içindeki payları yerine Enerji Yoğunluğu olarak tanımlanan ve MJ/kg birimiyle gösterilen, enerji üretiminde kullanılan kaynağın birim kütle veya birim hacim başına üretebileceği enerji miktarına göre sıralayacak olursak nükleer enerji ilk sıraya yükselmektedir. Zira yalnızca bir kilogram uranyum-235 elementi ile pratikte 3 900 000 kJ enerji üretilebilmektedir (Evrin Ağacı, 2025).

Enerji kaynakları arasındaki kıyaslama, mevcutta var olan miktar ve sürdürülebilirlik açısından tartışıldığında ise rüzgâr, güneş ve hidroelektrik ilk üç sıraya yerleşmektedir. Karada bulunan uranyum miktarının tamamı nükleer enerji olarak kullanılırsa, teorik olarak insanlığın birkaç yüz yıllık enerji tüketimini karşılayabilecek kadar enerji elde edilebilmektedir. Deniz ve okyanus zeminlerindeki uranyumu çıkartmak ve kullanmak maliyetli ve zahmetli olduğundan buralardaki uranyum kaynağı teorik hesaba katılmamaktadır. Yeni rezerv keşiflerinin gerçekleşmediği senaryolarda, sürdürülebilirlik açısından en zayıf kaynaklar kömür ve petroldür. Zira mevcutta keşfedilmiş kömür ve petrol kaynaklarının birkaç yüzyıl içerisinde tükeneceği öngörülmektedir (Evrin Ağacı, 2025).

Enerji kaynaklarının kıyaslanmasındaki bir diğer önemli faktör ise LCOE(Levelized cost of electricity) veya megawatt başına harcanan dolar olarak öne çıkmaktadır. Daha düşük LCOE değeri, yatırım başına daha yüksek enerji üretimini ifade eder. Evrin Ağacı tarafından yapılan çalışmada 2025 yılı dünyada enerji kaynağına göre birim enerji maliyeti aşağıdaki tablodaki gibi verilmiştir.

Tablo 3.2. 2025 yılı dünyada enerji kaynağına göre maliyet/enerji (Evrin Ağacı, 2025)

Enerji Kaynağı	LCOE(\$/MWh)
Kömür	60-100
Doğalgaz	40-100
Hidroelektrik	40-60
Nükleer	130-200
Rüzgâr	25-75
Güneş/PV	30-100
Petrol	115-230
Biyoyakıt	75-120

Tablo 2.2.'de de görülebileceği üzere, birim maliyet başına elde edilen enerji miktarı açısından en verimli kaynaklar başta rüzgâr ve güneş enerjisi olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Güneş panellerindeki hızlı gelişmeler sayesinde, yakın geçmişte LCOE değeri 90 ila 150 dolar iken günümüzde bu miktar 30 ila 100 dolar aralığına kadar düşürülmüştür. Güneş enerjisine olan yoğun ilgi ve yatırımlar devam ettiği sürece bu değerlerin yakın gelecekte 15-20 dolarlara kadar düşebileceği öngörülmektedir (Evrin Ağacı, 2025).

Güneş enerjisi, düşük su tüketimi sayesinde en çevreci enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Güneş enerjisinden enerji üretilirken 1 MWh enerji üretimi için yalnızca 10 litre su tüketilmektedir. Panel yüzeylerinin temizliğinin sağlanabilmesi için su tüketimine gereksinim duyulmaktadır. Kömür ve petrol için ise bu değer 1 MWh başına 2 000 litre gibi oldukça yüksek ve çevresel açıdan sorunlu bir seviyededir (Evrin Ağacı, 2025).

Yapılan araştırmalar, 2022 yılında dünyanın birincil enerji talebini karşılayan kaynaklar arasında yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel enerji talebindeki payının %10'un biraz üzerinde kaldığını ortaya koymaktadır. Buna karşılık fosil yakıtlardan elde edilen birincil enerji ise yaklaşık %85'tir. Ancak en hızlı büyüyen birincil enerji kaynağı yenilenebilir enerjidir. Güneş, rüzgâr, biyokütle ve jeotermal kaynaklı enerji tüketiminin 2050 yılına gelindiğinde iki ila üç kat artış göstereceği analiz edilmektedir. Birincil enerji kaynakları arasındaki en büyük tüketim düşüşü oranı kömürde görülmektedir. 2050 yılında kömür tüketiminin bugüne oranla en az %35 en fazla %85 oranında azalacağı öngörülmektedir. Petrol kaynaklı enerji tüketiminin payı 2022 yılında tüketilen toplam enerjinin yaklaşık %33'üne denk gelirken 2050 yılı itibarıyla bu oranın %25 ila %10'a kadar gerileyebileceği sonucuna ulaşılmıştır (BP, 2024). Şekil 2.2'de 2024 yılında gerçekleşen enerji talep artışının karşılandığı kaynaklar pasta grafik olarak verilmiştir.



■ Kömür ■ Yenilenebilir Enerji ■ Petrol Ürünleri ■ Doğalgaz ■ Nükleer

Şekil 3.2. 2024 yılı küresel enerji talep artışının karşılandığı kaynaklar (IEA, 2025)

Şekil 2.2’de görülebileceği üzere, enerji talebinde gerçekleşen artışın büyük bir bölümü yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılanırken en küçük pay nükleer enerjinin olmuştur.

Dünyada en fazla sera gazı salınımı yapan ve en hızlı büyüyen ekonomiye sahip olan Çin, tüm vatandaşlarının ekonomik, sürdürülebilir, güvenilir ve modern enerjiye erişimini sağlayacak politikalar üretmeyi amaçlamaktadır. Hızlı sanayileşme ve hızlı ekonomik büyüme Çin’in fosil yakıtları yüksek miktarlarda ve hızlı tüketmesine sebep olmuştur. Çin Halk Cumhuriyeti, karbon salınımını 2030 yılında zirveye ulaştıracağını ancak 2060 yılına kadar karbon nötr konuma geleceğini açıklamıştır. Çin’in resmi Ulusal Yenilenebilir Enerji Gelişim Planı kapsamında ülkenin enerji tüketiminde yenilenemeyen enerji kaynaklarının azaltılmasına yönelik açık hedefler sunulmaktadır. Söz konusu politikalar ve teşvikler Çin’in güneş ve rüzgâr enerjileri kapasitesi açısından dünya liderliğine yükselmesinde önemli rol oynamıştır. (Solangi ve Magazzino, 2025).

Amerika Birleşik Devletleri’nde yenilenebilir enerji politikaları ve uygulamaları eyaletler arasında farklılık göstermektedir. Çoğu ABD eyaleti; vergi teşviklerinden hibelere, üretim teşviklerinden kredilere kadar pek çok ekonomik enstrümanla yenilenebilir enerjiye yatırımı desteklemektedir. Ülke genelinde yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretimini resmi programına dahil eden ilk eyalet 1983 yılında Iowa olmuştur. 2000’li yılların başından itibaren pek çok eyalet yönetimi, kamuya elektrik sağlamakla mükellef şirketlere, kamunun tüketeceği elektriğin bir kısmının yenilenebilir enerji ile üretilmesi için zorunlu hedefler koymuştur. Örneğin, söz konusu hedeflerden biri 2025 yılında Oregon eyaletindeki büyük ölçekli elektrik şirketleri tarafından tedarik edilen elektriğin %25’inin yenilenebilir kaynaklardan sağlama zorunluluğudur (Idoko vd., 2024).

2015 yılından 2024 yılına gelindiğinde dünya genelinde yenilenebilir enerji kapasitesi yaklaşık 9 kat artış göstermiştir. 2024 yılı verilerine göre, dünya genelinde yenilenebilir enerji kapasitesi toplam 585 GW artarak rekor kırmıştır. Aynı yıl içerisinde yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik miktarı %15,1 artmıştır. Söz konusu oranın elde edilmesinde güneş ve rüzgâr enerjilerinin payı %92,5 olarak tespit edilmiştir. Yenilenebilir enerji kapasitesinin küresel dağılımında eşitsizlik geçmiş yıllarda olduğu gibi devam etmiştir. Çin, ABD ve AB’de 2024 yılında devreye aldığı yenilenebilir enerjisi kapasitesi, dünya genelinde faaliyete geçen kapasitenin %86,3’ünü oluşturmaktadır. Afrika kıtasında kurulan tesislerin oranı dünya geneli ile kıyaslandığında %1’in altında kalmaktadır. Asya kıtasında Çin ve Hindistan’ın başını çektiği yenilenebilir enerji kapasitesi, Avrupa kıtasında Almanya ve İspanya’nın başını çektiği yenilenebilir enerji kapasitesinin yaklaşık 4 katı fazladır. Kanada ve Amerika Birleşik Devletleri’nin toplam yenilenebilir enerji kapasitesi, Çin’in sahip olduğu yenilenebilir enerji kapasitesinin %25’i düzeyindedir. (IRENA, 2025). Tablo 2.3’te bazı ülkelerin 2024 yılı yenilenebilir enerji kapasitesi görülmektedir.

Tablo 3.3. Bazı ülkelerin 2024 yılı yenilenebilir enerji kapasitesi (IRENA, 2025)

Ülke	Yenilenebilir Enerji Kapasitesi (MW)
Çin	1 827 270
Abd	428 405
Kanada	110 470
Brezilya	213 857
Hindistan	204 292
Almanya	178 655
Japonya	132 317

Tablo 2.3’teki veriler, küresel ölçekte yenilenebilir enerji kapasitesinde Çin’in hegemonyasına işaret etmektedir. Brezilya ve Hindistan’ın Almanya’dan daha yüksek kapasitelere sahip olması dikkat çekicidir. Tablo 2.4’te ise 2024 yılı yenilenebilir enerji kapasiteleri kıtalar bazında karşılaştırılmaktadır.

Tablo 3.4. Bazı kıtaların 2024 yılı yenilenebilir enerji kapasitesi (IRENA, 2025)

Kıta	Yenilenebilir Enerji Kapasitesi (MW)
Asya	2 382 468
Avrupa	848 627
Kuzey Amerika	573 005
Güney Amerika	313 162
Okyanusya	73 777

Tablo 2.4’e göre, Asya kıtasındaki yenilenebilir enerji kapasitesi Avrupa ve Kuzey Amerika’daki kapasitelerin toplamından daha yüksektir. Kuzey Amerika kıtasındaki yenilenebilir enerji kapasitesine en çok katkı veren ülkeler ABD ve Kanada’dır.

2.1.2 Türkiye’de yenilenebilir enerji

Asya ve Avrupa kıtalarını birbirine bağlayan bir coğrafi konuma sahip olan Türkiye, pek çok yenilenebilir enerji kaynağı açısından önemli ölçüde yenilenebilir enerji potansiyeline sahiptir. Dünya genelindeki jeotermal enerji potansiyelinin yaklaşık %8’ine sahip olan Türkiye, coğrafi konumu itibarıyla da yüksek düzeyde güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Ayrıca Türkiye, sahip olduğu yer şekilleri nedeniyle rüzgâr enerjisi ve hidrolik enerji potansiyeli açısından da son derece önemli bir konuma sahiptir. (Koç vd., 2018).

Türkiye, toplam yenilenebilir enerji kapasitesi miktarı açısından 2015-2024 yılları arasında %100’den fazla bir artış göstermiş olmakla birlikte, 2024 yılı itibarıyla Rusya’nın da önüne geçerek Avrasya bölgesinde en çok yenilenebilir enerji kapasitesine sahip olan ülke konumuna gelmiştir. 68 984 MW kapasite ile Avrasya’nın toplam 130 624 MW olan kapasitesinin yarısından fazlası Türkiye’de bulunmaktadır (IRENA, 2025). Tablo 2.5 Türkiye’nin ve bazı komşularının yenilenebilir enerji kapasitesini göstermektedir.

Tablo 3.5. Türkiye’nin ve bazı komşularının 2025 yılı yenilenebilir enerji kapasitesi (IRENA, 2025)

Ülke	Yenilenebilir Enerji Kapasitesi (MW)
Türkiye	68 984
Rusya	54 433
Yunanistan	18 231
Bulgaristan	7 177
Avrupa Birliği Toplamı (27 ülke)	703 417

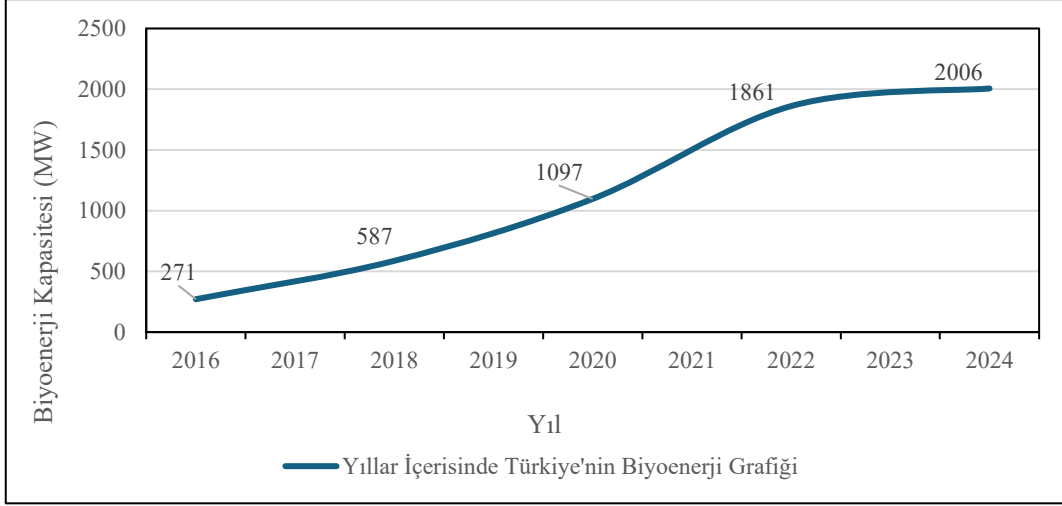
Tablo 2.5’e göre Türkiye, komşuları arasında en yüksek yenilenebilir enerji kapasitesine sahip ülkedir.

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü faaliyet raporlarına göre, Türkiye’nin toplam teorik hidroelektrik üretimi potansiyeli yıllık 433 milyar kWh/yıldır. Belirtilen enerji potansiyeli Avrupa potansiyelinin neredeyse beşte birine denk gelmektedir. Dünya potansiyelinin ise yaklaşık %2’si kadardır (DSİ, 2024).

Gerek elektrik enerjisi üretimi gerekse ısınma amacıyla kullanılabilen jeotermal enerji açısından yapılan atılımlar ile Türkiye 2005-2014 yılları arasında kurulu jeotermal enerji gücünü neredeyse 20 kat jeotermal enerjiden en çok yararlanan ülkelerden biri olmuştur. Türkiye'nin, elektrik üretimi noktasında kullanılmaya müsait jeotermal enerji potansiyeli olan 610 MW düzeyindeki enerjinin tamamından faydalanabilmesi amaçlanmaktadır (Koç vd., 2018).

Türkiye, Avrupa kıtası ile kıyaslandığında İspanya haricindeki tüm ülkelerden daha yüksek bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Türkiye, 2017 yılına kadar bu potansiyeli yeteri kadar değerlendirememiştir. Ülkemiz, 2016-2017 yılları arasındaki artışla birlikte kapasitesini bir yılda 834 MW seviyesinden 3 422 MW seviyesine yükseltmiştir. Türkiye, 2024 yılına gelindiğinde 19883 MW ile son on yıldaki kapasitesini yaklaşık 24 katına çıkartmıştır. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli en yüksek olan coğrafi bölgeleri Güneydoğu Anadolu ve Akdeniz olurken en düşük güneş enerjisi potansiyeline sahip bölge Karadeniz bölgesidir (Koç vd., 2018; IRENA, 2025).

Uzun yıllarda doğal olarak yenilenebilen gerek toprakta gerekse suda dış müdahale olmaksızın var olabilen veya tarım araçlarıyla yetiştirilebilen bitkiler, hayvancılık faaliyetleri ile ortaya çıkan atıklar, besin ve orman endüstrilerinin oluşturduğu bu atıklar biyokütle kapsamında değerlendirilmektedir. Biyokütle kullanılarak elde edilen yakıtlar, araç yakıtı olarak kullanılabilecekleri gibi ısınma amaçlı da kullanılabilmektedir. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre Türkiye'nin 2024 yılı ekonomik biyokütle enerji potansiyeli yaklaşık 3,9 milyon ton eşdeğer petrol (MTEP) olarak belirlenmiştir. 3,9 MTEP büyüklüğündeki ekonomik enerji eşdeğerinin yaklaşık 1,5 MTEP düzeyindeki kısmı bitkisel atıklardan elde edilmektedir (Koç vd., 2018; Sayın vd., 2022; ETKB, 2024b). Şekil 2.3 Türkiye'nin biyoenerji kapasitesindeki değişimi yıllık bazda göstermektedir.



Şekil 3.3. Yıllar içerisinde Türkiye'nin biyoenjerji grafiği (Sayın vd., 2022)

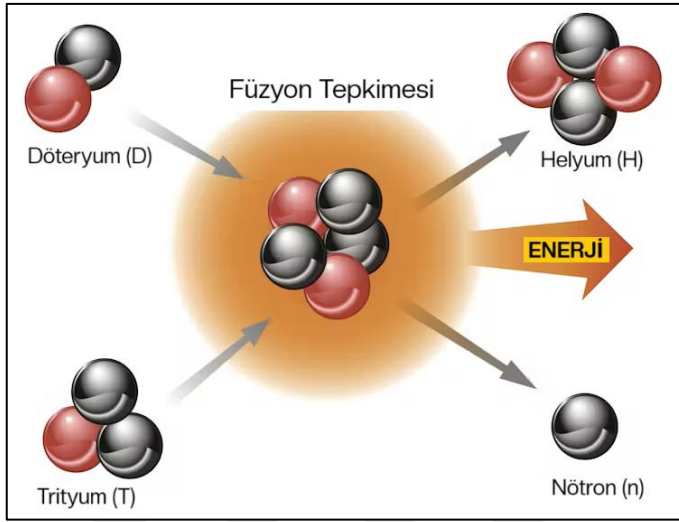
Şekil 2.3'e göre Türkiye'nin biyoenjerji kapasitesi 2016 yılından itibaren yükselmekte olup 2020-2021 yılları arasında ivme kazanmıştır.

Türkiye'de en çok kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarının başında rüzgâr enerjisi gelmektedir. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği'nin 2025 Ocak tarihli raporuna göre, Türkiye'nin 2024 yılındaki rüzgâr enerjisi kapasitesi 12 973 MW düzeyinden 14 000 MW düzeyine yükselmiştir. Rüzgâr enerjisi kapasitesindeki bu önemli artışın yanı sıra 2024 yılında ülke genelinde üretilen elektriğin yaklaşık %11,5'i rüzgâr enerjisinden elde edilmiştir. Türkiye'nin bölgeleri rüzgâr enerjisi kurulu gücü açısından kıyaslandığında en yüksek kurulu güce sahip olan yaklaşık 1 980 MW ile İzmir kentidir. Türkiye, rüzgâr enerjisi kapasitesi bakımından Yunanistan, İtalya ve Rusya da dahil olmak üzere komşu ülkelerle kıyaslandığında son derece yüksek bir kapasiteye sahip olmasına rağmen 2025 Ocak itibarıyla kendi potansiyelinin yaklaşık olarak dörtte birini kullanabilmektedir (Koç vd., 2018; IRENA, 2025; TÜREB TWEA, 2025).

2.2 Güneş Enerjisi

Sıcaklığı merkezinde 20 milyon dereceye kadar ulaşabilen güneş, hidrojen ve helyum gazlarından meydana gelmektedir. Güneşin yüzey sıcaklığı yaklaşık 6 000 derecedir. Böylesine yüksek bir sıcaklığın etkisiyle elektronlar atom çekirdeklerinden sürekli ayrılmaktadırlar. Bu nedenle güneşte atomlar ve moleküller bulunmamakta ve güneş, elektron ve atom çekirdeklerinden oluşmaktadır. Elektron ve atom çekirdeklerinin oluşturduğu karışım plazma olarak adlandırılmaktadır. Güneş merkezindeki yüksek sıcaklık sayesinde durmaksızın füzyon ismi verilen bir olay gerçekleşir ve bu olay sonucunda dört hidrojen çekirdeği bir araya gelerek bir helyum çekirdeği oluşturur.

Güneşin merkezinde gerçekleşen füzyon olayı ile saniyede 564 milyon ton hidrojenin 560 milyon ton helyuma dönüştüğü hesaplanmaktadır. Her saniye ortaya çıkmakta olan bu 4 milyon tonluk fark ise ısı ve ışık enerjisi formunda uzayda yayılmaktadır. Söz konusu enerjinin milyarda biri, farklı dalga boylarına sahip ışınlar halinde yeryüzüne ulaşmaktadır. Güneşten dünyaya ulaşan enerji 15 dakika boyunca depolanabilmiş olsaydı, küresel ölçekte bir yılda tüketilen enerji eşit miktarda enerji elde edilebilirdi (Köşker, 2006). Şekil 2.4'te güneşte meydana gelen füzyon tepkimesi ile enerji oluşumunun şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 3.4. Füzyon tepkimesiyle helyum ve enerji oluşumu (Da Silva ve Wiltgen, 2024)

Şekil 2.4'te şematik olarak gösterilen füzyon tepkimesi sonucunda foton enerjisi açığa çıkmaktadır. Dünya yüzüne oluşan foton enerjisinden elektrik üretimi yapılabilmektedir.

Küresel ısınmanın ilerleyişine katkı sunmayan temiz enerji kaynaklarının başında gelen güneş, bir saniyelik zaman diliminde insanlık tarihinin başlangıcından bugüne kadar kullanmış olduğundan daha fazla enerji yayar. Gerek üretimi gerekse kullanımıyla çevreye zarar vermeyen ve sakıncaları minimize eden verimli bir enerji kaynağına ulaşmak toplumların refahını arttırmak açısından son derece kritiktir. Tükenebilir fosil yakıt miktarının günden güne azalması ile güneş enerjisine olan ilgi küresel ölçekte artmaktadır. (Solangi vd., 2011).

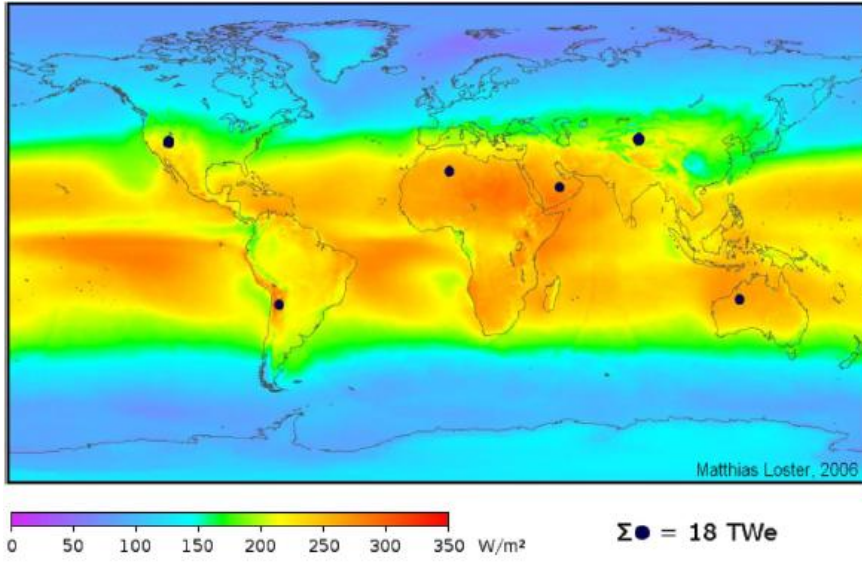
Dünya genelindeki rakamlar incelendiğinde 2024 yılı elektrik talebinin beşte ikisinden fazlası yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilmiştir ve bu oranın 1940'lı yıllardan beri ilk kez bu kadar yükseldiği görülmektedir. 2015-2024 yılları arasındaki süreçte dünya genelindeki güneş enerjisi kapasitesi yaklaşık olarak 8,2 katına çıkmıştır.

2024 yılı içerisinde küresel elektrik üretiminin oranı toplam elektrik üretimi oranı içerisinde %7'lik pay sahibi olmuştur. Tüm enerji kaynakları arasında güneş enerjisinin son 20 yıldır her yıl en hızlı büyüyen enerji kaynağı olmuştur. Güneş enerjisi üretimindeki hızlı büyümeye nükleer ve biyoenerji alanlarındaki gelişmeler de eklendiğinde temiz enerji kaynaklarının üretimindeki artış küresel elektrik talebindeki genişlemeden daha hızlı ilerlemektedir. Bu veriler ışığında fosil yakıt kaynaklı elektrik enerjisi üretimine gelecek yıllarda daha az ihtiyaç duyulacağı öngörülmektedir (IRENA, 2025; URL-10, 2025).

2.2.1 Dünyada güneş enerjisi kullanımı

BP ve IEA raporları doğrultusunda, 2050 yılına gelindiğinde rüzgâr ve güneş enerjisi kapasitelerinin en az 8 en çok 14 kat artış göstermesi beklenmektedir. Son yıllardaki kapasite artışında en büyük pay Çin'e aittir. ABD ve Avrupa Birliği ülkeleri gibi ekonomisi gelişkin ülkelerin de yatırımlarına hızla devam ettiği görülmektedir. Çin ve ekonomisi gelişmiş ülkelerin toplam kapasite artışındaki rolü %30 ila %45 aralığındadır. Teknolojik gelişmeler ile birlikte üretim maliyetlerinin daha ekonomik hale gelmesi güneş enerjisinin hızlı gelişimini desteklemektedir. Çin başta olmak üzere dünya genelinde panel verimliliklerinin yükselmektedir. Kapasite etkenleri ve proje büyüklükleri ile güneş enerjisinden faydalanmanın maliyeti düşmeye devam etmektedir. 2023 yılında fotovoltaik yöntemlerle güneş enerjisinden elde edilen elektrik miktarındaki artış %80'den dahi fazla büyüyerek rekor kırmıştır ve 425 Gigawatt seviyesine kadar yükselmiştir. Çin'deki üretim kapasitesinin süratli gelişimiyle birlikte 2022-2024 yılları arasında olan süreçte fotovoltaik modül üretimindeki maliyetler neredeyse yarı yarıya azalmıştır. 2023 yılında Dubai'de düzenlenen BM İklim Değişikliği Konferansı uyarınca 2030 yılına gelindiğinde küresel PV elektrik üretiminin tüm enerji kaynaklarıyla üretilen toplam elektrik miktarının %17'sine tekabül etmesi hedeflenmektedir (BP, 2024; IEA, 2024).

Dünya atmosferine ulaşan güneş enerjisinin yaklaşık %30'u yansımanın etkisiyle uzaya saçılmakta ve geriye kalan %70'lik kısmı elektrik enerjisi üretimi için kullanılabilir. Şekil 2.5. dünyaya ulaşan güneş radyasyonunun yıllık ortalama yoğunluğunu göstermekte olup, yapılan araştırmalar siyah nokta ile işaretlenmiş olan bölgelerde %8'lik bir dönüşüm verimine ulaşılması halinde küresel toplam birincil enerji talebinden daha fazlasını sağlayabileceğini göstermektedir.



Şekil 3.5. Dünya yüzeyindeki yıllık ortalama güneş radyasyonunun dağılımı (Kabir vd., 2016)

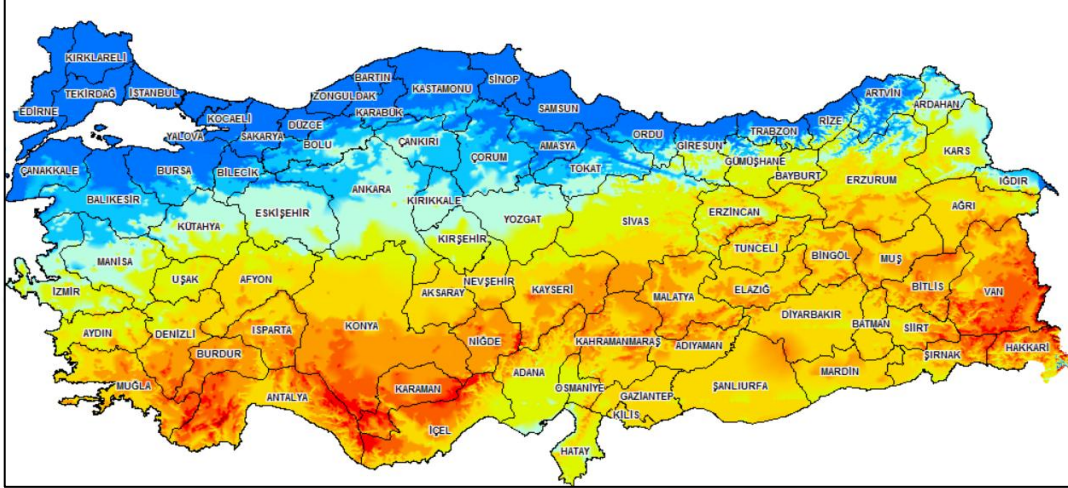
Avustralya, tüm kıtalar arasında metrekare başına en yüksek güneş radyasyonuna sahiptir ve dünyadaki en iyi güneş enerjisi kaynağına sahip olduğu tahmin edilmektedir. Avustralya kıtasında, 4-6 kWhm²'lik nispeten yüksek bir günlük güneş ışınlamı rapor edilmiştir. Kuzey ve Güney Afrika'nın çöllerinde, Amerika Birleşik Devletleri'nin güneybatısında, Meksika'ya komşu bölgelerde ve Güney Amerika açıklarındaki Pasifik kıyısının civarlarında da benzer seviyelerde güneş radyasyonu gözlemlenmiştir (Kabir vd., 2016).

Dünya genelindeki 10 ülke küresel PV piyasasının %74'ünü kontrol etmektedir. Dünya genelinde fotovoltaiik güneş enerjisi sistemleriyle üretilen elektriğin büyük çoğunluğu ev tipi çatı panellerinden ziyade ticari amaçla kurulan güneş enerjisi santrallerinden elde edilmektedir (URL-1, 2025).

