



**GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNİN TÜRKİYE
VE AVRUPA'DAKİ GERİ ÖDEME SÜRELERİNİN
KARŞILAŞTIRMASI**

**2022
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

Mohannad GYAM

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. İlhan CEYLAN**

**GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNİN TÜRKİYE VE AVRUPA'DAKİ
GERİ ÖDEME SÜRELERİNİN KARŞILAŞTIRMASI**

Mohannad GYAM

Tez Danışmanı

Prof. Dr. İlhan CEYLAN

T.C.

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Aralık 2022

Mohannad GYAM tarafından hazırlanan “GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNİN TÜRKİYE VE AVRUPA'DAKİ GERİ ÖDEME SÜRELERİNİN KARŞILAŞTIRMASI ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İlhan CEYLAN

.....

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliğiile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 23/12/2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Ali Etem GÜREL (DÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. İlhan CEYLAN (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Alper ERGÜN (KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Müslüm KUZU

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Mohannad GYAM

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNİN TÜRKİYE VE AVRUPA'DAKİ GERİ ÖDEME SÜRELERİNİN KARŞILAŞTIRMASI

Mohannad GYAM

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. İlhan CEYLAN

Aralık 2022, 74 sayfa

Enerji, herhangi bir ülke için Millî güvenliğin en önemli unsurlarından biridir. Bu nedenle ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelerek enerjide dışa bağımlılığı azaltmaya çalışmaktadır. Hem Türkiye hem de Avrupa enerji ithalatına büyük ölçüde bağımlıdır, bu nedenle son yirmi yılda Türkiye ve Avrupa yenilenebilir enerji kaynaklarına geçmeye başlamıştır. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli yüksek olmasına rağmen PV enerji sektörü büyük bir gelişme göstermemiştir. Türkiye, güneş enerjisi potansiyeli daha az olan Avrupa ülkelerine kıyasla kurulu güneş enerjisi kapasitesinde geç sıralarda yer almaktadır. Bu çalışmada, Türkiye ile Avrupa arasındaki şebekeye bağlı 1 MW'lık Güce sahip fotovoltaik santralin geri ödeme süreleri karşılaştırılmıştır. Geri ödeme sürelerini karşılaştırmak için Türkiye, Fransa, İspanya ve Almanya'da farklı güneş radyasyonu koşullarında %22.6 verimliliğe sahip LEXRON-400-72M PERC monokristal güneş panellerinin kullanıldığı

varsayılmıştır. Ayrıca Rusya-Ukrayna savaşının enerji fiyatlarına etkisi nedeniyle güneş enerjisi santralının geri ödeme süresi iki senaryo üzerinden değerlendirilmiştir.

Yapılan çalışma özetle, Rus-Ukrayna savaşı öncesi olan birinci senaryoda, geri ödeme süreleri 2.75 yıl ile Türkiye'nin Karaman ilinde 3.17 yıl ile Türkiye'de bulunmuştur. İspanya, Fransa ve Almanya'da ise geri ödeme süreleri sırasıyla 3.6, 5.6 ve 5.7 yıldır. Ama Rus-Ukrayna savaşı sonrası olan ikinci senaryoda, geri ödeme süreleri 2.22 yıl ile Almanya ve ardından 3.27 yıl ile Fransa olarak hesaplanmıştır. İspanya, Türkiye'nin Karaman ili ve Türkiye'de ise geri ödeme süreleri sırasıyla 2.41, 2.75 ve 3.17 yıldır.

Anahtar Sözcükler : Fotovoltaik güneş enerjisi, Güneş Panelleri, Güneş enerjisi potansiyeli, Geri ödeme süreleri.

Bilim Kodu : 92802

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

COMPARISON OF PAYBACK PERIODS OF SOLAR POWER STATIONS IN TURKEY AND EUROPE

Mohannad GYAM

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Energy Systems Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. İlhan CEYLAN

December 2022, 74 pages

Energy is one of the most important elements of national security for any country. Therefore, countries are trying to reduce foreign dependence on energy by turning to renewable energy sources. Both Turkey and Europe are heavily dependent on energy imports, so in the last two decades Turkey and Europe have started to switch to renewable energy sources. Although the potential of solar energy in Turkey is high, the PV sector has not shown much development compared to European countries with less solar energy potential as Turkey ranks low in installed PV solar capacity. In this study, the payback periods of a photovoltaic power station with a power of 1 MW connected to the grid between Turkey and Europe were compared. To compare payback periods, LEXRON-400-72M PERC monocrystalline solar panels with an efficiency of 22.6% were assumed to be used under different solar radiation conditions in Turkey, France, Spain and Germany. In addition, due to the effect of

the Russia-Ukraine war on energy prices, the payback period of the solar power plant was evaluated over two scenarios.

According to the results of the thesis, in the first scenario before the Russian-Ukrainian war, payback periods were found in Turkey's Karaman province with 2.75 years and in Turkey with 3.17 years while the payback periods in Spain, France and Germany are 3.6, 5.6 and 5.7 years, respectively. In the second scenario after the Russo-Ukrainian war, payback periods were found in Germany with 2.22 years and in France with 3.27 years while the payback periods In Spain, Turkey's Karaman province and Turkey are 2.41, 2.75 and 3.17 years, respectively.

Key Word : Photovoltaic solar energy, Solar Panels, Solar energy potential, Payback periods.

Science Code : 92802

TEŞEKKÜR

Öncelikle tez danışmanım Prof. Dr. İlhan CEYLAN'a yüksek lisansımı yapabilmem için bana verdiği büyük destek, anlayış ve teşvik için teşekkür ederim. Bu tezi araştırırken ve yazarken onun rehberliğı bana çok destek oldu.

Ayrıca Doç. Dr. Ali Etem GÜREL ve Doç. Dr. Alper ERGÜN'e zamanları, sabırları ve katkıları için teşekkür ederim.

Son olarak, eğitim hayatım boyunca her zaman desteklerini esirgemeyen, özellikle de bana her zaman ilham veren ve kendime inanmam için beni cesaretlendiren aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	10
GENEL FOTOVOLTAİK SİSTEM	10
2.1. PV HÜCRELERİ	11
2.1.1. Silicon Cell Technology	12
2.1.2. Perovskite Güneş Teknolojisi.....	16
2.2. PV MODÜLÜ	17
2.2.1. PV Modüllerinin Performansı ve Verimliliği.....	17
2.2.2. Teknolojiye Göre PV Üretimi	19
2.3. İNVERTÖR.....	20
2.4. ENERJİ GERİ ÖDEME SÜRESİ	21
2.4.1. Mono-Si PV Sistemlerinin Enerji Geri Ödeme Süreleri	22
2.4.2. Multi-Si PV Sistemlerinin Enerji Geri Ödeme Süreleri	23
2.4.3. İnce Film PV Sistemlerinin Enerji Geri Ödeme Süreleri	24
BÖLÜM 3	27
GERİ ÖDEME SÜRELERİ	27
3.1. FOTOVOLTAİK SİSTEMİN VERİMİLİĞİ:	27
3.1.1. Fotovoltaik Panellerin Verimliliği.....	28

	<u>Sayfa</u>
3.1.2. PV Modül Tipi.....	28
3.1.3. Hava Koşulları	29
3.1.4. Alınan Güneş Işınımının Yoğunluğu.....	30
3.1.5. Coğrafi Konum	31
3.1.6. Güneş Açısı Faktörü	31
3.1.7. İnvertörün Verimliliği.....	31
3.2. FOTOVOLTAİK SİSTEMİN TOPLAM MALİYETİ.....	32
3.3. YILLIK İŞLETME VE BAKIM MALİYETİ.....	33
3.4. TEŞVİK POLİTİKALARI	33
3.4.1. Besleme Tarifesi	33
3.4.2. Prim Garantisi (FIP)	34
3.4.3. Yenilenebilir Enerji Kotası Ve Sertifika Programları	35
3.4.4. Yenilenebilir Enerji İhaleleri	36
3.4.5. Sermaye Desteği Teşvikleri.....	38
3.4.6. Vergi Teşvikleri	38
BÖLÜM 4	40
TÜRKİYE VE AVRUPA'DA GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ.....	40
4.1. TÜRKİYE'DA GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ:.....	40
4.2. AVRUPA'DA GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ:.....	43
4.2.1. Almanya'da Güneş Enerjisi Potansiyeli.....	44
4.2.2. İspanya'da Güneş Enerjisi Potansiyeli	46
4.2.3. Birleşik Krallık'da Güneş Enerjisi Potansiyeli	47
4.2.4. Fransa'da Güneş Enerjisi Potansiyeli.....	47
4.2.5. Hollanda'da Güneş Enerjisi Potansiyeli.....	48
4.2.6. İtalya'da Güneş Enerjisi Potansiyeli	48
BÖLÜM 5	50
TÜRKİYE'NİN 1 MW FOTOVOLTAİK GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİ İÇİN GERİ ÖDEME SÜRESİ	50
5.1. GES'DEN ELDE EDİLECEK ENERJİ HESAPLAMALARININ YAPILMASI.....	50
5.2. FOTOVOLTAİK SİSTEMİN İLK YATIRIM MALİYETİ:	52
5.3. YILLIK İŞLETME VE BAKIM MALİYETİ.....	54

	<u>Sayfa</u>
5.4. TÜRKİYE'DE KURULU BİR PV SİSTEMİN GERİ ÖDEME SÜRESİ	55
5.5. KARAMAN'IN GERİ ÖDEME SÜRESİ	55
BÖLÜM 6	57
AVRUPA'NIN 1 MW FOTOVOLTAİK GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİ İÇİN GERİ ÖDEME SÜRESİ	57
6.1. ALMANYA'NIN GERİ ÖDEME SÜRESİ	57
6.2. FRANSA'NIN GERİ ÖDEME SÜRESİ	59
6.3. İSPANYA'NIN GERİ ÖDEME SÜRESİ	61
BÖLÜM 7	64
SONUÇLAR	64
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	74

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1.	Toplam nihai enerjinin tahmini yenilenebilir payı.....	2
Şekil 1.2.	Yenilenebilir güç kapasitesinin yıllık ilaveleri, 2013-2019.	2
Şekil 2.1.	Genel fotovoltaik sistem.....	10
Şekil 2.2.	Fotovoltaik dizi bileşenleri.....	11
Şekil 2.3.	Absorpsiyon katsayıları.....	12
Şekil 2.4.	İnce film, amorf silikon.	15
Şekil 2.5.	CdTe ince film.....	15
Şekil 2.6.	Teknolojilerin verimlilik karşılaştırmaları	18
Şekil 2.7.	Verimlilikler ticari PV modülleri	18
Şekil 2.8.	2020 yılında teknolojiye göre toplam PV modül üretimi.....	19
Şekil 2.9.	İnce film teknolojileri için yıllık küresel PV modülü üretimi.....	20
Şekil 3.1.	Türkiye'de PV tiplerine göre üretilebilecek enerji (kWh-yıl)	29
Şekil 3.2.	2017-2018 yılları arasında açık artırmada toplam yenilenebilir enerji hacminin teknolojiye göre payı	37
Şekil 3.3.	2010-2018 ihalelerinden kaynaklanan küresel ağırlıklı ortalama fiyatlar ve her yıl verilen kapasite.....	38
Şekil 4.1.	Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyel atlası	40
Şekil 4.2.	Türkiye'nin global radyasyon değerleri (kWh/m ² -gün).	41
Şekil 4.3.	Türkiye'nin güneşlenme süreleri (Saat).....	41
Şekil 4.4.	Karaman'ın global radyasyon değerleri (kWh/m ² -gün).	42
Şekil 4.5.	Karaman'ın güneşlenme süreleri (Saat).....	42
Şekil 4.6.	Hakkari'nin global radyasyon değerleri (kWh/m ² -gün)	43
Şekil 4.7.	Hakkari'nin güneşlenme süreleri (Saat)	43
Şekil 4.8.	Avrupa'nın güneş enerjisi potansiyel haritası	44
Şekil 4.9.	Almanya'nın güneş enerjisi potansiyel atlası	45
Şekil 4.10.	Almanya'nın global radyasyon değerleri (kWh/m ² -ay)	45
Şekil 4.11.	Almanya'nın güneşlenme süreleri (Saat).	46
Şekil 4.12.	2001-2011 dönemi için İspanya'nın güneş radyasyonu haritası	46
Şekil 4.13.	Fransa'nın global radyasyon değerleri (kWh/m ² -ay).	47
Şekil 4.14.	Hollanda'nın yıllık güneşlenme süresinin dağılımı.....	48

Sayfa

Şekil 4.15. İtalya Haritaları: İtalya bölgeleri, referans verim (küresel yatay yıllık radyasyon) ve nihai verim (yıllık enerji oranı). 2014-2017 yılları arasında uydudan türetilen radyasyon ve güç tahmininin ortalama değerleri.	49
Şekil 5.1. Türkiye'nin 1 MW GES sisteminden elde edilecek ortalama elektrik enerjisi miktarları (MWh).	51
Şekil 5.2. Karaman'ın 1 MW GES sisteminden elde edilecek ortalama elektrik enerjisi miktarları (MWh).	56
Şekil 6.1. Almanya'nın 1 MW GES sisteminden elde edilecek ortalama elektrik enerjisi miktarları (MWh).	57
Şekil 6.2. Fransa'nın 1 MW GES sisteminden elde edilecek ortalama elektrik enerjisi miktarları (MWh).	60
Şekil 7.1. Rusya-Ukrayna savaşı öncesi geri ödeme süreleri.	66
Şekil 7.2. Rusya-Ukrayna savaşı sonrası geri ödeme süreleri.	66

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1. Avrupa Birliği ve Türkiye'deki fotovoltaik güneş enerjisi kapasitesini ve toplam elektrik tüketimindeki payı	6
Çizelge 2.1. 2020 yılında İnvvertörlerin verimliliği ve pazar payı	21
Çizelge 2.2. Kocaeli, Türkiye'de 290.4 kWp şebekeye bağlı bir fotovoltaik sistem için yıllık küresel güneş radyasyonu ve enerji geri ödeme süresi.....	24
Çizelge 2.3. Amorf silikon (a-Si) ince film PV sistemleri için enerji geri ödeme süresi sonuçlarının gözden geçirilmesi.	25
Çizelge 2.4. Kadmiyum tellür (CdTe) ince film fotovoltaik sistemler için enerji geri ödeme süresi sonuçlarının gözden geçirilmesi.	25
Çizelge 2.5. Bakır indiyum selenit (CIS) fotovoltaik sistemleri için enerji geri ödeme süresi sonuçlarının gözden geçirilmesi.	26
Çizelge 2.6. PV Modülleri üretmek için kullanılan enerji, üretilen toplam enerjiye (%) kıyasla	26
Çizelge 3.1. PV panellerin farklı verim değerlerine göre 1 MW PV santralin geri ödeme süresi	28
Çizelge 5.1. LEXRON-400-72M PERC panellerinin en önemli elektriksel ve mekanik verileri	50
Çizelge 5.2. 1 MW GES kurulumu için gerekli ekipman fiyatları	52
Çizelge 5.3. Diğer ilk yatırım maliyet unsurları	54
Çizelge 5.4. Türkiye'nin Yatırım Geri Ödeme Süresi.....	55
Çizelge 5.5. Karaman'ın Yatırım Geri Ödeme Süresi.....	56
Çizelge 6.1. Savaş öncesi Almanya'nın Yatırım Geri Ödeme Süresi.	59
Çizelge 6.2. Savaş sonrası Almanya'nın Yatırım Geri Ödeme Süresi.	59
Çizelge 6.3. Savaş öncesi Fransa'nın Yatırım Geri Ödeme Süresi.	61
Çizelge 6.4. Savaş sonrası Fransa'nın Yatırım Geri Ödeme Süresi.	61
Çizelge 6.5. Savaş öncesi İspanya'nın Yatırım Geri Ödeme Süresi.....	62
Çizelge 6.6. Savaş sonrası İspanya'nın Yatırım Geri Ödeme Süresi.	63
Çizelge 7.1. Türkiye ve Avrupa ülkelerinde güneş enerjisi potansiyeli.	64
Çizelge 7.2. Rusya-Ukrayna savaşı öncesi geri ödeme süreleri.....	65
Çizelge 7.3. Rusya-Ukrayna savaşı sonrası geri ödeme süreleri.	66

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

CO ₂	: carbon dioxide (karbon dioksit)
Si	: silicon (silikon)
C-Si	: crystalline silicon (Kristal silikon)
Ge	: germanium (Germanyum)
GaAs	: gallium arsenide (Galyum Arsenit)
a-Si:H	: hydrogenated amorphous silicon (hidrojene amorf silikon)
CIGS	: copper indium gallium selenide (bakır indiyum galyum selenyum)
CdTe	: cadmium telluride (Kadmiyum tellür)
Pc-Si	: polycrystalline silicon (polikristal silikon)
°C	: Celsius (Santigrat)
°F	: Fahrenheit (Fahrenhayt)
W	: watt
kW	: kilowatt (Kilovat)
kWp	: kilowatt- peak (Kilovat- güç)
kWh	: kilowatt-hour (Kilovat-saat)
GW	: gigawatt (gigavat)
GWp	: gigawatt-peak (gigavat-güç)
MW	: megawatt (megavat)
MWh	: megawatt-hour (megavat-saat)
DC	: direct current (doğru akım)
AC	: alternating current (alternatif akım)
nm	: nanometer (nanometre)
kg	: Kilogram
m ²	: square meter (metrekare)
MJ	: megajoule