2.2.2 Türkiye'de güneş enerjisi

Türkiye, sahip olduğu coğrafi konum sayesinde bugün güneş enerjisini en etkin kullanan diğer ulusal örneklerle karşılaştırıldığında daha yüksek potansiyele sahiptir. Ancak Türkiye sahip olduğu potansiyeli etkin bir şekilde kullanamamaktadır. Türkiye'de güneş enerjisinden maksimum verim elde edebilmek adına Yenilenebilir Enerji Müdürlüğü'nce 2014 yılında Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası isimli bir çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışma ışığında, Türkiye'nin yıl boyunca güneş aldığı toplam sürenin 2 700 saat

ve günlük ortalama güneşlenme süresinin 7,4 saat olduğu bilinmektedir. Türkiye’ye yatay düzlemde isabet eden güneş enerjisinin günlük ortalama 4,11 kWh/m² olduğu da yine aynı çalışmayla ortaya koyulmuştur (Yelkovan, 2016). Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası şekil 2.7’de görülmektedir.



Şekil 3.6. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası (Yelkovan, 2016)

Şekil 2.7 incelendiğinde Türkiye’de güneş enerjisi potansiyelinin en yüksek olduğu iller Van, Karaman, Antalya ve İçel olarak görülmektedir. Türkiye’nin kuzeyindeki illerde ise güneş enerjisi potansiyelinin son derece düşük olduğu anlaşılmaktadır.

Bir yılın 110 gününde güneş enerjisi elde etme potansiyeline sahip olan Türkiye, bu potansiyelden faydalanabilmek adına gerekli adımları attığı ve yatırımları yaptığı takdirde yılda metrekare başına 1 100 kWh miktarında güneş enerjisi üretimi gerçekleştirebilir. Türkiye’de güneş enerjisi potansiyeli en yüksek bölgeler sırasıyla Güneydoğu Anadolu Bölgesi ve Akdeniz Bölgesi’dir. Tablo 2.6’da Türkiye’nin aylara göre güneş enerjisi potansiyeli (kWh/m²) ve güneşlenme süresi(saat) değerleri görülmektedir (Varınca ve Gönüllü, 2006). Tablo 2.6’ya göre Türkiye güneş enerjisi potansiyelinin en yüksek olduğu zaman dilimi Temmuz ayı iken ülkemizin en az güneşlendiği ay ise Ocak ayıdır. Türkiye, bir yılda toplam 2 640 saat güneş almaktadır. Türkiye’nin aylık güneşlenme ortalaması 260 saattir.

Tablo 3.6. Türkiye'nin toplam güneş enerjisi potansiyelinin aylara göre dağılımı
(Varınca ve Gönüllü, 2006)

Aylar	Güneş Enerjisi Potansiyeli	Güneşlenme Süresi
Ocak	5 175	103
Şubat	6 327	115
Mart	9 665	165
Nisan	12 223	197
Mayıs	15 386	273
Haziran	16 875	325
Temmuz	17 538	365
Ağustos	15 840	343
Eylül	12 328	280
Ekim	8 990	214
Kasım	6 082	157
Aralık	4 687	103
Toplam	1 311	2 640
Ortalama	108	220

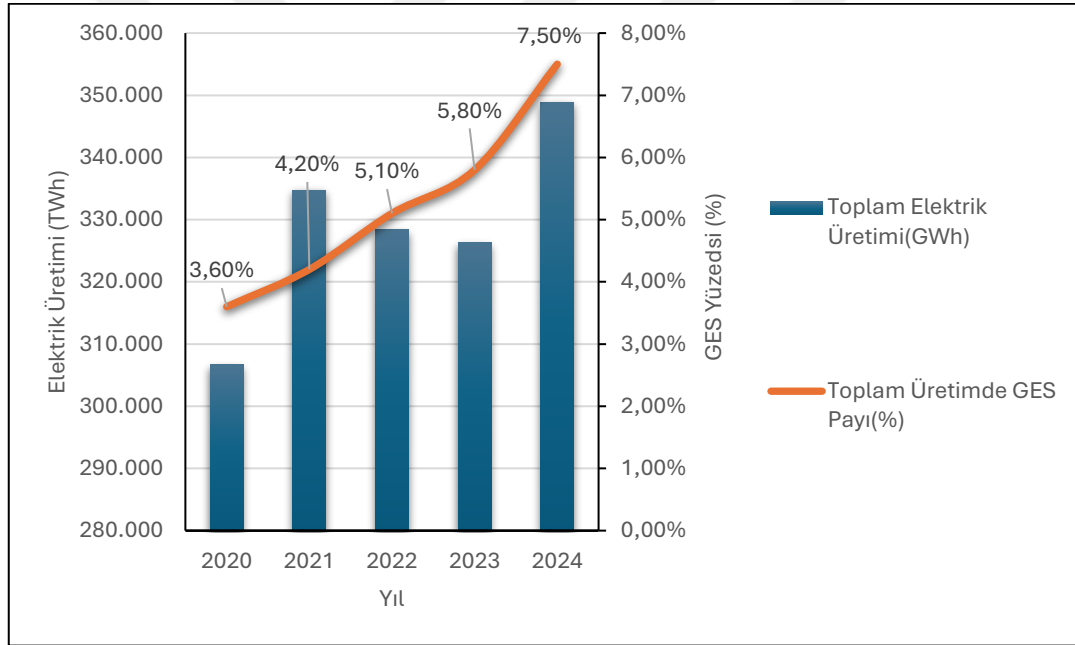
Türkiye'nin teorik olarak bir yılda 38×10^{10} kw/h güneş enerjisi üretebileceği bilinmektedir. Türkiye, elektrik üretiminde ilk kez 2014 yılında güneş enerjisinden faydalanılmıştır. Türkiye'de yaklaşık 50 MW lisanssız güneş enerjisi santrali faaliyet göstermektedir. Türkiye'de güneş enerjisinden faydalanmak için kullanılan en yaygın yöntem hane bazlı su ısıtma sistemleridir. Son dönemlerde, ısıtma desteğine sahip olan güneş enerjisi sistemlerinin kullanımı giderek artmaktadır. Türkiye'de ayrıca yüzme havuzları gibi tesislerde sıcak su ihtiyacının karşılanması, elektrik eldesi, tarımsal kurutma ve bina soğutması gibi alanlarda da güneş enerjisinden faydalanılmaktadır (Kılıç, 2015).

Türkiye, aktif büyük ölçekli ısı güneş enerjisi sistemleri sayısında Çin'in ardından ikinci sırada gelmektedir. Özellikle Akdeniz kıyıları ısı sistemleri açısından verimli ve kârlıdır. Türkiye, 2022 yılında İzmir'de faaliyete geçen MM Graphia güneş enerjili soğutma tesisiyle dünyanın en büyük tesisine sahip olmuştur. Türkiye toplam güneş enerjili ısı sistem kurulu gücü 19,1 GWth civarındadır. Makine Mühendisleri Odası'nın 2024 yılı enerji raporuna göre, 2023 yılında kurulmuş olan güneş enerjili termal sistemlerin sayısı 2020 yılındaki kurulum sayısına kıyasla yaklaşık %4'lük bir azalma kaydedilmiştir. Söz konusu düşüşün en büyük sebeplerinden biri doğal gaz alt yapısının kırsal bölgelerde de hızlı şekilde yaygınlaşmasıdır (MMO, 2024).

Türkiye'de şebekeye bağlı güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde edilen kurulu güç miktarı 2021 Aralık ayında 7 815,6 MW olurken 2023 yılına gelindiğinde 11 691 MWe'ya kadar artış göstermiştir. Fotovoltaik panellerle üretim yapan santrallerin üretim miktarı ise 2021 yılında ülke genelinde üretilen elektriğin yaklaşık olarak %4,2'sine tekabül

ederken 2023 yılında elde edilen veriler bu oranın yaklaşık %5,8'e geldiğini göstermektedir. Türkiye'de, 2021 yılında elektrik üretimi yapan 8 389 adet güneş enerjisi santrali olduğu raporlanırken 2023 yılına gelindiğinde santral sayısı 10 987'e yükselmiştir. Bu santrallerin büyük bölümü lisanssız güneş enerji sistemidir. Mevcut veriler değerlendirildiğinde bugün Türkiye güneş enerjisinden faydalanarak üretebileceği elektrik enerjisi potansiyelinin yalnızca %5'ini kullanabildiğini göstermektedir. Türkiye, potansiyelinin çok küçük bir kısmından faydalanmakta olmasına rağmen dünya genelinde güneş enerjisiyle en çok elektrik elde eden on dördüncü ülke konumunda yer almaktadır (MMO, 2024).

Güneşten elde edilen enerji miktar ve veriminin artırılması; Türkiye'nin dışa bağımlılığını azaltacak, istihdamı arttıracak, teknolojik gelişmelere öncü olacak ve bu alandaki bilimsel çalışmalara olan ilginin artmasını sağlayacaktır.



Şekil 3.7. Türkiye toplam elektrik üretimi ve güneş enerjisi santrallerinin üretimdeki paylarının yılları içerisindeki değişimi (MMO, 2024; ETKB, 2025)

2.3 Literatür Özetleri

Fotovoltaik etkinin tarihsel gelişimine ilişkin Lameirinhas ve arkadaşları (2022), derleme makalelerinde, fotovoltaik mekanizmasını gözlemleyen ilk fizikçinin 1839 yılında Alexandre Edmond Becquerel olduğunu söylemiştir. Fransız fizikçi, elektrokimyasal deneyler gerçekleştirirken platin ve gümüş elektrotların güneşe maruz kaldığında fotovoltaik etki oluştuğunu gözlemlemiştir. Fotovoltaik etkinin keşfinden 38 yıl sonra,

1877 yılında, ilk güneş pili tasarımı selenyum kullanılarak yapıldı ve bu güneş pilinin verimi yaklaşık %0,5 olarak tespit edilmiştir. Fotoelektrik kuramın ortaya konulması ise 1905 yılına denk gelmektedir. Kuramın sahibi Einstein, fotoelektrik kuramı oluştururken Max Planck'ın yapmış olduğu çalışmalar neticesinde kabul görmüş olan bazı kavramları temel almaktadır. Güneş pillerinde selenyum yerine silikon kullanılmaya başlanmasıyla çok daha yüksek verim oranları elde edilmiştir.

Literatürde güneş panellerinin verimini arttırmaya yönelik çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

Braga ve arkadaşları (2008), malzeme bilimi ışığında yaptıkları incelemelerle fotovoltaik teknolojiler için silikon üretimine ilişkin güncel süreçleri incelemiş güneş paneli silikonu üretiminin geleneksel süreçlere kıyasla %500 daha verimli olabileceğini göstermiştir.

Yu ve arkadaşları (2004), 3 kW'lık bir fotovoltaik elektrik üretimi sisteminin farklı ışıyım durumlarında verimliliğini arttırmaya yönelik çalışmalar yapmıştır. Çalışmada, yenilikçi bir kontrol algoritması ortaya konularak ışıyım yoğunluğunun %30'un altında kaldığı durumlarda ek donanım devresine ihtiyaç duymaksızın son derece sağlıklı çalışan bir PV sistem elde edilmiştir.

Atalay ve arkadaşları (2019), konut ve bina çatılarına uygulanan PV güneş panellerinin verimini incelemiş ve en önemli kriterlerin ışıyınların geliş açısı, panelin verimi ve gölgelenme süresi, ortam sıcaklığı ve panel yüzey tozlanması olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmada ayrıca bina çatılarına yerleştirilecek olan güneş pilleri için statik hesaplamaların inşaat aşamasında yapılarak panellerden doğacak ekstra ağırlığın bina omurgası ve bina çatısına zarar vermemesi gerektiği ifade edilmiştir. Çevre dostu bir uygulama olan çatı tipi güneş pillerinin 25-30 yıl kadar kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Di Sabatino ve arkadaşları (2024), silikon bazlı güneş pillerinin güncel durumu hakkında yaptıkları detaylı araştırmalarında silikon bloğu üretimi konusunda Czochralski yöntemi ile yönlendirilmiş katılaşma yöntemi arasında kıyaslama yaparak endüstriyel anlamda sektöre hâkim olan metodun Czochralski yöntemi olduğunu belirtmiştir. Çalışmanın devamında Topcon ve heterojunction(birden fazla yarı iletkenin birlikte kullanıldığı) güneş pili mimarileri incelenmiştir. Kusur mühendisliği gibi ön süreçlerin heterojunction güneş pili mimarisinde uygulanmasının verimi arttıracığına vurgu yapılmıştır.

Machín ve Márquez (2024), güncel piyasada en yaygın kullanılan güneş enerjisi paneli çeşitlerini tartıştıkları çalışmalarında, silikon bazlı güneş panellerinin enerji endüstrisine hâkim olduğunu ortaya koymuştur. Silikon güneş pili teknolojilerinin onlarca yıl süren araştırmalarla geldiği noktada verimlerinin ve kararlılıklarının son derece yüksek olduğuna vurgu yapılmaktadır. Güneş pili üretimindeki en yeni teknolojilerden biri olarak kabul edilen perovskit güneş panelleri diğer panel tiplerine kıyasla daha basit üretim proseslerine sahip olmasıyla öne çıkmakta ancak çevresel faktörler altında kararlılıklarının düşük olması sebebiyle zorluk yaratmaktadır. Perovskit güneş panellerinin bazı türlerinde kullanılan kurşun elementi de güneş enerjisinin çevre dostu olma özelliğine gölge düşürmektedir. Machín ve Márquez'in aynı çalışmada kıyasını yaptığı bir diğer teknoloji olan organik güneş pilleri ise kısa ömürlü olmaları ve verimliliklerinin düşük olmaları sebebiyle negatif bir görüntü çizse de üretim kolaylıkları ve ekonomik maliyetleri ile öne çıkmaktadır. Awasthi ve arkadaşları (2020), yaptıkları çalışmada farklı malzemelerle üretilen güneş enerjisi panellerini son yıllarda gittikçe yaygınlaşan çift eksenli güneş takip sistemlerinin verimini odağına alarak incelemektedir. Güneş takibini mümkün kılan sistemlerle ilgili mevcut gelişmelere geniş bir bakış sunan çalışma, çift eksenli güneş takipli sistemlerin sabit tek eksenli sistemlere nazaran genellikle daha yüksek verime sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, çift eksenli sistemlerde kullanılan döner mekanizmaların düzenli bakıma ihtiyaç duyulması ve çift eksenli sistemlerin daha karmaşık tasarım süreçlerine sahip olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada, güneş enerjisi santrallerinde performansın pek çok faktöre bağlı olduğu belirtilerek takip sisteminin kullanılıp kullanılmayacağının tüm faktörlerle birlikte değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Güneş enerjisi teknolojilerinin çevresel etkileri ve küresel ölçekteki durumu hakkındaki literatür çalışmalarına göre: Kabir ve arkadaşları (2016), güneş enerjisi teknolojilerinin küresel ölçekte yaygın kullanılan teknolojiler haline gelerek milyarlarca dolar yatırım toplamayı başardığına dikkat çekmiştir. Çalışmaya göre günümüzde gerek gelişmiş gerekse gelişmekte olan ülkelerde yeni güneş enerjisi santralleri inşa edilmesine ilişkin pek çok proje ve kurulum süreci devam etmektedir. PV panel teknolojilerinin güneş enerjisinden faydalanma yolundaki birincil kaynak olmaya devam edeceği ifade edilmiştir. Bu derleme makalede güneş enerjisi teknolojilerinin avantajları, limitleri, faydaları ve gelecekteki potansiyeli incelenerek güneş enerjisinin dünya genelindeki enerji talebini karşılamak adına en çok umut vadeden yenilenebilir enerji kaynakları arasında olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Tsoutsos ve arkadaşları (2005), güneş enerjisi sistemlerinin çevresel etkilerini tartıştıkları

çalışmada güneş enerjisinin fosil temelli geleneksel enerji kaynaklarıyla kıyaslandığında devasa çevresel avantajları sunduğu ifade edilmektedir. Özellikle sınırlı doğal kaynakların tüketilmemesi ile birlikte emisyonun ve atıkların neredeyse sıfır olması da güneş enerjisi sistemlerini kullanmanın avantajlarından. Güneş enerjisinden ısı ve elektrik eldesi için kullanılan çeşitli sistemler sosyoekonomik açıdan yeni istihdam alanları yaratmasıyla da öne çıkmaktadır. Yakıt ithalatını azaltması, merkezi şebekelere uzak kalan kırsal kesimlerin elektrik ve ısı enerjisine bağımsız şekilde ulaşabilmeleri, enerji arzında güvenliğin artması gibi avantajlar da güneş enerjisi sistemlerinin popülerliğini arttırmaktadır.

Literatürde, sektöre hâkim durumdaki silikon panellere yönelik yapılan çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

Parida ve arkadaşları (2011), bir PV (fotovoltaik) elektrik üretim sisteminin çoğu durumda kamuya bağlı şebekelerden oluştuğunu ve elektriksel ve mekanik bağlantıların yanı sıra montaj ekipmanları ve elektrik çıkışını istenen kriterlere göre ayarlayan araçlar gibi bir dizi araçtan oluştuğunu açıklamıştır. Söz konusu çalışmada hibrit PV sistemlerle elektrik üretiminin yanında ışık emici PV panel çeşitleri de incelenmiştir. Hibrit PV sistemlerle elektrik eldesi yapılırken, PV panellerin genellikle dizel yakıt kullanan bir jeneratör veya rüzgâr türbini gibi farklı sistemler eşlik etmektedir. Bu sayede, fosil yakıt tüketimini azaltılması hedeflendiği ifade edilmiştir. Farklı bir enerji kaynağıyla birlikte kullanılmayan ve güneş enerjisinden doğrudan elektrik enerjisi üretme yeteneğine sahip olan güneş panellerinin ise tamamı temel olarak güneş ışığındaki fotonları soğurarak serbest elektron elde etme prensibine dayalı olarak çalışmaktadır. Bu yüzden PV panellerin iç yapısında mutlaka ışık emici materyal kullanılması gerekmektedir. Çalışmada, genel olarak silikon bazlı teknolojiler incelenmiş olup, gelecekte kullanılacak en önemli silikon teknolojilerinin monokristal silikon, polikristal silikon ve şerit silikon olacağına işaret edilmiştir. İlaveten, silikon bazlı teknolojilerde daha ince levhalar kullanılacağı da ön görülmüştür. van der Zwaan ve Rabl (2003), güneş enerjisi paneli üretiminde kullanılan silikon temelli yaygın üretim yöntemlerinin üretim kapasitelerini ve elektrik üretim maliyetlerini kıyaslamıştır. Güneş panellerinin karakteristikleri ve güneş enerjisi santrallerinin kalitesini ilişkin literatür özetleri aşağıdaki gibidir: Deniz (2013), yapmış olduğu çalışmada güneş enerjisi santrallerindeki kaliteyi ortaya koyan faktörün performans oranı olduğunu ifade ederek söz konusu oran ne kadar yüksekse

santralin güneş enerjisinden elektrik üretme yeteneğinin o kadar yüksek olacağını belirtmiştir. Deniz'e göre performans oranının yüksek olması mühendislik teknolojileri ve bilimsel gelişmeler ışığında yapılacak olan tasarım, malzeme kullanımı ve işçilik ile ilişkilidir. Bir güneş enerjisi santraline yatırım yapılırken performans oranının yüksek olmasına ve kurulum maliyetinin düşük olmasına aynı anda odaklanmak gerekmektedir. Altaş (1998), PV panellerin karakteristikleri üzerine yapmış olduğu çalışmada PV paneller için en ideal ortamların soğuk ve güneşli ortamlar olduğunu ortaya koymuştur. Çünkü panelin bulunduğu ortamın sıcaklığı arttıkça panelin hem çıkış voltajı hem de gücü azalmaktadır. Altaş'ın çalışmasında I-V ile P-V karakteristikleri ele alınmıştır. Elektrik enerjisi elde etme amacıyla kullanılan PV panelleri esas enerji kaynağı olarak ışık şiddetinden faydalanmaktadır. Işıker ve arkadaşları (2006), PV panellerin gücüne etki eden faktörleri hem teorik hem de deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada ortaya konan sonuçlar, güneş enerjisinden elektrik üretimi yapan PV sistemlerin belirli yük direnci ve eğim açısı için en ideal rakamlara ulaşılabilceğini göstermektedir. Fotovoltaik panellerin yüzeyleri üzerinde sıcaklık ölçümü yapılan noktalar arasında 7-8 dereceye varan önemli veri farklılıkları oluşabildiğinden PV panel testlerinde panel yüzeyinin merkezi yakınlarındaki birkaç farklı noktadan veri toplanmasının daha tutarlı olacağı ifade edilmektedir.

3 GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİ

3.1 PV panellerin çalışma mekanizması

Işığın doğasını anlamaya ve açıklamaya yönelik olarak 17. yüzyılın sonlarından itibaren geliştirilen kuramsal yaklaşımlar, 1905 yılında Einstein'ın fotoelektrik etkiyi açıklama girişimleriyle bilimsel olarak daha ileri bir boyuta taşınmıştır. Einstein'ın çalışmalarına göre, foton enerjisi frekans ve Planck sabitiyle ilişkilendirilerek ifade edilebilmektedir:

$$E = h \cdot \nu \text{ veya } E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (3.1)$$

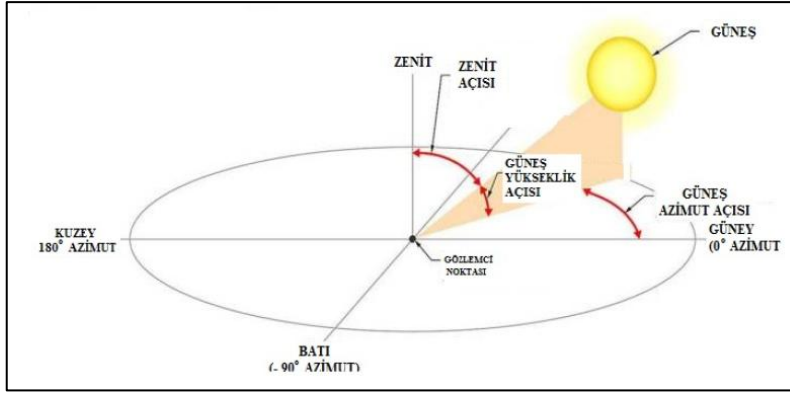
Bu formülde:

- E, foton enerjisini (eV)
- h, Planck sabitini (J/cdotps)
- ν , ışık frekansını (Hz)
- c, ışık hızını (m/s)
- λ , dalga boyunu (m) göstermektedir.

Radyasyon enerjisi taşıyan güneş ışınlarının dünya yüzeyine ulaşmak için kat etmeleri gereken mesafe Hava Kütlesi (HK) olarak adlandırılır. Hava Kütlesi terimi, ışınların atmosfer tabakasında yol alırken ne kadar zayıflayacağını ifade eder:

$$HK = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (3.2)$$

Bu formülde θ_z ifadesi güneş zenith açısını temsil etmektedir. HK denklemi, atmosfer şartlarının idealize edilerek atmosferin yansıma oluşturmeyen homojen bir yapıya sahip olduğu kabulü üzerinden türetilmektedir. Günümüzde gerçekleştirilen fotovoltaiik GES projelerinde HK değeri genellikle sabit olarak 1,5 kabul edilmektedir. HK değerinin 1,5 olabilmesi için zenith açısının $48,2^\circ$ olması gerekmektedir (Durak, 2016; Riverola vd., 2019). Şekil 3.1'de zenith açısının güneş konumuna göre hesaplanması şematik olarak gösterilmektedir.



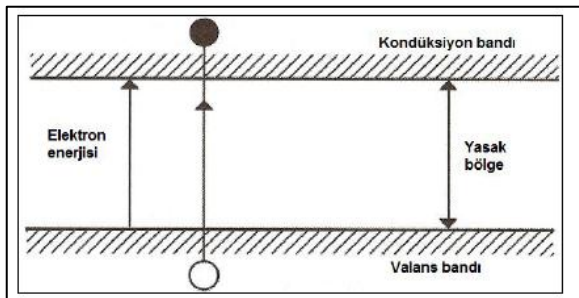
Şekil 3.1. Zenith açısı (Atay, 2020)

Şekil 3.1'e göre zenith açısı, güneş yükseklik açısı ile gözlemci noktasının dikey eksenini arasında kalan kısma denk gelmektedir.

Işık enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesini sağlayan günümüz PV teknolojileri, 19. Yüzyılın ilk yarısında Becquerel tarafından açıklanan prensipleri temel almaktadır. Fotovoltaik etkinin anlaşılabilmesi için yarıiletken malzeme davranışının da anlaşılabilmesi gerekmektedir. Yarıiletken malzemeler, sıcaklık değerleriyle ilgili olarak iletken veya yalıtkan olarak davranabilme yeteneğine sahiptir. Güneş pillerinde elektrik üretim mekanizması incelenirken, güneş pillerinin foton enerjisini maksimum düzeyde soğurarak elektronları yüksek enerji seviyelerine ulaştırmaları beklenmektedir. Güneş pillerinde kullanılan yarıiletken malzemelerin elektriksel karakteristiğini açıklamak için Valans Band (VB) ve Conduction Band (CB) bantları incelenmelidir:

- VB: Başlangıç anında elektronların konumlandığı düşük enerjili bant.
- CB: İletim bandı da olarak adlandırılabilen CB, elektronların çıkması gereken yüksek enerjili banttır (Durak, 2016; Riverola vd., 2019; Fahrenbruch, 1983).

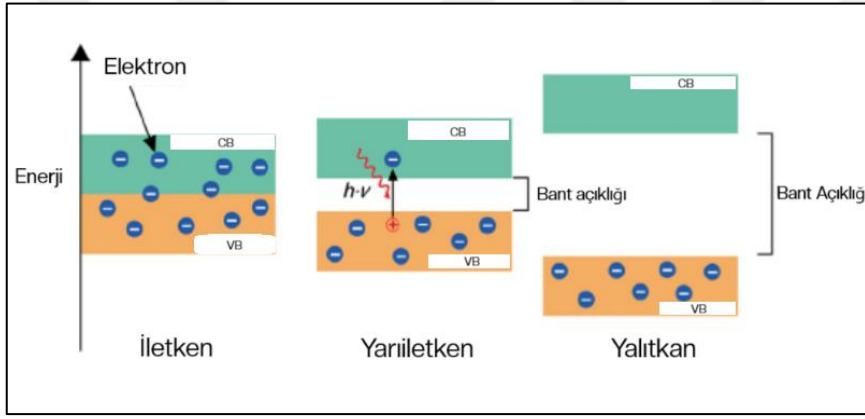
Şekil 3.2'de enerji bandı diyagramı görülmektedir.



Şekil 3.2. Enerji bandı diyagramı (Durak, 2016)

Enerji bandı diyagramında, başlangıç anında valans bandında konumlanan elektron, soğurduğu foton enerjisi ile kondüksiyon bandına geçmekte ve elektrik üretimi gerçekleştirmektedir.

PV panel teknolojisinde iletken veya yalıtkan malzemeler yerine yarı iletken malzemelerin kullanılmasının temel sebebi, verimli bir PV sistem oluşturabilmek için hem fotonların soğurulması hem de iki farklı yük taşıyıcı unsura ihtiyaç duyulmasıdır. Bu ihtiyaca cevap verebilen malzeme türü ise yarı iletken malzemelerdir. PV panelin performansını arttırmak için yarı iletkenlerin elektriksel iletkenliği ve taşıyıcı yoğunluğu katkılama işlemiyle düzenlenebilmektedir (Durak, 2016; Riverola vd., 2019; Fahrenbruch, 1983). Şekil 3.3'te iletken, yarıiletken ve yalıtkan malzemelerin iç yapısındaki bant açıklığı şeması görülmektedir.



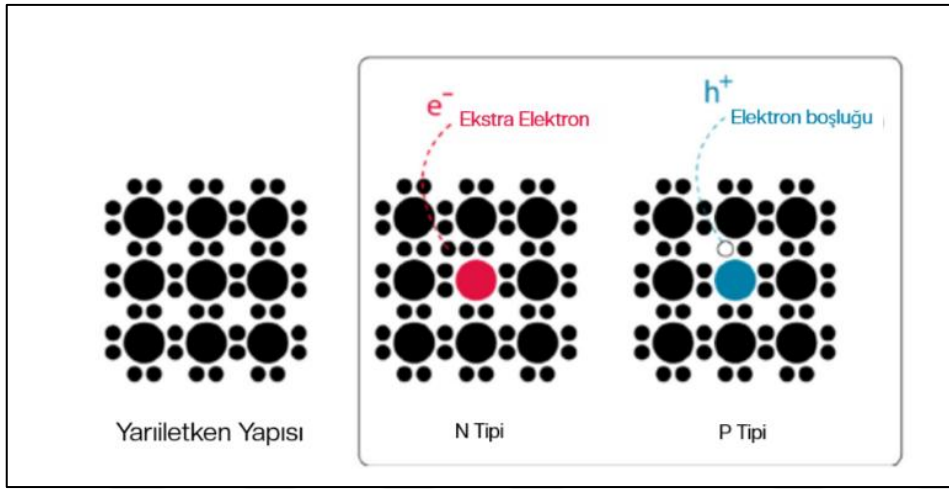
Şekil 3.3. Soldan sağa iletken, yarıiletken ve yalıtkanlar için bant aralığı şeması (Riverola vd., 2019)

Bir atomdaki orbitallerde hareket halinde olan elektronlar yalnızca belirli enerji seviyelerine sahip olabilmektedir. Enerji seviyesi birbirine çok yakın olan çok sayıda elektronun bir araya gelmesiyle enerji bantları oluşmaktadır. Enerji bantlarının birbirlerine göre olan enerji seviye farkı ise bant aralığı olarak adlandırılır. Yarı iletken malzemelerde, başlangıç anında tüm elektronlar düşük enerji bandında yer almaktadır. Foton ışığının enerjisi ile karşılaşan elektronlar ise (denklem 3.1) yüksek enerjili banda hareket etmektedir. Bu hareketin temel gereksinimi foton enerjisinin bant açıklığı olarak adlandırılan enerji farkından daha yüksek olmasıdır. Söz konusu enerji, PV panellerde güneş fotonu soğurulduğunda elde edilen enerjiyle karşılanabilmektedir (Riverola vd., 2019).

Şekil 3.3'te görülebileceği üzere, tam iletken malzemelerde enerji bantları arasındaki enerji farkı sıfırdır ve elektronlar serbestçe hareket edebilmektedir. Tam iletkenlerin

elektronik karakteristiği bu yapıdan kaynaklanmaktadır. Yalıtkan malzemelerde ise enerji bantları arasındaki enerji seviyesi farkı çok yüksektir. Farkın yüksek olması elektronların VB bandından CB bandına geçişini imkânsız kılmaktadır (Riverola vd., 2019).

Yarı iletken malzemelerin iletkenliğini kontrol etmek için uygulanan doping metodu, kristal yapıya saf olmayan atomların eklenmesini içermektedir. Doping işlemi sırasında kristal yapıya eklenecek olan verici veya alıcı atomlar ile iletkenlik kontrolü sağlanmaktadır (Riverola vd., 2019). Şekil 3.4'te yarıiletken malzemelerin iç yapısı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.4. N Tipi ve P Tipi yarı iletkenlerin yapısı (Riverola vd., 2019)

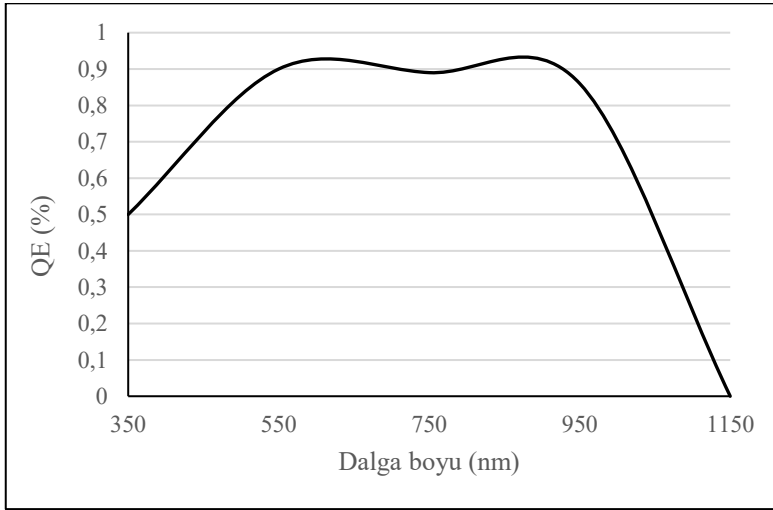
Şekil 3.4'te görülebileceği üzere N Tipi yarıiletkenlerde ekstra elektron bulunurken P Tipi yarıiletkenlerde elektron boşluğu bulunmaktadır.

N Tipi yarıiletkenlerde 1 Valans elektronu fazlalığı bulunmaktadır. P Tipi yarıiletkenlerde ise 1 Valans elektronu eksikliği bulunmaktadır. Güneş panellerinde, bu iki yarıiletken tipi birlikte kullanılmaktadır. Elektron takviyesi ile yapılan doping işlemine maruz kalan malzeme N Tipi, kovalent bağ kurarak elektron alma işlemi gerçekleştirilerek yapılan doping işlemine maruz kalan malzeme ise P Tipi yarıiletken olarak adlandırılmaktadır. N Tipi malzeme eldesinde en sık kullanılan atomlar fosfor atomları iken P Tipi malzeme eldesinde bor atomları tercih edilmektedir (Riverola vd., 2019).

N Tipi ve P Tipi yarı iletkenlerin birlikte kullanıldığı silikon bazlı güneş panellerinde, fotonların panel yüzeyine ulaşmasıyla birlikte elektronlar foton enerjisini soğurur ve serbest kalmaktadır. Serbest kalan elektronlar tırağın kazağa sürünmesiyle yapılan basit elektrostatik deneyindeki mekaniğe benzer bir şekilde elektrik alan oluşturmaktadır (Riverola vd., 2019).

Güneş panelleri, pratikte yeterince yüksek enerjili fotonlarla etkileşime girdiğinde dış devreye elektron sağlayabilen iki terminalli sistemlerdir. Bir PV hücresinden elde edilebilecek maksimum elektrik akımı olarak anlamına gelmekte ve I_{SC} ile sembolize edilmektedir. PV hücrelerinde elde edilebilecek maksimum devre voltajı ise V_{OC} ile gösterilmekte ve açık devre gerilimi olarak adlandırılmaktadır (Riverola vd., 2019).

Bir PV hücresinin elektrik üretme yeteneğinin fiziksel ifadesi QE, kuantum verimliliği olarak isimlendirilebilmektedir. QE ölçümleri, PV hücrenin, belirli bir dalga boyundaki foton ile etkileşime girdiğinde dış devreye elektron kazandırabilme olasılığını göstermektedir. Şekil 3.5, silikon bir PV hücresinin foton dalga boyuyla ilişkili olarak QE eğrisini göstermektedir (Riverola vd., 2019).



Şekil 3.5. Kristal silikon PV hücrenin yaklaşık QE eğrisi (Riverola vd., 2019)

Şekil 3.5'e göre, dalga boyu 1150 nm değerini geçtiğinde QE değeri 0'da düşmektedir. QE değerinin en yüksek olduğu dalga boyu ise 550 nm düzeyi olarak görülmektedir.

QE değeri kullanılarak türetilen I_{SC} formülü:

$$I_{SC} = q \cdot A \cdot \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} QE \cdot F(\lambda) d\lambda \quad (4.3)$$

Bu formülde;

- q , elektron yükü sabitini,
- A , güneş pilinin aktif yüzey alanını(m^2),
- $QE(\lambda)$, boyutsuz bir ifade olup kuantum verimliliğini,
- $F(\lambda)$, dalga boyuna bağlı foton akısı yoğunluğunu,

- λ , dalga boyunu(nm)
- λ_{min} , λ_{max} ise güneş pilinin çalışabileceği dalga boyu aralığını(nm) göstermektedir (Durak, 2016; Riverola vd., 2019; Fahrenbruch, 1983).

Bir PV hücrenin elektriksel karakteristiklerine ilaveten fiziksel büyüklüğünü de hesaba katarak elde edilen güç denklemi, PV hücrelerin en önemli değerlerinden biri olarak ele alınmaktadır:

$$W_{PV} = A_{PV} \cdot FF \cdot V_{OC} \cdot I_{SC} \quad (3.4)$$

3.4 denkleminde;

- A_{PV} panellerin toplam yüzey alanını (m^2),
- FF veya (fill factor) genellikle 0,7 ila 0,85 arasında değişen boyutsuz bir oranı,
- V_{OC} açık devre gerilimini(V),
- I_{SC} kısa devre akımını (A) ifade etmektedir (Ahmadi vd., 2018)

Güneş hücresi verimliliği hesaplanırken kısa devre akımı ve hücre yüzey alanıyla türetilen kısa devre akım yoğunluğundan faydalanılmaktadır:

$$I_{SC} = J_{SC} \cdot A \quad (3.5)$$

3.5 denkleminde A, güneş hücresinin aktif yüzey alanını ifade etmektedir. Kısa devre akım yoğunluğunun birimi mA/cm^2 olarak kabul edilmektedir. J_{SC} değerine ulaştıktan sonra güneş hücresinin verimi aşağıdaki gibi formüle edilmektedir:

$$\eta_s = \frac{V_{OC} \cdot J_{SC} \cdot FF}{P_{in}} \quad (3.6)$$

3.6 denkleminde yer alan; P_{in} ifadesi, güneş hücresine ulaşan toplam ışık gücüdür. Genellikle, daha önce de bahsedildiği gibi, AM 1,5 standardı için $1000 W/m^2$ sabit değeri kullanılmaktadır (Fahrenbruch, 1983).

3.2 PV hücrede Carnot sınırı

Bir PV hücrede güneş ışığı enerjisinin dönüştürülebileceği maksimum elektrik enerjisi teorik sınırı Carnot veya Landsberg olarak adlandırılabilen termodinamik verimlilik sınırıdır ve yaklaşık %85 olarak kabul edilmektedir. Ancak mevcutta üretilen ve aktif kullanımda olan hücrelerin verimliliği ile teorik sınır arasındaki fark neredeyse %50 oranındadır. Teori ve pratikteki verimlilik sınırlarının birbirlerinden bu denli uzak

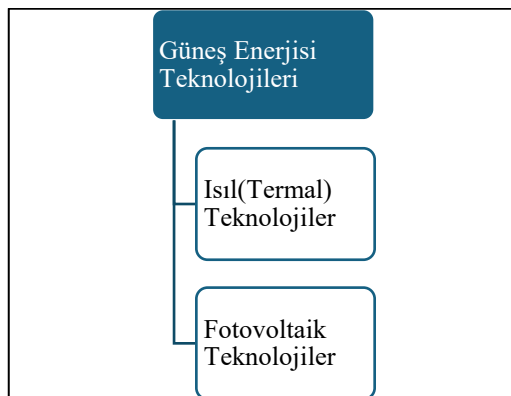
olmasının en büyük sebebi, güneş ışını dalga boyu aralığının çok geniş bir aralığa sahip olmasıdır. Söz konusu geniş spektrum, yarıiletken malzemelerin emme özellikleriyle tamamen uyuşmamaktadır (Riverola vd., 2019).

Güneş hücresi optimizasyonunda enerji kayıplarının analiz edilmesi pratik verimin artırılabilmesi açısından son derece kıymetlidir. Ancak güneş hücresi tasarımı yapılırken, pratikte hangi kayıpların önlenabilir hangilerinin ise önlenemez olduğu doğrudan ortaya koyulmalıdır. Pratik tasarımlarda önüne geçilemeyen fiziksel kayıpların başında çok yüksek ve çok düşük enerjili fotonlar gelmektedir. Foton enerjisine ilişkin toplam kayıp oranı %55 bandındadır. Güneş hücrelerinin verimlerini optimize ederken kullanılacak yöntemler ve detaylı analizler 5.2. Güneş Panellerinde Verim Arttırma Çalışmaları kısmında tartışılacaktır (Durak, 2016; Fahrenbruch, 1983).

3.3 Güneş Enerjisi Teknolojileri

Güneş enerjisinden yararlanılmasını sağlayan teknolojilere yönelik araştırmalar 1970'lerden günümüze kadar olan süreçte hız kesmeden devam etmiştir. Yaklaşık 55 yıldır edinilen bilgi birikimi sayesinde güneş enerjisi teknolojileri alanında ilerleme kaydedilirken bir diğer yandan bu alandaki teknoloji maliyetleri düşüş göstermiştir. Çevre dostu bir enerji kaynağı olarak görülen güneş enerjisinin pek çok kullanım alanı bulunmaktadır (Varınca ve Gönüllü, 2006; Wu ve Skye, 2021).

Kullanılan yöntemler, malzeme seçimi ve teknolojik tasarıma göre birçok alt kategoriye ayrılabilen güneş enerjisi sistemlerini şekil 3.6'da görülebileceği üzere temelde iki alt gruba ayırmak mümkündür (Varınca ve Gönüllü, 2006; Wu ve Skye, 2021).



Şekil 3.6. Güneş enerjisi teknolojileri (Varınca ve Gönüllü, 2006; Wu ve Skye, 2021)

Isıl teknolojiler kullanılarak elde edilen ısı enerjisi Rankine çevrimleri aracılığıyla elektrik enerjisi üretebileceği gibi fotovoltaik teknolojilerden de önce elektrik ardından mekanik enerji üretmek gibi çevrimler yapılabilir (Varınca ve Gönüllü, 2006; Wu ve Skye, 2021).

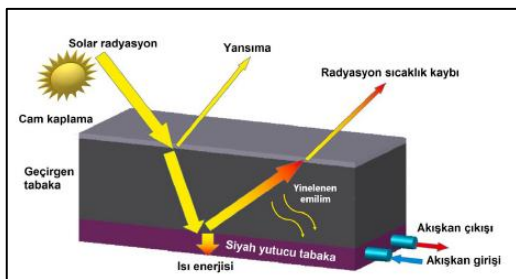
Bu bölümde;

- PV/T sistemler
- PV sistemler
- Ve güneş panellerinin limitleri ve avantajları incelenecektir.

3.3.1 PV/T sistemler

Günümüzde sıkça kullanılan pek çok sistemde elektriksel enerji ve termal enerjiden birlikte veya ayrı ayrı faydalanılmaktadır. PV/T sistemler olarak da bilinen fotovoltaik termal sistemler hem elektrik hem ısı enerjisi üretebilen karma sistemler olarak öne çıkmaktadır. Bugüne kadar yapılan araştırmalar, düz levhalı fotovoltaik termal sistemlerin elektrik ve ısı enerjisine ihtiyaç duyan konut uygulamalarında umut vadeden bir seçenek olduğunu göstermektedir (Ezcan, 2019).

Güneş enerjisi kullanılarak elektrik elde etme işlemi ilk olarak 1954 yılında gerçekleşmiştir. Güneş ısı elektrik santralleri ise 1970'li yılların sonlarına gelindiğinde kurulmuştur. PV/T sistemlerin sağladığı en büyük avantaj, tek bir yüzey üzerinden hem ısı hem elektrik enerjisi üretebilme potansiyeline sahip olmalarıdır. Yer tasarrufu sağlamalarının yanı sıra elektrik, sıcak su ve buharın eş zamanlı olarak kullanıcıları sunulmasına olanak sağlamaktadırlar (Ezcan, 2019). Şekil 3.7'de standart bir PV/T sistemi şematik olarak gösterilmektedir.



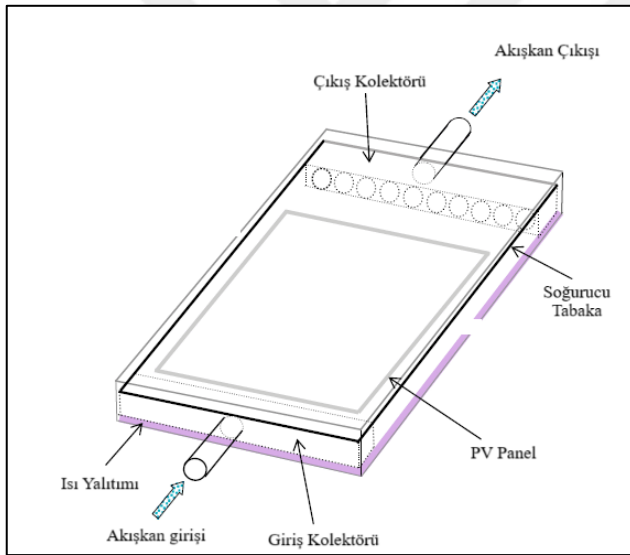
Şekil 3.7. Standart bir ısı güneş kolektörü (Demir, 2003)

Farklı PV/T sistemlerin verimlilikleri incelendiğinde elde edilen sonuç PV/T kolektör verimliliklerinin kuramsal olarak %70'in üzerine çıkabilirken düşük kaliteli

malzemelerle üretilen kolektörlerde kuramsal verimin %60'ın altına kadar düşebildiği görülmektedir. PV/T sistemleri, farklı çevresel ve iklim koşullarında kullanılmak üzere ve farklı kurulu maliyetleri ile birbirlerinden ayrılan üç ana tür altında incelemek mümkündür.

3.3.1.1 Düz Plakalı PV/T Sistemler

Düz plakalı PV/T sistemler bir PV panel ile soğurucu plakanın birlikte kullanıldığı sistemlerdir. Üst kısımda yer alan PV panel güneş enerjisini elektriğe çevirmektedir. PV panelin altındaki soğurucu tabaka ısıyı soğurmaktadır. Soğurulan edilen ısı, plaka üzerindeki borular içerisinden dolaşan akışkan aracılığıyla sistemden uzaklaştırılmaktadır. Isının uzaklaştırılması, PV panelin çalışma sıcaklığı düşürülerek elektriksel verimi arttırmaktadır (Charalambous vd., 2007). Şekil 3.8'de düz plakalı PV/T sistem görülmektedir.



Şekil 3.8. Düz plakalı PV/T sistem (Ravaee vd., 2012)

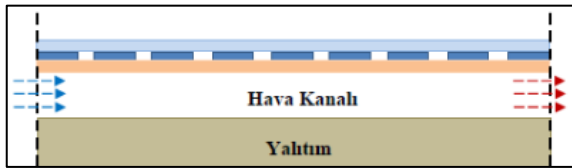
Şekilde, akışkan girişinden sisteme giren ve giriş kolektörü ile farklı borulara dağıtımını gerçekleştiren akışkan hava veya su olabilmektedir.

3.3.1.1.1 Su ve hava tipi PV/T

Düz plakalı sistemlerle benzer tasarıma olan su tipi PV/T sistemlerin ısı verimi %59'dur. PV panelin hemen altından geçen borular fotovoltaik hücrelerin daha az ısınarak daha verimli çalışmasını sağlamaktadır. Sistem çıkışında elde edilen sıcak su,

doğrudan veya iklimlendirme amacıyla kullanılabilir. Su tipi PV/T sistemlerin elektriksel verimi %9,5'tir (Ezcan, 2019).

Hava tipi kolektörlerin su tipi kolektörlere nazaran genellikle daha düşük verim oranlarına ulaşabildiği tespit edilmiştir. Ayrıca üretiminde üst cam kısmının boş bırakıldığı PV/T sistemlerin yüksek sıcaklıklarda ısı kaybını artırarak daha fazla elektrik üretebildiği de kayıtlara geçmiştir (Charalambous vd., 2007). Şekil 3.9'da hava soğutmalı bir PV/T sisteminin şematik kesiti görülmektedir.

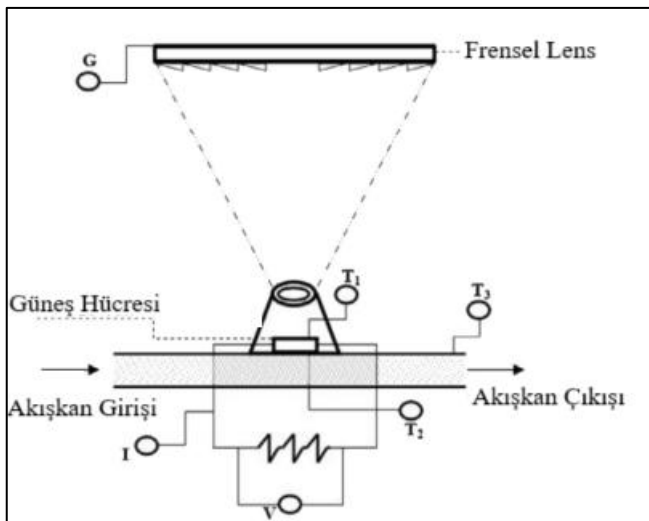


Şekil 3.9. Tipik hava soğutmalı PV/T sistemlerin şematik kesiti (Charalambous vd., 2007)

Şekil 3.9'daki PV/T sistem kesitinde yalıtım katmanını ile cam yüzey arasında hava kanalı bulunduğu görülmektedir.

3.3.1.2 Yoğunlaştırıcı PV/T

PV panel maliyetinin nispeten yüksek olması nedeniyle aynı miktar güneş ışığından daha yoğun şekilde faydalanabilmek için yoğunlaştırıcı PV/T sistemler kullanılabilir. Genellikle bir fresnel merceği kullanarak foton enerjisinden ve ısı enerjisinden daha çok yararlanılmaktadır (Charalambous vd., 2007). Şekil 3.10'da deneysel bir yoğunlaştırıcı PV/T görülmektedir.



Şekil 3.10. Deneysel bir yoğunlaştırıcı PV/T şeması (Daneshazariana vd., 2018)

Görseldeki gibi bir yoğunlaştırıcı PV/T sisteminde kullanılan güneş hücreleri genellikle polikristal gibi nispeten daha ucuz teknolojilerle üretilmektedir. Laboratuvar ortamında çok eklemli güneş hücresi gibi pahalı teknolojilerle de çalışılmaktadır (Daneshazariana vd., 2018).

3.3.2 PV sistemler

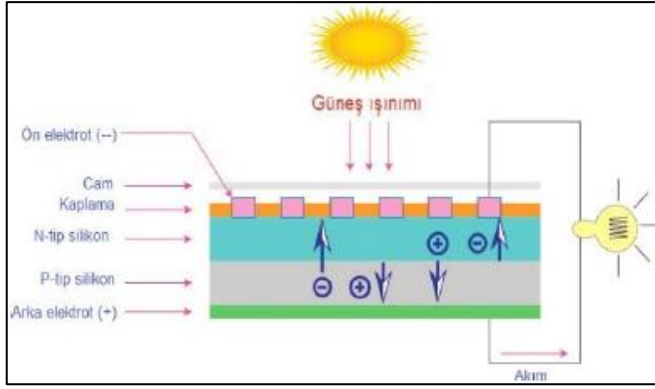
Fotovoltaik teknoloji, güneş pillerinin geniş uygulama alanları sayesinde büyük bir endüstri haline gelmiştir. Kökeni 19. yüzyılda yapılan fotoelektrik çalışmalara dayanan bu teknoloji, günümüz dünyasında beklentilerin ötesine geçerek kitlesel üretim seviyelerine ulaşmıştır (Marques Lameirinhas vd., 2022).

İsmi, Yunanca'da ışık manasında kullanılan “photo” ve gerilim anlamına gelen “voltaic” kelimelerinden türetilen fotovoltaik teknoloji, yarı iletken materyalden üretilmiş ve yüzeyine gelen güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine çevirme yeteneğine sahip sistemlerdir. Fotovoltaik sistemlerde kullanılan yarı iletken tipleri hem (negatif) N hem de (pozitif) P tipidir (Demir, 2003; Güneş, 2024).

Fotovoltaik teknolojiyi, üretiminde kullanılan malzeme tiplerine ve tekniklere bağlı olarak üç kuşakta incelemek mümkündür:

1. Kuşak plaka temelli paneller
2. Kuşak ince film panelleri
3. Kuşak organik paneller

Birinci kuşak olarak belirtilen plaka temelli geleneksel güneş panelleri tümleşik devre yöntemiyle çalışmaktadır. 2020 yılı verilerine göre fotovoltaik teknoloji endüstrisinde lider konumda olan geleneksel paneller, 2020 yılında PV teknolojiler ile üretilen elektriğin %95'i bu panellerle sağlanmıştır. (Marques Lameirinhas vd., 2022). Şekil 3.11'da geleneksel güneş paneli yapısını görülmektedir.



Şekil 3.11. Geleneksel güneş paneli yapısı (Eryılmaz, 2022)

Şekil 3.11’da da görülebileceği üzere güneş panelindeki N-Tipi ve P-Tipi silikonlar arasındaki elektron hareketliliği ile elde edilen akımın dış devreye aktarılmaktadır.

Güneş pili üretiminde daha ekonomik seçeneklerin araştırılması ve geliştirilmesi isteği, ikinci kuşak olarak adlandırılan ince film güneş panelleri ile karşılık bulmuştur. İnce film güneş panellerinin geleneksel panellere kıyasla en önemli özelliği, geleneksel panellerde 100-120 mikrometreyi bulan soğurucu katman tabakasını yalnızca birkaç mikrometrelik katmanlara indirgemiş olmasıdır. İnce filmlili güneş panelleri, PV endüstrisine ilk adımını attığında düşük verimi sebebiyle birinci kuşak geleneksel panellerle rekabet edememiştir. Ancak daha sonra yapılan çalışmalar, ince film katmanlı panellerde verimin yaklaşık %24’e kadar çıkartılabildiğini ve ince film katmanlı panel üretiminin hem daha ekonomik hem de daha çevre dostu olduğunu göstermiştir (Marques Lameirinhas vd., 2022).

Üçüncü ve son kuşak olarak nitelendirilen organik güneş panelleri, temel olarak ince film katmanlı panellerden ilham almakta birlikte, klasik N-P sistemine bağımlı kalmamıştır ve organik bileşiklerin kullanıldığı materyallerle üretilmektedir (Marques Lameirinhas vd., 2022). Güneş paneli türleri ilerleyen bölümlerde daha detaylı incelenmiştir.

3.3.3 Güneş panellerinin limitleri ve avantajları

Yenilenebilir ve temiz enerji kategorilerinde değerlendirilen güneş enerjisinin kullanımına ilişkin başlıca avantajlar aşağıdaki gibidir:

- Güneş pilleri güvenilir ve uzun ömürlüdür.
- Mekanik yıpranmanın gözlenmemesi, uzun süreler boyunca arıza vermeden çalışabilmesi ve daha sonradan değiştirilebilir yapıda kurulumunun yapılabilmesi güneş pillerinin kurulum ve işletim kolaylıkları arasındadır.

- Herhangi bir arazi, kurum veya tesise entegre edilerek ortak alan kullanımı ilkesiyle çalışabilmektedir.
- Terkedilmiş yerleşim bölgeleri, işlevini yitirmiş sanayi alanları gibi işlevsiz alanların yeniden değerlendirilmesini sağlayarak ekstra alana ihtiyaç duymamaktadır. Aynı şekilde tarıma uygun olmayan kurak ve çorak toprakları toplum faydasına kazandırabilmektedir.
- Elektrik üretimi anında atık oluşturmaz ve yakıt kullanımına gerek yoktur.
- Elektrik üretimi sırasında gürültü yapmamaktadır.
- Güneş enerjisi, teknik açıdan sonsuz bir kaynaktır.
- Bir güneş enerjisi panelinin üretim süreci dahil tüm yaşam döngüsü boyunca üretilen emisyon miktarı kömürle kıyaslandığında 25 kat daha azdır.
- Güneş enerjisi kullanarak elektrik üretmek diğer tüm alternatiflerle kıyaslandığında çok daha ucuzdur. 2020 yılında yayınlanan IRENA raporuna göre, 2020 yılı itibarıyla, tarihte üretilen en ucuz elektrik PV sistemler aracılığıyla üretilmeye başlanmıştır.
- PV paneller, panel üretimi sırasında harcanan enerji miktarının 10 ila 30 katını ürettikten sonra atık haline gelmektedir (Altuntaş, 2019; URL-2, 2025; URL-3, 2025).

Güneş enerjisi kullanarak ısı ve elektrik enerjisi elde etmek için yapılan çalışmalar ve meydana gelen teknolojik ilerleme ile birlikte günden güne azalmasına rağmen güneş enerjisi kullanımının dezavantajları da mevcuttur. Başlıca dezavantajlar aşağıdaki gibidir:

- Enerji üretimi sürekli değildir. Bir PV panel dünyanın farklı noktalarında çok farklı verimlilik oranıyla çalışacaktır. Aşırı sıcak veya aşırı bulutlu hava durumuna sahip ülkelerde PV paneller çok düşük oranda elektrik üreteceğinden bu sistemlerin muhakkak hidroelektrik veya rüzgâr gibi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenmesi gerekmektedir.
- Depolama cihazlarında devamlı bakım ihtiyacı vardır ve söz konusu cihazlar kısa ömürlüdür.
- Güneş pillerinde verimlilik düşüktür.
- Hareketli sistemlerde bakım maliyetleri yükselebilmektedir.

- Fotovoltaik hücre kurulumunun maliyeti yüksektir. Özellikle güneş enerjisi paneli sistemlerinin hane kullanımı için uygulandığı projelerde kablolama, işçilik ve batarya masrafları 6 kWsa bir sistem için ortalama 20 bin Amerikan doları dolaylarındadır.
- Güneş enerjisi panellerinin ürettiği atıklar ve kapladığı alan hesaba katıldığında PV sistemlerin en çevre dostu sistemler olmadığı görülmektedir. Örneğin; Amerika Birleşik Devletleri'nin ihtiyaç duyduğu tüm elektrik güneş enerjisi santrallerinden üretilseydi, ülkenin %0,8'lik yüz ölçümü tamamen PV panellerle kaplanması gerekirdi (Altuntaş, 2019; URL-2, 2025; URL-3, 2025).

3.4 Türkiye'deki Güneş Enerjisi Santralleri

Türkiye'de güneş enerjisi santrallerinin elektrik üretimi lisansı 2013 yılından sonra verilmeye başlanmıştır. 2017 yılında ilk kez Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları yarışması düzenlenmiştir. Yarışmada, farklı büyüklükteki şirketler yenilenebilir enerji projelerini yarıştırmıştır. 2020 yılına gelindiğinde 2024 yılında yürürlüğe giren düzenlemelerle birlikte, Türkiye'de yüzer güneş enerjisi santrallerinin denizler ile iç su kaynakları (baraj, göl ve göletler) üzerine kurulmasının önü açılarak, güneş enerjisinden yararlanma potansiyeli önemli ölçüde genişletilmiştir. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2035 yılı hedefleri arasında, güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi santrallerindeki toplam kurulu gücün 80 milyar dolarlık yatırımla 120 000 MW seviyesine çıkarılması yer almaktadır (ETKB, 2024b).

Türkiye'de lisanslı ve lisanssız elektrik üretimi gerçekleştiren toplam güneş enerjisi santrallerinin sayısı 700'ün üzerindedir. Panel markası bilinmeyen tesislerin oranı yaklaşık %21,53 iken güneş enerjisi santrallerimizde kullanılan panellerin %80'den fazlası Türkiye menşeli üreticilerden temin edilmektedir. Türkiye'de aktif faaliyette bulunan en büyük 10 güneş enerjisi santrali tablo 3.1.'de listelenmektedir.