KISALTMALAR

GHG	: Greenhouse Gases (Sera gazları)
RESs	: Renewable Energy Sources (Yenilenebilir enerji kaynakları)
UNFCCC	: United Nations Framework Convention on Climate Change (Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi)
REN21	: Renewable Energy Policy Network for The 21st Century (21. Yüzyıl için Yenilenebilir Enerji Politikası Ağı)
IEA	: International Energy Agency (Ulusal Enerji Ajansı)
PV	: Photovoltaic (fotovoltaik)
CSP	: Concentrating Solar Thermal Power (Konsantre Termal Güneş Enerjisi)
TCMB	: Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası
IRENA	: International Renewable Energy Agency (Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı)
SPB	: Simple Payback Period (Basit Geri Ödeme Süresi)
EPBT	: Energy Payback Time (Enerji Geri Ödeme Süresi)
SWE	: Staebler-Wronski effect (Staebler-Wronski etkisi)
REA	: Regional Energy Agency (Regionalna energetska agencija)
PCE	: Power conversion efficiencies (enerji dönüşüm verimliliği)
STC	: Standard Test Conditions (Standart Test Koşulları)
PR	: Performance ratio (performans oranı)
CED	: Cumulative Energy Demand (Kümülatif Enerji Talebi)
GEPA	: Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası
FIT	: Feed-In Tariff (Besleme Tarifesi)
LCOE	: Levelized Cost Of Electricity (Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti)
RO	: Renewable Obligations (yenilenebilir yükümlülükler)
RPS	: Renewable Portfolio Standards (yenilenebilir portföy)
PPA	: Power Purchase Agreement (Enerji satın alma anlaşması)
KDV	: Katma Değer Vergisi
PERC	: Passivated Emitter and Rear Cell
FIP	: Feed-in premium (Prim Garantisi)
LNG	: Liquefied Natural Gas (Sıvılaştırılmış Doğal Gaz)
YEKDEM	: Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması

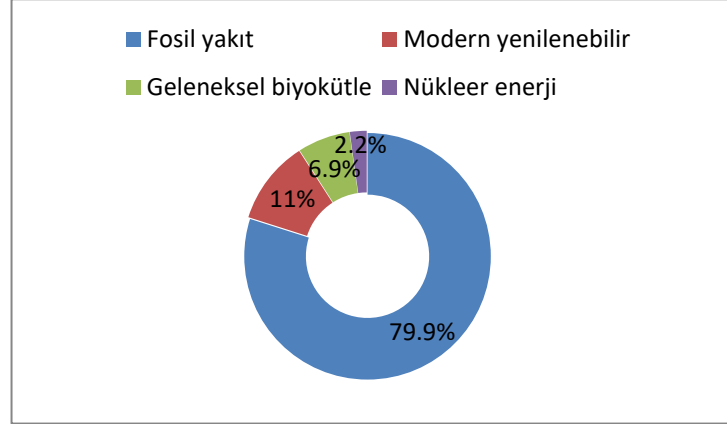
BÖLÜM 1

GİRİŞ

Küresel enerji talebindeki sürekli artış, dünyanın birçok yerinde nüfus artışı ve gelişmiş ekonomik ve teknolojik durumlarla büyük ölçüde bağlantılıdır. Bu talep öncelikle kömür, petrol, doğal gaz veya "fosil yakıtlar" olarak bilinen kaynaklar kullanılarak karşılanmaktadır. "Fosil" terimi, milyonlarca yıl boyunca canlı organizmaların kalıntılarından oluşan bu yakıtlara atıfta bulunurken, "yakıtlar" yandıklarında ısı enerjisi ürettikleri için doğalarının bir açıklamasıdır. Bu kaynaklar, ağır makineler gibi çeşitli endüstriyel işlemler için gereken enerjiyi üretmek için kullanılabilir. Fosil yakıtlarla ilgili temel sorun, yakıldıklarında karbondioksit (CO₂) gazları üretmeleridir. Karbondioksit bir sera gazı olarak sınıflandırılır; Dolayısıyla artan karbondioksit üretimi küresel ısınmayı artırır. Üç kaynak arasında en yüksek karbondioksit üreticisi kömür, en düşük karbon dioksit üreticisi doğal gazdır [1]. Ayrıca fosil yakıtlar yenilenemeyen enerji kaynakları olarak sınıflandırılır, yani yenilenemez veya tükenebilirler. Bu kaynakların tüketim oranı yapılandırma oranından yüksekse bu durum meydana gelebilir. Bu kısmen fosil yakıt fiyatlarında sürekli dalgalanmalara ve ozon tabakasında sera gazlarında (GHG) artışa neden olur.

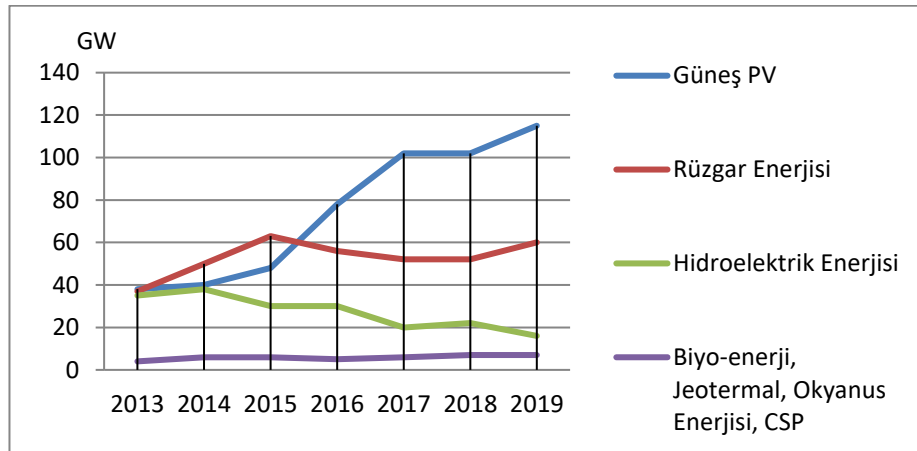
Yenilenebilir alternatif enerji kaynakları keşfedilmiş ve enerji üretmek için entegre edilmiştir. Bu kaynaklar güneş radyasyonu, rüzgar, jeotermal, gelgit, hidro ve biyoenerji içerir ve modern yenilenebilir enerjiler olarak adlandırılır. Aslında, yenilenebilir enerji kaynakları (RESs), çevresel etkileri azaltan ve minimum ikincil atık üreten veya hiç üretmeyen temiz enerji kaynakları olarak tanımlanabilirler. Alternatif bir enerji kaynağına duyulan ihtiyaç ve UNFCCC küresel anlaşmalarına uyan birçok ülkenin hedefi olan karbon ayak izinin azaltılmasıyla motive edilen yenilenebilir enerji tüketimi 1950'den beri sürekli olarak artmaktadır. REN21 2020 raporuna göre, 2018'deki toplam nihai enerji tüketiminin modern yenilenebilir

payının yaklaşık %11, fosil yakıtların ise Şekil 1.1'de gösterildiği gibi %79.9 civarında olduğu tahmin edilmektedir [2].



Şekil 1.1. Toplam nihai enerjinin tahmini yenilenebilir payı [2].

REN21 2020 raporuna göre, 2019'da 200 GW'tan fazla yeni yenilenebilir enerji üretim kapasitesi kurulmuştur ve bu da yıl sonuna kadar küresel toplamı 2588 GW'a yükseltilmiştir (Şekil 1.2). 2019'da dünya çapında yaklaşık 115 GW güneş PV'si eklenmiştir. 2019 yılı boyunca, yenilenebilir enerji kapasitesi ilavelerinin %57'si güneş PV enerjisi, ardından rüzgar enerjisi (%30 için yaklaşık 60 GW) ve hidroelektrik (%8 için yaklaşık 16 GW) olmuştur. İlavelerin geri kalan %5'i biyo-enerji, jeotermal enerji ve konsantre güneş termal enerjisinden (CSP) elde edilmiştir [2].



Şekil 1.2. Yenilenebilir güç kapasitesinin yıllık ilaveleri, 2013-2019 [2].

Diğer yenilenebilir enerji türlerine karşı güneş enerjisinin payını artırmanın birçok nedeni vardır:

- Güneş Enerjisine Karşı Rüzgar : Rüzgar teknolojisi uzun süredir piyasada olmasına rağmen bazı sorunlar yaşamıştır. Rüzgardan toplanan ilk gücün üretilmesi daha ucuzdur, ancak rüzgar türbinleri fotovoltaik hücrelerden çok daha fazla bakım gerektirir.
- Güneş Enerjisine Karşı Hidroelektrik: Etkili olmasına rağmen, hidroelektrik enerji genellikle büyük barajların kullanılmasıyla sağlanır, bu da ilk kurulum maliyetinin çok yüksek olacağı anlamına gelir. Barajın inşası da tüm ekosistemi değiştirme potansiyeline sahiptir.
- Güneş Enerjisine Karşı Biyokütle: Odun veya çöp gazlarının yakılması gibi biyokütle kullanımı, fosil yakıtlardan veya kömürden daha az atık enerji üretir. Maalesef biyokütle, karbon monoksit ve nitrojen oksitler gibi uçucu organik bileşikler oluşturur. Olumlu tarafı, kirliliği geleneksel yakıtlara kıyasla mütevazıdır. Fotovoltaik hücreler, emisyon yaratmamaları ve Tarım için kullanılacak arazileri yok etmemeleri bakımından bir kez daha üstünlüğünü kanıtlanmıştır.

Ayrıca güneş enerjisinin geleneksel enerji sistemlerinden önde olmasını sağlayan birçok avantajı vardır. Güneş enerjisinin avantajları şunlardır:

- Malzemeler yenilenebilir ve sınırsızdır. Mevcut güneş enerjisi miktarı şaşırtıcı - insanların şu anda ihtiyaç duyduğunun yaklaşık 10.000 katı - ve sürekli olarak değişmektedir. Doğru şekilde yakalanırsa, gelen güneş ışığının %0,02'si halihazırda kullanılan tüm diğer yakıt kaynaklarını değiştirmek için yeterli olacaktır. Dünyanın ortalama albedo'su %30 civarındadır, yani kabaca 52 petawatt enerji her yıl Dünya tarafından yansıtılır ve uzayda kaybolur [3].
- Güneş enerjisi düşük emisyonludur. Güneş panelleri, üretim ve inşaat yoluyla çevresel maliyetler getirmelerine rağmen kirlilik oluşturmaz. Bununla

birlikte, bu çevresel zararlar, geleneksel enerji kaynaklarının verdiği zararlar karşılaştırıldığında ihmal edilebilir: fosil yakıtların yakılmasıyla, atmosfere yılda yaklaşık 21.3 milyar metrik ton karbondioksit salınmaktadır [3].

- Güneş enerjisi, enerji şebekeleri olmayan uzak alanlar için uygundur.
- Güneş enerjisi güvenilirdir. 2003'teki Kuzeydoğu Karartması, iki ülkede 55 milyon insanın elektrik şebekesinden ayrılmasıyla sonuçlanmıştır. O zaman, 1999'da Güney Brezilya'daki elektrik kesintisi, tarihte dünyanın en yaygın ikinci elektrik kesinti olmuştur [4].
- Güneş enerjisi, dış enerji harcamalarında tasarruf sağlar. Birçok ülkede, elektrik üretimi için ithal edilen petrol büyük bir kazanç yüzdesi oluşturur. Sadece ABD petrole saatte 13 milyon dolar harcamaktadır [3]. Nişantaşı üniversite rektörüne göre Prof. Dr. Şenay Yalçın, Türkiye'de her yıl yaklaşık 50 milyar dolar enerji harcandığını ve enerjinin dışarıdan satın alındığını, yerli ve milli kaynakların yeterli olmadığını belirtmiştir [5]. Siyasi olarak istikrarsız bu bölgede petrol arzı azaldıkça ve fiyatlar yükselmiş, bu sorunlar güneş enerjisinin ve diğer alternatif enerji sistemlerinin genişlemesini hızlandırmaya devam etmiştir.

Güneş enerjisinin sahip olduğu tüm avantajlar, başta enerji ithalatçıları olmak üzere ülkeleri bütçelerindeki ithalat faturasını azaltmak için önemlidir. Örneğin Türkiye gibi bir ülke, TÜRKİYE PETROLLERİ A.O.'nun raporuna göre Yerli ham petrol üretiminin toplam petrol arzına oranı 2019 yılında %6,3 iken 2020 yılında bu oran %7.1 olmuştur. Bir başka deyişle Türkiye'nin petrol ithalatına bağımlılığı 2020 yılında %92.9 olmuştur. Doğal gaz tüketimi 44.9 milyar metreküp olarak gerçekleşmiştir. 2020 yılında metreküp net ithalat ise yaklaşık 44.4 milyar metreküp olarak gerçekleşmiştir [6]. TCMB verilerine göre Türkiye'ye, 2000-2019 yılları arasındaki 20 yılda 665 milyar 196 milyon 652 bin dolarlık petrol, gaz ve kömür ithal edilmiştir [7].

Avrupa Komisyonu'nun, Avrupa Birliği'nin fosil yakıt ithalatına aşırı bağımlılığı nedeniyle katlanılan maliyetler konusunda uyardığı bir rapora göre, Avrupa Birliği'nde de durum farklı değildir. Birliđin enerji ithalatı 2018'de 331 milyar avro olarak gerçekleşmiştir. 2017'de bu değerin 2016'ya göre %26'lık bir artışla 266 milyar avro olduğu tahmin edilmektedir (ancak 2013'teki 400 milyar avro zirveden %34 daha az). 2017 yılındaki toplam ithalat faturasının %68'ini petrol, %28'ini doğal gaz ve %4'ünü taşkömürü oluşturmuştur [8]. Bu yüksek rakamlar Avrupa Birliği ülkelerini ve Türkiye'yi yüksek enerji maliyetlerini azaltmak için güneş enerjisine yönelmeye sevk etmektedir.

Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın (IRENA) raporuna göre Avrupa Birliği, in'den sonra dünyada ikinci sırada yer alırken, 2020 yılında Avrupa Birliği'ndeki güneş fotovoltaiik enerjisinin toplam kapasitesi 152.917 GW'a ulaşmıştır. Avrupa Birliği'nde güneş fotovoltaiik enerjisinin toplam elektrik tüketime oranı %6 olmuştur. Türkiye'de 2020 yılı için fotovoltaiik güneş enerjisi kapasitesi 6.668 GW'a ulaşırken, Türkiye'nin güneş fotovoltaiik enerji kapasitesi açısından dünyada on altıncı sırada yer aldığı Türkiye'deki toplam elektrik tüketime'nin %5.9'unu oluşturmaktadır. Aşağıdaki izelge 1.1'de, Avrupa Birliği ve Türkiye'deki fotovoltaiik güneş enerjisi kapasitesini ve toplam elektrik tüketime'ndeki payını göstermektedir [9].

Bir güneş fotovoltaiik (PV) dizisi kurmak hem çevresel hem de finansal bir karardır. Güneş enerjisi kurulumu sermaye yoğun olduğu için, finansal argümanlar genellikle çevresel faktörlere göre önceliklidir. Basit Geri deme Süresi (GS), bir güneş enerjisi kurulumundaki ilk sermaye harcaması ile ilk yatırımın geri dönüşü arasındaki sürenin yıl cinsinden yaygın olarak belirtilen bir lsdr. Arno HM Smits, Klaus Jger ve ark. geri ödeme süresinin finasta bir yatırımın maliyetini geri kazanmak için gereken süre olarak tanımlandığı güneş enerjisi santrallerinde geri ödeme süresi olarak tanımlamıştır [10]. Güneş ışınımının yüksek olduğu bölgelerdeki enerji geri ödeme süresi, düşük ışınımın olduğu bölgelere göre önemli lde daha kısadır. Hangi PV teknolojisi seçilirse seçilsin, enerji geri ödeme süresi her zaman, genellikle 25 ile 30 yıl arasında olan, beklenen sistem ömrünün çok altındadır. Bu

nedenle, PV sistemine yatırılan enerji, PV sisteminin yaşam döngüsü boyunca birkaç kez geri ödenir.

Çizelge 1.1. Avrupa Birliği ve Türkiye'deki fotovoltaik güneş enerjisi kapasitesini ve toplam elektrik tüketimindeki payı [9].

Ülke Veya Bölge	2018		2019		2020		Toplam tüketim payı (2020)
	Yeni (MW)	Toplam (MW)	Yeni (MW)	Toplam (MW)	Yeni (MW)	Toplam (MW)	
Avrupa Birliği	8 147	117 530	16 599	134 129	18 788	152 917	6.0%
Almanya	3 000	45 158	3 889	49 047	4 736	53 783	9.7%
İtalya	426	20 114	757	20 871	729	21 600	8.3%
İspanya	41	7 068	4 209	11 277	2 812	14 089	9.0%
Birleşik Krallık	313	13 073	273	13 346	217	13 563	4.0%
Fransa	1 081	9 691	1 113	10 804	929	11 733	2,8%
Hollanda	1 697	4 608	2 569	7 177	3 036	10 213	8.9%
Türkiye	1 642	5 064	932	5 996	672	6 668	5.9%

Yıllar önce, güneş pilleri daha az verimliyken, güneş panellerinin enerji geri ödeme sürelerinin sorgulanması önemliydi. Ama günümüzün güneş panelleri daha verimlidir, dolayısıyla daha fazla elektrik üretirler ve bu gerçek, daha verimli üretim ile birlikte enerji geri ödeme sürelerinin sadece birkaç yıla düştüğü anlamına gelmektedir. 2018 yılında yapılan araştırmalardan birinde, "Çatı tipi PV sistemleri için enerji geri ödeme tahminleri 4, 3, 2 ve 1 yıldır: Mevcut polikristal-silikon PV modüllerini kullanan sistemler için 4 yıl, mevcut ince film modülleri için 3 yıl, beklenen polikristal modüller için 2 yıl ve beklenen ince film modülleri için 1 yıl" [11]. Güneş pilleri nihayetinde daha ucuz ve daha verimli malzemelerden yapılabilir, bu da üretim maliyetlerini daha da azaltacak ve belki de verimliliklerini artıracaktı ve bu da enerji geri ödeme sürelerini azaltacaktır. Almanya'da tipik bir 10 ila 100 kWp PV çatı sistemi fiyatları 1990'da 14000 EUR/kWp'in civarındalar. 2020'nin sonunda, bu tür sistemler 1990'daki fiyatın sadece %7.4'üne mal olmaktadır [12].

Basit geri ödeme süresi genellikle bir konutta veya işletmede solar PV'nin benimsenmesinden önce değerlendirilir. Solar PV elektriğinin değerini

sürdürülebilirlik açısından daha iyi tanımlamasına rağmen, Enerji geri ödeme süresi nadiren bir kurulumun değerini ölçmek için kullanılır [13].

Güneş enerjisi santrallerinde geri ödeme süresi ile ilgili daha önce birçok çalışma sunulmuştur. Türkiye'de son dönemde yapılan belki de en önemli çalışmalardan biri Adıyaman Üniversitesi'nde bir grup araştırmacı tarafından 2019 yılında yapılan bir araştırmadır. Türkiye'nin Adıyaman bölgesinde kurulu gücü 1.025 MW ve kurulum maliyeti güneş enerjisi santrali başına 1,000,000 USD olan üç özdeş güneş enerjisi santrali çalışmanın sonuçları, yıllık ortalama elektrik üretiminin 1,696,665 kWh olduğunu göstermiştir. Dahili elektrik tüketimi 10,770 kWh olmuştur. Böylece net elektrik üretimi 1,685,895 kWh olarak gerçekleşmiştir. Bu GES'ler için ortalama geri ödeme süresi 5.5 yıldır [14].

Bir grup araştırmacının 2019 yılında yaptığı başka bir çalışmada, sonuçlar, Türkiye'de Aksaray ilinde 20,000 m² bir alana kurulu güneş enerjisi santralinin geri ödeme süresinin 4.5 yıl olduğunu, güneş santralinin kârının ise 501,825 USD/yıl olduğunu göstermiştir [15]

Konya Meram Tıp Fakültesi Hastanesi'nde güneş enerjisi santrali inşaatı üzerine yapılan bir başka çalışmada, güneş enerjisi santralinin geri ödeme süresi, 900 kW'lık bir fotovoltaik sistemin tasarlandığı iki senaryo üzerinden değerlendirilmiştir. Birinci senaryoda, sera gazı emisyon azaltımına desteğin olmadığı durum değerlendirilmiş ve sistemin geri ödeme süresi 5.1 yıl olarak bulunmuştur. İkinci senaryoda, sera gazı emisyon azaltım sübvansiyonu ton CO₂ başına 15 USD olarak kabul edilmiş ve sistemin geri ödeme süresi 4.8 yıl olarak belirlenmiştir [16].

Norveçli güneş enerjisi platformu Otovo, 2019'da yaptığı yakın tarihli bir çalışmada, birçok Batı Avrupa pazarındaki güneş enerjisi sistemlerinin geri ödeme sürelerinin 10 yılın altına düştüğünü ve hatta güneşli İspanya ve Fransa'nın bazı bölgelerinde altıya ulaştığını söylemektedir. Düşen fotovoltaik (PV) panel fiyatları ve kirletici yakıtlar için daha yüksek CO₂ maliyetlerinin birleşimi, güneş enerjisini Avrupa'daki tüketiciler için daha çekici hale getirmiştir. Otovo, önemli Avrupa pazarlarında geri ödeme sürelerini karşılaştırmak için, güneş enerjisinin %80'inin kendi kendine

tüketildiği 2.9 kWp'lik bir sistem boyutu da dahil olmak üzere tüm ülkeler için eşit olan sabit bir dizi faktör varsaymıştır. Sistem maliyeti kWp başına 1,800 EUR (2,050 USD) olarak belirlenmiştir. Çalışma, geri ödeme sürelerinin altı yılın altına düştüğü tek pazarın Fransa olduğunu gösteriyor. Bu güney ve güneydoğu için geçerliken, ülke genelindeki tüketiciler 6 ila 7.9 yıl arasında geri ödeme bekleyebilirler. Geri ödeme süreleri İspanya'nın orta ve güneyinde de 6 – 6.9 yıla düşmektedir, ancak kuzeyde 10 – 10.9 yıla kadar çıkabilmektedir. Almanya'da, Almanya'nın geri ödeme süresi 7 ile 7.9 yıl arasında hesaplanmıştır [17].

Türkiye'deki güneş enerjisi santrallerinin geri ödeme süreleri Avrupa ülkelerine göre daha kısa olmasına rağmen, Türkiye kurulu güneş PV kapasitesi açısından Avrupa'da sekizinci sırada yer almaktadır.

Güneş panellerinin üretimindeki hızlı gelişme, verimliliğin artması ve güneş enerjisini destekleyen birçok kanunun değişmesi gibi güneş enerjisi santrallerinde geri ödeme süresini olumlu yönde etkileyen birçok faktörün olduğu yukarıdakilerden açıkça görülmektedir. Güneş enerjisi santrallerinde geri ödeme süresinin azalmasına yenilenemeyen enerji fiyatlarındaki son artışlar neden olmaktadır. Bu nedenle tez, güneş enerjisi sektöründeki en önemli değişim ve gelişmeleri ve bunların Avrupa ve Türkiye'deki güneş enerjisi santrallerinin geri ödeme süreleri üzerindeki etkilerini ele almıştır.

İncelenen literatüre dayanarak, Türkiye ve Avrupa'daki güneş enerjisi santrallerinin geri ödeme sürelerini karşılaştıran bir çalışmayı rastlanmamıştır. Bu tez, güneş enerjisi çalışmasında santrallerinin geri ödeme sürelerinin Türkiye ve Avrupa'yı karşılaştırmaktadır. Türkiye, Avrupa'ya kıyasla yüksek güneş radyasyonu olan bölgelerde yer almasına rağmen, Türkiye'de güneş enerjisi sektörünün büyümesinin gecikmesinin nedenlerinin bilinmesine katkı sağlayacaktır. Ayrıca tez, Türkiye'de güneş enerjisi sektörünün önündeki en önemli engellerin ve yatırımcıların güneş enerjisi santrallerine yatırım yapma konusundaki isteksizliklerinin nedenlerinin bilinmesine katkı sağlayacaktır.

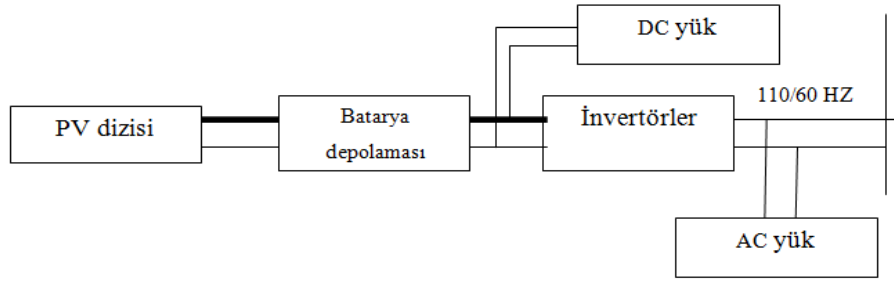
Tezin amaçladığı yer:

- Türkiye'deki karar vericileri güneş enerjisine yönelik adımlar atmaya yönlendirmek, güneş enerjisinden enerji üretmenin yatırım getirilerini değerlendirmek, Türkiye'deki güneş santrallerinde geri ödeme sürelerinin incelenmesi olarak sıralanabilir. Özellikle Türkiye'nin enerji sorunu yaşayan ve fosil enerji kaynakları konusunda fakir ülkelerden biri olarak görülmesi nedeniyle, dışa bağımlılıktan kurtulmak için güneş enerjisi santrali yatırımlarının artırılması gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışma, bu alanda yatırım yapmak isteyen yatırımcılara yol göstermesi açısından önemlidir.
- Bu tez, güneş enerjisi santrallerinin geri ödeme süresini etkileyen güneş panellerinin türü ve güneş enerjisi santralinin yeri veya diğer faktörler açısından incelemeyi amaçlamaktadır.
- Bu tez aynı zamanda Avrupa'daki güneş enerjisi santrallerinde geri ödeme süresini incelemeyi ve Türkiye ile karşılaştırmayı amaçlamaktadır.
- Fotovoltaik sistemlerden elektrik üretiminin uzun vadeli fayda ve maliyetlerinin değerlendirilmesi ve bu kaynağın ülke ekonomisine maksimum fayda sağlayacak şekilde önerilerde bulunulması çalışmanın amaçları arasındadır.

BÖLÜM 2

GENEL FOTOVOLTAİK SİSTEM

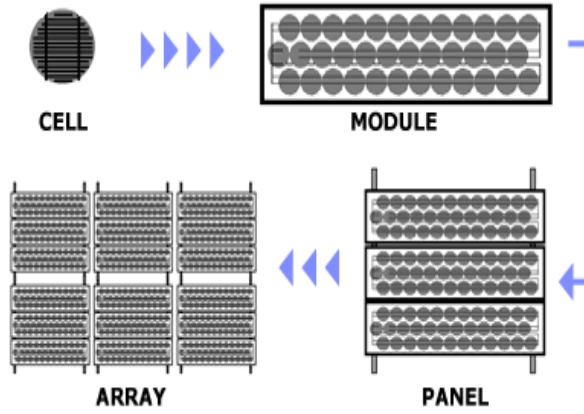
Fotovoltaik (PV) sistem, güneş radyasyonunu doğrudan elektriğe dönüştürür. Genel bir PV sisteminin blok diyagramı Şekil 2.1'te gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Genel fotovoltaik sistem.

Aşağıdaki yapı taşlarından oluşur:

- PV dizisi: İşlevi güneş radyasyonunun elektriğe dönüştürülmesidir. Bu sistemdeki ana ünedir.
- Batarya depolaması: Güneş ışınımı olmadığında enerji üretebilmek için dizi tarafından üretilen elektrik enerjisi kısmen depolanmalıdır. Bu nedenle, ikinci ana ünite Batarya depolama birimidir.
- Güç koşullandırma devreleri: Yükün yapısına bağlı olarak, üretilen elektrik gücü DC/DC dönüştürücüler ve DC/AC invertörler kullanılarak şartlandırılmalıdır.
- PV dizisi güneş modüllerinden oluşur. Her modül, tüm jeneratörün terminal özelliklerini karşılamak için seri ve paralel bağlı bir güneş hücreleri matrisi içerir. Buna göre, güneş hücresi PV jeneratördeki temel elemandır. Bu eleman, güneş ışınlarını Elektrik enerjisine dönüştürür.



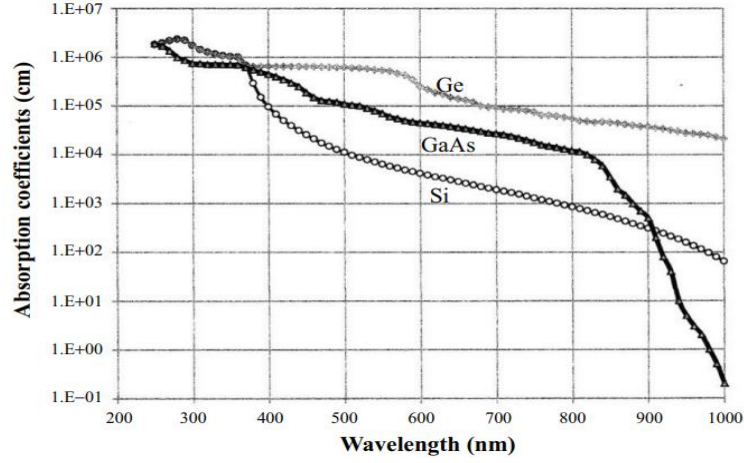
Şekil 2.2. Fotovoltaik dizi bileşenleri.

2.1. PV HÜCRELERİ

Bir fotovoltaik (PV) hücre, fotovoltaik etki adı verilen bir süreçle güneş enerjisini faydalı elektriğe dönüştüren bir enerji hasat teknolojisidir. Hepsi bir elektrik akımı üretmek için Güneş'ten gelen fotonlarla etkileşime girer bunlar yarı iletken kullanan birkaç farklı PV hücresi türünden oluşur. Güneş hücrenin üretimi için en yaygın malzeme silikondur. Silikon kumdan elde edilir ve yer kabuğundaki en yaygın elementlerden biridir, bu nedenle hammadde bulunabilirliğinde bir sınır yoktur.

PV teknolojisinin verimliliğini sınırlayan ana faktörlerden biri, güneş ışığının doğası ve PV hücre malzemesinin mevcut tüm enerjeyi emme yeteneğidir. Güneş ışığı, kızılötesi, görünür ve ultraviyole ışık dahil olmak üzere geniş bir elektromanyetik radyasyon spektrumu içerir. Bu spektrumun her bölgesi bir dalga boyu aralığına sahiptir: kızılötesi en uzun, ultraviyole en kısa ve görünür ışık ikisi arasında dalga boylarına sahiptir. Elektromanyetik spektrum boyunca, kısa dalga boyları en fazla enerjiye sahiptir. Ancak, silikon gibi en yaygın PV malzemeleri, diğer malzemelerin yanı sıra daha kısa dalga boylarında güneş ışınımını emmez. Şekil 2.3, germanyum (Ge), galyum arsenit (GaAs) ve silikonun (Si) absorpsiyon katsayısını karşılaştırır. Absorpsiyon katsayısı, malzemenin derinliğinin tersidir. Daha kısa dalga boyları, daha uzun dalga boylarından daha kolay emilir. Ayrıca silikon, 400 ila 800 nm aralığında enerjiyi emmek için üçü arasında en az verimli malzemedir. Absorpsiyon katsayısının önemi, protonlardan önemli miktarda enerji yakalamak için gereken

malzemenin kalınlığını belirlemesidir. Silikon hücresel "GaAs" veya "Ge"den daha kalın olmalıdır [18] .



Şekil 2.3. Absorpsiyon katsayıları [18].

PV modüllerinde bir dizi yarı iletken malzeme kullanılabilir, ancak ticari uygulanabilirlik elde etmek için modüllerin uygun şekilde yüksek performansa sahip olması, operasyonda kararlılık, iyi üretilebilirliğe sahip olması, düşük maliyetli üretime sahip olması ve uzun bir kullanım ömrü elde edebilmesi gerekir. Üretilebilirlik, üretim kolaylığı, malzemelerin mevcudiyeti, sağlık ve güvenlik, çevresel etkiler gibi hususları içerir. Düz plaka piyasası, hem monokristal hem de polikristal silikon piyasasına hakimdir ve ikincisi en yüksek pazar payına sahiptir. 2014 yılında, kristal silikon modüllerin PV pazarının neredeyse %91'ini oluşturduğu, polikristal silikonun %55 ve monokristal silikonun %36 oranında katkıda bulunduğu tahmin edilmektedir [19]. Ancak Fraunhofer Güneş Enerjisi Sistemleri Enstitüsü'nün 2022'deki bir raporuna göre, Si-wafer bazlı PV teknolojisi, 2020'deki toplam üretimin yaklaşık %95'ini oluşturmuştur. Monokristal teknolojinin payı toplam c-Si üretiminin %84'tür (2019'daki %66'ya kıyasla) [20].

2.1.1. Silicon Cell Technology

Güneş hücresi, herhangi bir PV sisteminin çekirdeğidir. Son 40 yılda, fotovoltaik (PV) hücreler, PV modüllerinin kümülatif satış hacmi her iki katına çıktığında %20'den fazla azalan etkileyici bir fiyat düşüşü göstermiştir. Bu, PV güç

sistemlerinin toplam maliyetinde önemli bir düşüşe ve sonuç olarak PV'ler tarafından üretilen elektrik enerjisinin maliyetinde bir azalmaya neden olmuştur. Bu maliyet artık geleneksel olarak üretilen ve sağlanan şebeke gücünün uzun vadeli maliyetine yakındır. 1970'den beri Kristal silikon (c-Si), PV hücre ve modül üretimi için en önemli malzeme olmuştur ve bugün tüm PV modüllerinin %90'ından fazlası c-Si'den yapılmıştır. 40 yıllık araştırma ve üretime rağmen, bilim adamları ve mühendisler hala Si-wafer bazlı PV'lerin performansını geliştirmenin ve aynı zamanda maliyeti düşürmenin yeni yollarını araştırmaktadırlar [21].

Bir PV hücresi oluşturmak için birçok türde yarı iletken malzeme kullanılır, ancak şu anda silikon en yaygın olanıdır. Silikon dioksit çok bol miktarda bulunur ve dünya kabuğunun yarısından fazlasını oluşturur. Bununla birlikte, verimli hücreler oluşturmak için gereken saf silikon, üretilmesi için çok enerji gerektirir. %99 saflıkta silikon üretmek için yaklaşık 50 kWh/kg enerji gereklidir. Yüksek verimli hücreler 108'de 1 kısım saflık gerektirir ve bu saflığı elde etmek için 200 kWh/kg'dan fazla enerji gereklidir [20]. Güneş hücresi için kullanılan silikon veya diğer yarı iletken malzemeler monokristal, polikristalli veya amorf olabilir. Bu malzemeler arasındaki temel fark, Bu malzemeler arasındaki temel fark, yarı iletkenlerin mükemmel derecede düzenli ve düzenli bir Kristal yapıya sahip olma derecesidir. Bu nedenle bir yarı iletken malzeme, malzemeyi oluşturan kristallerin boyutuna göre sınıflandırılabilir. Monokristal, her bir atomun dört komşu atoma bağlı olduğu çok düzgün bir yapıdan oluşur. Monokristal hücreler en verimli olanlardır (%18 ila %20), ancak üretimi için en fazla enerjiyi gerektirir, Bu hücrelerin beklenen ömrü genellikle 25-30 yıldır. Polikristal hücreler üretmek için daha az enerji gerektirir ve daha az verimlidir (%16 ila %18), Ömrünün 20 ila 25 yıl arasında olması beklenmektedir. Amorf silikon hücreler üretmek için en az enerjiyi alır, ancak daha da az verimlidir (%8 ila %10) [18]. Fraunhofer Güneş Enerjisi Sistemleri Enstitüsü tarafından Şubat 2022'de yayınlanan bir rapora göre, rekor laboratuvar hücrelerinin verimliliği monokristalin için %26.7 ve polikristalin silikon bazlı teknoloji için %24.4'tür. Aynı raporda, son 10 yılda ortalama ticari silikon modüllerin verimliliği yaklaşık %15'ten %20'ye ve daha fazlasına yükselmiştir [20].