Tablo 3.1. Türkiye'nin en büyük 10 güneş enerjisi santrali

Santral İsmi-Konumu	Kurulu Güç (MW)
Karapınar GES- Konya	1 350 MW
Erzin-1 GES- Hatay	140 MW
Naturel & Esenboğa Enerji GES-Ankara	118 MW
Bor-2 GES- Niğde	100 MW
Bor-3 GES- Niğde	100 MW
Aşağı Kaleköy Barajı Hibrit GES- Bingöl	76 MW
Kayseri OSB GES- Kayseri	50 MW
Akyel 1 ve 2 RES Hibrit GES- Karaman	50 MW
Uşak rüzgâr Santrali Hibrit GES- Uşak	45 MW
Van Arısu GES- Van	45 MW

Tablo 3.1'deki veriler ışığında Türkiye'nin en büyük güneş enerjisi santrali Karapınar Güneş Enerjisi Santrali'dir. Konya'da konumlanan Karapınar GES, 2023 yılında tam kapasiteyle üretime başlamıştır ve Türkiye'nin elektrik tüketiminin %1'ini tek başına karşılamaktadır. Karapınar ve Erzin-1 santrallerinde kullanılan çift yüzölü ve güneş takip sistemleri gibi ileri teknoloji panel sistemleri yapısıyla santrallerin verimi optimize edilmiştir (URL-6, 2025; URL-7, 2025). Şekil 3.11'de Türkiye'de güneş paneli üretim yapan yerli fabrikalarda çekilmiş fotoğraflar yer almaktadır.



Şekil 3.12. Türkiye’de panel üretimi gerçekleştiren fabrikalardan üretim prosesi sırasında çekilmiş fotoğraflar (URL-4, 2025; URL-8, 2025)

Türkiye’de aktif olarak faaliyet gösteren en büyük güneş enerjisi santrali konumundaki Konya Karapınar Kalyon GES, yaklaşık 2600 futbol sahası büyüklüğüne tekabül eden 20 milyon m²’lik bir alan üzerine kurulmuştur. Santralin kurulu gücü 1 348 MW olmakla birlikte 2023 yılının Mart ayında şebeke bağlantısı resmen kurulmuştur. Santralin 1,14 milyon ton karbon emisyonunu önleyeceği ve bir yıllık üretimiyle 2 milyon kişinin elektrik talebini karşılayacağı öngörülmektedir. Santralde yaklaşık 3,5 milyon adet PV panel kullanılmış ve güneş takip sistemi olarak doğu-batı ekseninde çalışan tek eksenli takip sistemi tercih edilmiştir. Kullanılan güneş panelleri monokristal yapılı, PERC hücre teknolojisiyle üretilmiş ve çift yüzölü güneş panelidir. Büyük çaplı güneş enerjisi santrallerinde standart bir uygulama haline geldiği üzere hem paralel hem seri bağlantı kullanılmıştır. (Kalyon Güneş Enerjisi Üretim A.Ş., 2021).

2024 yılının ikinci yarısında tam kapasiteyle faaliyete geçen Erzin-1 YEKA GES, Türkiye’nin en büyük ikinci güneş enerjisi santrali olma özelliği taşımaktadır. 106 bin hanenin elektrik tüketimini temiz enerjiyle karşılayarak bir yıl içerisinde 175 bin ton karbon emisyonu engellemeyi hedefleyen santral, 2 bin dönümlük arazi üzerinde faaliyet göstermektedir. Santralde, tek eksenli güneş takip sistemi ile birlikte çift yüzölü paneller kullanılmıştır (URL-16, 2025).

Naturel Enerji bünyesinde yer alan ve Ankara’da konumlanan güneş enerjisi santrali, Türkiye’nin en büyük üçüncü güneş enerjisi santrali olarak kabul edilmektedir. Arazi tipi santraldeki paneller 118 MW kapasitelidir ve toplam güneş enerjisi üretimi 60 binden fazla konutun elektrik ihtiyacını karşılamaktadır (URL-17, 2025).

3.5 Dünya’daki Güneş Enerji Santralleri

Dünya üzerinde yer alan güneş enerjisi santralleri arasında en büyük kapasiteye sahip santraller Asya kıtasında bulunmaktadır. 2024 yılının Haziran ayında resmî törenle şebekeye bağlanan Xinjiang Güneş Enerjisi Santrali, 5 gigawatt kurulu kapasiteye sahiptir. Söz konusu enerji miktarı Avrupa kıtasında yer alan bir ülke olan Lüksemburg’un bir yıllık elektrik tüketimine denk gelmektedir (URL-1, 2025). Şekil 3.13’te İspanya’da yer alan SOLTEN I ve SOLTEN II projeleri yer almaktadır.



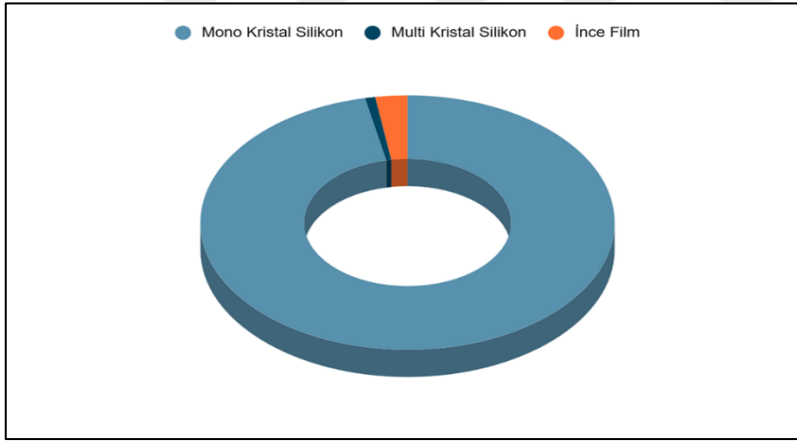
Şekil 3.13. SOLTEN I ve SOLTEN II, İspanya (Durak, 2016)

Amerika Kıtası’nın en büyük güneş enerjisi santrali olan Villanueva Plant Santrali Meksika’da konumlanmaktadır. Kurulum maliyeti 650 milyon dolar olan santral, Meksika’da yaklaşık 1,2 milyon hanenin elektrik ihtiyacını karşılayabilecek kapasiteye sahiptir. Tek eksenli yatay tasarıma sahip PV modüllerden oluşan tesis geleneksel güneş enerjisi santrallerine kıyasla daha az alan kaplaması açısından öne çıkmaktadır (URL-1, 2025).

Dünyanın en büyük 15 güneş enerjisi santralinden biri olan Francisco Pizarro Solar Plant İspanya’da konumlanmaktadır. 590 MW kapasiteyle yaklaşık 330 bin hanenin elektrik ihtiyacını karşılayabilen tesis yıllık CO₂ salınımı miktarını 245 000 ton kadar azaltmaktadır (URL-1, 2025).

4 GÜNEŞ PANEL TÜRLERİ ve ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ

Günümüzde, güneş enerjisi paneli üretimi için en çok tercih edilen güneş paneli tipi monokristal silikon panellerdir. Monokristal silikon güneş panellerinin, mevcut PV panel sektörünün neredeyse tamamını oluşturuyor olması verimlerinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Monokristal silikon güneş panellerinin verimini yüksek yapan, kristal yapısının diğer üretim yöntemlerine kıyasla daha saf kalmasıdır. Polikristal güneş paneli teknolojileri ise imalat kolaylığının ve ekonomikliğin verimliliğe tercih edildiği durumlarda rağbet görmektedir. Üretiminde çoğunlukla kadmiyum tellür (CdTe) kullanılan ince film teknolojili güneş panelleri ise polikristal güneş panellerine kıyasla daha fazla tercih edilmelerine rağmen henüz monokristal silikon güneş panelleri ile rekabet edecek kadar üretilmemektedir. İnce film teknolojisi hakkındaki en önemli tartışma, bu teknolojiye sahip olan panellerin zararlı çevresel etkilerinin yüksek olması ve panellerin geri dönüşümüne ilişkin etkili yöntemlerin henüz geliştirilememiş olmasıdır (Stanford Understand Energy, 2024). Şekil 4.1'deki pasta grafiğinde sektör lideri konumundaki panel türleri gösterilmektedir.



Şekil 4.1. 2023 yılında dünyada PV panel üretiminde kullanılan teknolojilerin kıyaslanması (Stanford Understand Energy, 2024)

Şekil 4.1'e göre monokristal silikon panel teknolojisi sektörün neredeyse tamamının lideridir.

Avrupa'nın en büyük uygulamalı bilimler araştırma ve geliştirme organizasyonlarının başında gelen Fraunhofer Institute tarafından 2024 yılının ikinci yarısında yayınlanan raporda, ince film teknolojisini kullanan PV panel üretiminin toplam üretim içerisindeki payı %2,5 bandını aşmıştır. (Fraunhofer ISE, 2024).

4.1 Monokristal ve Polikristal Güneş Panelleri

Silisyum güneş hücreleri monokristal veya polikristal sahip olabilmektedir. Polikristal güneş hücrelerinin üretimi daha düşük maliyetlidir ancak monokristal hücreye kıyasla verimleri düşüktür. Monokristal ve polikristal hücrelerin farklı verimlere sahip olmasının temelinde üretim süreçleri yatmaktadır. Daha homojen bir yapıya sahip olan tek bir silikon kristalinin büyütülmesiyle üretilen monokristal paneller bu homojen yapıları sayesinde daha verimli olmaktadır. Polikristal hücreler ise pek çok küçük parçacıktan oluşan, daha düzensiz bir molekül yapısına sahip olan hücrelerdir. Şekil 4.2’de monokristal (solda) ve polikristal (sağda) güneş panelleri görülmektedir (Güzelbay, 2024).

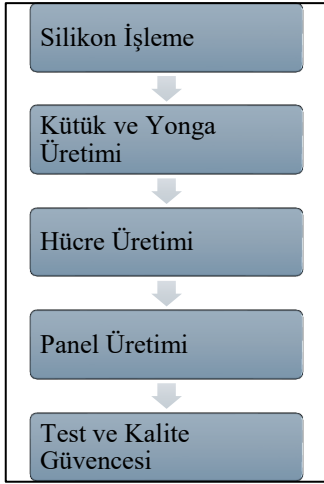


Şekil 4.2. Monokristal ve polikristal güneş panelleri (Kaur vd., 2025)

Şekil 4.2’de de görülebileceği üzere, monokristal güneş panelleri genellikle siyah renkli ve oval köşeli bir görüntü sunarken polikristal güneş panelleri daha homojen bir görüntü sunmaktadır.

4.1.1 Monokristal panel üretim süreci

Organik olmayan güneş panellerinin ana malzemesi silisyumdur. Silisyum doğada bol miktarda bulunmaktadır ve toksik özellik göstermemektedir (Güzelbay, 2024). Şekil 4.3’te monokristal yapıli standart bir güneş hücresinin üretim süreci gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Monokristal PV panel üretim süreci (DOE, 2025a)

Şekil 4.3'te görülebileceği üzere, sıfırdan bir güneş paneli üretim süreci temel olarak beş adımlı bir proses olarak kabul edilmektedir. Proses adımları alt başlıklar halinde incelenmiştir.

4.1.1.1 Silikon işleme

PV sistemleri oluşturan panellerin temel ve en önemli bileşeni silikondur. 1 ton yüksek saflıkta silikon elde edebilmek için yaklaşık 2 ton silika kumuna ihtiyaç duyulmaktadır. Yerkürenin yaklaşık %26'sını oluşturan silika kumunun işlenmesiyle elde edilen silikon, güneş hücrelerinde kullanılacak saflığa ulaşmak için Siemens metodu ile neredeyse kusursuz saflığa ulaşmaktadır. Siemens metoduna maruz kalmadan önce hidrojen ve klor ile zenginleştirilerek polisilikon haline getirilen hammadde, Siemens yöntemiyle yüksek sıcaklıklara ısıtılmaktadır.

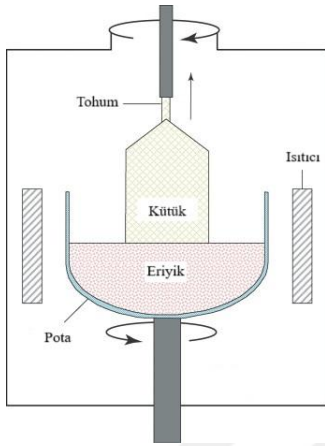


Siemens işlemi sırasında meydana gelen kimyasal denklem 5.1 ve denklem 5.2'deki gibi ifade edilebilmektedir (DOE, 2025a; Drouiche vd., 2015).

4.1.1.2 Kütük ve yonga üretimi

Yonga ve hücre üreticileri, silisyumu genellikle parça ya da toz formunda temin etmektedir. Ancak silisyumun yonga ve hücre üretiminde kullanılabilmesi için kütük (ingot) şekline dönüştürülmesi gerekmektedir. Temin edilen parça ya da toz formundaki silisyumun, bir pota vasıtasıyla yüksek sıcaklıklarda eritildikten sonra Czochralski

prosesi işletilmektedir. Czochralski yönteminde, eriyik haldeki saf silikonun yer aldığı potaya silisyum tohum kristali daldırılmaktadır. Tohum kristalini tutan çubuk yukarı doğru çekilerek yüzlerce kilogram ağırlıkta ve metrelerce uzunluktaki silikon kütükleri elde edilmektedir. Literatürde kısaca CZ yöntemi olarak da geçen Czochralski yöntemi, zaman ve para sarfiyatının yüksek olmasına karşılık sektördeki en yüksek verimliliklere ulaşılmasını sağlamaktadır. CZ yöntemi kullanılarak üretilen kütükler monokristal yapıli güneş panellerinin üretiminde kullanılmaktadır (Drouiche vd., 2015). Şekil 4.4'te CZ uygulamasından bir kesit görölmektedir.



Şekil 4.4. Czochralski yöntemi ile silikon kütük oluşumu (Müller ve Friedrich, 2005)

Şekil 4.4'te gösterilen CZ yönteminde pota ile kristal tohumu tutan mekanizma farklı yönlerle dönmektedir. Şekil 4.5'te CZ metodu ile üretilmiş bir silindirik silikon kütüğü görölmektedir.

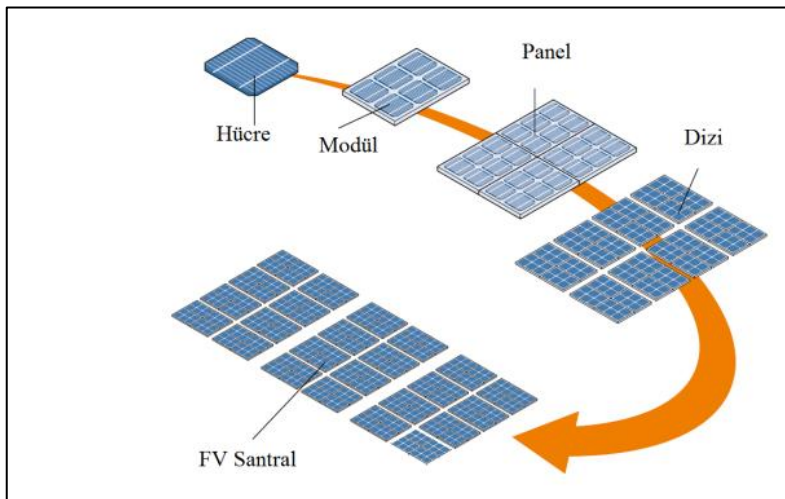


Şekil 4.5. Czochralski yöntemi ile oluşturulmuş bir silikon kütük (PHOTOSIL Consortium, 2011)

Polisilikon, CZ sürecine tabi tutulmadan önce pot içerisinde eriyik halde bulunmaktayken, sıvının içerisine boron karıştırılarak P Tipi yarı iletken elde edilebilmektedir. N Tipi yarıiletken eldesinde en yaygın kullanılan element fosfordur. Kütük oluşumu sırasında çekme işleminin çok hassas şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir; çekme işlemi hızlı yapılırsa kütükte yapısal kusurlar meydana gelecek, çekme işlemi yavaş yapılırsa da elde edilen yarıiletkenin verimi düşecektir. Silindirik şekilde elde edilen kütükler, daha sonra kesme işlemine tabi tutularak külçe haline getirilecektir. Bu külçelerin ince disklerle yine kesilerek ayrılması sonucunda ise yonga üretimi gerçekleşmiş olacaktır (DOE, 2025b; URL-4, 2025).

4.1.1.3 Hücresel üretim

Güneş hücrelerinin üretim süreci silikon yongalarda yüzey pürüzsüzleştirme işlemiyle başlamaktadır. Pürüzlerinden arındırılan silikon yüzeyin güneş ışığını soğurma kapasitesi artar. Pürüzsüzleştirme işleminin ardından yongalar bir dizi fiziksel ve kimyasal işleme tabi tutularak yansımının azaltılması ve katkıları ile P-N birleşiminin oluşturulması hedeflenmektedir. Son aşamada, yonga yüzeyine metal iletkenler basılmaktadır. Yüzeydeki metal iletkenlerin işlevi hücrede üretilen elektriğin PV panel boyunca yönlendirilmesini ve toplanmasını sağlamaktadır. Süreç tamamlandığında yongalar güneş enerjisinden elektrik elde etmeye hazır hale getirilmiş hücrelere dönüşmektedir (DOE, 2025b; URL-4, 2025). Şekil 4.6’da, fotovoltaik hücrelerden modül, panel, dizi oluşumu gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Güneş hücresinden modül, panel ve dizi oluşumu (Abamor, 2016)

Şekil 4.6’da görüldüğü gibi bir araya getirilen diziler fotovoltaik güneş enerjisi santrali oluşturmaktadır.

4.1.1.3.1 PERC hücre teknolojisi

Kristal yapıli hücrelere uygulanabilen PERC hücre teknolojisinin amacı geleneksel güneş hücresinin verimini arttırmaktır. PERC hücre üretmek için güneş hücresinin arkasına yansıtıcı ve pasifleştirici bir katman eklenmektedir. PERC teknolojisine sahip hücrelerde verim artışı iki şekilde gerçekleşmektedir:

- Yansıtıcı ve pasifleştirici katmandan yansıtılan yüksek dalga boyuna sahip fotonların soğurularak enerji eldesi
- Yüksek dalga boyuna sahip fotonların yansıtılarak fazla ısınmadan kaçınmak

PERC hücre teknolojisindeki gelişmeler istem boyutunun küçülmesini ve ilk kurulum maliyetinin azalmasını sağlamıştır. PERC hücre teknolojisine sahip panellerin kullanımı 2010 yılından sonra yaygınlaşmıştır (Delibaş ve Yılmaz, 2023; Güzelbay, 2024).

4.1.1.3.2 TOPCon hücre teknolojisi

N-tipi hücrelerde kullanılan TOPCon hücre teknolojisi, PERC hücre teknolojisine benzer şekilde güneş hücresinin arka yüzeyine yeni bir katman eklenmesiyle uygulanmaktadır. Eklenen katman son derece incedir ve kuantum tünellemesi mekanizmasını kullanarak verimi artırır. Hücre voltajı yükselir ve daha yüksek güç çıkışı sağlanır. TOPCon hücre teknolojisi 2020 yılından itibaren yaygınlaşmaya başlamıştır. TOPCon teknolojisi ile elde edilen verim artışı PERC teknolojili panellere kıyasla daha yüksektir (Delibaş ve Yılmaz, 2023; Güzelbay, 2024).

4.1.1.3.3 Heterojunction hücre teknolojisi

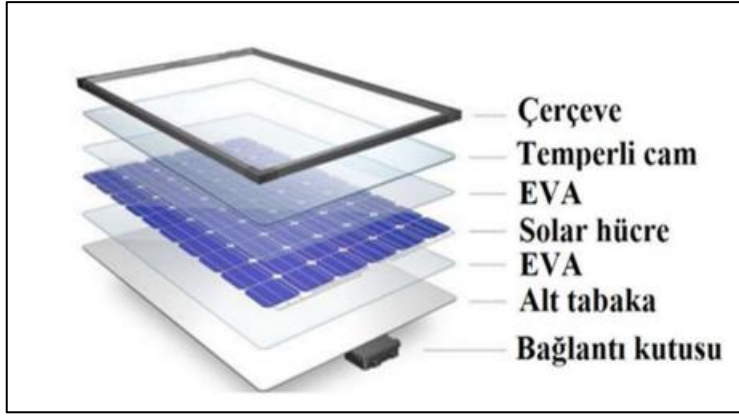
Heterojunction veya kısaca HJT hücre teknolojisi çok katmanlı güneş hücreleri ile benzerlik göstermektedir. Her iki hücrede de birden fazla soğurucu katman oluşturarak panele ulaşan fotonlardan maksimum fayda sağlamak amaçlanmaktadır. HJT ile çok katmanlı güneş hücrelerinin arasındaki en önemli fark ise HJT hücre teknolojisinde yalnızca silikon katmanların kullanılarak farklı katmanlar elde edilmesidir. HJT hücre teknolojisiyle üretilen güneş panelleri yüksek verimliliğe sahip olsa da üretim maliyetleri şu an için yüksektir (Delibaş ve Yılmaz, 2023; Güzelbay, 2024).

4.1.1.4 Panel üretimi

Panel montajı aşamasında, çok sayıda güneş hücresi seri bağlantı yoluyla amaçlanan voltaj ve akım özelliklerine ulaştırılarak çeşitli montaj elemanları ve koruyucu katmanların arasına hapsedilir. Bir güneş paneli temel olarak altı elemandan oluşmaktadır. Bu elemanlar ve görevleri:

- Alüminyum Çerçeve: Montaj elemanı olarak görev yaparak panellerin birbirlerine, çatılara, arazilere veya çeşitli çelik konstrüksiyon yapılar sabitlenebilmesini sağlamaktadır.
- Temperli Cam: Güneş panelini her türden dış etkenden ve çevresel koşullardan koruyan temperli cam, sağlamlıklarını arttırmak amacıyla özel prosedürler ile üretilmektedir. Temperli camın bir diğer işlevi ise güneş ışınlarının yansımaları engelleyerek mümkün olduğu kadar çok ışının soğutulmasına yardımcı olmaktır.
- EVA: PV hücrelerin hem temperli cama hem de sırt folyosuna yapışmasını sağlamaktadır.
- Sırt Folyosu: Panelin yalıtımını sağlayarak panelin optimum sıcaklıkta çalışmasını sağlamaktadır.
- Bağlantı Kutusu: Elektriğin geri akışını engellemek amacıyla diyot bağlantıları içeren bağlantı kutusu, dış ortama uyum sağlayacak şekilde su geçirmez malzemeler ile imal edilmektedir. Bağlantı kutusundan çıkan elektrik kabloları, panelde üretilen elektrik akımını sistemin güç elektroniğine iletmekle görevlidir.
- PV Hücreler: Fotovoltaik mekaniği kullanarak elektrik üretimini sağlayan birimlerdir (DOE, 2025b).

Şekil 4.7’de silikon kristal bir güneş panelinin elemanları gösterilmektedir.



Şekil 4.7. Güneş panelinin yapısı (Doğanay, 2021)

Şekil 4.7’de gösterildiği gibi silikon kristal bir güneş paneli solar hücrelere ilaveten koruma ve montaj elemanları ihtiva etmektedir.

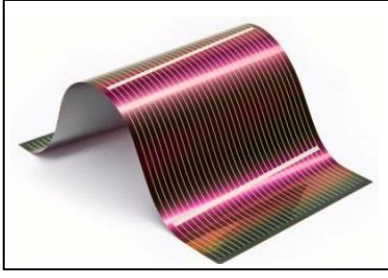
Güneş paneli üretim sektörü, yalnızca ABD’de 300 bine yakın personel istihdam etmektedir. 2024 yılı içerisinde Amerika Birleşik Devletleri’nde her 54 saniyede bir çeşitli ölçeklerde yeni güneş enerjisi projelerinin kurulumunun gerçekleştirildiği bildirilmektedir. Büyük ölçekli güneş enerjisi projelerinin 44 GWh kapasiteye ulaştığı ülkede, yaklaşık 500 bin konutta güneş enerjisi sistemi kullanılmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri’nin 2024 yılındaki kurulu enerji kapasitesi artışında güneş enerjisinin payı %66 dolaylarında iken doğal gaz ve diğer sera gazı üreticisi enerji kaynaklarının payı yalnızca %6 oranında kalmaktadır (SEIA, 2025).

Uluslararası sevkiyat istatistikleri ışığında, 2024 yılının üçüncü çeyreğinden elde edilen verilere göre, dünyanın en büyük on solar panel üreticisinin sekizi Çin merkezli kuruluşlardan oluşmaktadır. Söz konusu üreticilerin toplam üretim kapasitesi yaklaşık 370 GW olmuştur. Yıllık güneş paneli üretim hacminin yaklaşık %95’i Çin önderliğinde Asyalı üreticilere aittir. Geriye kalan %5’lik payın büyük bir bölümü Avrupa ve Kuzey Amerika menşeli şirketlere aittir (Fraunhofer ISE, 2024; URL-5, 2025).

4.2 İnce Film Güneş Panelleri

Birinci nesil güneş paneli ifadesi monokristal ve polikristal güneş panellerini temsilen kullanılmaktadır. İnce film güneş panelleri ise ikinci nesil güneş paneli olarak da ifade edilebilmektedir. İnce film güneş paneli teknolojisinde başta kadmiyum tellür (CdTe) olmak üzere bakır indiyum galyum selenür (CIGS) ve amorf silisyum (a-Si) gibi farklı

yarıiletken malzemeler kullanılabilmektedir (Zafer, 2006). Şekil 4.8’de bir ince film güneş paneli görülmektedir.



Şekil 4.8. İnce film güneş paneli (Birant, 2017)

Şekil 4.8’deki ince film panel, esnekliği ve inceliği ile öne çıkmaktadır. İnce film panellerin bir diğer avantajı üretim maliyetlerinin düşük olmasıdır. Düz ve pürüzsüz olmayan yüzeylerde uygulama kolaylığı da sunan ince film güneş panelleri monokristal panellere göre daha düşük verime sahiptir (Zafer, 2006).

4.2.1 İnce film güneş paneli üretim süreci

İnce film tabakalı güneş paneli üretim prosesi, kristal yapıli güneş panellerinin üretim prosesinden farklılık göstermektedir. Soğurucu olarak genellikle kadmiyum tellürün kullanıldığı ince film tabakalı güneş paneli teknolojisinde üretim, üzeri şeffaf iletken bir kaplama yapılan düz cam tabakasıyla başlamaktadır. Ardından yüksek sıcaklıkta buharlaştırılan kadmiyum tellür cam tabakasının üzerine yapıştırılmaktadır. Hücre şerit tasarımını gerçekleştirmek için lazer ile kazı yöntemi kullanılarak diğer koruma ve montajlama elemanları monokristal güneş panellerinde olduğu gibi yerleştirilerek ince film panel kullanıma hazır hale getirilmektedir (DOE, 2025a).

4.3 Üçüncü Kuşak Güneş Panelleri

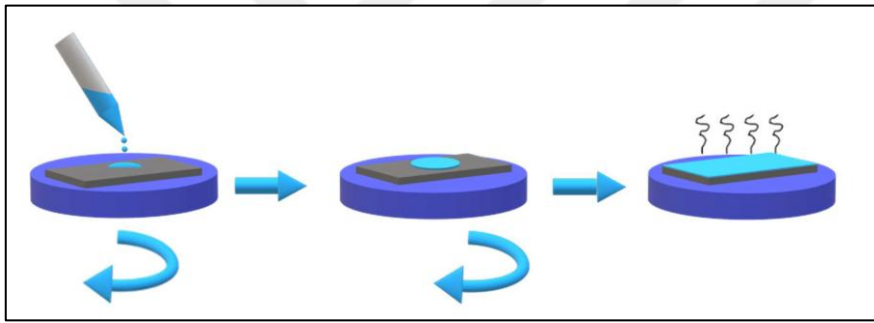
Güneş paneli üretiminde yeni teknikler kullanarak yeni malzemeler sunma arayışı sonucunda üçüncü nesil güneş paneli teknolojileri ortaya çıkmıştır. Üçüncü nesil üretim ve malzeme teknolojileri, ince film güneş panellerinden daha verimli ancak onlar kadar ince ve esnek paneller elde etme amacı taşımaktadır (Nkinyam vd., 2024). Alt başlıklarda, en yaygın üçüncü nesil teknolojilere yer verilmiştir. Üçüncü nesil panellerin üretilmesinde kullanılan yöntemler ince film güneş paneli üretimi ile büyük benzerlikler taşımaktadır.

4.3.1 Organik güneş panelleri

Üretiminde organik yarı iletken malzemeler kullanılmaktadır. Monokristal yapılı güneş panelleri ile arasında ciddi bir verim farkı bulunmaktadır. Organik güneş panelleri günümüzde düşük verimleri sebebiyle santrallerde kullanılmamaktadır. Düşük üretim maliyeti, çevre dostu hammadde kullanımı ve esnek yapıli hafif paneller üretilebilmesi organik güneş panellerinin küçük ölçekli uygulamalarda tercih edilmesini sağlamaktadır (Baldemir, 2022).

4.3.1.1 Organik güneş paneli üretim süreci

Organik güneş paneli üretiminde buhar biriktirme ve döndürerek kaplama yöntemleri tercih edilmektedir (Baldemir, 2022). Şekil 4.9’da döndürerek kaplama yönteminin uygulanmasına ilişkin bir şema görölmektedir.



Şekil 4.9. Döndürerek kaplama ile organik film eldesi (Baldemir, 2022)

Şekil 4.9’da görölen döndürerek kaplama yönteminde organik madde çözeltisi döner bir mekanizmanın üzerine yerleştirilen cam tabakaya damlatılmaktadır. Döner mekanizma hareketlendiğinde merkezciil kuvvet etkisi ile çözelti tüm cam tabaka yüzeyine yayılmaktadır (Baldemir, 2022).

4.3.2 Çok katmanlı (tandem) güneş panelleri

Çok katmanlı paneller, güneş ışığının dalga boyuna uygun olacak şekilde birden fazla yarı iletken katmanın birleştirilmesiyle oluşmaktadır. Amaç, güneş ışığı içerisindeki farklı enerji seviyelerine sahip fotonlardan faydalanarak tek bir ışın ile daha fazla enerji elde etmektir. Uzay uygulamaları gibi yüksek verimliliğin maliyetten daha önemli olduğu alanlarda önem taşımaktadır. Verimlilikleri %40’ın üzerine çıkabilmektedir (Nkinyam vd., 2024).