İnce film teknolojisinde modüller, cam, paslanmaz çelik veya plastik gibi ucuz bir alt tabaka üzerine son derece ince ışığa duyarlı malzeme katmanlarının yığılmasıyla üretilir. İnce filmler, tek başına toplam modül üretim maliyetinin %50'sinden fazlasını oluşturan pahalı silikon yongaların kullanımını ortadan kaldırarak fotovoltaiklerin maliyet yapısında devrim yaratma potansiyeline sahipti [22].

Ticari kullanımda olan (aktif malzemeye bağlı olarak) dört tip ince film modülü vardır:

- Amorf silikon (a-Si): Amorf silikon (a-Si) ince film hücreleri en eski ince film türüdür. Bu güneş pilleri, tipik güneş hücresi yongalarından farklı olarak kristal olmayan silikon kullanılarak üretilir. Amorf silikon, kristal silikon ve diğer yarı iletken malzemelerin çoğuna kıyasla üretimi daha ucuzdur. Bu tip silikon, bolluğu, toksik olmaması ve maliyet etkinliği nedeniyle de popülerdir. Bu güneş hücresi, düşük işlem sıcaklığı gerektirir. Amorf silikon, kızılötesi ve hatta bir miktar ultraviyole içeren geniş bir ışık spektrumu yelpazesini emebilir ve loş ışıkta gerçekten iyi performans gösterebilir. Hücrenin kristalin silikon hücrelerin aksine sabahın erken saatlerinde veya öğleden sonra geç saatlerde ve hatta bulutlu ve yağmurlu günlerde güç üretmesini sağlar. Aslında, Kristal silikon hücreler, düşük ve dolaylı gün ışığına maruz kaldıklarında önemli ölçüde daha düşük bir verimlilik düzeyine sahiptir. A-Si hücrelerinin verimliliği, Staebler-Wronski etkisi (SWE) olarak adlandırılan operasyonun ilk aşaması sırasında genellikle yaklaşık yüzde 10 ila 30 oranında önemli ölçüde düşer. Basitçe söylemek gerekirse, SWE, güneş ışığına uzun süre maruz kalma nedeniyle fotoiletkenlik ve karanlık iletkenlikteki değişiklikler nedeniyle elektrik çıkışında kayıplar oluyor. Buna karşılık, geleneksel c-Si güneş pilleri neredeyse hiç böyle bir bozulma etkisi göstermez [23]. 2017'de bir grup araştırmacı, Hidrojene amorf silikon hücrenin (a-Si: H) verimliliğini %11.3'e yükseltmeyi başarmıştır [24]. Amorf silikon ince film güneş hücreleri, bakır indiyum galyum selenyum güneş pili (CIGS hücresi) ve kadmiyum tellür (CdTe) gibi diğer ince film teknolojileriyle güçlü bir rekabetle karşı karşıyadır. Bu hücrelerin her ikisi de yüksek ışık emme kapasitesine ve düşük karbon ayak izine sahiptir.



Şekil 2.4. İnce film, amorf silikon.

- Kadmiyum tellür (CdTe): Kadmiyum tellür (CdTe) ince film güneş hücreleri, en yaygın ince film güneş hücresi türüdür. Fraunhofer Güneş Enerjisi Sistemleri Enstitüsü tarafından Şubat 2022'de yayınlanan bir rapora göre, CdTe güneş pillerinin en yüksek laboratuvar verimi %21.0'dır. Son 10 yılda ticari bir CdTe modülünün ortalama verimliliği %9'dan %19'a yükselmiştir [20]. Kadmiyum tellür, metal kadmiyum ve tellür yarı metalinin bir füzyonudur. Fiziksel özellikleri ve düşük teknoloji üretimi nedeniyle ince fotovoltaiik modüllerde kullanıma uygundur. Bu avantajlarına rağmen kadmiyum toksisitesi ve şüpheli kanserojenliği nedeniyle yaygın olarak kullanılmamaktadır.



Şekil 2.5. CdTe ince film.

- Bakır indiyum galyum selenyum (CIS, CIGS): İnce film güneş hücreleri üretmek için kullanılan başka bir yarı iletken türüdür. CIGS hücreleri geleneksel olarak piyasadaki diğer hücre tiplerinden daha maliyetli olmaktadır. Bu nedenle yaygın olarak kullanılmazlar. Fraunhofer Güneş Enerjisi Sistemleri Enstitüsü tarafından Şubat 2022'de yayınlanan bir rapora göre, CIGS güneş hücrelerinin en yüksek laboratuvar verimi %23.4'tür [20].

- Galyum Arsenit (GaAs): GaAs bazlı güneş hücrelerini kullanan en yaygın alan, havacılık endüstrisi ve uzay araçları ve yapay uydulardır. Ana sebep, uzayda Dünya'dan çok daha büyük olan geniş spektral kapsama alanıdır. Özellikle insansız hava araçlarında kullanılabilen esneklikleri ve ağırlıkları nedeniyle havacılık ve askeri alanda da kullanılmaktadırlar. Bu tip güneş hücreleri yaygın kullanım için pahalıdır. Fiyatlar, teknolojinin karmaşıklığına bağlı olarak değişebilir. Yüksek fiyat sadece yonga maliyetinden değil, aynı zamanda sonraki üretimden de etkilenir - pahalı ekipman. Li ve diğerleri. silikon ile karşılaştırıldığında, GaAs hücrelerinin fiyatlarının on kata kadar daha yüksek olduğunu belirtmektedir [25]. GaAs güneş hücreleri, tek eklemli güneş hücreleri için 1-güneş altında %29.1 verimlilik göstermiştir. Ayrıca tek eklemli güneş pillerinin sınırlayıcı verimi %30-32 olduğu için çok eklemli güneş hücreleri geliştirilmiş ve InGaP/GaAs bazlı 3 eklemli güneş hücreleri uzayda yaygın olarak kullanılmaktadır [26].

2.1.2. Perovskite Güneş Teknolojisi

Silikon, 1950'lerden beri güneş hücrelerinde kullanılan birincil yarı iletken malzeme olmuştur. Bununla birlikte, Geleneksel güneş panellerinde kullanılan büyük silikon kristalleri, çok fazla enerji tüketen pahalı, çok aşamalı bir üretim süreci gerektirir. Bir alternatif arayışında bilim adamları, silikona benzer özelliklere sahip yarı iletkenler oluşturmak için perovskitlerin ayarlanabilirliğini kullandılar. "Perovskite" adı, kristal yapılarının takma adından gelmektedir.

Perovskite güneş hücreleri, daha yüksek performans potansiyeli olan rekabetçi enerji dönüşüm verimliliği (PCE) göstermiştir, ancak kararlılığı, önde gelen fotovoltaik (PV) teknolojilerine kıyasla sınırlıdır. Perovskitler, nem ve oksijenle reaksiyona girdiklerinde veya ışığa, ısıya veya uygulanan voltaja uzun süre maruz kaldıklarında ayrışabilirler. Kararlılığı artırmak için araştırmacılar, hem perovskite malzemenin kendisinde hem de çevreleyen cihaz katmanlarında bozulma üzerinde çalışmaktadırlar. Hücre dayanıklılığının geliştirilmesi, ticari perovskite güneş ürünlerinin geliştirilmesi için kritik öneme sahiptir.

Perovskite güneş hücreleri, verimlilikteki hızlı artışlarla son yıllarda dikkate değer bir ilerleme göstermiştir. En son araştırmalara göre, perovskite hücrelerin verimliliğinde 2009'da yaklaşık %3'ten 2022'de %25'in üzerine bir artış göstermiştir [27]. Perovskit güneş hücrelerinin stabilitesini ve bozulmasını anlamadaki önemli ilerlemeye rağmen, sınırlı operasyonel ömürleri nedeniyle şu anda ticari olarak uygun değildirler.

2.2. PV MODÜLÜ

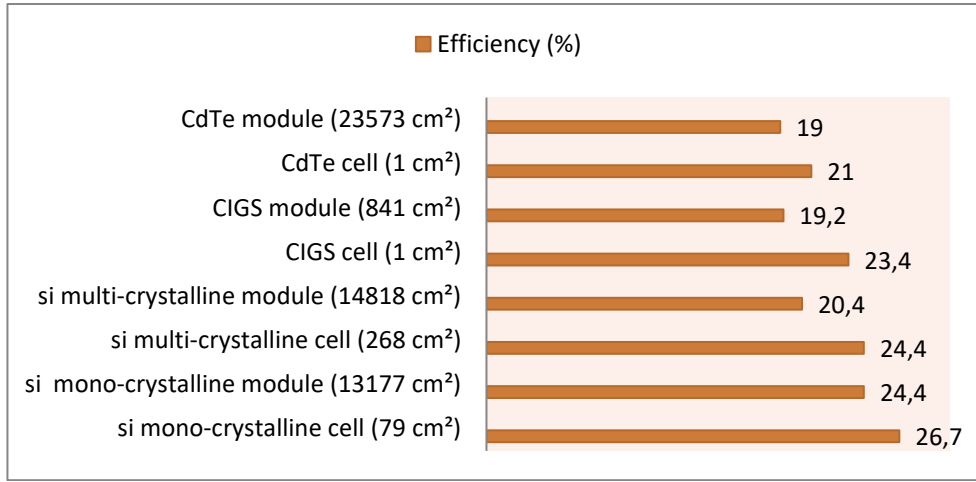
PV modülü, akımı artırmak için paralel ve daha yüksek bir voltaj üretmek için seri olarak bağlanmış birçok PV hücresinden oluşur. Tipik bir PV modülü, seri olarak bağlanmış yaklaşık 36 veya 72 hücreden oluşur [28]. Modül, ön yüzeyinde temperli cam (veya başka bir PV modülü, akımı şeffaf malzeme) ve arka yüzeyinde koruyucu ve su geçirmez bir malzeme ile kaplanmıştır. Kenarlar hava koşullarına dayanıklı olması için kapatılmıştır. Modülün arkasında, elektrik bağlantılarını sağlayan bir bağlantı kutusu veya bağlantı telleri bulunmaktadır.

2.2.1. PV Modüllerinin Performansı ve Verimliliği

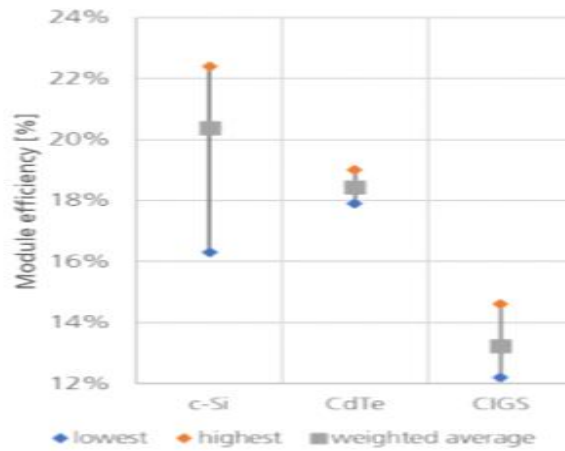
PV sisteminin performansı, PV sisteminin her yıl ne kadar elektrik enerjisi üreteceğinin bir tahminidir. Bir PV sisteminin elektrik enerjisi üretimi genellikle megawatt saat (MWh) olarak ölçülür. Belirli bir PV sistemi için PV sistem performansı, öncelikle PV modüllerinde güneş radyasyonu miktarından ve daha az ölçüde sıcaklık ve güneş spektrumlarından etkilenir. Bir PV sistemine bu üç birincil girdi, kirlilik seviyesi, montaj konfigürasyonu, rüzgar hızı, günün saati, konum ve diğerleri gibi faktörlerden etkilenmektedir.

PV modüllerinin ve dizilerinin performansı, genellikle Standart Test Koşulları (STC) altında maksimum DC güç çıkışlarına (watt) göre derecelendirilir. Standart Test Koşulları, bir modül (hücre) çalışma sıcaklığı 25° C (77 F) ve gelen güneş ışınım seviyesi 1000 W/m² ve Hava Kütlesi 1.5 spektral dağılımı altında tanımlanır. Gerçek performans genellikle STC derecesinin yüzde 85 ila 90'ı kadardır [29].

Fotovoltaik hücrenin verimi ile fotovoltaik modülün verimi arasında bir fark vardır. Bu farkın nedeni, hücrenin veriminin, tek hücreye çarpan enerjiye göre hesaplanması, modülün veriminin ise modülün tamamı olmasıdır, Güneş modülü genellikle hücreler arasında boşluklara sahip olduğundan, enerjinin bir kısmı kaybedilir. Şekil 2.6, en iyi laboratuvar hücresi verimliliği ile en iyi laboratuvar modülü verimliliği arasındaki farkı gösterir. Ticari PV modüllerinin mevcut verimlilikleri için, kristalli Silikon (c-Si) gofret bazlı modüllerin toplam ortalama verimliliği, 2021 yılının dördüncü çeyreğinde %20.4'tür. Bu gruptaki en düşük modül verimi Şekil 2.7'de görüldüğü gibi %16.3 ve en yüksek değer %22.4'tür [20].



Şekil 2.6. Teknolojilerin verimlilik karşılaştırmaları [20].

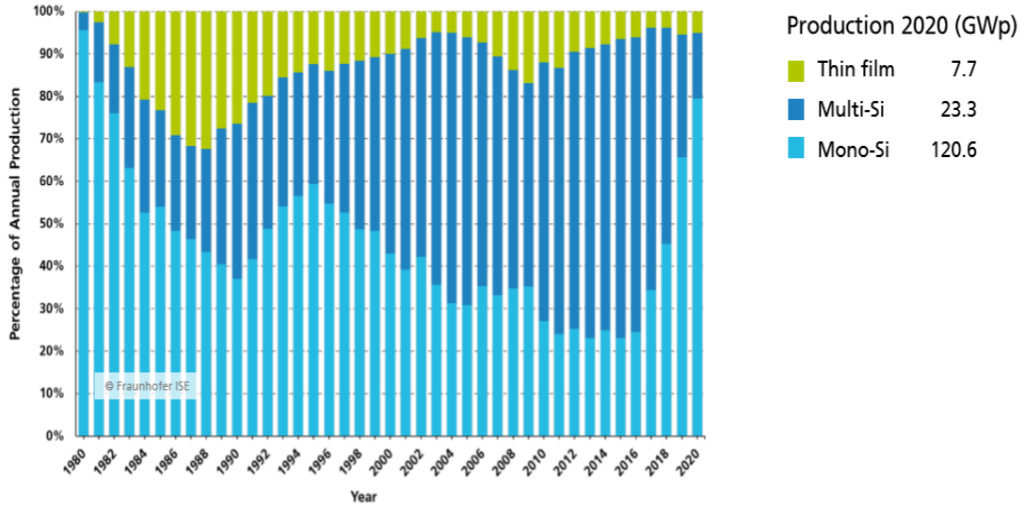


Şekil 2.7. Verimlilikler ticari PV modülleri [20].

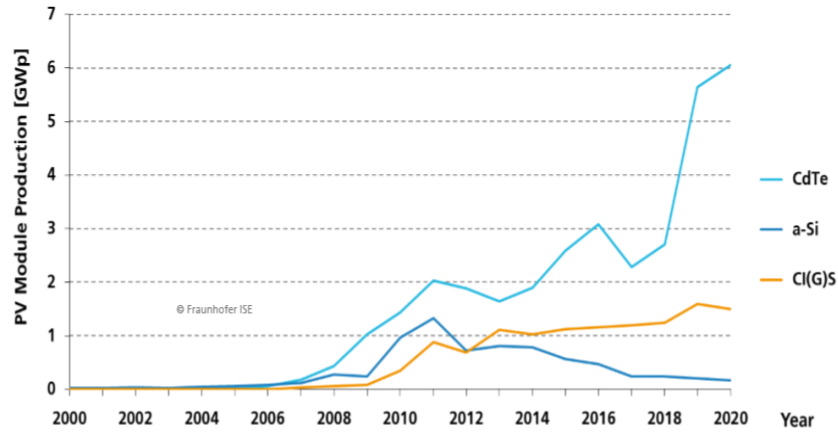
2.2.2. Teknolojiye Göre PV Üretimi

Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın (IRENA) raporuna göre, 2020 yılında dünyadaki toplam PV kapasite 707.495 GW'ye ulaşmıştır [9].

Fraunhofer Güneş Enerjisi Sistemleri Enstitüsü tarafından Şubat 2022'de yayınlanan bir rapora göre, farklı analistler tarafından bildirilen 2020 üretim rakamları bir miktar farklılık gösteriyor. Farklı kaynaklar, 2020 yılı için toplam PV modülü üretiminin 137 ile 152 GWp arasında olduğunu bildirmektedir. Şekil 2.8, 2020 yılında teknolojiye göre toplam PV modül üretimini göstermektedir. 2020 yılında, monokristal teknolojisinin yıllık üretimi 120.6 GWp olmuştur. Ayrıca, 2020 yılında multikristal teknolojisinin yıllık üretimi 23.3 GWp ve İnce film teknolojisinin yıllık üretimi 7.7 GWp'dır. Aynı rapora göre, ince film teknolojilerinin toplam küresel fotovoltaik enerji üretiminin yüzdesi yaklaşık %5'dir, CdTe, CI(G)S ve a-Si teknolojileri için enerji üretimi sırasıyla 6.1 GWp, 1.5 GWp, 0.2 GWp'dır. Şekil 2.9, son yirmi yılda ince film teknolojileri için yıllık küresel PV modül üretimini göstermektedir [20].



Şekil 2.8. 2020 yılında teknolojiye göre toplam PV modül üretimi [20].



Şekil 2.9. İnce film teknolojileri için yıllık küresel PV modülü üretimi [20].

Son on yılda, verimliliği ve diğer avantajları nedeniyle diğer ince film teknolojilerine kıyasla küresel yıllık CdTe teknolojisi üretiminde bir artış görülmektedir.

2.3. İNVERTÖR

Bir güneş invertörü, güneş panelleri tarafından yakalanan doğru akım (DC) elektriğini alternatif akıma (AC) dönüştüren bir güneş fotovoltaik sisteminin en önemli bileşenlerinden biridir. İntertörün en önemli fonksiyonlarından biri, maksimum güç noktası takibi ve güneş PV sisteminin güvenli çalışmasını sağlamaktır. Dört ana tip güneş invertörü vardır. Dizi invertörleri, mikro invertörler, merkezi invertör, DC/DC dönüştürücü (Power optimizer).

İntertörün verimliliği, sistem konfigürasyonuna karar vermede en önemli faktördür. Fraunhofer Güneş Enerjisi Sistemleri Enstitüsü tarafından Şubat 2022'de yayınlanan bir rapora göre, son teknoloji marka ürünler için İntertör verimliliği %98 ve daha yüksektir. Dizi İntertörlerin pazar payının %64 olduğu tahmin edilmektedir. Bu İntertörler çoğunlukla konut, küçük ve orta ölçekli ticari uygulamalarda 150 kWp'ye kadar olan PV sistemlerinde kullanılmaktadır. Çoğunlukla büyük ticari ve şebeke ölçekli sistemlerde uygulamaları olan merkezi invertörlerin pazar payı yaklaşık %34'tür. Pazarın küçük bir kısmı (yaklaşık %1) mikro invertörlere aittir. "Güç optimize ediciler" olarak da adlandırılan DC/DC dönüştürücülerin pazar payının

toplam İvertör pazarının %5'i olduğu tahmin edilmektedir. Çizelge 2.1, 2020 yılında İvertörlerin verimliliğini ve pazar payını göstermektedir [20].

Bir fotovoltaik (PV) invertörün verimliliğindeki küçük bir yüzde farkı, maliyetinde büyük bir farka neden olur. Bunun nedeni, verimlilikteki her %1'lik fark için invertörün maliyetinin yaklaşık %10 değişmesidir [30].

Çizelge 2.1. 2020 yılında İvertörlerin verimliliği ve pazar payı [20].

İvertör	Güç	Verimliliği	pazar payı (Tahmini)
Dizi İvertörleri	150 kWp'ye kadar	%98'e kadar (DC/AC)	64.4%
Merkezi İvertör	80 kWp'den fazla	%98.5'e kadar (DC/AC)	33.7%
Mikro İvertörler	Modül Gücü Aralığı	90% - 97% (DC/AC)	1.4%
Güç Optimize Edici	Modül Gücü Aralığı	%99.5'e kadar (DC/DC)	5.1%

2.4. ENERJİ GERİ ÖDEME SÜRESİ

PV pazarlarının hızlı büyümesi, büyük ölçüde geleneksel enerji kaynaklarından daha ucuz olan ürettikleri elektriğe dayanmaktadır. Bu nedenle, sistemi üretmek için kullanılan enerjiyi geri ödeme için PV sisteminin ne kadar süre çalışması gerektiğini bilmek, Enerji geri ödeme süresi (EPBT) göstergesi gibi PV sistemlerinin göstergelerini izlemek için önemlidir. Enerji geri ödeme süresi, nihai olarak çeşitli faktörlere bağlıdır, Bunlar; modül tipi, destekleyici yapı tipi, dönüşüm verimliliği, üretim süreci, konum ve kurulum konumu (zemine monte veya çatıya monte) olarak sıralanabilir.

2.4.1. Mono-Si PV Sistemlerinin Enerji Geri Ödeme Süreleri

2000 yılından günümüze, Avrupa'da çatı uygulaması için mono-silikon PV sistemleri üzerinde birçok çalışmalar yapılmıştır. 2004 yılında, Erik A. Alsema ve diğerleri tarafından güney Avrupa'daki mono-silikon PV sistemleri için enerji geri ödeme süreleri çalışma yapılmıştır, Belirli koşullar altında; modülün verimliliği %14, sistem ömrü 30 yıl ve performans oranı (PR; nominal ve gerçek elektrik çıkışı arasındaki oran) 0.75 iken Kümülatif Enerji Talebi (CED) 5200 MJ/m²'dir. Sonuçlar, mono-Si modüllerinin 2.7 yıl bir enerji geri ödeme süresine sahip olduğunu göstermektedir [31]. 2006 yılında, Erik A. Alsema ve diğerleri tarafından güney Avrupa'da 1700 kWh/m²/yıl ve orta Avrupa'da 1000 kWh/m²/yıl olmak üzere iki farklı konumda mono-Si teknolojisine bazlı PV Çatı Uygulaması için sistemlerinin enerji geri ödeme süresi hakkında çalışma yapılmıştır, Belirli koşullar altında; modülün verimliliği %14, sistem ömrü 30 yıl ve sistem Performans Oranı 0.75'dir. Sonuçlar, mono-Si modüllerinin Avrupa'da 2.1 yıl ve Orta Avrupa'da 3.6 yıl bir enerji geri ödeme süresine sahip olduğunu göstermektedir [32]. 2009 yılında, Wim C. Sinke ve diğerleri tarafından güney Avrupa'da mono-silikon çatı PV sistemleri için enerji geri ödeme süreleri çalışma yapılmıştır, Belirli koşullar altında; modülün verimliliğinin %14, sistem ömrü 30 yıl ve performans oranının 0.8 ve ışınım 1700 kWh/m²/yıl, kümülatif enerji talebi ise 2860 MJ/m² olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, mono-Si modüllerinin 1.8 yıl bir enerji geri ödeme süresine sahip olduğunu göstermektedir [33].

Hücre üretimindeki gelişme ve dönüşüm verimliliğindeki artış dahil olmak üzere çeşitli faktörler nedeniyle çatı tipi fotovoltaik sistemler için bir mono- silisyumun enerji geri ödeme süresinde 2004'te 2.7 yıldan 2009'da 1.8 yıla düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca 2009'da kümülatif enerji talebi 5200 MJ/m²'den 2860 MJ/m²'ye düşmüştür. ışınım yoğunluğu ve performans oranı arttıkça kümülatif enerji talebi ve enerji geri ödeme süresi azalmıştır.

2.4.2. Multi-Si PV Sistemlerinin Enerji Geri Ödeme Süreleri

Multi-si üretimi için teknikler daha basittir ve bu nedenle mono-si malzeme için gerekli olanlardan daha ucuzdur. Bununla birlikte, polikristal malzemenin malzeme kalitesi, tane sınırlarının varlığından dolayı tek-kristal malzemeninkinden daha düşüktür. Tane sınırları, güneş hücresi performansını azaltır. 1995 yılında, Phylipsen ve Alsema, Avrupa koşulları altında çatıya monte multi-Si PV için %13 verimlilikle PV hücrelerinin değerlendirildiği enerji geri ödeme süresiyle ilgili çalışma yapmıştır; 1700 kWh/m²/yıl ışınım ve 0.75 performans oranında sistem ömrü 25 yıl. Multi-Si modülleri için 2.7 yıl bir enerji geri ödeme süresine sahip olduğunu göstermiştir [34]. 2000 yılında, E.A. Alsema ve E. Nieuwlaar, multi-Si modülleri için enerji geri ödeme süresini çalışmışlardır, Güney Avrupa (Akdeniz) koşulları altında %13.2 verimliliğe sahip PV hücrelerinin; 1700 kWh/m²/yıl ışınım, 4200 MJ/m² kümülatif enerji talebi ve 0.75 performans oranı olduğunu varsaymışlardır. Sonuçlar, multi-Si modüllerinin çatı üstü sistemler için 2.5-3 yıl bir enerji geri ödeme süresine sahip olduğunu, zemine monte edilmiş sistemler için yaklaşık 4 yıl bir enerji geri ödeme süresine sahip olduğunu göstermiştir [35]. Çatıya monte edilen PV sistemleri, zemine monte edilen PV sistemlerinden daha düşük enerji geri ödeme sürelerine sahiptir, çünkü PV sisteminin verimliliği, paralel eğimli PV modüllerinin karşılıklı gölgeleme etkisi nedeniyle düşer.

2006 yılında, Erik A. Alsema ve diğerleri tarafından multi-si PV modülleri için enerji geri ödeme süresine çalışma yapmışlardır, Güney Avrupa koşullarında Multi-Si'nin verimliliğinin %13.2 olduğunu varsaymışlardır; 1700 kWh/m²/yıl ışınım ve 0.75 performans oranı, kümülatif enerji talebi ise 3250 MJ/m² olarak alınmıştır. Sonuçlar, Multi-Si modüllerinin 1.9 yıl bir enerji geri ödeme süresine sahip olduğunu göstermiştir. Aynı çalışmada, Enerji geri ödeme süresi, 1000 kWh/m²/yıl güneş ışınımına sahip Orta Avrupa bölgeleri için 3.2 ila 3.8 yıl aralığında tahminlerde bulunulmuştur [32]. 2008'de Stoppato, iki benzer sistem için ancak farklı ışınım etkisi altında enerji geri ödeme süresiyle ilgili çalışma yapmışlardır ve burada çatıya monte multi-Si PV için PV hücrelerini %16 verimlilikle değerlendirmişlerdir, İtalya iklimi koşulları altında; 1251 kWh/m²/yıl ve 1552kWh/m²/yıl Güneş ışınımı olmaktadır. Enerji geri ödeme süresine tahmini sırasıyla 4.8 yıl ve 3.7 yıldır [36].

2014 yılında, Yue ve diğerleri tarafından güney Avrupa koşulları altında çatıya monte multi-Si PV için %13.2 verimliliğe sahip PV hücrelerinin değerlendirildiği enerji geri ödeme süresi ile ilgili çalışma yapılmıştır; 1700 kWh/m²/yıl ışıma, 0.75 performans oranı ve sistem ömrü 30 yıl iken, Kümülatif enerji talebi 3010 MJ/m²'dir. Sonuçlar, multi-Si modüllerinin 1.6 yıl bir enerji geri ödeme süresine sahip olduğunu göstermektedir [37]. Aksoy Tırmıkçı ve Yavuz tarafından 2020 yılında Kocaeli, Türkiye'de 290.4 kWp kapasiteli, şebeke bağlantılı çatı tipi bir PV sistem için yapılan bir çalışmada, fotovoltaik sistem verimliliği %15 ve altı olan polykristal teknolojisine dayanmaktadır. Çizelge 2.2'de 2014-2018 yıllar arasında radyasyon yoğunluğunu göstermektedir. Fotovoltaik sistem için enerji geri ödeme süresinin sonuçları Çizelge 2.2'de gösterildiği gibi 2-2.2 yıl arasında değişmektedir [38].

Çizelge 2.2. Kocaeli, Türkiye'de 290.4 kWp şebekeye bağlı bir fotovoltaik sistem için yıllık küresel güneş radyasyonu ve enerji geri ödeme süresi [38].

Yıllık küresel güneş radyasyonu (kWh/ m ² -gün)	Enerji Geri Ödeme Süresi (yıl)
2014	3.907
2015	3.917
2016	4.022
2017	4.009
2018	3.888

Solar PV sistemlerinin enerji geri ödeme süresi, silikon hücreler için malzeme kullanımının son 16 yılda yaklaşık 16 g/Wp'den yaklaşık 3 g/Wp'ye düşmesi nedeniyle son yıllarda büyük ölçüde azalmıştır. Buna ek olarak, Performans oranı 1990'da 0.7'den bugün 0.83'e yükselmiştir [20].

2.4.3. İnce Film PV Sistemlerinin Enerji Geri Ödeme Süreleri

İnce filmler, üretimlerinde yüksek bir kümülatif enerji talebi gerektirmedikleri için fotovoltaik hücrelerin maliyet yapısında devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Ancak ince film teknolojisi bazı PV modüllerinin verimliliği, mono-si ve multi-si'den daha düşüktür. 2000 yılında, Alsema çoğu ince film modülünün enerji gereksinimlerinin çerçeve hariç 1000-1500 MJ/m² aralığında olacağını tahmin etmiştir [35]. 2009 yılında, De Wild Scholten, a-Si , CdTe ve CIS modüllerinin enerji

gereksiniminin sırasıyla 989 MJ/m² ve 811 MJ/m² ve 1684 MJ/m² olduğunu tahmin etmiştir [39].

CdTe teknolojisinin diğer fotovoltaik modüllere kıyasla daha düşük enerji gereksinimlerine sahiptir. Bu nedenle CdTe modüllerinin daha düşük enerji geri ödeme süresi vardır. Çizelge 2.3, 2.4 ve 2.5, farklı kaynaklara göre Avrupa'daki ince film PV teknolojilerinin enerji geri ödeme süresini göstermektedir. 2006 yılında, Vasilis Fthenakis ve Erik Alsema tarafından yayınlanan bir araştırma makalesine göre, PV modülleri üretmek için gereken enerji, Çizelge 2.6'da gösterildiği gibi sistemin beklenen işletim ömrü boyunca ürettiği toplam enerjinin %10'unu geçmemektedir.

Çizelge 2.3. Amorf silikon (a-Si) ince film PV sistemleri için enerji geri ödeme süresi sonuçlarının gözden geçirilmesi.

Yazarlar	Yıl	Konum	Monte Sistemi	Işınım (kWh/m ² /yıl)	PR	Modül Verimliliği (%)	Sistem Ömrü (yıl)	EPBT (Yıl)	Kaynaklar
Alsema	2000	Güney Avrupa	çatıya	1700	0.75	7	30	2.7	[35]
Jungbluth et al.	2008	İsviçre	çatıya	1117	0.75	6.5	30	3	[40]
De Wild Scholten	2009	Güney Avrupa	çatıya	1700	0.75	6.6	30	1.4	[39]

Çizelge 2.4. Kadmiyum tellür (CdTe) ince film fotovoltaik sistemler için enerji geri ödeme süresi sonuçlarının gözden geçirilmesi.

Yazarlar	Yıl	Konum	Monte Sistemi	Işınım (kWh/m ² /yıl)	PR	Modül Verimliliği (%)	Sistem Ömrü (yıl)	EPBT (Yıl)	Kaynaklar
Alsema et al.	2006	Güney Avrupa	zemine	1700	0.75	9	30	1.1	[32]
Fthenakis and Alsema	2006	Avrupa	çatıya	1700	0.75	8	30	1.0	[41]
Raugi et al.	2007	Güney Avrupa	çatıya	1700	0.75	9	20	1.5	[42]
Jungbluth et al.	2008	İsviçre	çatıya	1117	0.75	7.6	30	2.7	[40]
Raugi et al.	2009	Güney Avrupa	zemine	1700	0.8	10.9	30	0.8	[43]
De Wild Scholten	2009	Güney Avrupa	çatıya	1700	0.75	10.9	30	0.84	[39]

Çizelge 2.5. Bakır indiyum selenit (CIS) fotovoltaik sistemleri için enerji geri ödeme süresi sonuçlarının gözden geçirilmesi.

Yazarlar	Yıl	Konum	Monte Sistemi	Işınım (kWh/m ² /yıl)	PR	Modül	Sistem	EPBT (Yıl)	Kaynaklar
						Verimliliği (%)	Ömrü (yıl)		
Raugi et al.	2007	Güney Avrupa	çatıya	1700	0.75	11	20	2.8	[42]
Jungbluth et al.	2008	İsviçre	çatıya	1117	0.75	10.7	30	2.8	[40]
De Wild Scholten	2009	Güney Avrupa	çatıya	1700	0.75	10.25	30	1.45	[39]

Çizelge 2.6. PV Modülleri üretmek için kullanılan enerji, üretilen toplam enerjiye (%) kıyasla [41].

Hücre Teknolojisi	PV Modülleri üretmek için kullanılan enerji, üretilen toplam enerjiye (%) kıyasla
Monokristalin silikon	10.0
Multikristal silikon	8.1
CdTe	3.7

BÖLÜM 3

GERİ ÖDEME SÜRELERİ

Güneş enerjisi ticari olarak makul bir yatırımdır. PV sistemlerinin finansal faydalarını belirlemenin bir yöntemi, geri ödeme süresi veya bir PV sisteminin sistem maliyetine eşdeğer enerji değeri üretmesi için gereken sürenin uzunluğudur. Geri ödeme süresi, güneş enerjisi sistemi sahiplerinin güneş enerjisi yatırımlarını geri ödemesi için geçen süre olarak tanımlanabilir ve genellikle yıl olarak ifade edilmektedir. Bir güneş sistemi daha kısa bir geri ödeme süresine sahipse, daha yüksek bir yatırım getirisine sahiptir. Tersine, daha uzun geri ödeme süreleri olan sistemler daha düşük getiriye sahiptir. Fotovoltaik santraller için geri ödeme süreleri, aşağıdakiler de dahil olmak üzere birçok faktörden etkilenirler:

- Fotovoltaik sistemin verimliliği,
- Fotovoltaik sistemin toplam maliyeti,
- Yıllık işletme ve bakım maliyeti,
- Teşvik Politikaları.