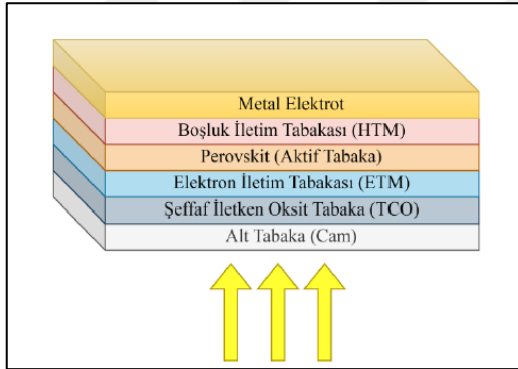
4.3.2.1 Çok katmanlı güneş paneli üretim süreci

Çok katmanlı güneş panellerinin üretim sürecinde farklı katmanlar için farklı üretim süreçleri kullanılabilmektedir. Çok katmanlı bir hücrede bulunan kristal silikon, perovskit ve organik malzemeler farklı süreçlerle üretilerek katmanlar bir araya getirilmektedir. Silikon tabanlı bir güneş hücresinin üzerine ara katman eklenerek bu ara katman üzerinde perovskit biriktirilmesi yaygın bir uygulamadır. (Priya ve Stoiner, 2025)

4.3.3 Perovskit güneş panelleri

Üretim maliyetinin düşüklüğü ve yüksek verimi ile öne çıkan perovskit hücre teknolojisi üzerine günümüzde pek çok araştırma yürütülmektedir. Perovskit malzemeler optik ve elektriksel karakteristikleri gereği güneş panellerinde ışık emici katman olarak kullanılabilmektedir (Nkinyam vd., 2024; Toprak, 2024).

Perovskit malzemeler, ABX_3 olarak formüle edilebilen bileşiklerdir. Keşfi 1839 yılına uzanan perovskitler kristal yapıya sahiptir. Şekil 4.11’de perovskit bir güneş hücresinin katman yapısı gösterilmektedir (Toprak, 2024).



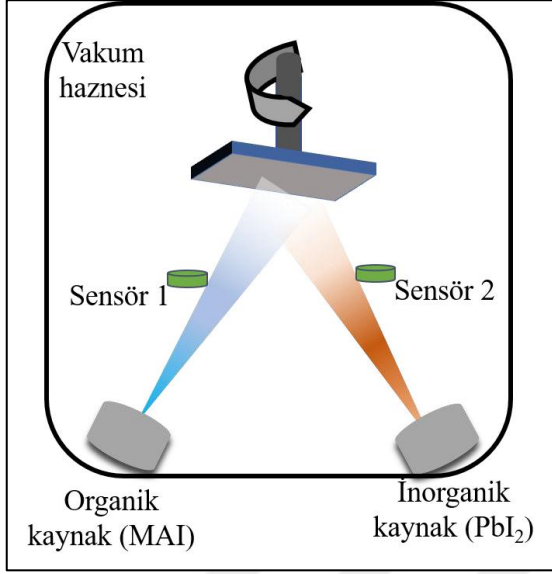
Şekil 4.10. Perovskit hücre katmanları (Toprak, 2024)

Aktif tabaka görevi gören perovskit, foton ışığını soğurarak elektronların hareketini sağlamaktadır. Elektron iletim malzemesi ve boşluk iletim tabakası N Tipi ve P Tipi yarı iletken bantlarını oluşturarak elektrik üretimi sağlanmaktadır (Toprak, 2024).

4.3.3.1 Perovskit güneş paneli üretim süreci

Perovskit malzeme ile güneş hücresi üretirken seçilecek olan yöntem panel verimini doğrudan etkilemektedir. Çünkü yüksek verimli perovskit paneller ancak homojen yapılı,

iri taneli ve boşluk barındırmayan bir perovskit film üretilmesi gerekmektedir. Buhar biriktirme yöntemi ile üretilen perovskit güneş panellerinin tek adımlı ve iki adımlı kaplama yöntemiyle üretilen panellere kıyasla daha homojen bir yapıya sahip olduğu bilinmektedir (Toprak, 2024). Şekil 4.11’de buhar biriktirme yöntemi ile perovskit film üretimi görülmektedir.



Şekil 4.11. Buhar biriktirme yöntemi ile perovskit film üretimi (Toprak, 2024)

Şekil 4.11’deki şemada inorganik kaynak olarak kurşun elementinin (Pb) kullanılması dikkat çekmektedir. En verimli perovskit paneller kurşun kullanılarak elde edilmektedir. Kurşunun toksik bir metal olması ve buhar biriktirme yönteminin yüksek maliyeti sebebiyle perovskit paneller ticarileşme aşamasına geçememektedir (Toprak, 2024).

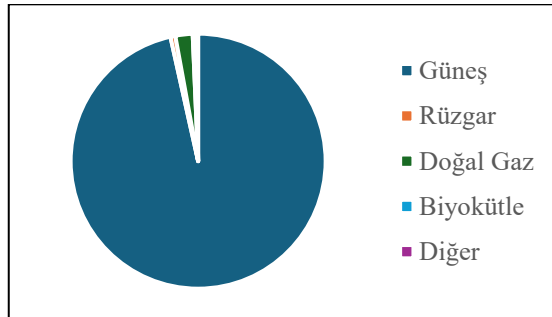
4.4 Türkiye’de Güneş Paneli Üretimi ve Kullanımı

Türkiye’de güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretiminde son yıllarda ciddi atılımlar gerçekleştirilmiştir. Söz konusu atılımlar gerek lisanslı gerek lisanssız elektrik üretim istatistiklerine de yansımış olup tablo 4.1.’de görülebileceği üzere kurulu güç oranı en fazla artan elektrik kaynağı güneş enerjisi olmuştur (EMO, 2025).

Tablo 4.1. 2024 Mart-2025 Mart aralığında lisanslı elektrik enerjisi üretilen kaynakların kurulu güç değişim oranları (EMO, 2025)

Enerji Kaynağı	2024 Mart Kurulu Güç (MW)	2025 Mart Kurulu Güç (MW)	Değişim (%)
Doğal Gaz	24 760,82	24 466,10	-1,19
Barajlı Hidrolik	23 853,52	23 861,83	0,03
Rüzgâr	11 980,92	13 057,44	8,99
İthal Kömür	10 373,80	10 455,80	0,79
Linyit	10 193,96	10 216,56	0,22
Akarsu	8 303,61	8 335,26	0,38
Güneş	1 665,09	2 110,82	26,77
Biyokütle	1 995,38	2 032,91	1,88
Jeotermal	1 691,34	1 733,51	2,49

Türkiye’de toplam lisanslı elektrik üretimi içerisinde ise tüm gelişme ve atılımlara karşın %2,16’da kalmaktadır. Şekilde 4.12’de pasta grafiğine göre lisanssız elektrik üretiminde güneş enerjisinin payı ise %96,51’dir (EMO, 2025).



Şekil 4.12. Türkiye 2025 Mart Ayı Lisanssız Elektrik Üretiminde Kullanılan Kaynaklar (EMO, 2025)

Türkiye’de, lisanslı bir şekilde güneş enerjisi paneli yapan firma sayısı EPDK tarafından 37 olarak belirtilmektedir. Geçtiğimiz iki yıl içerisinde Türkiye, güneş enerjisi kapasitesinde %102 artış gerçekleştirerek 2025 yıl sonu hedefini henüz 2024 Ağustos ayında yakalamayı başarmıştır. Son iki buçuk yıllık güneş ve rüzgâr enerjisi kaynaklı elektrik üretimi, 15 milyar Amerikan doları tutarındaki doğalgaz ithalatının önüne geçmiştir (URL-11, 2025; URL-12, 2025).

4.5 Güneş Paneli Üretiminde Kullanılan Güncel Teknolojiler

Monokristal güneş paneli üretiminde kullanılan güncel teknolojiler, CZ metodunun iyileştirilmesi ve malzeme bilimindeki gelişmelerin takip edilerek uygulanmasıyla gelişmektedir. Ancak üretim süreçleri genel olarak geleneksel metotla sürdürülmektedir. CZ çekme yöntemiyle kristal büyütme işleminde son 50 yılda büyük gelişmeler kaydedilmiş ve günümüzde monokristal güneş panellerinin sektördeki dominasyonu CZ kristal büyütme yönteminin diğer yöntemlere kıyasla başarısıyla açıklanmaktadır. Bu başarıdaki ölçüt, homojenizasyon ve verimliliklerdir. Özellikle Dash'in ortaya koyduğu çalışma ışığında CZ yöntemiyle kristal büyütülmesinin erken evresinde dislokasyon kusurlarını ortadan kaldırmak mümkün olmuş ve daha kusursuz silikon kütükleri elde edilebilmiştir. Günümüzde, CZ yönteminin pahalı ve meşakkatli olması sebebiyle bu yönetime karşı en çok kullanılan alternatif yöntem Yönlü Katılma yöntemi. Ancak Yönlü Katılma yöntemiyle elde edilen çok kristalli silikon kütüklerinin yalnızca düşük verimli poli kristal güneş hücresi üretiminde kullanılabiliyor olması sektörü tüm zorluklarına rağmen CZ yöntemini kullanmaya itmektedir. CZ yöntemiyle tek kristalli güneş hücresi üretiminde iyileşme sağlamak için güncel teknolojide kullanılan ve/veya kullanılabilecek başlıca iki yöntem aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir:

- Çekme hızı ve stabilizasyon sürelerinin optimize edilmesi kritik öneme sahiptir.
- CZ yönteminde eriyiğin elde edildiği pota uzun süreler boyunca kullanılmamalı, değişim tarihlerine dikkat edilmelidir (Di Sabatino vd., 2024).

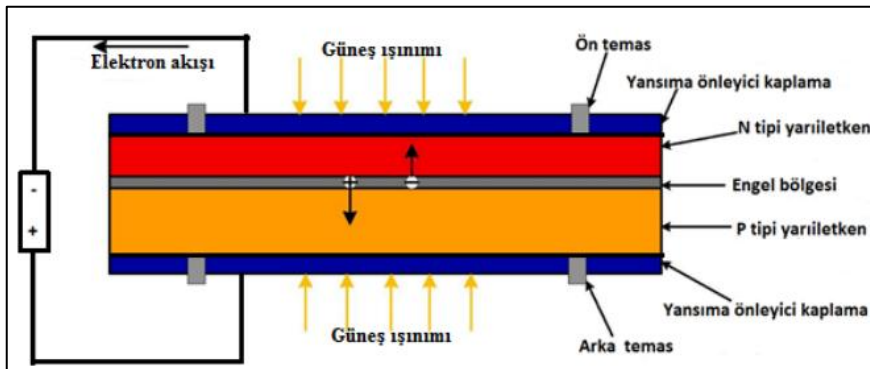
Güneş panellerine ve dolayısıyla güneş hücrelerine olan süratli talep artışı, kütük üreticilerini daha büyük çaplı kütükler üretmeye zorlamakta, kütük çapı büyüdükçe de daha büyük potaların kullanımını zorunlu kılmaktadır. Daha büyük kütük üretimindeki başlıca riskler, kontaminasyon ve eriyikteki kararsızlık olarak gösterilmektedir. CZ yöntemiyle ilgili otomasyon ve işçilik maliyetlerinin azaltılması kısa dönemde maliyetlerin düşürülmesini sağlayabilecektir (Di Sabatino vd., 2024).

Günümüzde, yapay zekâ (YZ) ve makine öğrenmesi (MÖ) gibi bilgi teknolojilerinin geldiği nokta pek çok sektörde olduğu gibi güneş paneli üretiminde de yenilikleri beraberinde getirmektedir. YZ ve MÖ uygulamaları güncel panel üretim sektöründe başlıca silikon kütük analizlerinde, güneş hücrelerinin tasarım ve optimizasyonunda ve gelişmiş hata karakterizasyonu alanlarında kullanılmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, çok küçük veri kümeleriyle dahi çalışabilen ve yüksek doğruluk oranına sahip

derin öğrenme teknolojileriyle, CZ yöntemiyle üretilen kütüklerdeki yapı kayıplarının gözle muayene yerine yapay zekâ ile muayene edilerek yapısal kayıpların doğru şekilde tespit edilmesinin yanında kayıpların doğru şekilde sınıflandırılmasını da sağlamaktadır. Bu örnekte kullanılan yapay zekâ ve sinir ağları prosedürü, insan gücüne ve çok fazla zamana ihtiyaç duyan gözle muayene yöntemine kıyasla büyük avantajlar sağlamaktadır (Di Sabatino vd., 2024).

4.5.1 Bifacial (çift yüzlü) güneş panelleri

Bifacial veya çift yüzlü güneş panelleri, yeni kurulan güneş enerjisi santrallerinin üçte ikisinden fazlasında kullanılan ve gün geçtikçe gelişmeye devam etmekte olan bir teknolojidir. Çift yüzlü paneller, hem doğrudan fotonlarla temas eden ön yüzeyden hem de yeryüzüne ulaştıktan sonraki yansımada sonucunda tekrar atmosfere saçılmakta olan fotonlardan faydalanarak çift taraflı elektrik üretimi gerçekleştirmektedir. Güneş enerjisi paneli pazarını önemli ölçüde domine eden tek yüzlü tek kristalli güneş panellerinin önümüzdeki 10 yıl içerisinde sektördeki ağırlığını kaybedeceği ve sahadaki panellerin yaklaşık %70'inin çift taraflı tek kristalli panellerden oluşacağı tahmin edilmektedir. Çift yüzlü güneş panelinin akademik literatürdeki ilk izleri 1960'ların ilk yıllarında yapılan teorik çalışmalara dayanmakla birlikte 1970'lerde Sovyetler Birliği çift yüzlü paneller ile prototip çalışmalar gerçekleştirmiştir. Güncel teknolojide arka yüzeyden elde edilen gücün ön yüzeyden elde edilen güce oranı genellikle %3 ila %10 arasında değişmektedir (Braga vd., 2023). Şekil 4.13'te çift yüzlü bir güneş panelinin diyagramı görülmektedir.



Şekil 4.13. Çift yüzlü panel diyagramı (Demir, 2024)

Şekil 4.13'te görülebileceği üzere, çift yüzölü güneş panellerinde ilave güneş hücresi ihtiyacı bulunmamaktadır. Aynı sayıda güneş hücresi hem ön hem arka taraflarından elektrik üretimi yapmaktadır.

4.5.2 Takipli (sun tracker) panel sistemleri

Gelişen teknolojiyle birlikte güneş enerjisi santrallerinde kullanılan montaj yöntemleri farklılık göstermektedir. Güneş enerjisi santrallerinin ilk örnekleri sabit açılı sistemlerle donatılmakta iken günümüzde tek eksenli veya çift eksenli sistemler daha sık tercih edilmektedir. Sabit montajlı panel sistemleri zorlu çevresel koşullara karşı daha dirençli iken mevsime ve saate göre güneşten gelen fotonları en verimli açı ile soğurmak için kullanılan hareketli sistemler daha yüksek verim sağlamaktadır. Hareketli güneş panellerinin kullanımı ile %25 ila %40'a kadar daha fazla elektrik üretmek mümkün olabilmektedir. Güneş takip sistemleri çoğunlukla daha yüksek enerji üretimi sağlasa da aşırı sıcak bölgelerde panel yüzeyinin aşırı ısınması verimi düşüreceğinden takipli sistemlerin her zaman daha yüksek verim sunacağını belirtmek doğru olmayacaktır (Awasthi vd., 2020; Fraas ve Lewis, 2010). Şekil 4.14'te yol kenarına yerleştirilmiş sabit açılı güneş panelleri görülmektedir.

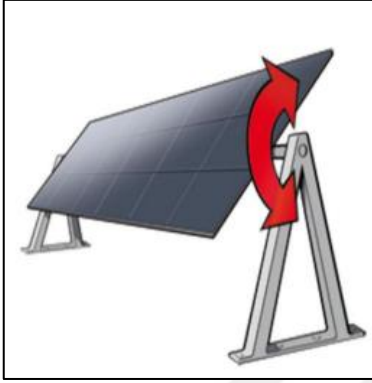


Şekil 4.14. Sabit açılı güneş panelleri, İsviçre (Durak, 2016)

Şekil 4.14'te görülebilen sabit açılı güneş panelleri, standart uygulamada işlevsiz kalacak bir alana yerleştirilmiştir. İsviçre'deki bu örnek, güneş panelleri ile alan değerlendirme örneğidir.

Güneş takip sistemlerinde verim artışı en çok yaz aylarında görülmektedir. Günümüzde en yaygın kullanılan takip sistemleri çift eksenli ve tek eksenli sistemlerden oluşmaktadır.

İzleme sistemlerinde kurulum maliyetleri yüksektir. Ayrıca takip mekanizmasının rüzgâr ve fırtına gibi çevresel şartlara karşı dirençli olmasını sağlamak da ilave maliyet oluşturmaktadır. Önceki yıllarda izleme sistemlerinin en maliyetleri ilave elektrik üretiminden elde edilen karı karşılamazken günümüzdeki yeni santrallerin çoğu takip sistemleri kullanmaktadır. Modern güneş enerjisi santrallerinin tasarımında güneş takip sistemi kullanımına ilişkin tereddütler neredeyse bulunmamakta, daha çok güneşin nasıl takip edileceğine ilişkin tartışmalar yapılmaktadır (Durak, 2016; Fraas ve Lewis, 2010). Şekil 4. 15’te tek eksenli bir güneş takip sistemi görülmektedir.



Şekil 4.15. Tek eksenli panel (Nuhoğlu, 2017)

Çift eksenli takip sistemleri genellikle birbirlerine dik olan iki döner eksen içermektedir. Bu yüzden tek eksenli takip sistemlerine kıyasla daha karmaşık kontrol sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Çift eksenli takip sistemlerinin tek eksenli takip sistemleriyle kıyaslandığında yaklaşık %16 oranında daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Bir güneş enerjisi santralinde hangi takip sisteminin kullanılacağına karar verilirken en önemli parametrelerden biri arazi durumu olmaktadır (Durak, 2016; Fraas ve Lewis, 2010). Şekil 4.16’da çift eksenli güneş takip sistemli bir panel görülmektedir.

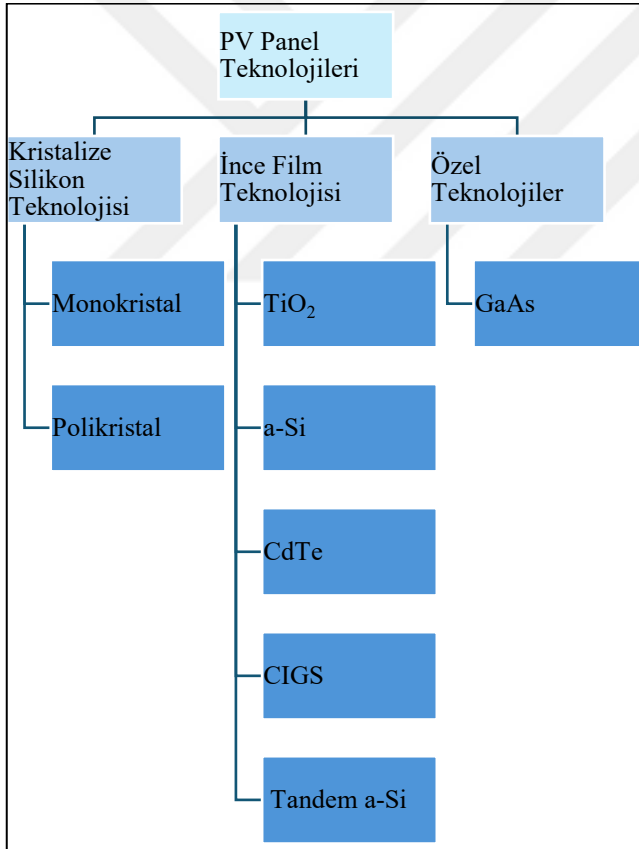


Şekil 4.16. Çift eksenli güneş paneli (Durak, 2016)

Şekil 4.16’da görülebileceği üzere, çift eksenli takip sistemleri tek eksenli takip sistemlerine kıyasla daha karmaşık bir yapıya sahiptir.

4.6 Güneş Panellerinin Üretimi Ve Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik panel sektöründeki hızlı büyüme 1980’li yıllardan bugüne devam etmektedir. 1981 yılında ticari amaçlarla temin edilebilecek tek PV panel tipi silisyum p-n tasarımı paneller iken günümüzde farklı malzemeler ve süreçlerle üretilen paneller temin etmek mümkün olmaktadır. Türlü metal oksit malzemeler ile üretilen güneş panellerinin yanı sıra organik kökenli malzemeler ile üretilen güneş panelleri de ticari amaçlarla kullanılabilmektedir. Şekil 4.17’deki diyagramda fotovoltaik panel sektöründe kullanılan çeşitli teknolojiler gösterilmektedir (Demir, 2003; Razykov vd., 2011).



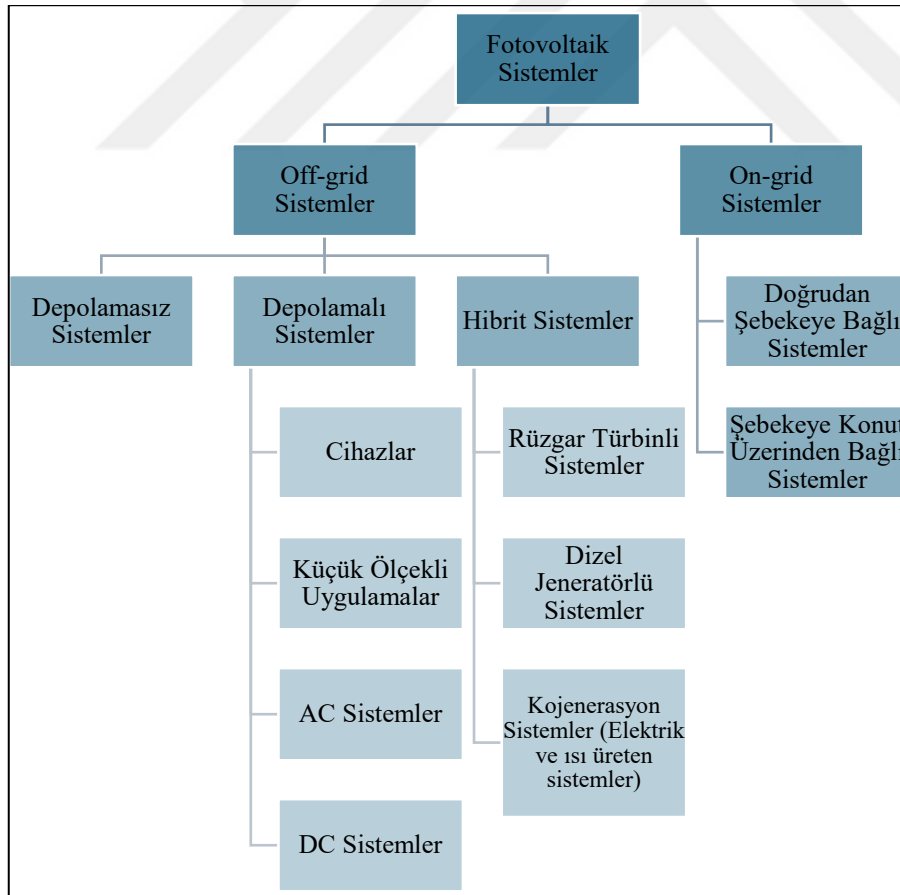
Şekil 4.17. Bazı PV panel teknolojileri (Demir, 2003)

Şekil 4.17’de “Özel Teknolojiler” grubunun altında bulunan galyum arsenit paneller üçüncü kuşak panel türündedir.

4.6.1 On-Grid ve off-grid Sistemler

Elektrik şebekesine bağlı sistemler On-grid sistemler olarak isimlendirilmektedir. Off-grid sistemlerin şebeke ile bağlantısı bulunmamaktadır. Off-grid sistemler, literatürde stand alone system veya ada sistem olarak da adlandırılabilir. Off-grid sistemlerin en önemli özelliği genellikle ihtiyaç kadar üretim yapmak için tasarlanmaları ve sistem tasarımında çoğunlukla bir depolama ünitesinin yer almasıdır. Gelişmeye devam eden ülkelerde off-grid sistemlerin kullanımının giderek arttığı bilinmektedir (İşler, 2020; Güneş, 2020).

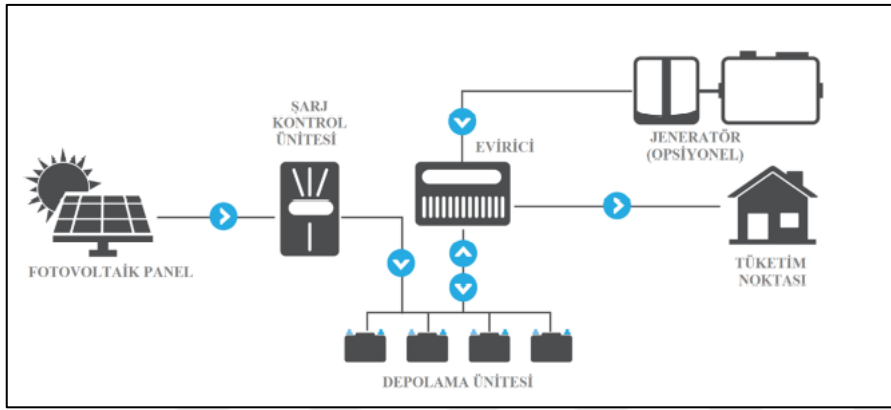
Fotovoltaik sistem sınıflandırmasındaki bir diğer sistem ise şebekeye bağlı sistemler olarak adlandırılmaktadır. Literatürde grid connected system olarak da anılan bu sistemler, çoğunlukla PV paneller aracılığıyla üretilen elektrik enerjisinin şebekeye aktarılması; aktarılan elektrik enerjisinin ise elektrik faturasından düşürülmesi veya üreticiye nakden ödenmesi prensibiyle kullanılmaktadır. (İşler, 2020; Güneş, 2020). Şekil 4.18'deki diyagramda fotovoltaik sistemler sınıflandırılmıştır.



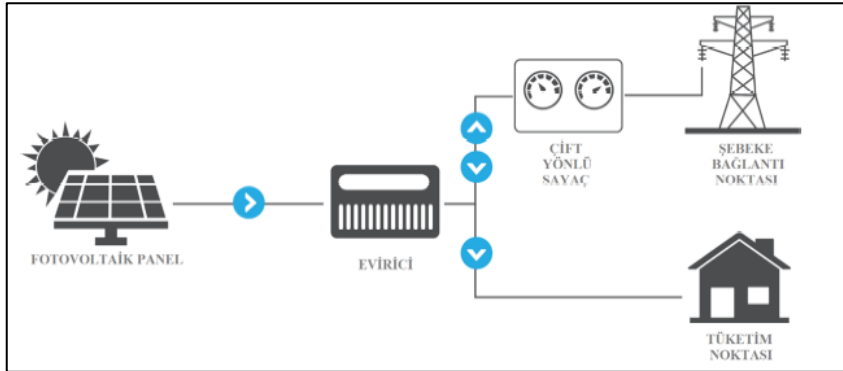
Şekil 4.18. Fotovoltaik sistemlerin gruplandırılması (İşler, 2020)

Şekil 4.18’de on-grid sistemler iki farklı alt türe ayrılırken off-grid sistemler pek çok alt türe ayrılmaktadır. Off-grid sistemler ihtiyaca göre şekillenebilen, uygulama açısından daha esnek sistemlerdir.

Off-grid sistemler, kırsal kesimlerde veya şebeke bağlantısının mevcut olmadığı konumlarda enerji talebi dikkate alınarak tasarlanan sistemlerdir. Şekil 4.19’da görülebileceği üzere, off-grid sistemlerin tasarımında güç çevirici(invertör) kullanımı gerekliken jeneratör gibi opsiyonel unsurlar da tasarıma eklenebilmektedir. (İşler, 2020; Güneş, 2020)



Şekil 4.19. Off-grid sistem şeması (Varınca ve Gönüllü, 2006)



Şekil 4.20. On-grid sistem şeması (Varınca ve Gönüllü, 2006)

Şekil 4.20’de on-grid sistem şeması görülmektedir. Şekil 4.20 ile karşılaştırıldığında şebekeye bağlı sistem şemasında depolama ünitesi bulunmadığı ve çift yönlü sayaç bulunduğu görülmektedir. Çift yönlü sayaç, şebekeye sağlanan ve şebekeden alınan elektrik miktarlarını hesaplamaktadır.

On-grid sistemler ile off-grid sistemlerin arasındaki en büyük tasarımsal fark depolama ünitesi kullanılmamasıdır. Yine de mevcut enerji ihtiyacı ve ortam koşulları dikkate alınarak şebekeye bağlı sistem tasarımlarında da depolayıcı unsur tercihe bağlı olarak

kullanılabilmektedir. Ticari ve kamusal güneş enerjisi santralleri çoğunlukla arazi tipi sistemlerden oluşmaktadır ve bu tip tasarımlarda paneller zemine montajlanmaktadır. Daha küçük çaplı zemine monteli ada sistemler ise tarımsal sulama sistemi gibi amaçlarla kullanılabilmektedir (İşler, 2020; Güneş, 2020).

Güneş panelleriyle oluşturulan sistemlerde, paneller seri veya paralel bağlama yöntemleriyle bağlanabilmektedir. Büyük çaplı GES uygulamalarında çoğu paralel olmak üzere hem seri hem de paralel bağlantılar kullanılmaktadır. Her elektrik devresinde olduğu gibi paralel bağlantıda akım artışı gözlemlenirken seri bağlantıda voltaj artışı görülmektedir. Güneş enerjisi santrallerinde iki bağlantı tipinin birlikte kullanılmasındaki amaç sistemin toplam gücünü dengeli bir şekilde arttırarak güç optimizasyonunu sağlamaktır. Ayrıca enerji iletimi ve güvenlik hususlarının dikkate alınmasıdır (Durak, 2016). Şekil 4.21’de zemine monteli tarımsal PV sistem uygulaması görülmektedir.