3.1. FOTOVOLTAİK SİSTEMİN VERİMLİLİĞİ:

Fotovoltaik sistemin verimliliği, geri ödeme sürelerinin uzunluğunu büyük ölçüde etkiler, çünkü sistemin verimliliği ne kadar düşükse, üretilen elektrik enerjisi miktarı düşür ve dolayısıyla geri ödeme süreleri artmaktadır. Fotovoltaik sistemin verimliliği, fotovoltaik panellerin verimliliği, modül tipi, hava koşulları, coğrafi konum, alınan güneş ışınımının yoğunluğu ve invertörün verimliliği gibi çeşitli faktörlerden etkilenir.

3.1.1. Fotovoltaik Panellerin Verimliliği

Hüseyin Binli ve Mert Görtürk tarafından 2021 yılında yapılan bir çalışmada, fotovoltaik panellerin farklı verim değerlerinin 1 MW'lık bir fotovoltaik santralin yatırım geri ödeme süresine etkisi incelenmiştir. Fotovoltaik santralde kullanılan fotovoltaik panellerin verimliliği %16.62 olarak varsayılmıştır. PV paneller için varsayılan verimlilik değerleri %20, %25, %30, %35, %40 ve %45'tir. Sonuçlar, Çizelge 3.1'de gösterildiği gibi %16 verimlilikte geri ödeme sürelerinin 6.3 yıl olduğunu ve PV panellerin veriminin artmasıyla geri ödeme sürelerinin azaldığını göstermiştir [44].

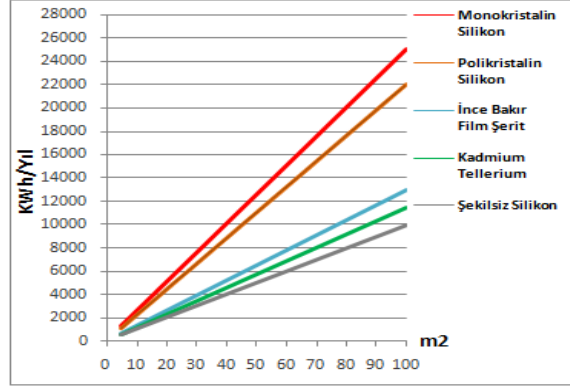
Çizelge 3.1. PV panellerin farklı verim değerlerine göre 1 MW PV santralin geri ödeme süresi [44].

PV panel verimlilik değerleri (%)	Yatırım maliyetinin geri ödeme süresi(yıl)
16	6.3
20	4.5
25	3.3
30	2.7
35	2.2
40	1.9
45	1.7

3.1.2. PV Modül Tipi

Monokristal modüller verimlilik açısından diğer modüllere göre daha iyidir ve bu nedenle aynı alanda daha fazla elektrik enerjisi üretirler. Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA) verilerine göre, Türkiye'de 100 m² bir alanda monokristal modüllerin üretebileceği enerji yaklaşık 25,000 kWh-yıl'dır. Ancak aynı alanda polikristal modüllerin üretebileceği enerji 22,000 kWh-yıl'dır. Şekil 3.1, Türkiye'de PV modül tiplerinin üretebileceği enerjiyi göstermektedir [45].

Ama monokristal hücrelerin daha yüksek saflığı nedeniyle, monokristal modüller polikristal modüllerden daha pahalıdır. Bu nedenle güneş enerjisi santrallerinde monokristal modüllerin seçimi fotovoltaik sistemin finansal maliyetini artıracaktır.



Şekil 3.1. Türkiye'de PV tiplerine göre üretilebilecek enerji (kWh-yıl) [45].

3.1.3. Hava Koşulları

Yarı iletkenler sıcaklıktaki değişikliklere duyarlı olduğundan, güneş sisteminden aldığımız enerji miktarını etkileyen ana faktörlerden biri sıcaklıktır. Optimum seviyelerin üzerindeki sıcaklıklar güneş pili açık devre voltajını ve enerji çıkışını azaltırken, daha düşük sıcaklıklar güneş pili voltajını artırır. Çoğu güneş panelinin çıkışı, Standart Test Koşulları (STC) altında ölçülür. Üretim standartlarına göre 25°C veya 77°F, fotovoltaik güneş panelleri için optimum sıcaklık aralığının zirvesini gösterir. Bu sıcaklıklarda fotovoltaik güneş pilleri güneş ışığını maksimum verimle emebilir. Bu nedenle, güneş paneli sıcaklık katsayısı, sıcaklık bir santigrat derece arttığında güneş panellerinin verimliliğindeki azalma oranını ifade eder. Örneğin, sıcaklık katsayısı negatif yüzde 0.5 olduğunda, 25 santigrat derecenin üzerindeki her derece için verimliliğin yüzde 0.5 düştüğü anlamına gelir.

Kar ve buz, güneş panellerinin verimini sınırlayan olumsuz faktörler arasındadır. Güneş panelleri dayanıklıdır. Buzdan kolay kolay zarar görmez. Güneş pillerinin donmuş bir geceden sonra çözülmesi biraz zaman alır. Güneşin ilk ışınlarının güneş panelleri üzerinde parladığı süre boyunca, buz veya kar onlara çarpan güneş ışığının bir kısmını engellediği için verimleri düşer.

Tozlu veya kirli bir iklimde, Fotovoltaik panel üzerinde toz veya diğer kirleticilerin birikmesi sonucu oluşan tozlanma, panel üzerinde ince bir tabaka oluşmasına yol açar ve panel üzerine düşen ışınımı azaltır. Işınımdaki azalma, cam üzerinde biriken tozun panel tarafından alınan güneş ışığını soğurup dağıtması sonucu olmaktadır. Bulutlu veya yağmurlu günlerde, güneş panelleri güneşli günlere kıyasla daha az üretken olma eğilimindedir. Bir güneş panelinin bulutlu gününün çıktısı, bulut örtüsünün ne kadar yoğun olduğuna da bağlıdır.

2014 yılında Birleşik Krallık'ın güneydoğusundaki Brighton kasabasında Sanaz Ghazi ve Kenneth Ip tarafından hava koşullarının fotovoltaik panellerin verimliliği üzerindeki etkisini incelemek amacıyla yapılan çalışmalardan birinde, çalışmanın gösterdiği fotovoltaik panellerin gerçek çıktısı, düzenli temizlik yapılmadan tozlu bir iklimde %60'a kadar düşebilir. Ayrıca yüksek nem, yağmur ve karın PV sistemlerinin verimliliği üzerinde önemli etkileri olduğu ve bazı durumlarda herhangi bir sistem çıktısını ortadan kaldırdığı bulunmaktadır [46].

Güneş panellerinin verimini olumsuz etkileyen bu hava koşulları, üretilen enerjiyi azaltacak ve bu da fotovoltaik santrallerin geri ödeme sürelerinin artmasına neden olacaktır.

3.1.4. Alınan Güneş Işınımının Yoğunluğu

Fotovoltaik sistemin verimliliği, Dünya yüzeyindeki güneş radyasyonunun mevcudiyeti ve yoğunluğu günün saatine ve konuma göre değiştiğinden, alınan güneş radyasyonunun yoğunluğundan etkilenir. Genel olarak, herhangi bir yerde güneş radyasyonunun yoğunluğu, güneşin gökyüzündeki en yüksek görünür konumunda olduğu zaman - güneş öğle saatlerinde - açık, bulutsuz günlerde en fazladır. Dünya atmosferinin üst kısmındaki küresel radyasyon 1367 W/m^2 'dir. Deniz seviyesinde, küresel toplam radyasyon yaklaşık 1000 W/m^2 'dir.

Enlem, iklim ve hava koşulları, güneşlenmeyi etkileyen başlıca faktörlerdir. Düşük enlemlerdeki ve kurak iklimlerdeki yerler, genellikle diğer yerlere göre daha yüksek güneşlenme sürelerine sahiptir.

Güneş kaynaklarındaki mevsimsel (aylık) değişimler, Dünya'nın ekvatorundan uzaklaştıkça artar. Dünyanın yörüngesi ve dönüşü nedeniyle, Güneş'in güneş dizisine göre konumu sürekli değişmektedir. Bu nedenle, Türkiye ve Avrupa'da kış aylarında güneşlenme saatlerinin sayısı azalmaktadır.

3.1.5. Coğrafi Konum

Güneş enerjisi santralının kurulduğu konum , fotovoltaik sistemin verimliliğini büyük ölçüde etkiler, bu nedenle konumda güneş enerjisi potansiyeli, güneşlenme saati sayısı ve hava koşulları hakkında bilgi belirtilmelidir. Güneş enerjisi potansiyeli ne kadar büyükse ve güneşlenme saati sayısı ne kadar fazlaysa, sistemin verimliliği artacak ve bu da geri ödeme sürelerini azaltacaktır.

Fotovoltaik istasyonun konumu seçilirken trafoların güneş enerjisi kapasitesi dikkate alınmalı ve sistem çevresinde gölgelenmeye neden olabilecek herhangi bir engel bulunmamalıdır.

3.1.6. Güneş Açısı Faktörü

Güneşin açısı gün içinde sürekli bir değişim gösterir. Farklı bölgelerdeki güneşlenme sürelerindeki farklılıklar göz önüne alındığında, uygulama alanlarında maksimum enerji üretimini sağlamak için panellerin optimum açılarda yerleştirilmesi gerekmektedir [47].

3.1.7. İnvvertörün Verimliliği

Bir invertörün verimliliği, çeşitli parametrelerden ve ortam sıcaklığı, nem ve güneş radyasyonu gibi çevresel koşullardan etkilenir. Nipon Ketjoy ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada, Tayland'ın kuzey bölgesindeki şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerin durumunu inceleyerek invertör verimliliğini etkileyen faktörleri analiz etmek için araştırma yapmışlardır. İnvvertör verimliliğini etkileyen üç faktörü analiz etmişlerdir [48]:

- Birincisi invertör çalışma süresinin etkisi. Dört yıldır çalışan bir PV sisteminin çalışmasının analizi, üreticinin 0.91 spesifikasyonuna neredeyse eşit olan yıllık ortalama 0.90 invertör verimliliği göstermiştir.
- İkinci analiz, farklı PV modül teknolojisi tiplerinden gelen güç girişinin etkisidir. Çalışma, polikristal PV modüllerine bağlı invertörün 0.91 ile en yüksek verimi elde ettiğini göstermiştir. Ancak detaylı analizler, PV modül teknolojisinin invertör verimliliği üzerinde daha az veya minimum etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Invertör verimliliği üzerinde etkisi olan PV modülünden gelen güç girişi olmuştur.
- Üçüncü analiz, radyasyon dağılımının invertör verimliliği üzerindeki etkisinin incelenmesini içeriyordu. Çalışma, invertörün 350 W/m²'nin üzerindeki ışınımında 0.90'lık maksimum verimlilikte çalıştığını göstermiştir.

Agata Zdyb ve Slawomir Gulkowski tarafından fotovoltaik modüllerin dört farklı teknolojisinin değerlendirilmesi için yapılan bir başka çalışmada: polikristal silikon (pc-Si), amorf silikon (a-Si), bakır indiyum galyum selenyum (CIGS) ve kadmiyum tellür (CdTe). Veriler, santral işletiminin dördüncü yılında, Polonya'nın doğu konumu bulunan bir güneş enerjisi santralinde toplanmıştır. Çalışma sırasında, değişen dış koşulların invertör verimliliği üzerindeki etkisi ile yılın farklı mevsimlerinde dizilerin ve sistemin kayıpları gösterilmiştir. İnterör verimliliği yazın %98'e ulaşırken, kışın %30'a düşmüştür [49]. İnterörün kışın veriminin düşük olmasının en önemli nedenlerinden biri güneş ışınımının azalması ve hava koşullarındaki dalgalanmaların fotovoltaik sistemin verimini olumsuz etkilemesidir.

3.2. FOTOVOLTAİK SİSTEMİN TOPLAM MALİYETİ

PV sistemlerinin toplam maliyeti temel olarak arazinin maliyetine, lokasyona, sistemin boyutuna, sistemi oluşturan ekipmanın maliyetine ve kurulum maliyetine bağlıdır. PV ekipmanının maliyeti, marka seçimine ve verimliliğine bağlı olarak büyük ölçüde değişir. Ayrıca, şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerin toplam maliyeti, akülerin varlığı nedeniyle Şebekeden bağımsız PV sistemlerin maliyetinden farklıdır.

Onur Özcan ve Filiz Ersöz tarafından 2019 yılında Türkiye'nin üç farklı coğrafi bölgesinde toplam nominal kurulu gücü 8865 MW olan güneş enerjisi santrallerinin performanslarının maliyet bazlı değerlendirilmesi için yapılan çalışmalardan birinde, Ankara Yatırım ve İzmir alternatiflerinin benzer performans gösterdiği, yatırımın geri ödeme süresi için risk beklentilerinin minimum olduğu ve yatırım getirisinin diğer yatırımlara göre daha yüksek olduğu kaydedilmiştir. İstanbul alternatifi için geri ödeme süresi ve hesaplanan yatırım getirisi, yatırımın riskli olacağı ve kârlılığı düşük olacağı için uygun olmayacaktır. Bu durumun ortaya çıkmasında en önemli faktör arazi maliyetlerindeki bölgesel değişimdir. İzmir'de arsa tahsis maliyeti (7 800 000 Türk lirası), Ankara'daki arsa maliyetinin (3 705 000 Türk lirası) iki katından fazladır. Ayrıca İstanbul'da arsa maliyeti çok yüksek (15 093 000 Türk lirası), Sonuçlarda, arazi tahsisine harcanan paranın etkisi çok büyüktür [50].

3.3. YILLIK İŞLETME VE BAKIM MALİYETİ

Yatırımın ekonomik ömrü boyunca her yıl tekrar eden işletme ve bakım masraflarını oluşturmaktadır. İşletme ve bakım maliyetleri, yıllık işçilik giderlerini, İşletme, bakım ve onarım giderlerini, GES sigorta bedellerini, dağıtım sistemi kullanım bedellerini, Ticari, teknik ve şirket faaliyetine bağlı işlem maliyetlerini ve diğer giderleri içermektedir.

3.4. TEŞVİK POLİTİKALARI

Yenilenebilir enerji sektörünü düzenleyen yasalara göre güneş enerjisi sektörüne uygulanan teşvik politikaları ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir.

3.4.1. Besleme Tarifesi

Besleme Tarifeleri (FIT), yenilenebilir enerji sistemleri ve teknolojilerine yatırımı hızlandırmak için tasarlanmış politika mekanizmalarıdır [51]. Tarife garantisi genellikle uzun vadeli anlaşmaları ve söz konusu enerjinin üretim maliyetine bağlı fiyatları içerir. Uzun vadeli sözleşmeler ve garantili fiyatlar, üreticileri yenilenebilir enerji üretiminin doğasında bulunan bazı risklerden korumaktadır. FIT oranı; üretim

maliyetine, teknoloji çeşidine, yenilenebilir enerji tesisinin konumuna (örneğin çatı veya zemine monte edilmiş güneş PV projeleri için), sistem büyüklüğüne (konut ya da ticari ölçekte) ve tesisin bulunduğu yerdeki yenilenebilir enerji kaynağının kalitesine göre farklılık gösterebilmektedir [52].

FIT mekanizmasında yenilenebilir enerji tesisi işletmecisine belli bir süre için alım garantisi verilmektedir. Politikada belirlenen süreler kendi içerisinde kısa (3-7 yıl), orta (10-14 yıl) ve uzun vadeli (15-20 yıl) olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Tarife miktarının ve garantili alım süresinin belirlenmesinde, FIT mekanizması sonucunda oluşan maliyetin finansmanında farklı uygulamalar ile karşılaşılmaktadır. Teşvik sistemindeki FIT oranı hesaplamasında genellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin LCOE'si dikkate alınmaktadır. Böylece FIT seviyesi, yenilenebilir enerji üretim tesisinin inşası ve işletilmesi esnasında ortaya çıkan birçok maliyetin (sermaye maliyeti, işletme-bakım maliyeti, yakıt maliyeti gibi) finansmanı için yeterli olmakta, ayrıca yatırımcı belirli düzeyde kâr elde edebilmektedir. FIT oranının belirlenmesinde kullanılan ikinci yöntemde, destek miktarı, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin toplumda oluşturduğu pozitif dışsallıklar dikkate alınarak hesaplanmaktadır (örneğin iklim değişikliği ile mücadeledeki rolü, insan sağlığı üzerindeki etkisi, arz güvenliğinin sağlanması, vb.). Üçüncü yöntemde, üretim maliyetine ya da üretilen elektriğin değerine bakılmaksızın devlet tarafından sabit bir fiyat belirlenmektedir. dördüncü yöntemde ise, yapılan ihaleler ile FIT seviyesinin tespit edilmesi mümkün olmaktadır [52].

3.4.2. Prim Garantisi (FIP)

Bir prim garantisi (FIP) planı kapsamında, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik tipik olarak elektrik spot piyasasında satılır ve YEK üreticileri, elektrik üretimlerinin piyasa fiyatının üzerine prim alır. FIP sabit (yani piyasa fiyatlarından bağımsız sabit bir seviyede) veya Değişken prim sistemi (yani piyasa fiyatlarının gelişimine bağlı olarak değişken seviyelerde) olabilir. FIP sabit olması durumunda, prim genellikle uzun vadeli ortalama elektrik fiyatları dikkate alınarak hesaplanmaktadır, ancak aylık, günlük veya saatlik olarak kısa vadeli değişimler dikkate alınmamaktadır. Ancak, artan elektrik fiyatı, YEK kapasitesinin daha hızlı

gelişmesine ve dolayısıyla politika maliyetlerinde artışa neden olabilir. Risk dağılımı ile ilgili olarak, YEK santrali işletmecileri, değişken elektrik fiyatlarından kaynaklanan genel riskleri üstlenmek zorundadır ve bu da daha yüksek risk primlerine yol açmaktadır [53].