Şekil 4.21. Zemine monteli tarımsal PV sistem (Ferreira vd., 2024)

Şekil 4.21’deki tarımsal PV sistemde güneş panelleri tarımsal faaliyetlere engel olmayacak bir yükseklikte konumlandırılmıştır.

4.6.1.1 Fotovoltaik sistemlerin uygulama alanları

PV panel sistemler büyük ölçekli kamu uygulamalarında kullanılmaktadır. Ancak PV panel kullanımı sadece büyük ölçekli projelerle sınırlı kalmamaktadır. (Parida vd., 2011). Farklı PV panel uygulamaları alt başlıklarda incelenmiştir.

4.6.1.1.1 Yapıya entegre sistemler

Yapıyla bütünleşmiş fotovoltaik sistemlerin kullanım alanları çatı, dış cephe ve cam gibi yapı malzemelerine entegre edilerek oluşturulmaktadır. Şekil 4.22’de çatıya sonradan monte edilmiş modüler PV sistemi görülmektedir.



Şekil 4.22. Bir çatıya sonradan monte edilmiş paneller (Ueda, 2009)

Şekil 4.22’de görülebilen modüler PV sistemleri bir konutun çatısında yer almaktadır. Modüler sistemlerin entegrasi sırasında çatı ve bina iskeletine ekstra yük yüklenmektedir. Modüler sistem uygulamalarında statik hesaplamaları önem taşımaktadır.

Yeni yapıların inşası sırasında geleneksel malzemeler yerine PV panellerin tercih edilmesi hem ekonomik hem de estetik açıdan avantajlı alternatifler sunmaktadır. Konutların ve binaların dış yüzeylerine uygulanan PV sistemler, mimari açıdan beğeni toplamalarının yanı sıra yaz aylarında gölgeleme sağlayarak iç ortamın soğutma yükünü de azaltacak şekilde tasarlanabilmektedir (Parida vd., 2011; Güneş, 2020). Şekil 4.23’te bir yapının dış yüzeyine entegre edilmiş ince film güneş panelleri görülmektedir.



Şekil 4.23. Dış yüzeyine PV panel entegre edilmiş bir yapı (Debbarma, 2017)

Şekil 4.23’te yapı yüzeyine entegre edilmiş olan paneller modüler sistem değildir. Bina projesinin erken aşamalarında hesaba katılarak uygulanabilmektedir. Kullanılan PV panel türü hafiflik ve esneklik özellikleri ile öne çıkan ince film güneş panelleridir. Binaya entegre PV panel uygulamaları Şekil 4.23’teki gibi bina yüzeyine olabileceği gibi Şekil 4.24’teki gibi kısmi uygulamalar da yapılabilmektedir.



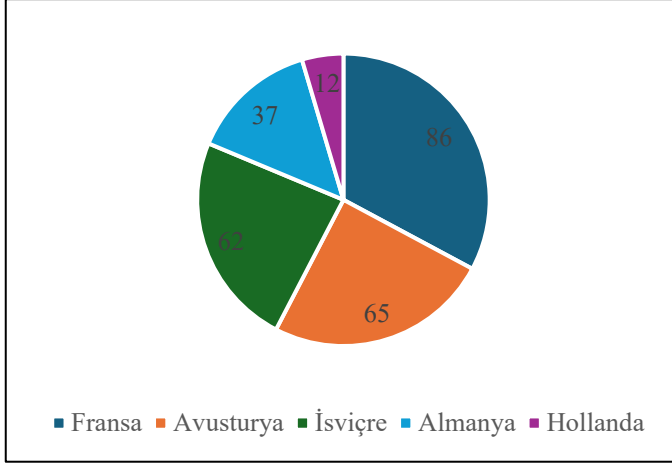
Şekil 4.24. Balkon korkuluğu olarak PV panel (Onyszkiewicz ve Sadowski, 2023)

Bina çatılarına PV sistem uygulaması yapılırken Şekil 4.25’te görülebileceği gibi entegre sistemler de tercih edilmektedir.



Şekil 4.25. Çatıya entegre PV panel uygulaması, Stockholm (Martín-Chivelet vd., 2022)

Piyasa araştırmaları entegre PV sistemlerin kayda değer bir potansiyel sunduğunu ortaya koysa da fotovoltaik teknolojilerin mimari uygulamalarda çoğunlukla ilave sistemlerle sınırlı kalması, literatürde önemli bir tartışma alanı olarak değerlendirilmektedir. Yine de Avrupa’da 90’dan fazla entegre sistem üreticisi olduğu bilinmektedir. 2015 yılından bugüne kadarki süreçte Avrupa ülkelerindeki yıllık kurulu entegre sistem kapasitesinin %140’tan fazla arttığı raporlanmaktadır. Şekil 4.26’da en çok kurulu entegre sistem kapasitesine sahip 5 ülke görülmektedir (SUPSI, 2024).



Şekil 4.26. Avrupa’da kurulu entegre PV sistem kapasitesi (SUPSI, 2024)

Şekil 4.26’da görülen pasta grafiği, Almanya’nın kurulu entegre PV sistem kapasitesinde Avrupa lideri olduğunu göstermektedir. Almanya’da entegre PV sistem kapasitesinin yaygın olması, ülke yasalarının PV sistemlere olan yoğun teşvikleridir.

4.6.1.1.2 Pv sistemlerin uzayda kullanımı

PV sistemlerin uzay gemileri ve uydularda kullanılabileceğini ilişkin çalışmaların tarihi PV hücrelerinin tarihi kadar eskidir. Astronomik nesnelerden gece saatlerinde PV elektrik üretiminin yapılıp yapılamayacağına ilişkin araştırmalar da mevcuttur. Günümüzde PV sistemlerin uzayda kullanımına ilişkin en önemli örnek Uluslararası Uzay İstasyonu’nun yaklaşık 260 bin güneş hücresi içeren ve yaklaşık yarım futbol sahası kadar alan kaplayan güneş panelleridir. İstasyon’un PV paneller aracılığıyla ürettiği elektrik 40’tan fazla konutun elektrik ihtiyacını karşılayabilecek düzeydedir. Güneş panelleri, Uluslararası Uzay İstasyonu’nun enerji ihtiyacının üzerinde elektrik üretmekte ve ürettiği elektriğin yaklaşık %60 kadarı uzay istasyonunun bataryalarına aktarılmaktadır. Bataryalarda depolanan elektrik, panellerin gölgede kalarak elektrik eldesi yapamadığı anlarda kullanılmaktadır (Parida vd., 2011; Durak, 2016; NASA, 2015). Şekil 4.27’de Uluslararası Uzay İstasyonu’nun fotoğrafı yer almaktadır.



Şekil 4.27. Uluslararası Uzay İstasyonu PV panelleri (ESA, 2023)

Şekil 4.27’de Uluslararası Uzay İstasyonu’nun güneş panelleri görülebilmektedir. İstasyonda kullanılan paneller üçüncü kuşak çok katmanlı güneş hücrelerinden üretilmiştir.

4.6.1.1.3 Katlanabilir paneller

Fotovoltaik uygulamalar için kullanılmak üzere yeni malzeme arayışı devam etmektedir. Uygulamalarda kullanılacak olan malzemelerin karakteristik özelliklerinin anlaşılması oldukça önemlidir. Malzeme seçiminin panel verimliliği, dayanıklılığı ve esnekliği üzerindeki etkisi açıkça gözlemlenebilmektedir (Dallaev vd., 2023).

Günümüzde, esnek güneş panelleri, akıllı kıyafetler olarak adlandırılan tekstil ürünlerini mühendislikle birleştirmektedir. Polis ve askerler için tasarlanan görev kıyafetlerinde de katlanabilir panel kullanımı potansiyeli artmaktadır (Dallaev vd., 2023).

Katlanabilir güneş enerjisi panelleri, ince film teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte gelişmeye devam etmektedir. Esnek panellerin avantajları arasında yüksek dayanıklılık ve darbe direncinin yanı sıra kolay taşınabilirlik de yer almaktadır. Esnek panellerin eğimli yüzeylere kolayca entegre edilebilmesi ile gelecekte fotovoltaik perdeler ve akıllı bina yüzeyleri gibi farklı kullanım alanlarının yaygınlaşabileceği öngörülmektedir (Dallaev vd., 2023). Şekil 4.28’de bir cekete entegre edilmiş giyilebilir fotovoltaik sistem görülmektedir.



Şekil 4.28. Giyilebilir PV sistem (Schubert vd., 2006)

Şekil 4.28’de yer alan giyilebilir PV sistemde üretilen elektrik mobil cihazları şarj edebilmektedir. GPS sistemi ve sağlık sensörü gibi düşük güçlü elektroniklerin çalıştırılması da sağlanabilmektedir.

4.6.1.1.4 Güneş enerjili araba yarışları

1980’li yıllardan itibaren dünya çapında gerçekleştirilmeye başlanan güneş enerjili araba yarışları, günümüzde hala küresel ölçekte düzenlenmeye devam etmektedir. 2023 yılında gerçekleştirilen World Solar Challenge yarışında Belçikalı mühendislik öğrencilerinin tasarlamış olduğu Infinite isimli araç saatlik 88,65 kilometrelik hıza ulaşarak birinci olmuştur. Aracın tasarımında 4 m²’lik kaput alanında silisyum paneller kullanılmıştır. 257 hücrenin yerleştirildiği paneller araca toplamda 1 250 W güç sağlayabilmektedir (URL-14, 2025; URL-15, 2025). Şekil 4.29’da güneş enerjili bir yarış arabası görülmektedir.



Şekil 4.29. Widya Wahana V model güneş enerjili yarış arabası (Arieffadillah vd., 2021)

Şekil 4.29’daki gibi güneş enerjili yarış arabalarında yüksek verim ve yüksek dayanım özellikleri sebebiyle monokristal güneş panelleri tercih edilmektedir.

4.6.1.1.5 Küçük ölçekli kullanımlar

Küçük ölçekli PV sistemler günlük yaşamın pek çok alanında yaygın şekilde kullanılmaktadır. PV paneller ile elektrik eldesi yapan sistemler askeri ve sivil haberleşme

alanlarında, deniz suyu arıtma tesislerinde, orman yangını gözetleme kulelerinde, ikaz ışıklarında, tarımsal amaçlı pompalarda, turistik tesislerde ve giyilebilir teknolojilerde kullanılabilmektedir (Parida vd., 2011; Durak, 2016; URL-2, 2025; Schubert vd., 2006).

4.7 Güneş Panellerinde Verim Arttırma Çalışmaları

Fotovoltaik sistemlerin verimliliğine etki eden faktörler aşağıdaki gibi listelenebilmektedir:

- Güneş pili malzemesi
- Güneş pilinin akım ve voltaj özellikleri
- Dönüştürücü verimi
- Çevresel etkenler
- Kablo kalınlık ve dirençleri
- Hücre yüzeyinin hijyeni
- Coğrafi etkenler
- Güneş pili üretiminde kullanılan yöntemler
- Güneş panellerine uygulanan bakım ve onarım prosedürleri

Bir fotovoltaik hücrenin verimi ile aynı hücrenin birleştirilmesinden oluşturulan panellerin/sistemlerin verimi birbirleriyle aynı olmamaktadır. Hücre verimi daima panelin genel veriminden daha yüksek hesaplanmaktadır. Çünkü panel verimi hesaplamasında kullanılan yüzey alanı tüm panel alanını kapsayacak şekilde hesap edilmektedir (Huan vd., 2023).

Geride kalan 10 yıllık süreç içerisinde, tek kristalli silikon bazlı güneş panellerinin verimliliği %6'dan daha fazla yükselmiştir. Laboratuvar ortamında ölçülen maksimum verimlilik rekorları tablo 4.2'de görülebilmektedir.

Tablo 4.2. Laboratuvar ortamında tespit edilen maksimum hücre verimlilikleri-2024
(Fraunhofer ISE, 2024)

Hücre Tipi	Verim
Monokristal	%27,3
Polikristal	%24,4
CIGS (İnce film teknolojisi)	%23,4
CdTe (İnce film teknolojisi)	%21
Perovskit	%25,2

Üretim süreçlerinde yaşanacak gelişmeler ile PV hücre rekor verimliliklerinin artırılabilceği öngörülmektedir. Ancak güneş enerjisi santrallerinde verimlilik, farklı coğrafyalara kurulan paneller için değişkenlik göstermektedir. Bir güneş panelinin bulunduğu ortamdaki sıcaklık arttıkça panelin çıkış gücü azalmaktadır. Fotovoltaik panellerin performansı bulutsuz ve serin iklim koşullarında bulutsuz ve sıcak koşullara kıyasla yükselmektedir. Ortam sıcaklığındaki bir derecelik artış panelin çıkış gücünü %0,5 kadar düşürmektedir. Sıcaklık gibi nemin yüksek olması da uygulamada panel verimini düşüren bir diğer etkidir. Ayrıca panellerin kurulduğu ortamın çok tozlu veya kirli olması panel verimine negatif yönde etki etmektedir. Özellikle kuş pisliği gibi çevresel faktörlerin panel sıcaklığını arttırarak verimi düşürme ihtimali bulunmaktadır (Fraunhofer ISE, 2024; Tinni, 2023).

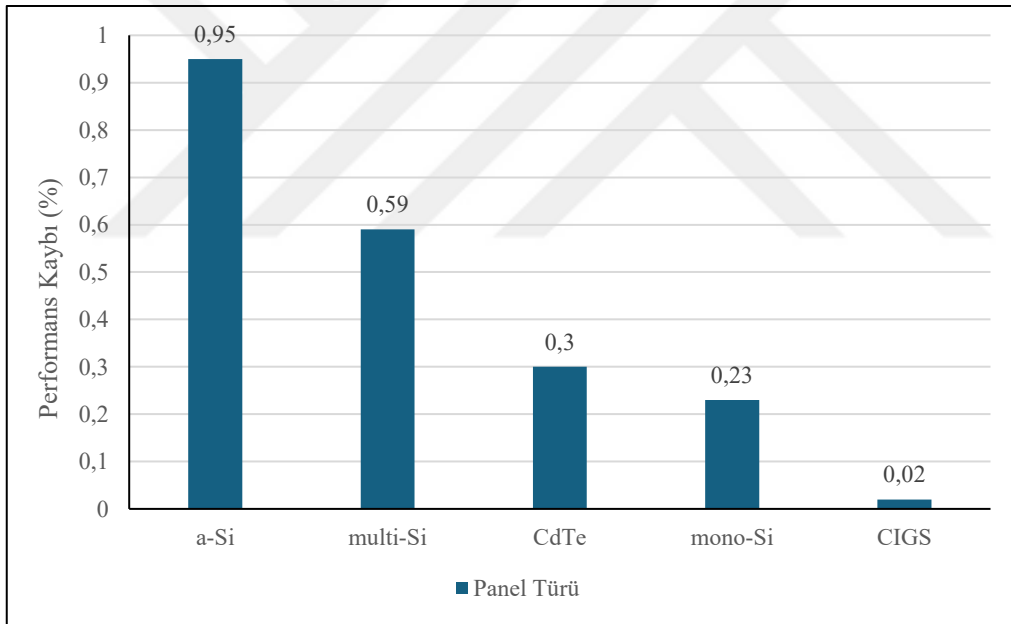
Bir güneş hücresinin ulaşabileceği maksimum teorik verim %70 olarak gösterilse de uygulamadaki gerçekçi hedefin %45 sınırı olduğu düşünülmektedir. Güneş panellerinde verimi arttırmanın üç temel yolu mevcuttur:

- Her emilen foton için bir elektron toplanabiliyor olması gerekmektedir.
- Her fotondaki enerji olabildiğince verimli kullanılmalıdır. Zira güneş spektrumu farklı enerjiye sahip fotonlar içermektedir.
- Hücrenin ürettiği voltaj ile yarı iletkenin bant açıklığı enerjisi mümkün mertebe yakın olmalıdır.

Her emilen foton için bir elektron toparlanabilmesini sağlamanın başlıca yöntemi çok yüksek saflıkta yarı iletken malzeme kullanılmasıdır. Saflık ne kadar yüksek olursa fotonun enerjisini emen elektron yoldaki engellere takılıp sönmünden önce birleşim

noktasına ulaşarak elektrik üretebilme kabiliyetini arttıracaktır. Her fotondaki enerjinin olabildiğince verimli kullanılması, en temel anlamda, enerjisi düşük fotondan elektrik üretme yeteneği geliştirebilmektir. Enerjisi yüksek olan fotonların ise enerjisinin bir miktarının kullanılıp fazlasının israf edilmesi durumundan kaçınmak gerekmektedir. Foton enerjisinin verimli kullanılabilmesine yönelik çalışmalar, çok katmanlı (tandem) hücrelere ve spektral uyumlu malzeme seçimi gibi kriterlere yoğunlaşmaktadır. Çok katmanlı hücre tasarımları ile her katmanda farklı bir enerji seviyesinin emilimi gerçekleştirilirken galyum arsenit (GaAs) gibi spektral uyumluluğu yüksek malzeme tercihleri güneş spektrumuna en uygun bant aralığını elde etme olanağı sağlamaktadır. Hücrenin ürettiği voltaj ile PV hücre üretiminde kullanılan yarı iletkenin bant açıklığı enerjisini birbirine yakınlaştırmak ise perovskit gibi yeni nesil malzemeler üzerine yapılan çalışmalarla mümkün olmaktadır (Fraas ve Lewis, 2010).

Şekil 4.30’da farklı PV panel türlerinin yıllık performans kaybı oranları gösterilmektedir.

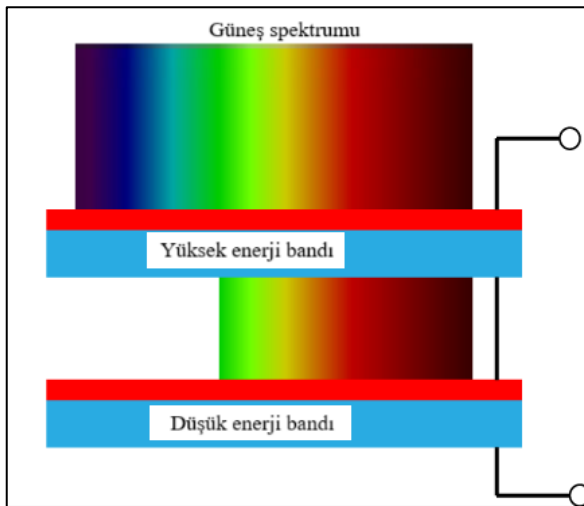


Şekil 4.30. PV panellerde yıllık performans kaybı oranları (Stanford Understand Energy, 2024)

Her sistemde olduğu gibi, PV panel sistemlerinde de eskimeye bağlı performans kayıpları yaşanabilmektedir. Uzun dönem kullanımda en hızlı eskiyen (veya en çok performans kaybı yaşayan) panel teknolojileri şekil 4.30’da görülmektedir. Panel performanslarının yıllar geçtikçe neden farklı oranlarda eskidiklerine ilişkin sebepler henüz tam olarak anlaşılamamaktadır. Ancak eskime verileri, fotovoltaiik projelerin modellenmesi ve

tasarlanmasında özellikle ekonomik açıdan önemli bir kriter olarak hesaba katılmaktadır (Stanford Understand Energy, 2024).

PV panellerin verimi üzerine yapılan laboratuvar çalışmaları, henüz ticari amaçla veya büyük ölçekli projelerde kullanılamayan ancak hızla gelişmekte olan bazı güneş paneli teknolojilerini açığa çıkartmaktadır. Özellikle farklı element ve bileşiklerden elde edilen çok katmanlı güneş panelleri, yeryüzüne ulaşan hemen her fotondan elektrik üretme kapasitesine sahip olabildiğinden laboratuvar ortamındaki verimlilikleri %47,6'ya kadar çıkabilmektedir. Çok katmanlı hücre tasarımında yüksek enerjili fotonları soğurabilmek amacıyla yüksek bant aralığına sahip bir malzemeden üretilen bir üst hücre kullanılmaktadır. Söz konusu üst hücre yüksek enerjili fotonları soğururken düşük enerjili fotonların geçişine izin vererek alt katmandaki hücrede de elektrik üretilmesine olanak tanımaktadır. Alt katmandaki hücre, düşük bant aralığına sahip bir malzemeden üretilmektedir. Çok katmanlı hücre tasarımında en çok kullanılan elementler periyodik tablonun III. ve V. grubundakilerdir. Tandem güneş hücresi teknolojisine ilişkin en önemli kısıt, maliyetin çok yüksek olmasıdır. Hafif materyallerle yüksek enerji üretiminin kritik öneme sahip olduğu uzay uygulamalarında tandem hücreler kullanılmakla birlikte, henüz ticari ve büyük ölçekli santral uygulamalarına rastlanmamaktadır (Riverola vd., 2019; Fraunhofer ISE, 2024; DOE, 2025b). Şekil 4.31'de çok katmanlı bir güneş hücresinin şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 4.31. Çok katmanlı hücre şeması (Liyakath vd., 2021)

Şekil 4.31'de yer alan şematik gösterim, güneş spektrumunun hücreye farklı dalga boylarında ulaştığını açıkça göstermektedir. Çok katmanlı güneş hücresinde yüksek enerjili mavi ışık spektrumundan elektrik üretimi farklı bir katmanda gerçekleşirken

düşük enerjili kırmızı ışık spektrumundan elektrik üretimi farklı karakteristiklere sahip bir katman tarafından elektrik üretilmektedir.

4.7.1 Güneş panellerinin temizlenmesi

Güneş enerjisi panellerinde verim arttırma çabalarının mekanik açıdan önemli kısmını panel yüzeyinde toz ve kirle mücadele oluşturmaktadır. Yüzeyde biriken toz ve kirler, güneş ışığını engelleyen bir bariyer görevi görerek verimi düşürmektedir. Tozlanma, güneş panellerinin verimini %40 kadar düşürebilirken güç çıkışında ise %86'ya varan oranlarda negatif etki oluşturabilmektedir (Najmi ve Rachid, 2023).

Güneş paneli temizliğinde kullanılabilecek en basit yöntem su ile temizliktir. Ancak su kaynaklarının olmadığı veya sınırlı olduğu bölgelerde bu yöntem zorluklar yaratabilmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek amacıyla güncel teknolojik gelişmelerden de faydalanılarak yenilikçi çözümler üretme arayışı devam etmektedir. Otomatik/robotik temizlik sistemleri, kirlenme karşıtı kaplamalar ve su kullanımını minimuma indirmeyi amaçlayan temizlik sistemleri ile daha verimli, ekonomik ve çevreci yaklaşımlar geliştirilmektedir (Najmi ve Rachid, 2023).

4.7.1.1 Manuel Temizlik

İnsan gücüne ve zamana ihtiyaç duyulan manuel temizlik yönteminde; temizlik personelinin yaralanma riski ve panellerin zarar görme ihtimali ciddi zorluklarla karşılaşılabilir. Elektrik çarpması riskini minimuma indirmek amacıyla iletken olmayan temizlik malzemelerinin kullanımı teşvik edilmektedir. Manuel temizlik sırasında çevresel koşullarla ilişkili olarak farklı coğrafyalarda farklı miktarda su kullanımı gerekmektedir. Örnek olarak Orta Doğu coğrafyasındaki MW düzeyinde kapasiteye sahip olan santrallerin temizliğinde metrekare başına yarım litrelik su kullanımı gerektiği tahmin edilmektedir (Akkoyunlu ve Abdallatif, 2024). Şekil 4.32'de güneş panellerine manuel temizlik işlemi uygulayan bir işçi görülmektedir.



Şekil 4.32. Güneş panellerini manuel olarak temizleyen bir işçi (Akkoyunlu ve Abdallatif, 2024)

Şekil 4.32’de görülen manuel temizlik işleminde kullanılan temizlik ekipmanlarının panel yüzeyinde hasara sebep olmaması gerekmektedir.

4.7.1.2 Su Püskürtmeli Sistemler

İnsan müdahalesine gerek duymadan panel temizliği yapabilen su püskürtmeli sistemler ile su israfının önlenmesi ve daha verimli bir temizlik süreci gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Modern santrallerde kullanılan su püskürtmeli sistemler, panellerden üretilen elektrik enerjisiyle çalışarak dışa daha az ve bağımlı ve daha sürdürülebilir yaklaşımlar sergilemektedir. Püskürtmeyi sağlayan nozul elemanlarının otomasyonu programlanabilir mantıksal denetleyiciler ile gerçekleştirilebilmektedir. Su püskürtmeli sistemlerin tasarımı sırasında, sistemin su borularının oluşturacağı gölgelenme konusu dikkate alınmaktadır (Najmi ve Rachid, 2023). Şekil 4.33’te sabit borulu su püskürtmeli temizlik sistemi görülmektedir.



Şekil 4.33. Bir su püskürtmeli temizlik sistemi (Najmi ve Rachid, 2023)

Şekil 4.33’te görülen su püskürtmeli temizlik sistemi düşük su tüketimiyle geniş yüzeyleri otomatik olarak temizleyerek bakım maliyetlerini düşürmeyi ve insan gücüne olan ihtiyacı azaltmayı amaçlamaktadır.

4.7.1.3 Temizlik Robotları ve Dronlar

Modüler temizlik robotları ve dronlar güneş panellerinin temizlenmesinde kullanılan en yenilikçi yöntemlerdendir. Bu yöntemler, basınçlı/basınçsız su veya basınçlı hava kullanma avantajına sahip olabilmektedir. Modüler robotların panellere tutunması için güvenli tutunma mekanizmaları tasarlanmalıdır. Robotik temizlik sistemleriyle alakalı günümüzde yapılan çalışmalar, modüler yapıli paletli robotlardan mikrodnetleyiciler ile entegre çalışabilen robotlara kadar pek çok araştırma ortaya koymaktadır (Najmi ve Rachid, 2023; Akkoyunlu ve Abdallatif, 2024).

Robotik temizlik yöntemi üzerine yapılan çalışmalar, toz ve kuş pisliğı gibi çevresel faktörlerden otonom şekilde kurtarılan panellerin güç çıkışlarında artış gözlemlendiğini göstermektedir. Robot kollarıyla yapılan temizlik çalışmaları sonucunda, panelin elektriksel verimliliğinde %13,5 oranında artış gözlemlenmiş, ayrıca günlük enerji üretiminde %85'e varan performans artışı sağlanmıştır. Mikrodenetleyici kullanılarak yapılan bir temizlik robotu ise panel temizliğinde kayda değer bir zaman tasarrufu sağlamıştır. Hafif kirlenme koşullarında dahi robotla temizlik yapmanın enerji verimini artırabildiğı bilinmektedir. Şekil 4.34'te uzaktan izleme ve kontrol imkânı sunan, fotoelektrik sensörler ile otomatik kenar algılaması yapabilen, yağmur sensörü ve su püskürtme sistemi ile temizleme işlemini tutarlı ve eşit şekilde gerçekleştirilebilen modüler bir robot gösterilmektedir (Najmi ve Rachid, 2023; Akkoyunlu ve Abdallatif, 2024).



Şekil 4.34. Modüler temizlik robotu (Najmi ve Rachid, 2023)

Güneş panellerinin temizliğinde kullanılan dronlar özel olarak tasarlanmaktadır. Yüzeyde biriken kir ve tozları uzaklaştıran dronlar, motorlarında oluşturdukları aşağı yönlü itiş gücünü kullanarak temizlik yapmaktadır. Panellere doğru oluşan güçlü hava akımı panel

yüzeyindeki istenmeyen maddeleri yerinden söker. Dronları uzaktan yönlendirmek için sensörler ve kameralar kullanılmaktadır. Dronların yazılımı programlanırken güneş panelleri üzerindeki belli güzergahlar takip edilecek şekilde tasarım yapılmaktadır. Panellerin boyutu, şekli ve panel civarındaki olası engellerin konumu ve mevcut kir miktarı gibi unsurları değerlendiren algoritmalar yazılarak dronların en verimli güzergahı takip etmesi sağlanmaktadır (Najmi ve Rachid, 2023). Şekil 4.35'te güneş paneli temizliği yapan bir dron görülmektedir.



Şekil 4.35. Dron ile panel temizliği (Najmi ve Rachid, 2023)

Şekil 4.35'te görülen dron ile panel temizleme yöntemi 2020 yılından bugüne pilot uygulama aşamasını tamamlayarak ticari aşamaya ulaşmıştır.

4.7.1.4 Öz Temizlik Kaplamaları

Son yıllarda yapılan çalışmalar, güneş panellerinin kendi kendini temizleme yetenekleri üzerine yoğunlaşarak panel verimliliklerinin artırılabilceğini göstermektedir. Öz temizlik yöntemi, hidrofobik ve hidrofilik gibi kaplama malzemelerinin panel yüzeyinde kullanılmasıyla toz ve kirin uzaklaştırılmasını amaçlamaktadır. SiO_2 gibi hidrofobik malzemelerle kaplanan panellerin veriminde anlamlı bir artış tespit edilmiştir. SiO_2 ve TiO_2 gibi nano dolgu malzemelerinin kullanıldığı güneş panelleri enerji harcamaksızın toz uzaklaştırma işlemi gerçekleştirebilmiş ve manuel temizleme yapılan panellere kıyasla daha fazla elektrik üretmiştir. Öz temizlik kaplamalarına ilişkin çalışmalarda ek kaplamanın opaklığı arttırmaması ve optimum performans için diğer temizlik yöntemleriyle birlikte kullanılma zorunluluğuna yoğunlaşmaktadır (Akkoyunlu ve Abdallatif, 2024).