Sabit prim sisteminin tasarlanması kolay olsa da piyasa fiyatlarının yüksek seyrettiği zamanlarda fazla ödeme yapılmakta ya da tersi mümkün olmaktadır. Bu nedenle birim prim miktarına ya da toplam prim ödemesine (piyasa fiyatı + prim) alt ve üst limitler getirilmektedir. Değişken prim sisteminde FIP, (teknolojiye özgü) piyasa fiyatları (genellikle belirli bir süre boyunca ortalaması alınır, örneğin bir ay) ve önceden tanımlanmış bir referans tarife seviyesi (genellikle FIT oranı) arasındaki fark olarak sürekli olarak hesaplanır. Piyasa fiyatları referans tarife seviyesinden yüksekse FIP ödeme yapılmamaktadır. Bazı durumlarda, düşük veya hatta negatif piyasa fiyatları durumunda YEK destek planı maliyetlerini azaltmak için FIP hesaplaması kullanılan bir minimum piyasa fiyatında yapılmaktadır [52]. Değişken primler dinamikdir ve elektrik fiyatının düzeyine bağlıdır. Bu şekilde, YEK'nin santral işletmecileri, elektrik piyasası fiyatının genel riskine maruz kalmazlar. FIT'lerle karşılaştırıldığında, yenilenebilir elektriğin pazarlanması gerektiğinden yatırım riskleri daha yüksektir.

3.4.3. Yenilenebilir Enerji Kotası Ve Sertifika Programları

Ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırımı teşvik etmek için farklı sistemler uygulamıştır - bunlardan biri yenilenebilir enerji kotaları ve sertifika programlarıdır. Yenilenebilir enerji kotaları, yenilenebilir yükümlülükler (RO) veya yenilenebilir portföy standartları (RPS), elektrik kuruluşlarının, elektrik tedarikçilerinin veya bazen de büyük elektrik tüketicilerinin enerji karışımında yenilenebilir enerji kaynaklarının (RES) minimum paylarının tanımına atıfta bulunur. Bu kotalar ulusal, bölgesel veya yerel yönetimler tarafından tanımlanır ve RES'in gelişimini desteklemek için genellikle zaman içinde artırılmaktadır.

Yenilenebilir enerji kota uygulamasında, devlet yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretim hedefi belirlemekte ve elektrik tedarik zincirindeki (üretici, toptan

satıcı ya da tüketici) bir gruba toplam elektrik üretiminin, kapasitesinin ya da tüketiminin belirlenen asgari bir oranı kadarının yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması zorunluluğu getirmektedir. Ardından, yeşil sertifika piyasası kurulmakta olup söz konusu piyasadaki arz-talep miktarlarına göre sertifika fiyatları belirlenmektedir. Yenilenebilir Enerji Sertifikaları (REC'ler), hamilin yenilenebilir bir enerji kaynağından üretilen bir megawatt-saat (MWh) elektriğe sahip olduğunu onaylayan piyasa tabanlı bir araçtır. Güç sağlayıcısı enerjiyi şebekeye besledikten sonra, alınan REC bir enerji malı olarak açık piyasada satılabilir. Yeşil sertifika, yenilenebilir enerji tesisinden üretilen elektrik ya da tesisin karbon emisyon azaltım miktarına göre verilebilmektedir. Piyasadaki üreticiler kotayı dolduramamaları halinde sertifikalardan almakta ve belirlenen kotanın üzerinde yenilenebilir kaynaklı elektrik üretmeleri durumunda sertifikaları satarak gelir elde etmektedirler [52].

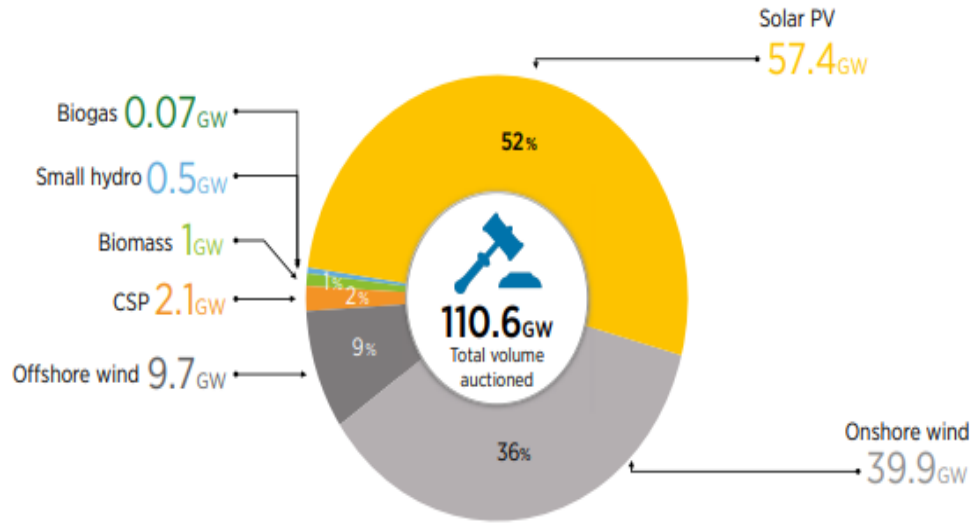
3.4.4. Yenilenebilir Enerji İhaleleri

Yenilenebilir Enerji ihaleleri ayrıca talep ihaleleri veya satın alma ihaleleri de denmektedir. Yenilenebilir enerji ihalelerindeki Tarife seviyesi, proje geliştiricilerin ihale sürecinde tekliflerinde belirttikleri fiyatlara dayanmaktadır. İhale planlarının ana özellikleri şunlardır [54]:

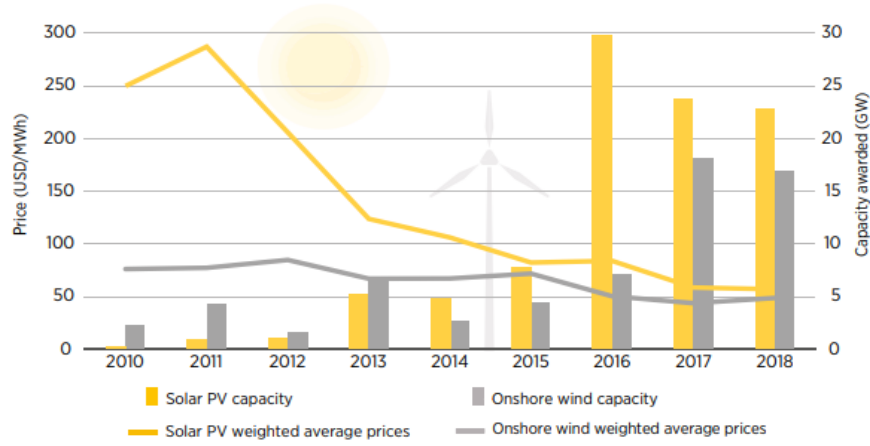
- Devlet, belirli bir teknolojiye belirli bir kapasitede YE elektriği kurmak için bir ihale süreci açar veya ihale çağrısı yapmaktadır.
- Devlet, proje geliştiricilerinin ihaleye katılmaları için tanımlanmış gereksinimler koymaktadır (örneğin, mali yeterlilik kanıtı, güvenli arazi, çevre lisansı vb.).
- İhaleye katılan proje geliştiriciler, projeyi gerçekleştirebilecekleri birim elektrik fiyatı ile teklif verilmektedir.
- Devlet, projeleri fiyat ve yerel üretimdeki pay, teknolojik özellikler ve çevresel gereklilikler gibi diğer kriterler bazında değerlendirmektedir.
- Tercih edilen teklif sahibi ile bir PPA (enerji satın alma anlaşması) imzalanmaktadır (değerlendirme sadece fiyata dayalıysa en düşük fiyatla veya değerlendirmenin birden fazla kritere dayanması durumunda en yüksek puanla). Bu sözleşme yenilenebilir üreticilere belirli bir yıl sayısı için sabit

bir fiyat ve projenin finansmanı için temel olarak kullanılabilir tüm üretim için garantili bir satın alma sağlanmaktadır.

2017 ve 2018 yılları arasında açık artırmada yaklaşık 111 gigawatt elektrik satılmaktadır ve güneş PV'sinin payı Şekil 3.2'de gösterildiği gibi yarıdan fazladır. İhalelerin düşük fiyatlara ulaşma potansiyeli, dünya çapında benimsenmelerinde büyük bir motivasyon olmuştur. Şekil 3.3'de gösterildiği gibi, güneş enerjisi için fiyat sonuçları son on yılda genel olarak düşmüştür. 2010'da güneş enerjisi, 2016'daki ortalama 83 USD/MWh'lik fiyatla karşılaştırıldığında, yaklaşık 250 USD/MWh'lik bir küresel ortalama fiyatla sözleşme yapılmaktadır. Dönem boyunca düşen teknoloji maliyetleri, dünyanın dört bir yanındaki politika yapıcıları, ihaleleri, yenilenebilir enerjilerin piyasa fiyatını kendi özel bağlamlarında belirlemenin ve geliştiriciler için beklenmedik kârlardan kaçınmanın bir yolu olarak görmeye yönlendirmektedir. Bu düşüş eğilimi 2017'de de devam etmektedir. 2018'de güneş PV fiyatları daha yavaş da olsa düşmeye devam etmektedir ve 2018'de 56 USD/MWh'ye ulaşmaktadır [55].



Şekil 3.2. 2017-2018 yılları arasında açık artırmada toplam yenilenebilir enerji hacminin teknolojiye göre payı [55].



Şekil 3.3. 2010-2018 ihalelerinden kaynaklanan küresel ağırlıklı ortalama fiyatlar ve her yıl verilen kapasite [55].

3.4.5. Sermaye Desteği Teşvikleri

Güneş enerjisi santrallerinin ilk yatırım maliyeti güneş enerjisinin yaygınlaşmasının önünde bir engeldir, bu nedenle bazı ülkelerde yatırımcıları yenilenebilir enerji sektörüne yatırım yapmaya teşvik etmek için yatırımın sermaye maliyetinin belirli bir yüzdesi devlet tarafından karşılanmaktadır.

3.4.6. Vergi Teşvikleri

Yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırımı teşvik etmeyi amaçlayan politikalardan biridir. YEK'ten elde edilen elektrik çeşitli vergi imtiyazlarına tabidir. Bir imtiyaz, YEK'ten gelen elektrik üreten sistemlerin yatırım maliyetlerinin kişisel gelir vergisi veya kurumlar vergisi veya Emlak vergisi olarak vergiden düşülmektedir. Bu şekilde vergi muafiyeti yoluyla doğrudan ödüllendirilmektedir [59].

YEK'ten elektrik tüketimini teşvik etmek için kişisel gelir vergisi teşviki kullanılır. Bu vergi önlemleri, gelir kaynağına ve kurulu kapasiteye bağlı olarak vergi indirimlerine veya muafiyetlerine izin verdiği için daha yaygın hale gelmektedir. Kurumlar vergisine dahil edilen muafiyetler, yeşil elektrik üreten sistemlere yapılan yatırımın bir yüzdesinin net vergi matrahından indirilmesine imkan vermektedir [56].

Emlak vergileri, alternatif kaynaklardan enerji üretim teknolojileri için üretilen kilovat-saatlik enerji üzerindeki vergi yükünü çoğunlukla artırır. Bu nedenle bazı ülkelerde, yenilenebilir enerji üretiminde kullanılan emlak , arazi ve sabit kıymetler için vergi tutarının %100'üne varan oranda ortadan kaldıracak emlak vergisi indirimi kullanılmaktadır [57].

Bir diğer vergi teşviki, dolaylı vergi olarak kabul edilen katma değer vergisinden (KDV) indirim veya muafiyettir. KDV, gelir vergisinden farklı olarak gelire değil tüketime dayalıdır, KDV her satın alımda eşit olarak tahsil edilir. Bazı ülkelerde yenilenebilir enerji üretim ekipmanları Katma Değer Vergisinden muafır.

Vergi teşviklerinde diğer bir uygulama yöntemi ise hızlandırılmış amortisman usulüdür. Hızlandırılmış amortisman yönteminde yatırımcının kârından amortisman oranı kadar indirim yapılmakta ve daha az vergi ödemesi sağlanmaktadır Vergi teşvikleri; kredi geri ödeme riskini ve böylece risk primi gibi maliyetleri azalttığından, buna bağlı olarak da ilk yatırım maliyetlerini düşürdüğünden doğrudan sübvansiyon olarak değerlendirilebilmektedir [52].

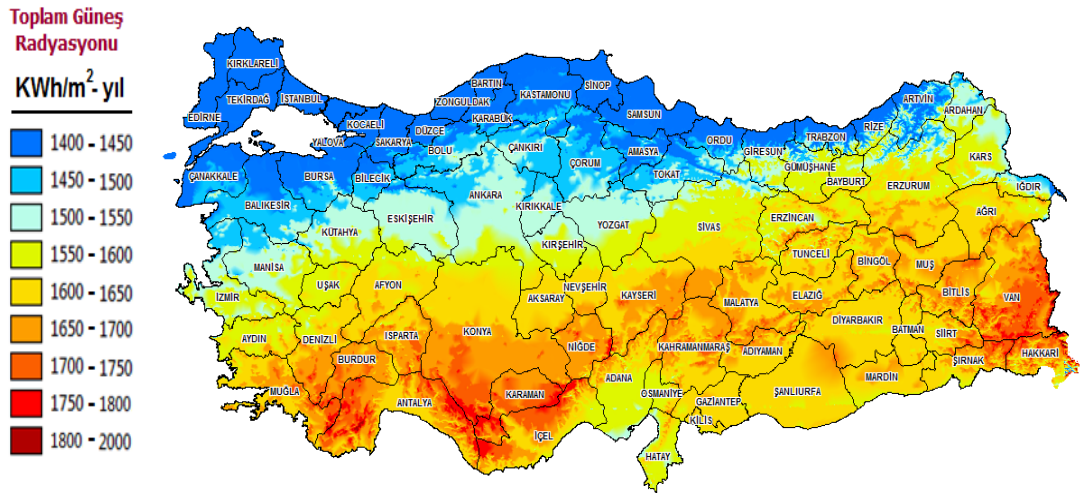
BÖLÜM 4

TÜRKİYE VE AVRUPA'DA GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ

4.1. TÜRKİYE'DA GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ:

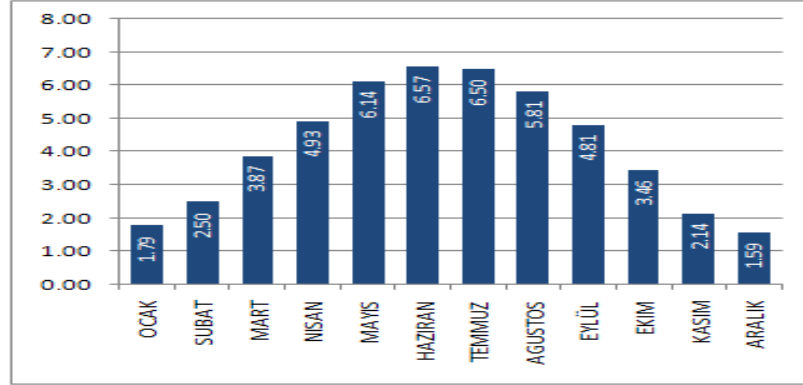
Türkiye, Kuzey Yarım Küre’de, 36-42 derece kuzey enlemleriyle 26-45 derece doğu boylamlarında arasında yer alır. Bu durumu ülkenin kutuptan çok Ekvator’a yakın olmasına ve ılıman kuşakta bulunmasına neden olmuştur. Türkiye, coğrafi konumu nedeniyle önemli bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir.

Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan, Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre, ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2741 saat olup ortalama yıllık toplam ışınım değeri 1527.46 kWh/m² olarak hesaplanmıştır [58]. Şekil 4.1’de, Türkiye’nin güneş radyasyonunun bir haritası görülmektedir. Şekil 4.1’de güneş ışınımından en fazla yararlanan güney bölgeleri açık kırmızı ve koyu kırmızı ile, en az miktarda güneş ışınımından yararlanabilen kuzey bölgeleri ise açık mavi ve lacivert olarak gösterilmiştir.



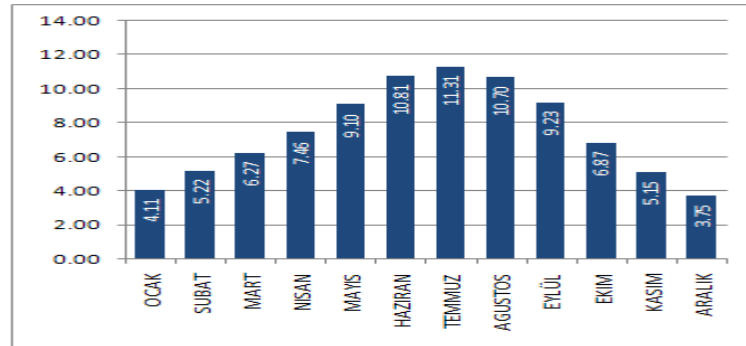
Şekil 4.1. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyel atlası [45].

Şekil 4.2, Türkiye için aylık bazda günlük global radyasyon değerlerini göstermektedir. Global radyasyon değeri en yüksek değerine 6.57 kWh/m²-gün ile Haziran ayında, en düşük değerine ise 1.59 kWh/m²-gün ile Aralık ayında ulaşmaktadır. Türkiye için aylık bazda ortalama günlük radyasyon değeri 4.18 kWh/m²-gün'dür.



Şekil 4.2. Türkiye'nin global radyasyon değerleri (kWh/m²-gün) [45].