4.8 Güneş Panellerinin Ekonomik Analizi

Fotovoltaik sistemlerin özgül maliyet bileşenlerinin göz ardı edilmesi objektiflikten uzak iyimser senaryolar oluşturulmasına yol açabilmektedir. Teknik ve teknolojik ilerlemeler ile güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etmek gün geçtikçe daha az maliyet yaratmaktadır. Araştırma geliştirme çalışmalarının devam etmesi fotovoltaik panelleri en temiz en akıllı ve en ekonomik elektrik üretim yöntemlerinden biri haline getirmiştir. Batarya verimliliğindeki kararlı artışlar da PV üretim maliyetlerini azaltarak sektörün daha rekabetçi hale gelmesini sağlamaktadır (Chong vd., 2024).

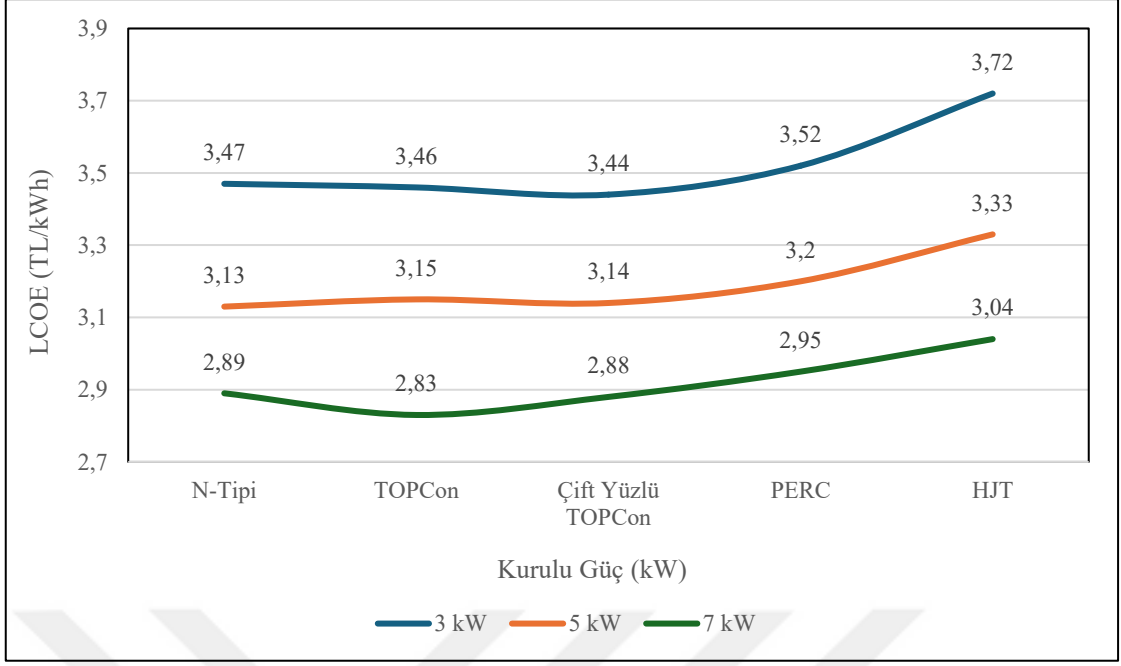
Güneş pillerinin ürettiği enerji 2010 yılında 33.759 GWh iken günümüz teknolojileri ile 1 294 481 GWh'in üzerinde bir üretim söz konusu olmaktadır (Tomczyk ve Łapniewska, 2025). Tablo 4.3'te monokristal, polikristal ve ince film güneş panellerinin kullanım ömrü ve üretim maliyetleri gösterilmektedir.

Tablo 4.3. Monokristal, polikristal ve ince film güneş panellerinin ömür ve maliyeti (Saurabh vd., 2025)

Panel Tipi	Kullanım Ömrü (Yıl)	Üretim Maliyeti \$/W
Monokristal	25-30	\$0,20-\$0,40
Polikristal	20-25	\$0,18-\$0,35
İnce Film	10-20	\$0,15-\$0,30

Tablo 4.3'te görüldüğü gibi, monokristal paneller daha yüksek üretim maliyetlerine sahiptirler. Ancak kullanım ömürlerinin uzun olması ve daha önce bahsedildiği gibi verimlerinin yüksek olması monokristal panellerin tercih edilmesini sağlamaktadır. Üretim maliyeti kolonundaki \$/W ifadesi, bir güneş enerjisi sisteminin üreteceği Watt başına ABD doları cinsinden maliyetini göstermektedir.

Elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kaynağın ne kadar ekonomik olduğunu anlamak açısından LCOE önemli bir parametredir. LCOE Türkçe'ye birim elektrik maliyeti olarak çevrilebilmektedir. (Chong vd., 2024). Güncel PV teknolojileri değerlendirildiğinde kapasite arttıkça LCOE değerinin düştüğü görülmektedir (Cristea vd., 2025). Şekil 4.36'da, günümüzde en yaygın kullanılan monokristal güneş paneli teknolojilerinin LCOE değeri görülmektedir.



Şekil 4.36. Monokristal panel teknolojileri için LCOE değerleri (Cristea vd., 2025)

Şekil 4.36’da görüldüğü üzere, en yüksek LCOE değerleri HJT teknoloji kullanıldığında ortaya çıkmaktadır. Bunun sebebi, HJT teknolojisinin yüksek maliyetli yatırım ve üretim süreçleridir. Farklı kurulu güç tasarımlarından farklı teknolojilerin daha düşük LCOE değerine sahip olduğu dikkat çekmektedir. (Cristea vd., 2025)

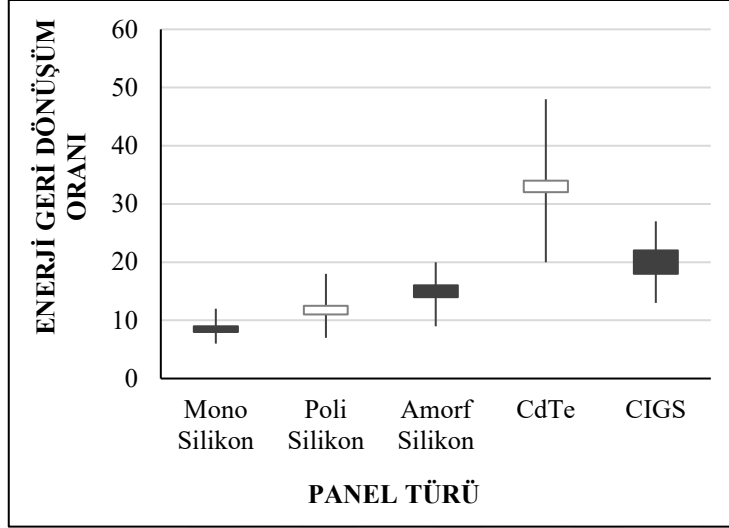
Güncel çalışmalarda, güneş enerjisinden elektrik üretirken yapılan geleneksel LCOE hesaplamalarına sistem entegrasyon maliyetini de ekleyerek sistem LCOE (S-LCOE) hesaplamaları da kullanılabilmektedir. Çin’de yapılan bir araştırma, güneş enerjisi santrallerinin S-LCOE değerinin son 12 yılda yaklaşık %70 oranında azaldığını göstermektedir. Bu veri ışığında, şebeke entegrasyon maliyetleri dahil edildiğinde bile güneş enerjisi santralleri kömür santralleriyle rekabet edebilecek kadar ekonomik bir alternatif olarak görülmektedir (Chong vd., 2024).

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)’nın 2021 yılında yayınladığı Karbon Nötr Senaryosu, 2050 yılına gelindiğinde küresel elektrik tüketiminin %90’ını yenilenebilir enerji kaynakları karşılayacağını öngörmektedir. Ancak yenilenebilir enerji teknolojileri ile elde edilen elektrik, çeşitli işlevlerdeki metallere ihtiyaç duymaktadır. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin oluşturduğu emisyonun büyük kısmı da bu metallerin elde edilmesi için gerçekleştirilen madencilik faaliyetlerinden ileri gelmektedir (Torrubia vd., 2024).

Fotovoltaik teknolojileri malzeme-enerji-emisyon ilişkisi üzerinden inceleyen çalışmalar, yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) ve enerji yatırım getirisi (EROI) parametrelerini

tartışmaktadır (Torrubia vd., 2024). Bir güneş paneli sistemine yapılan ilk yatırımın kendisini ne zaman amorti edeceğine ilişkin ekonomik analizler ise yatırım getirisi (ROI) parametresi ile tartışılmaktadır (Tomczyk ve Łapniewska, 2025).

Şekil 4.37’de farklı panel türlerinin geri dönüşüm oranları görülmektedir.



Şekil 4.37. Farklı panel tiplerinin yaklaşık enerji geri dönüşüm oranları (Stanford Understand Energy, 2024)

Şekil 4.37’ye göre, CdTe panellerden elde edilen kullanılabilir enerji miktarı, CdTe panel üretmek için harcanan enerjiden yaklaşık 35 kat daha yüksektir. En düşük EROI oranı ise monokristal silikon panellerdedir.

Perovskit hücre teknolojisi henüz tam olarak ticarileşmemekle birlikte geleceğin en önemli hücre teknolojilerinden biri olacağı düşünülmektedir. Laboratuvar deneylerinde elde edilen yüksek verim ve üretim kolaylığı gözlemlenmiştir. Perovskit gibi yeni nesil teknolojilerin ticarileşebilmesi için LCOE değerinin mevcut teknolojilere kıyasla rekabetçi olması beklenmektedir (Zhu vd., 2024). Tablo 4.4’te, mevcut monokristal teknolojisine ile bu teknolojiye orta vadede rakip olması beklenen perovskitler kıyaslanmaktadır.

Tablo 4.4. Monokristal ve perovskit teknolojilerinin ekonomik karşılaştırması (Zhu v., 2024)

Teknoloji	Birim Enerji Başına Maliyet (\$/W)	Verim	Kullanım Ömrü (Yıl)
Monokristal	~0,27\$	%24,7	~25 yıl
Perovskit	0,21\$	%18,2	~4,5 yıl

Tablo 4.4'ten de anlaşılacağı üzere, perovskit teknolojisinin önündeki iki temel sınırlayıcı unsur verim ve kullanım ömrü olarak öne çıkmaktadır. Günde yaklaşık 6 saat güneşlenme süresi altında perovskit modülün 10 000 saatlik kesintisiz çalışabileceği tahmin edilmektedir. Bu da 4,5 yıla denk gelmektedir. Günümüzde, perovskit hücreler için standartlaşmış bir stabilite değerlendirme protokolü bulunmamaktadır (Zhu v., 2024).

4.9 Güneş Panel ve Santrallerinin Geleceği

Sonsuz bir enerji kaynağı olan güneş enerjisinden daha yüksek verimli panellerle faydalanma hedefi güncel güneş panel ve santrallerindeki teknolojik gelişmelerin devamlılığını sağlayan yegâne motivasyon kaynağıdır. Günümüzde, panel verimliliğini arttırmak, panel üretim ve geri dönüşüm sürecinde çevreye daha da az zarar vermek ve güneş paneli sektörünün daha da büyümesini sağlamak amaçlı pek çok çalışma yapılmaktadır. Söz konusu çalışma başlıklarından biri de şeffaf hücreleridir. Şeffaf güneş hücrelerine ilişkin çalışmalar, geleneksel güneş panellerinin bir binaya enerji sağlamak için çok miktarda alana ihtiyaç duyulması problemini aşmak için yapılmaktadır. Şeffaf güneş hücresi teknolojisi, herhangi bir cam yüzeyi güneş hücresine çevirmeyi amaçlamaktadır. Şeffaf hücreler, binaların ve otomobillerin pencerelerinden iç ortama gelen istenmeyen ışık enerjisinin soğurulması prensibiyle çalışmaktadır. Böylece mimari alanların verimli kullanılması sağlanmaktadır (Husain vd., 2018).

Şeffaf güneş hücresi teknolojisi, büyük şehirleri ve metropollerini yalnızca elektrik enerjisi tüketen alanlar olmaktan çıkarıp küçük ölçekli güneş enerjisi santrallerine dönüştürülmesini amaçlamaktadır. Şeffaf güneş hücrelerine ilişkin en yaygın uygulama alanı yapıya entegre sistemler olarak öne çıkmaktadır. Yüzeyinin %90'ı camdan oluşan bir binanın cam yüzeyleri şeffaf güneş hücresi olarak tasarlandığında bu binanın elektrik tüketiminin %40'ından fazlası güneş enerjisinden karşılanabilmektedir. Bazı şirketler, kabul edilebilir verimlilik düzeyinde şeffaf güneş hücresi uygulamaları gerçekleştirmiş olsa da bunlar henüz silikon güneş panelleriyle rekabet edebilecek düzeyde değildir. Yine

de şeffaf güneş hücrelerine olan ilgi, modern dünyadaki tüm cam yüzeylerin potansiyel birer güneş paneli olması itibarıyla giderek artmaktadır. Şeffaf güneş hücrelerinde dokuz farklı teknoloji kullanılmakla birlikte, en yaygın kullanılan teknoloji ince film fotovoltaiiklerdir. Şeffaf güneş hücreleri henüz kayda değer bir ticari atılım gösterememiştir ve araştırma aşamasındadır. Ancak yakın gelecekte, bu teknoloji sayesinde, kendi kendini şarj edebilen mobil cihazlardan ve herhangi bir çatı alanı kullanımına ihtiyaç duymadan net sıfır enerji tüketimine ulaşabilecek gökdelenlerden söz edilebileceği öngörülmektedir (Husain vd., 2018).

Yapay zekâ, robotik, veri bilimi ve bilişim teknolojilerindeki tüm diğer gelişmeler güneş panellerinin üretiminden uygulamasına ve hatta panellerin çevresel etkenlerle mücadelesine kadar pek çok alanda kullanılabilmektedir. Yapılan bir çalışmada, güneş panellerinin yüzeyindeki kir ve toz birikiminin akıllı robotlarla gerçekleştirilerek hijyen için daha az insan emeği ve zamana ihtiyaç duyulabileceği gösterilmiştir (Chakaborty vd., 2021).

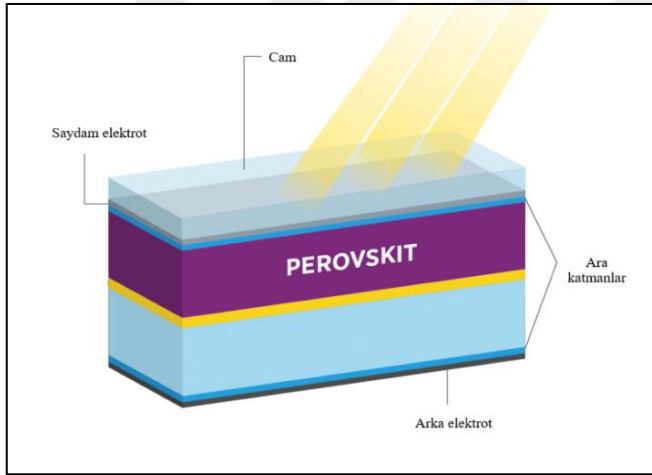
Malzemelerin dijital ortamda üretilebilmesi gelişmiş bir üretim yöntemidir. Bu yöntemde veri bilimi ve makine öğrenmesi gibi gelişmelerden sıkça faydalanılmaktadır. Laboratuvar ortamında en yüksek verimlilik oranlarından birine ulaşan perovskit paneller, dijital ortam üretim teknolojilerinden faydalanılarak incelenilmektedir. Dijital yöntemlerle üretilen malzemelerin başlıca avantajları aşağıdaki gibidir:

- Tasarım, sentez ve performans optimizasyonu süreçleri hızlandırılarak daha verimli iş akış süreçleri oluşturabilmek
- Talep edilen performans doğrultusunda malzeme özellikleri ve sentez süreçleri üzerinde hassas kontrol imkanı oluşturmak
- Gelecekteki panel teknolojileri için umut vadeden malzeme adaylarını belirleyerek yeni malzeme özelliklerini optimize edebilmek.

Son birkaç yıl içinde, veriye dayalı yaklaşımlar, yüksek verimli deney teknolojileri ve makine öğrenimi ile birlikte perovskitlerin dijital üretiminin çapraz entegrasyonundaki gelişmeler, uluslararası düzeyde bilimsel araştırmaların ön cephesi ve odak noktası haline gelmiş ve dikkate değer ilerlemeler kaydedilmiştir (Fraunhofer ISE, 2024; Wang vd., 2025).

Güncel PV teknolojilerinde en çok ilgi gören alanlardan biri olan perovskit güneş panelleri, araştırma aşamasından ticarileşme aşamasına geçiş döneminde olmakla

birlikte, özellikle Asya kıtasında büyük yatırımlar ile desteklenmektedir. Standart güneş panellerinden 20 kat daha ince yapıda üretilen perovskit paneller, çok katmanlı tasarımlarla birlikte kullanılabilir. Asya kıtasında bu panellere yapılan yatırımlar milyarlarca Amerikan doları ölçeğindedir. Perovskit güneş panellerinin, yüksek verimlilik ve düşük maliyet avantajları sayesinde PV sektöründe büyük değişiklikler gerçekleştirmesi beklenmektedir. Perovskit panellerle ilgili ilk çalışmaların kökeni 2009 yoluna uzanmaktadır. Perovskit panellerde yaşanan heyecan verici gelişmelere rağmen üretim süreçlerinde kullanılan temel malzemelerden birinin kurşun olması çevre sağlığı açısından önemli zorluklar oluşturmaktadır. Perovskit panellerin henüz büyük çaplı santrallerde kullanılmadığı bilinse de 2026-2027 yılları arasında ABD’de kurulacak bir güneş enerjisi santrali için Oxford Üniversitesi’nde geliştirilen panellerin sevkiyatına devam edilmektedir (DOE, 2025b; Zhang, 2024; URL-13, 2025). Şekil 4.38’de şematik olarak çok katmanlı perovskit güneş pili görülmektedir.



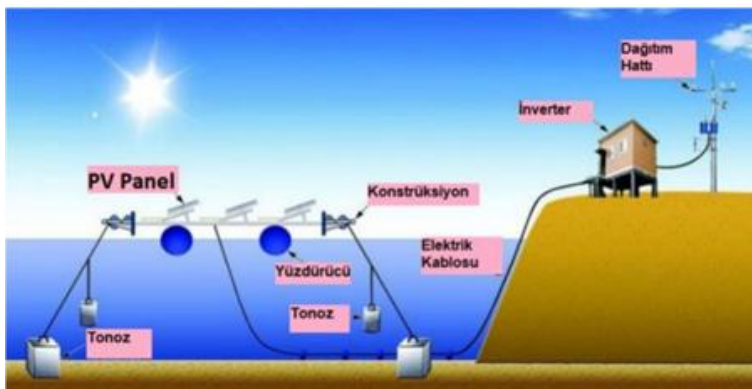
Şekil 4.38. Çok katmanlı perovskit güneş pili (DOE, 2024)

Şekil 4.38’deki şematik gösterimde perovskit katmanının altında konumlanan katman monokristal silikondur.

Çok katmanlı güneş hücreleri, ilk kullanımına 1958 yılında rastlanan uzay PV sistemlerine entegre edilebilmektedir. Uzay araçları ve uydularda kullanılan çok katmanlı hücrelerin temel görevi, yüksek verimlilikleri ve radyasyon yeteneklerini de kullanarak birim güç için ihtiyaç duyulan kütle miktarını azaltmaktır. Uzay projelerinde kullanılan bir diğer güneş pili çeşidi olan perovskitler, düşük maliyet ve yüksek güç/ağırlık oranına sahip olmakla birlikte, radyasyon hasar mekanizmalarının daha iyi incelenmesine gerek duymaktadır. Çünkü perovskit güneş pilleri, silikon ve GaAs hücrelerle kıyaslandığında çok daha düşük ömürlüdür (Li vd., 2021; Huan vd., 2023).

PV sistemlerin daha yüksek verimlilik oranlarıyla çalışabilmesi için üzerine pek çok araştırma geliştirme çalışmasının yapıldığı bir diğer alan da yüzey soğutma işlemleridir. Çünkü uygun soğutma sağlanması durumunda, elektriksel verimi artacak ve güneş pillerinin ömrü uzatılabilecektir. Silikon güneş panelleriyle yapılan bir çalışma, panel yüzeyini soğutmak için panel yüzeyini 1 cm derinlikteki suya daldırmanın panel verimini neredeyse %18 kadar arttırılabileceğini göstermektedir. Söz konusu çalışma ışığında panel yüzeyini suya daldırarak soğutma işleminin yüzer güneş enerjisi santrallerinin kurulduğu alanlardaki gibi daha büyük su kütlelerine de uygulanabileceği öngörülmektedir (Siecker vd., 2017; Mehrotra vd., 2014).

Güneş enerjisi santrallerindeki en yenilikçi teknolojilerden biri de yüzer güneş enerjisi santralleridir. Yüzer santrallere olan ilgi Türkiye ve dünyada artarak devam etmektedir. Yüzen santrallerin konumlandırılması için denizler, göller veya barajlar kullanılabilir. Yüzen santrallerin önemli avantajlarından biri, üzerine kurulduğu su kütesinin soğutma etkisinden faydalanarak karada kurulan santrallere kıyasla daha yüksek verimde çalışabilmesidir. Bu santrallerin en büyük avantajlarından bir diğeri ise barajlara kurulan yüzer santrallerin barajdaki mevcut trafo ve iletim hatlarına uyum gösterebilmesidir. Yüzer güneş sistemleri de karasal sistemlerde olduğu gibi sabit açılı veya güneş takip mekanizmalı olacak şekilde tasarlanabilmektedir. Şekil 4.39’da standart bir yüzer güneş enerjisi santrali görülmektedir. Şekil 4.40’ta, Çin’de yer alan bir yüzer GES ve santral çevresinde balık tutan kişiler görülmektedir (Gökmener vd., 2023; Akçul ve Sadık, 2024).



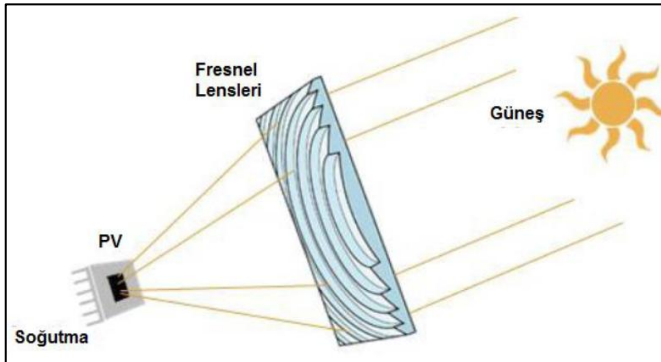
Şekil 4.39. Yüzer güneş santrali (Akçul ve Sadık, 2024)



Şekil 4.40. Çin’de konumlanan bir yüzer GES (Xue, 2017)

Yüzer GES’lerin en büyük dezavantajları su kütlesinde meydana gelebilecek doğa olaylarından etkilenmesi, kurulumda kullanılan materyallerin zaman içerisinde korozyona uğraması, yüksek maliyetli olması ve su kütlesinin ekosistemine zarar vermesi olarak sıralanabilmektedir. Türkiye üzerine yapılan çalışmalar, Türkiye’deki barajlara yüzer GES’ler kurulmasıyla birlikte barajlardaki suyun korunabileceği ve daha fazla yeşil enerji üretilebileceğini göstermiştir (Akçul ve Sadık, 2024; Şenli, 2023).

Günümüzde, yoğunlaştırılmış fotovoltaik sistemlere ilişkin pek çok çalışma yapılmaktadır. Tarihi 1970’li yıllara dayanan yoğunlaştırılmış sistemler, güneş ışınlarını Fresnel lensler ile 500 kata kadar yoğunlaştırarak standart panellere kıyasla daha yüksek verim elde etmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca yoğunlaştırılmış sistemlerin kurulum aşamasında, aynı miktarda enerji üreten klasik GES’lere kıyasla %30 arazi kullanımı tasarrufu yapılabilmektedir. Yoğunlaştırılmış sistemlerin önündeki en büyük zorluk sistemin genel soğutma düzeneğine bağlı olarak termal sistemin yönetilmesidir (Durak, 2016). Şekil 4.41’de fresnel lensli CPV sistemi görülmektedir.



Şekil 4.41. Fresnel lensli CPV sistemi (Durak, 2016)

Aynı arazi üzerinde hem tarım yapmayı hem de elektrik enerjisi üretmeyi sağlayan agrivoltaik tarım teknolojileri, güneş enerjisi santrallerindeki en büyük yeniliklerden bir

diğeridir. Yalnızca 2012-2020 yılları arasında 500 kattan fazla kurulu güç kapasitesine ulaşan bu santraller, dünya nüfusunun artmasıyla birlikte hem tarımsal gıda hem de elektrik ihtiyacının artacağı bir gelecekte agrivoltaik teknolojilerin kilit rol oynayacağı öngörülmektedir. Küresel ölçekte agrivoltaik sistemlerin kullanımı büyük bir hızla artmakta olup bu sayede enerji özerkliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından avantaj sağlanmaktadır. Tarım arazilerine kurulan güneş paneli sistemleri hem açık tarlalara hem de seralara entegre edilebilmektedir. Agrivoltaik sistemlerde geliştirilmesi gereken en önemli noktalardan biri sistemde kullanılan panellerin opaklık derecesinin azaltılmasıdır. Tarım arazilerinde kullanılan güneş panellerinin opaklığının azaltılmasında ince film teknolojili paneller ve perovskit bazlı paneller kullanılabilmektedir. Yarı şeffaf güneş panellerinin kullanılma amacı, fotosentetik radyasyonun bitkileri beslemesini sağlarken spektrumdaki diğer ışınların elektrik enerjisi eldesinde kullanılabilesidir (Gorjian vd., 2022). Şekil 4.42’de Çin’de konumlanan bir agrivoltaik tarım tesisi görülmektedir.



Şekil 4.42. Çin’de konumlanan bir agrivoltaik tarım tesisi (URL-9, 2025)

Şekil 4.42.’de görülebilen agrivoltaik tarım tesisi, uzak doğu ülkelerinin geleneksel tıp uygulamalarında sıklıkla kullanılan kurt üzümü üretimi gerçekleştirmekle birlikte 640 MW kapasiteli güneş enerjisi panellerine sahiptir. Santralin kapasitesinin 1 GW’ye kadar artırılması hedeflenmektedir. 2014 yılı öncesinde çölleşmiş bir arazide konumlanan tesis; serçe, tavşan ve sülün gibi bölgedeki vahşi hayvan sayısında da artış sağlamıştır. Güneş panellerinin 2,9 metre yüksekliğe kurulması hem işletme sürecini kolaylaştırmış hem de tarım için yeterli alan oluşturmuştur (URL-9, 2025).

5 SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, güneş enerjisi santrallerinde son yıllarda kaydedilen teknolojik gelişmelerin üretim verimliliği, yatırım maliyetleri ve işletme performansı üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Özellikle güneş paneli üretiminde geleneksel hücrelerin yerini, daha yüksek verimli ve düşük kayıplı PERC, TOPCon ve HJT gibi gelişmiş hücre teknolojilerine bırakması, santral performansını önemli ölçüde artırmıştır. Santrallerde çift yüzölçümlü panellerin yaygınlaşması, bir santralin aynı sayıdaki panel ve hücre ile daha fazla elektrik enerjisi elde edebilmesinin önünü açmıştır. Bu geçişler, yalnızca enerji dönüşüm verimliliğini artırmakla kalmamış, aynı zamanda otomasyon destekli üretim hatları sayesinde birim watt başına maliyetlerde ciddi düşüşler sağlamıştır.

Düşen maliyetlerin bir diğer nedeni, Asya ülkelerinde (özellikle Çin, Hindistan, Güney Kore) panel üretim kapasitesinin ölçek ekonomisiyle genişletilmesidir. Bu ülkelerdeki büyük yatırımlar, panel fiyatlarını küresel ölçekte erişilebilir kılmış, güneş enerjisini daha hızlı yaygınlaştırmıştır. IEA verilerine göre, güneş panellerinin maliyeti son on yılda %80'in üzerinde azalmıştır.

Santral verimliliği açısından soğutma ve temizlik sistemlerinde de önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Geleneksel pasif soğutma yöntemleri yerine faz değişimli materyaller, aktif sıvı soğutma sistemleri ve yüksek yansıtıcı yüzey uygulamaları ile hücre sıcaklıkları daha etkin şekilde kontrol edilebilmektedir. Ayrıca manuel temizlik yöntemlerinin yerine otonom robotik temizlik sistemleri pek çok büyük santralde yaygınlaşmıştır. Öte yandan, hidrofobik ve nano-kaplama teknolojileri halen saha testleri ve Ar-Ge aşamasındadır; ticarileşmeleri, uzun vadeli dayanıklılık ve maliyet/yarar dengesi açısından değerlendirilmektedir.

Güneş takip sistemleri (solar tracker), fotovoltaik panellerin gün boyunca güneşin konumuna göre hareket etmesini sağlayarak, sabit sistemlere kıyasla daha fazla enerji üretimi sağlar. Özellikle tek eksenli takip sistemleri, büyük ölçekli santrallerde %15 ila %25 arasında verim artışı sağlayabilmektedir. Geçmiş yıllarda kurulan santrallerde genellikle sabit açılı panel yerleşimi tercih edilmişken modern santrallerde tek eksenli güneş takibi gerçekleştiren mekanizmalar tercih edilmektedir. Son yıllarda, motor verimliliği artan, rüzgâr yüklerine dayanıklı ve yazılım kontrollü takip sistemleri

geliştirilmiş; bu da bakım maliyetlerini düşürürken sistem güvenilirliğini artırmıştır. Bu gelişmeler, güneş takip teknolojilerini yatırımcılar için daha cazip hale getirmiştir.

Güneş hücrelerinde yeni nesil malzeme arayışları bağlamında, son yıllarda öne çıkan bir diğer gelişme ise perovskit tabanlı güneş hücreleridir. İlk kez 2009 yılında laboratuvar ortamında düşük verimli bir hücre olarak tanıtılan bu teknoloji, çok kısa sürede verimlilikte %25 seviyelerini aşarak dikkat çekmiştir. Geleneksel silikon hücrelerle tandem (ikili katman) yapılar hâlinde kullanıldığında teorik verim limitlerini zorlayabilecek kapasiteye sahiptir. Ancak perovskitlerin kararlılık, nem duyarlılığı ve toksik içerik (kurşun) gibi dezavantajları, henüz büyük ölçekli ticari kullanımı sınırlamaktadır. Buna rağmen, çok sayıda araştırma kurumu ve özel sektör aktörü bu alandaki Ar-Ge yatırımlarını sürdürmekte, geleceğin güneş santrallerinde perovskitlerin önemli bir rol oynayabileceği öngörülmektedir.

Türkiye’de güneş enerjisi yatırımlarının planlanmasında, yüksek verimli hücre teknolojilerinin (TOPCon, HJT) tercih edilmesi ve uzun ömürlü panel yapılarının desteklenmesi, yatırımın geri dönüş süresini iyileştirecektir.

Otonom temizlik sistemleri, faz değişimli soğutma teknolojileri ve güneş izleyici (tracker) sistemleri gibi yardımcı teknolojiler sahaya entegre edilmeli; bu alanlarda yerli üretim ve inovasyon desteklenmelidir.

Hidrofobik ve nano-kaplama uygulamaları için üniversite-sanayi iş birliğinde saha testleri yapılmalı, bu teknolojilerin ekonomik uygulanabilirliği değerlendirilmelidir.

Perovskit hücreler, henüz ticari olgunluğa ulaşmamış olmasına rağmen, Ar-Ge ve pilot uygulama projeleri ile Türkiye'nin bu alandaki teknolojik hazırlığı artırılmalıdır. Özellikle perovskit-silikon tandem yapılar üzerine yürütülecek çalışmalar, gelecekte yüksek verimli santral uygulamaları için öncü olabilir.

Ulusal düzeyde, güneş enerjisi teknolojilerindeki gelişmeleri teşvik eden dinamik bir mevzuat altyapısı oluşturulmalı; yatırımcıların yeni teknolojileri risk almadan denemesine olanak sağlayan pilot destek mekanizmaları devreye alınmalıdır.

KAYNAKLAR

- Abamor, S. (2016). Şebeke bağlantılı fotovoltaik enerji santrallerinin elektrik güç kalite parametrelerinin izlenmesi ve analizi [Yüksek lisans tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. Şanlıurfa.
- Ahmadi, M. H., Ghazvini, M., Sadeghzadeh, M., Alhuyi Nazari, M., Kumar, R., Naeimi, A., & Ming, T. (2018). Solar power technology for electricity generation: A critical review. *Energy Science & Engineering*, 6(5), 340–361. <https://doi.org/10.1002/ese3.239>
- Akçul, M., & Sadık, A. (2024, Şubat 11–12). Yüzer güneş enerjisi sistemleri [Konferans sunum özeti]. International Scientific Compilation Research Congress, Ankara, Türkiye. https://www.researchgate.net/publication/379840387_YUZER_GUNES_ENERJISI_SISTEMLERIFLOATING_SOLAR_ENERGY_SYSTEMS
- Akkoyunlu, M. T., & Abdullatif, Y. (2024). A comprehensive investigation of solar panel cleaning technologies: A review study. *Journal of Thermal Engineering*, 10(6), 1715–1741. <https://doi.org/10.14744/thermal.0000879>
- Altaş, İ. H. (1998). Fotovoltaik güneş pilleri: yapısal özellikleri ve karakteristikleri. *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3E*, 47, 66–71. http://www.ihaltas.com/downloads/publications/3e_98_04_PV_03.pdf
- Altuntaş, H. (2019). Türkiye’de yenilenebilir enerji hedef ve politikaları ile fotovoltaik güneş enerjisinin gelişimi [Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. Ankara.
- Ariefadillah, M. F., Kumara, I. N. S., & Divayana, Y. (2021). The development of solar PV car to reduce carbon emissions from the transport sector. *Journal of Electrical, Electronics and Informatics*, 5, 10–20. <https://doi.org/10.24843/JEEI.2021.v05.i01.p03>
- Atay, S. (2020). Çatı tipi güneş panellerinin verimini etkileyen çevresel parametrelerin incelenmesi [Yüksek lisans tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. Kahramanmaraş.
- Atalay, Ö., Yorgun, B., & Erdem, R. (2019, Kasım 8–9). Fotovoltaik (PV) güneş enerjisi sistemleri ve çatı uygulamaları [Konferans sunum özeti]. 8. Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi, Mersin, Türkiye. <https://www.mmo.org.tr/8-gunes-enerjisi-sistemleri-sempozyumu-ve-sergisi/bildiriler-kitabi>
- Awasthi, A., Shukla, A. K., Manohar, M. S. R., Dondariya, C., Shukla, K. N., Porwal, D., & Richhariya, G. (2020). Review on sun tracking technology in solar PV system. *Energy Reports*, 6, 392–405. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.02.004>
- Baldemir, M. A. (2022). Piren merkezli elektroaktif molekül tabanlı organik fotovoltaik güneş hücresi üretimi ve karakterizasyonu [Yüksek lisans tezi, Amasya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. Amasya.
- Birant, G. (2017). Surface coverage control of self organized plasmonic nanostructures at interfaces of photovoltaics related materials [Yüksek lisans tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. Ankara.
- Braga, A. F. B., Moreira, S. P., Zampieri, P. R., Bacchin, J. M. G., & Mei, P. R. (2008). New processes for the production of solar-grade polycrystalline silicon: A review. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 92, 418–424. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.10.003>
- Braga, D. S., Kazmerski, L. L., Cassini, D. A., Camatta, V., & Diniz, A. S. A. C. (2023). Performance of bifacial PV modules under different operating conditions in the state of Minas Gerais in Brazil. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 8, 23. <https://doi.org/10.1051/rees/2023021>

- Chakaborty, S., Borole, Y. D., Nanoty, A. S., Shrivastava, A., Jain, S. K., & Rinawa, M. L. (2021). Smart remote solar panel cleaning robot with wireless communication. In 2021 9th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM) (pp. 1–5). Bengkulu, Indonesia. <https://doi.org/10.1109/CITSM52892.2021.9588917>
- Charalambous, P. G., Maidment, G. G., Kalogirou, S. A., & Yiakoumetti, K. (2007). Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review. *Applied Thermal Engineering*, 27, 275–286. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.06.007>
- Chong, S., Wu, J., & Chang, I. S. (2024). Cost accounting and economic competitiveness evaluation of photovoltaic power generation in China—Based on the system levelized cost of electricity. *Renewable Energy*, 222, 119940. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.119940>
- Cristea, M., Cristea, C., Tîrnovan, R. A., & Şerban, F. M. (2025). Levelized cost of energy (LCOE) of different photovoltaic technologies. *Applied Science*, 15, 6710. <https://doi.org/10.3390/app15126710>
- Da Silva, M., Wiltgen, F., & Salvino, I. (2024, November 5). Importância da metalurgia na sustentabilidade dos futuros reatores a fusão termonuclear controlada [Konferans sunum özet]. Jornada de Iniciação Científica e Tecnológica 2024 na FATEC, Pindamonhangaba, Brasil.
- Dallaev, R., Pisarenko, T., Papez, N., & Holcman, V. (2023). Overview of the current state of flexible solar panels and photovoltaic materials. *Materials*, 16(17), 5839. <https://doi.org/10.3390/ma16175839>
- Daneshazarian, R., Cuce, E., Cuce, P. M., & Sher, F. (2018). Concentrating photovoltaic thermal (CPVT) collectors and systems: Theory, performance assessment and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 473–492. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.013>
- Debbarma, M., Sudhakar, K., & Baredar, P. (2017). Comparison of BIPV and BIPVT: A review. *Resource-Efficient Technologies*, 3(3), 263–271. <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.11.013>
- Delibaş, H. M., & Yılmaz, N. F. (2023, November 13–16). Fotovoltaik teknolojisinin güncel durumu ve kapsamlı değerlendirmesi [Konferans sunum özet]. The 5th International Conference of Materials and Engineering Technology, Trabzon, Türkiye. <https://www.researchgate.net/profile/Hasan-Delibas/publication/393096864>
- Demir, A. S. (2003). Fotovoltaik sistemlerde hücre sıcaklığının panel verimi üzerindeki etkisinin deneysel olarak araştırılması [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi, Batman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü]. Batman.
- Demir, Y. C. (2024). Binaya entegreli fotovoltaik uygulamaların tasarımına etki eden parametrelerin deneysel analizi [Yayımlanmamış doktora tezi, Şanlıurfa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. Şanlıurfa.
- Deniz, E. (2013, November 21–24). Güneş enerjisi santrallerinde kayıplar [Konferans sunum özet]. Üçüncü Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi ve Sergisi, İzmir, Türkiye. https://www.emo.org.tr/ekler/38f0038bf09a40b_ek.pdf
- Di Sabatino, M., Hendawi, R., & Sanchez Garcia, A. (2024). Silicon solar cells: Trends, manufacturing challenges, and AI perspectives. *Crystals*, 14, 167. <https://doi.org/10.3390/cryst14020167>
- DOE. (2024). Perovskite solar cells. <https://www.energy.gov/eere/solar/perovskite-solar-cells>
- DOE. (2025a). Solar photovoltaic manufacturing basics. <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-manufacturing-basics>

- DOE. (2025b). Multijunction III-V photovoltaics research. <https://www.energy.gov/eere/solar/multijunction-iii-v-photovoltaics-research>
- Doğanay, M. M. (2021). Mardin bölgesi güneş (fotovoltaik) enerjisi potansiyel analizi. UMÜFED Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 3(1), 86–117.
- Drouiche, N., Cuellar, P., Kerkar, F., Medjahed, S., Ouslimane, T., & Ould Hamou, M. (2015). Hidden values in kerf slurry waste recovery of high purity silicon. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 52, 393–399. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.114>
- DSİ. (2024). 2024 yılı idare faaliyet raporu. https://cdnis.tarimorman.gov.tr/api/File/GetGaleriFile/425/DosyaGaleri/594/dsi_2024_yili_faaliyet_raporu.pdf
- Durak, M. (2016). Güneş enerjisi: Teori ve uygulama. <https://enerji.mmo.org.tr/wp-content/uploads/2021/05/G%C3%9CNE%C5%9E-ENERJ%C4%B0S%C4%B0-TEOR%C4%B0-VE-UYGULAMA-Murat-Durak.pdf>
- EMO. (2025). Elektrik mühendisleri odası enerji daimi komisyonu elektrik istatistikleri raporu. https://www.emo.org.tr/ekler/66edf037e37c0f7_ek.pdf
- Energy Outlook. (2024). BP Energy Outlook 2024 (pp. 8–58). <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2024.pdf>
- Eryılmaz, N. (2022). Fotovoltaik (PV) panellerde verim artırma yöntemlerinin incelenmesi [Yayımlanmamış yüksek lisans tezi, Munzur Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü]. Tunceli.
- ESA. (2023). International Space Station solar panels in 2021. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2023/06/International_Space_Station_solar_panels_in_2021
- ETKB. (2024). Biyokütle. [https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-biyokutleETKB. \(2024, Ekim 21\). Yenilenebilir enerjide 2035 yol haritası: Lansman sunumu \[Sunum slaytları\]. \[https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/BHIM/tr/Duyurular/Yenilenebilir%20Enerjide%202035%20Yol%20Haritas%C4%B1%20Lansman%20Sunumu_202410221014.pdf\]\(https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/BHIM/tr/Duyurular/Yenilenebilir%20Enerjide%202035%20Yol%20Haritas%C4%B1%20Lansman%20Sunumu_202410221014.pdf\)](https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-biyokutleETKB. (2024, Ekim 21). Yenilenebilir enerjide 2035 yol haritası: Lansman sunumu [Sunum slaytları]. https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/BHIM/tr/Duyurular/Yenilenebilir%20Enerjide%202035%20Yol%20Haritas%C4%B1%20Lansman%20Sunumu_202410221014.pdf)
- ETKB. (2025). Elektrik. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>
- Evrin Ağacı. (2025, May 4). Nükleer mi, Güneş mi: En İyi Enerji Kaynağı Hangisi? [Video]. YouTube. https://youtu.be/_CWfViJWCSE?si=KuQU5wi3hEuQcKus
- Ezcan, H. O. (2019). Fotovoltaik termal (PV/t) enerji sistemlerinin analizi [Yüksek lisans tezi, Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. Kocaeli.
- Fahrenbruch, A. L. (1983). Fundamentals of Solar Cells: Photovoltaic Solar Energy Conversion. Academic Press.
- Ferreira, R. F., Lameirinhas, R. A. M., Bernardo, C. P. C. V., Torres, J. P. N., & Santos, M. (2024). Agri-PV in Portugal: How to combine agriculture and photovoltaic production. Energy for Sustainable Development, 79, Article 101408. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101408>
- Fraas, L., & Lewis, M. (Eds.). (2010). Solar cells and their applications (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Fraunhofer ISE. (2024). Photovoltaics report. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>

- Gorjian, S., Bousi, E., Özdemir, Ö. E., Trommsdorff, M., Kumar, N. M., Anand, A., Kant, K., & Chopra, S. S. (2022). Renewable and Sustainable Energy Reviews, 158, Article 112126. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112126>
- Gökmener, S., Çiçek, D. D., Oğuz, E., Haspolat, E., Melek, A. B., & Deveci, M. (2023). Yüzer güneş enerjisi santralleri için uygun yer seçiminde kullanılan kriterler. 10. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, İzmir, Türkiye. https://kms10.imo.org.tr/wp-content/uploads/2023/11/10_KMS_Bildiri_Kitabi.pdf
- Gross, R., Leach, M., & Bauen, A. (2003). Progress in renewable energy. Environment International, 29, 105–122.
- Güneş, C. (2020). Fotovoltaik güneş enerji santrallerinin tasarımı, bakımı, onarımı ve işletmesi [Yüksek lisans tezi, Adıyaman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü]. Adıyaman.
- Güneş, S. (2024). Enerji verimliliğine dayalı fotovoltaik güneş enerji santrali analizi ve tasarımı [Yüksek lisans tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. Zonguldak.
- Güzelbay, A. (2024). Güneş paneli üretim hatalarının enerji verimliliğine olan etkilerinin belirlenmesi [Yüksek lisans tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. Konya.
- Huan, Z., Zheng, Y., Wang, K., Shen, Z., Ni, W., Zu, J., & Shao, Y. (2023). Advancements in radiation resistance and reinforcement strategies of perovskite solar cells in space applications. Journal of Materials Chemistry, 12, 1910. <https://doi.org/10.1039/d3ta06388g>
- Husain, A. A. F., Hasan, W. Z. W., Shafie, S., Hamidon, M. N., & Pandey, S. S. (2018). A review of transparent solar photovoltaic technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 94, 779–791. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.031>
- Idoko, I., Ijiga, O., Harry, K., Ezebuka, C., Ukatu, I., & Peace, A. (2024). Renewable energy policies: A comparative analysis of Nigeria and the USA. World Journal of Advanced Research and Reviews, 21, 888–913. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.1.0071>
- IEA. (2024). World Energy Outlook. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/140a0470-5b90-4922-a0e9-838b3ac6918c/WorldEnergyOutlook2024.pdf>
- IEA. (2025). Global Energy Review 2025. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5b169aa1-bc88-4c96-b828-aaa50406ba80/GlobalEnergyReview2025.pdf>
- IRENA. (2025). Renewable capacity statistics 2025. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Mar/IRENA_DAT_RE_Capacity_Statistics_2025.pdf
- İşiker, Y., Yeşilata, B., & Bulut, H. (2006, Haziran 21–23). Fotovoltaik panel gücüne etki eden çalışma parametrelerinin araştırılması [Konferans sunum özeti]. Birinci Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, Eskişehir, Türkiye. <http://eng.harran.edu.tr/~yisiker/yayinlar/D2.pdf>
- İşler, H. S. (2020). Şebeke bağlantılı, depolamalı fotovoltaik güneş enerjisi sistemleri için performans analizi ve verim artırılması [Yayımlanmamış doktora tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. Kahramanmaraş.
- Kabir, E., Kumar, P., Kumar, S., Adelodun, A., & Kim, K. (2016). Solar energy: Potential and future prospects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 894–900. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>
- Kalyon Güneş Enerjisi Üretim A.Ş. (2021, Nisan). Karapınar Güneş Enerji Santrali teknik olmayan özet. <https://www.kalyonerji.com/documents/teknik-olmayan-ozet.pdf>

- Kannan, N., & Vakeesan, D. (2016). Solar energy for future world: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1092–1105. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.022>
- Kaur, N., Sudhakar, K., Mohamed, M. R., Cuce, E., & Barbulescu, D. (2025). Floating solar sustainability on land and ocean: A strategic assessment using SWOT-TWOS-PESTLE analysis. *Science and Technology for Energy Transition*, 80, Article 101114. <https://doi.org/10.2516/stet/2024114>
- Kılıç, F. (2015). Güneş enerjisi, Türkiye’deki son durumu ve üretim teknolojileri. *Mühendis ve Makina*, 671(56), 28–40.
- Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y., & Uğurlu, İ. (2018). Dünyada ve Türkiye’de enerji görünümünün genel değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 692, 86–114.
- Koç, E., & Kaya, K. (2015). Enerji kaynakları - Yenilenebilir enerji durumu. *Mühendis ve Makina*, 668, 36–47.
- Köşker, F. (2006). Kapalı olimpiik yüzme havuzlarında güneş enerjisinin kullanımı ve termo-ekonomik analizi [Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. İstanbul.
- Li, J., Aierken, A., Liu, Y., Zhuang, Y., Yang, X., Mo, J. H., Fan, R. K., Chen, Q. Y., Zhang, S. Y., Huang, Y. M., & Zhang, Q. (2021). A brief review of high efficiency III-V solar cells for space application. *Frontiers in Physics*, 8(63), 1925. <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.631925>
- Liyakath, R., Ramaraj, B., Shin, P. K., & Santhakumar, K. (2021). Restructuring and interlayer phenomenon on tandem architecture to improve organic solar cell behaviour. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 7729–7738. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-05491-8>
- Machín, A., & Márquez, F. (2024). Advancements in photovoltaic cell materials: Silicon, organic, and perovskite solar cells. *Materials*, 17(1165). <https://doi.org/10.3390/ma17051165>
- Marques Lameirinhas, R. A., Torres, J. P. N., & de Melo Cunha, J. P. (2022). A photovoltaic technology review: History, fundamentals. *Energies*, 15(5), 1823. <https://doi.org/10.3390/en15051823>
- Martín-Chivelet, N., Kapsis, K., Wilson, H. R., Delisle, V., Yang, R., Olivieri, L., Polo, J., Eisenlohr, J., Roy, B., Maturi, L., Otnes, G., Dallapiccola, M., & Wijeratne, W. M. P. U. (2022). Building-integrated photovoltaic (BIPV) products and systems: A review of energy-related behavior. *Energy and Buildings*, 262, 111998. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111998>
- Mehrotra, S., Rawat, P., & Debbarma, M. (2014). Performance of a solar panel with water immersion cooling technique. *International Journal of Science, Environment*, 3(3), 1161–1172.
- MMO. (2024). Türkiye’nin enerji görünümü oda raporu. https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/gonderi_dosya_ekleri/t%C3%BCrkiyenin_enerji_g%C3%B6r%C3%BCn%C3%BCm%C3%BCn%C3%BC_kitap.pdf
- Müller, G., & Friedrich, J. (2005). Crystal growth, bulk: Methods. In F. Bassani, G. L. Liedl, & P. Wyder (Eds.), *Encyclopedia of condensed matter physics* (pp. 262–274). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369401-9/00416-2>
- Najmi, N., & Rachid, A. (2023). A review on solar panel cleaning systems and techniques. *Energies*, 16(24), 7960. <https://doi.org/10.3390/en16247960>
- NASA. (2015). Solar arrays on the International Space Station. <https://www.nasa.gov/image-article/solar-arrays-international-space-station-2/>

- Nkinyam, C. M., Ujah, C. O., Nnakwo, K. C., & Kallon, D. V. V. (2025). Insight into organic photovoltaic cell: Prospect and challenges. *Unconventional Resources*, 5, 100121. <https://doi.org/10.1016/j.uncres.2024.100121>
- Nuhoğlu, S. (2017). Tek eksen güneş takipli fotovoltaik sistem tasarımı ve Konya için örnek bir uygulama [Yüksek lisans tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. Konya.
- Onyszkiewicz, J., & Sadowski, K. (2022). Proposals for the revitalization of prefabricated building facades in terms of the principles of sustainable development and social participation. *Journal of Building Engineering*, 46, 103713. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103713>
- Parida, B., Iniyar, S., & Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1625–1636.
- PHOTOSIL Consortium. (2011). UMG silicon from the PHOTOSIL project – A status overview in 2011 on the way towards industrial production. https://www.researchgate.net/publication/260345778_UMG_Silicon_from_the_PHOTOSIL_project_-_a_status_overview_in_2011_on_the_way_towards_industrial_production
- Priya, P., & Stonier, A. A. (2025). Emerging innovations in solar photovoltaic (PV) technologies: The perovskite solar cells and more. *Energy Reports*, 14, 216–242. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.06.003>
- Ravaee, H., Farahat, S., & Sarhaddi, F. (2012). Artificial neural network based model of photovoltaic thermal (PV/T) collector. *The Journal of Mathematics and Computer Science*, 4(3), 411–417.
- Razykov, T. M., Ferekides, C. S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, H. S., & Upadhyaya, H. M. (2011). Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar Energy*, 85, 1580–1608. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.002>
- Riverola, A., Vossier, A., & Chemisana, D. (2019). Fundamentals of solar cells. In S. Thomas, E. H. M. Sakho, N. Kalarikkal, S. O. Oluwafemi, & J. Wu (Eds.), *Nanomaterials for solar cell applications* (pp. 3–33). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-03432-0>
- Sağlam, E. (2022). Tasarlanan bir yeşil ev için enerji ve maliyet analizi (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sinop.
- Saidur, R., Rahim, A., Islam, M., & Solangi, K. (2011). Environmental impact of wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2423–2430. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.024>
- Saurabh, S., Kumar, A., & Kumar, R. (2025). Techno economic analysis of grid connected photovoltaic systems with battery energy storage: A comprehensive review. *Energy Storage*, 7(1). <https://doi.org/10.1002/est2.70119>
- Sayın, C., Balki, M., & Yılmaz, O. (2022). Biyokütle. Nobel Yayın Grubu.
- Schubert, M. B., & Werner, J. H. (2006). Flexible solar cells for clothing. *Materials Today*, 9(6), 42–50. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(06\)71542-5](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(06)71542-5)
- SEIA. (2025). Solar data cheat sheet. Erişim: 12.06.2025, <https://seia.org/research-resources/solar-cheat-sheet/>
- Siecker, J., Kusakana, K., & Numbi, B. P. (2017). A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 192–203. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.053>

- Solangi, K. H., Islam, M. R., Saidur, R., Rahim, N. A., & Fayaz, H. (2011). A review on global solar energy policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2149–2163. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.007>
- Solangi, Y., & Magazzino, C. (2025). Evaluating financial implications of renewable energy for climate action and sustainable development goals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 212, 115390. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115390>
- Stanford Understand Energy. (2024, Aralık 17). Solar Energy Lecture | Kirsten Stasio | Stanford Understand Energy [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=ihgvj9M4LI4&t=1885s&ab_channel=StanfordUnderstandEnergy
- SUPSI. (2024). Building integrated photovoltaics: A practical handbook for solar buildings' stakeholders status report. Erişim: 12.06.2025, https://solarchitecture.ch/wp-content/uploads/2024/10/2024_report_BIPV_web-1.pdf
- Şenli, H. (2023). Yüzen güneş enerjisi sistemlerinin incelenmesi, çevresel katkıları ve Türkiye'deki barajların yüzen güneş enerjisi potansiyeli. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 35(4), 418–427. <https://doi.org/10.7240/jeps.1261370>
- Tinni, I. H. (2023). Güneş enerji sistemlerinde verimlilik analizi: Nijer güç sistemi uygulaması (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Tomczyk, D., & Łapniewska, Z. (2025). Solar panels on every rooftop? Photovoltaics boom in Poland and the role of the European Union funds. *Energy Research & Social Science*, 125, 104107. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.104107>
- Toprak, A. (2024). Perovskit güneş hücrelerinde kuantum nanomalzemeler ile katkılama işleminin fotovoltaik parametrelere etkisi (Yayımlanmamış doktora tezi). Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Torrubia, J., Valero, A., & Valero, A. (2024). Renewable exergy return on investment (RExROI) in energy systems: The case of silicon photovoltaic panels. *Energy*, 304, 131961. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131961>
- Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., & Gekas, V. (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy*, 33, 289–296. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00241-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00241-6)
- TÜREB TWEA. (2025). Türkiye rüzgâr enerjisi istatistik raporu – Ocak 2025. <https://www.tureb.com.tr/yayin/turkiye-ruzgar-enerjisi-istatistik-raporu-ocak-2025--ozet-1167>
- Ueda, Y., Kurokawa, K., Kitamura, K., Yokota, M., Akanuma, K., & Sugihara, H. (2009). Performance analysis of various system configurations on grid-connected residential PV systems. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 93, 945–949. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.11.021>
- URL-1. (2025). <https://www.theecoexperts.co.uk/solar-panels/biggest-solar-farms> Erişim: 11.06.2025
- URL-2. (2025). <https://earth.org/what-are-the-advantages-and-disadvantages-of-solar-energy/> Erişim: 11.06.2025
- URL-3. (2025). <https://earth.org/solar-energy-facts/> Erişim: 11.06.2025
- URL-4. (2025). <https://kalyonPV.com/teknolojimiz/ingot-kutuk-uretimi> Erişim: 03.06.2025
- URL-5. (2025). <https://www.solarbeglobal.com/top-PV-module-suppliers-by-shipment-in-q3-2024/> Erişim: 03.06.2025

- URL-6. (2025). <https://kalyonholding.com/enerji/ges/karapinar-ges.html> Erişim: 04.06.2025
- URL-7. (2025). <https://www.yesilisdunyasi.com/lander?> Erişim: 04.06.2025
- URL-8. (2025). <https://cw-enerji.com/tr/video> Erişim: 04.06.2025
- URL-9. (2025). <https://www.enerjisauretim.com.tr/blog/gunesin-sonsuz-gucu-ile-gida-uretiminde-devrim-agrivoltaik-tarim> Erişim: 11.06.2025
- URL-10. (2025). <https://www.PV-magazine.com/2020/09/03/giant-agrivoltaic-project-in-china/> Erişim: 11.06.2025
- URL-11. (2025). <https://www.theguardian.com/business/2025/apr/08/clean-energy-powered-40-of-global-electricity-in-2024-report-finds> Erişim: 11.06.2025
- URL-12. (2025). <https://yesilhaber.net/turkiyede-37-gunes-paneli-ureticisi-var/> Erişim: 03.06.2025
- URL-13. (2025). <https://ember-energy.org/tr/analizler/gunes-kapasitesi-25-yilda-iki-katina-cikarak-2025-hedefini-asti/> Erişim: 03.06.2025
- URL-14. (2025). <https://worldsolarchallenge.org/about-us/history>
- URL-15. (2025). <https://www.solarteam.be/en/cars/infinite>
- URL-16. (2025). https://kontekenerji.com.tr/limak-enerji-yeka-4-erzin-1-ges-projesi,https://www.aa.com.tr/tr/enerjiterminali/sirket-haberleri/turkiyenin-ikinci-buyuk-gesi-kismi-olarak-devreye-alindi/43195?utm_source=chatgpt.com
- URL-17. (2025). <https://www.enerjiatlasi.com/gunes/naturel-yenilenebilir-enerji-ges.html>
- van der Zwaan, B., & Rabl, A. (2003). Prospects for PV: A learning curve analysis. *Solar Energy*, 74, 19–31. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00112-9](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00112-9)
- Varınca, K., & Gönüllü, T. (2006, Haziran 21–23). Türkiye’de güneş enerjisi potansiyeli ve bu potansiyelin kullanım derecesi, yöntemi ve yaygınlığı üzerine bir araştırma [Konferans sunumu]. I. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, Eskişehir, Türkiye.
- Wang, Z., Chen, Z., Wang, B., Wu, C., Zhou, C., Peng, Y., Zhang, X., Ni, Z., Chung, C., Chan, C., Yang, J., & Zhao, H. (2025). Digital manufacturing of perovskite materials and solar cells. *Applied Energy*, 377, 124120. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124120>
- Wu, W., & Skye, H. M. (2021). Residential net-zero energy buildings: Review and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, 110859. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110859>
- Xue, J. (2017). Photovoltaic agriculture – New opportunity for photovoltaic applications in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.098>
- Yelkovan, E. (2016). Güneş enerjisi destekli yarı olimpiik yüzme havuzunun ısıtma sisteminin termo-ekonomik analizi (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Yu, G. J., Jung, Y. S., Choi, J. Y., & Kim, G. S. (2004). A novel two-mode MPPT control algorithm based on comparative study of existing algorithms. *Solar Energy*, 76, 455–463.
- Zafer, C. (2006). Organik boya esaslı nanokristal yapılı ince film güneş pili üretimi (Yayımlanmamış doktora tezi). Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Zhang, X. (2024, Kasım). High-efficiency perovskite solar cells: Progress and prospects [Konferans sunum özeti]. *E3S Web of Conferences*, 553. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455301014>

Zhu, P., Chen, C., Dai, J., Zhang, Y., Mao, Y., Chen, S., Huang, J., & Zhu, J. (2024). Toward the commercialization of perovskite solar modules. *Advanced Materials*, 36(15), 2307357. <https://doi.org/10.1002/adma.202307357>



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fatih BAŞER

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Tülay Başaran Anadolu Lisesi, 2013

Lisans : Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Makine Mühendisliği 2021

Mesleki Deneyim

İş Yeri : Magis Teknoloji Anonim Şirketi