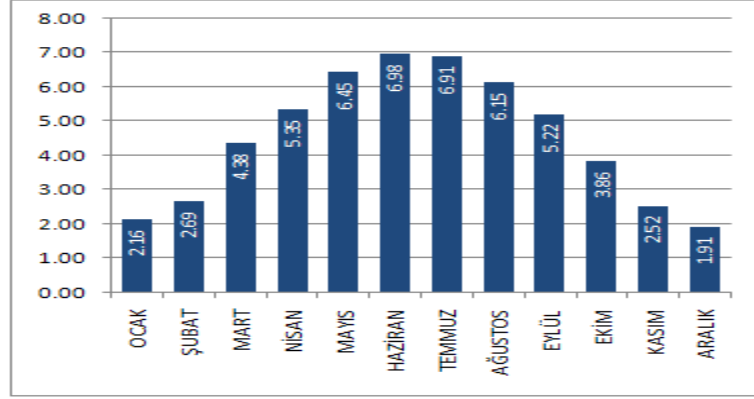
Şekil 4.3, Türkiye'de aylık bazda güneşlenme süresini göstermektedir. En yüksek güneşlenme süresi Temmuz ayında 11.31 saat, en düşük güneşlenme süresi 3.75 saat ile Aralık ayında gerçekleşmektedir. Türkiye'de aylık bazda günlük ortalama güneşlenme süresi 7.49 saat-gün'dür. Tüm bu veriler dikkate alındığında Türkiye'nin yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip olduğu görülmektedir.



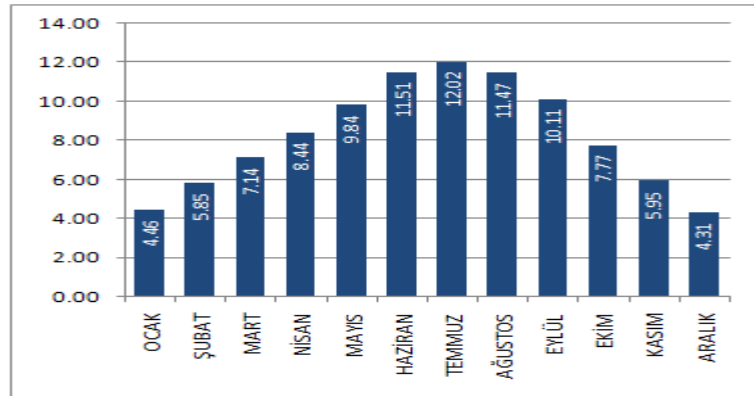
Şekil 4.3. Türkiye'nin güneşlenme süreleri (Saat) [45].

Türkiye güneş enerjisi potansiyel haritasını inceledikten sonra, Karaman'ın Türkiye şehirleri arasında en yüksek ortalama yıllık toplam radyasyon değerine sahip olduğunu tespit ettik. Karaman'ın ortalama yıllık toplam radyasyon değeri 1661

kWh/m² ve ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 3009 saattir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5, Karaman'ın global radyasyon değerlerini ve güneşlenme sürelerini göstermektedir.

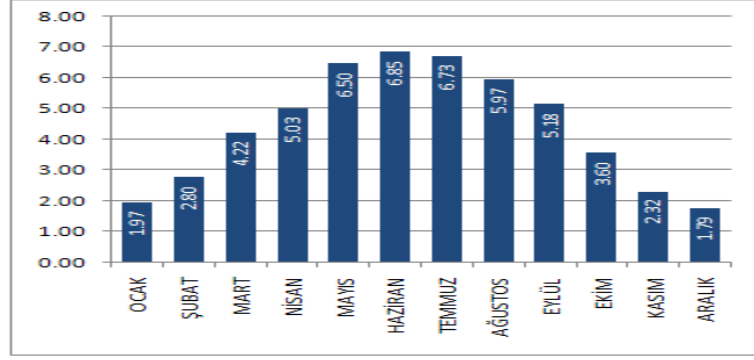


Şekil 4.4. Karaman'ın global radyasyon değerleri (kWh/m²-gün) [45].

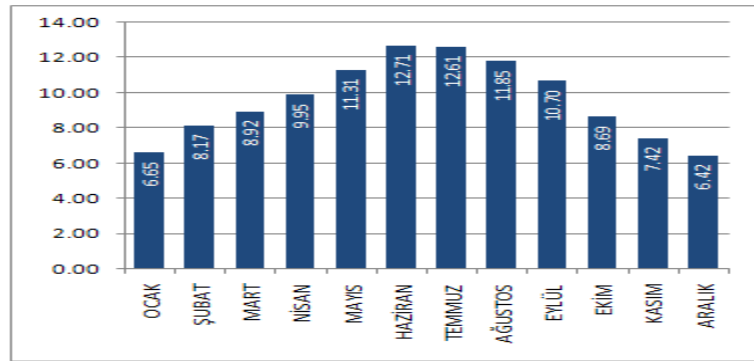


Şekil 4.5. Karaman'ın güneşlenme süreleri (Saat) [45].

Ancak Türk şehirleri arasında en fazla Güneşlenme Süreleri olan Hakkari şehiri olmaktadır. Hakkari'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 3512 saat ve ortalama yıllık toplam radyasyon değeri 1612 kWh/m²'dir. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7, Hakkari'nin global radyasyon değerlerini ve güneşlenme sürelerini göstermektedir.



Şekil 4.6. Hakkari'nin global radyasyon değerleri (kWh/m²-gün) [45].



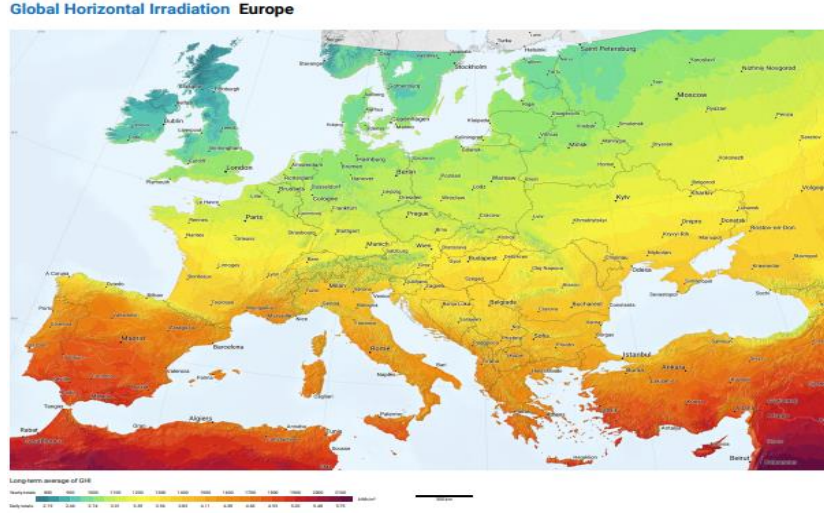
Şekil 4.7. Hakkari'nin güneşlenme süreleri (Saat) [45].

Türkiye'nin güneyinde yer alan şehirlerin kuzey şehirlerine göre yüksek güneş enerjisi potansiyeli nedeniyle, güneydeki şehirlerin güneş enerjisi santralleri için daha düşük geri ödeme sürelerine sahip olması beklenmektedir.

4.2. AVRUPA'DA GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ:

Global radyasyon değerleri, sitenin coğrafi konumuna göre değişir ve ekvatora yakın bölgelerde en yüksektir. Bu nedenle, yıllık ortalama global radyasyon değerleri, Avrupa bölgeleri arasında farklılık gösterir ve güney bölgeleri kuzey bölgelerine göre çok daha iyi değerlere sahiptir. Orta Avrupa'da ortalama yıllık toplam ışıınım değeri yaklaşık 1100 kWh/m²'dir [39].

Şekil 4.8, Avrupa'nın Güneş Enerjisi Potansiyel haritasını göstermektedir. Referans döneminde (1983-2012) Avrupa'nın ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2335 saattir [59].

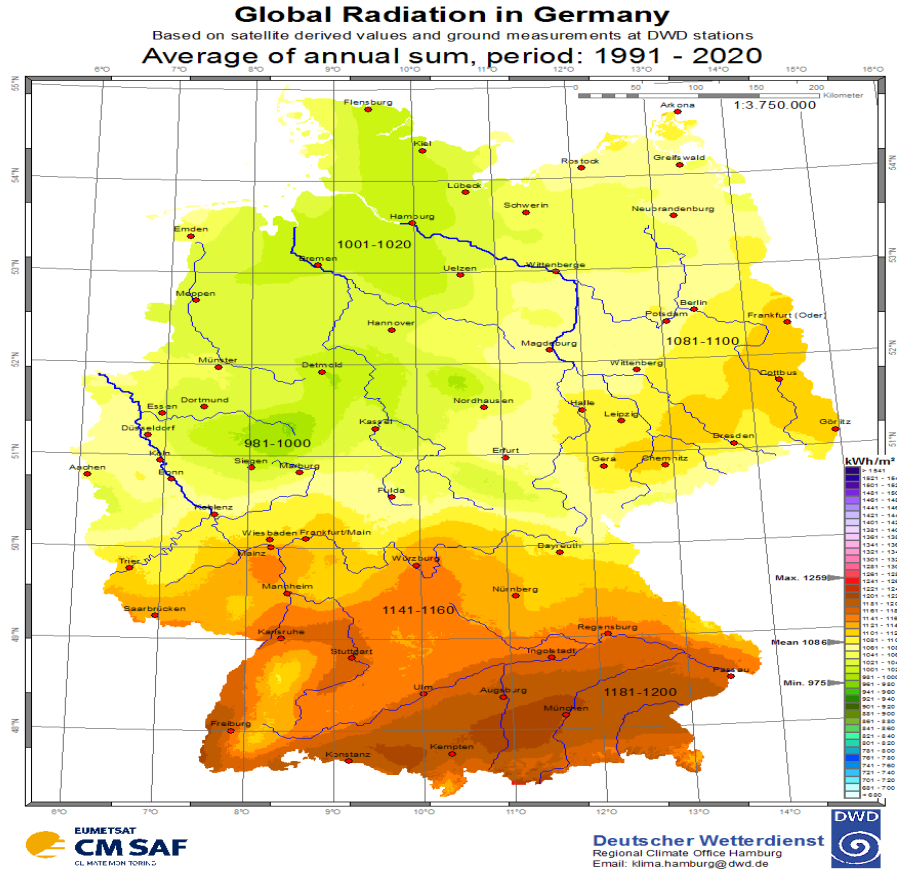


Şekil 4.8. Avrupa'nın güneş enerjisi potansiyel haritası [60].

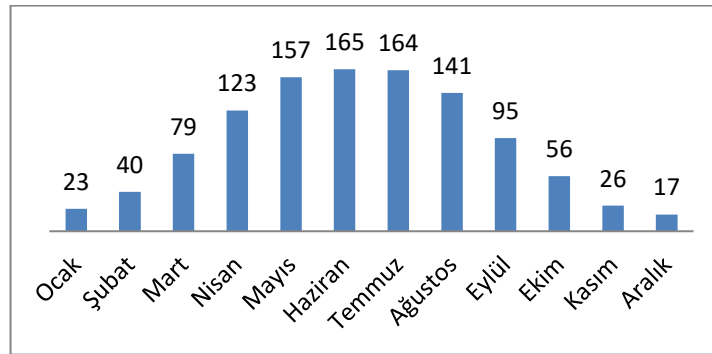
4.2.1. Almanya'da Güneş Enerjisi Potansiyeli

Almanya, Avrupa'nın ortasında yer almaktadır. Almanya, kurulu güneş fotovoltaik kapasitesi açısından Avrupa'da 1. Sırada olmasına rağmen, Almanya'nın güneş enerjisi potansiyeli ortalama olarak kabul edilmektedir. Almanya'nın ortalama yıllık toplam radyasyon değeri 1086 kWh/m^2 . Şekil 4.9, 1991-2020 dönemi için Almanya'nın güneş radyasyonunun bir haritasını göstermektedir. Şekil 4.9, 1991-2020 dönemi için Almanya'nın ortalama yıllık toplam radyasyon değeri 975 ile 1259 kWh/m^2 arasında değiştiğini göstermektedir [61]. Güney bölgeleri ekvatora daha yakın olduğu için ortalama yıllık toplam radyasyon değeri kuzeyden güneye doğru artmaktadır.

Şekil 4.10, Almanya'nın ortalama aylık global radyasyon değerlerini göstermektedir. Global radyasyon değeri en yüksek değerine $165 \text{ kWh/m}^2\text{-ay}$ ile Haziran ayında, en düşük değerine ise $17 \text{ kWh/m}^2\text{-ay}$ ile Aralık ayında ulaşmaktadır. Almanya'nın ortalama aylık radyasyon değeri $90.5 \text{ kWh/m}^2\text{-ay}$ 'dır [61].

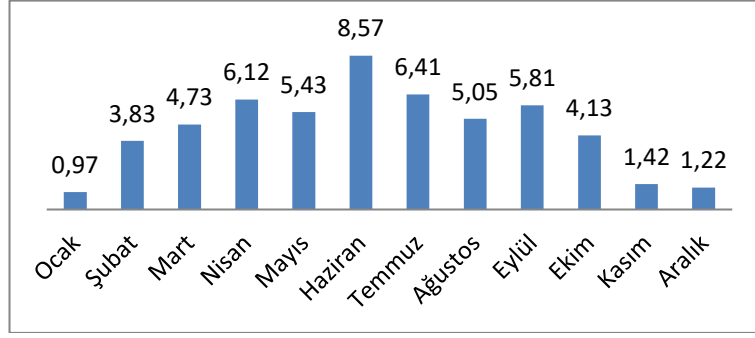


Şekil 4.9. Almanya'nın güneş enerjisi potansiyel atlası [61].



Şekil 4.10. Almanya'nın global radyasyon değerleri (kWh/m²-ay) [61].

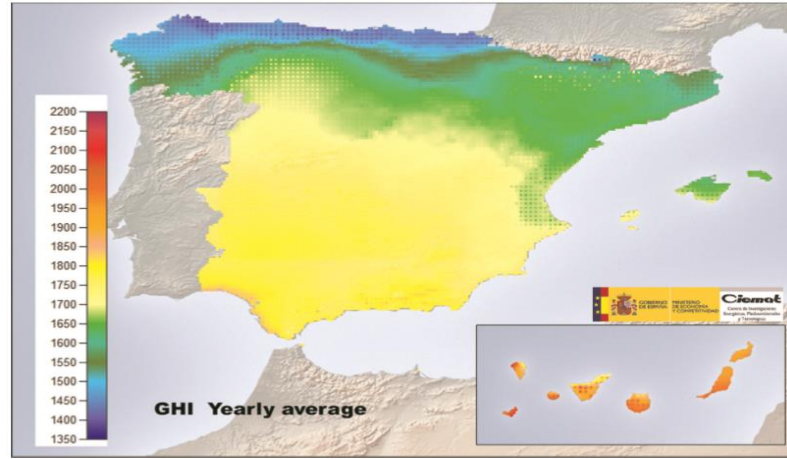
2021 yılı için Almanya'nın yıllık toplam güneşlenme süresi 1631 saattir. Şekil 4.11, Almanya'de aylık bazda güneşlenme süresini göstermektedir. En yüksek güneşlenme süresi Haziran ayında 8.57 saat, en düşük güneşlenme süresi Ocak ayında gerçekleşmektedir. 2021 yılı için Almanya'de aylık bazda günlük güneşlenme süresi 4.47 saat-gün'dür [62].



Şekil 4.11. Almanya'nın güneşlenme süreleri (Saat).

4.2.2. İspanya'da Güneş Enerjisi Potansiyeli

İspanya güneybatı Avrupa'da yer almaktadır. İspanya'nın ortalama yıllık toplam radyasyon değeri 1600 kWh/m^2 . İspanya'nın güney bölgelerinde ortalama güneş radyasyonu kışın 1.5 kWh/m^2 'den yaz aylarında 7 kWh/m^2 'ye kadar değişmektedir [63]. Şekil 4.12, 2001-2011 dönemi için İspanya'nın güneş radyasyonunun bir haritasını göstermektedir.



Şekil 4.12. 2001-2011 dönemi için İspanya'nın güneş radyasyonu haritası [64].

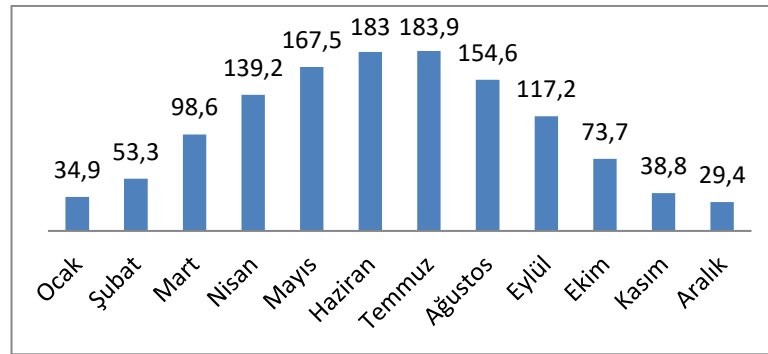
İspanya şehirleri arasında en fazla Güneşlenme Süreleri olan Huelva şehiri olmaktadır. Huelva'nın ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2998 saat'dir [65].

4.2.3. Birleşik Krallık'da Güneş Enerjisi Potansiyeli

Birleşik Krallık Batı Avrupa'da yer almaktadır. Birleşik Krallık'ın ortalama yıllık toplam radyasyon değeri 949 kWh/m^2 , yaklaşık $2.5\text{--}3.1 \text{ kWh/m}^2\text{-gün}$ [66]. Birleşik Krallık'da güneş enerjisi potansiyeli zayıf olmasına rağmen, kurulu PV kapasitesi açısından Avrupa'da dördüncü sırada yer almaktadır. Birleşik Krallık bölgeleri arasında en fazla Güneşlenme Süreleri olan "Eastbourne" bölgesi olmaktadır. Eastbourne'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 1888 saat'dir [65].

4.2.4. Fransa'da Güneş Enerjisi Potansiyeli

Fransa Batı Avrupa'da yer almaktadır. Fransa'nın ortalama yıllık toplam radyasyon değeri 1274.1 kWh/m^2 . Şekil 4.13, Fransa'nın ortalama aylık global radyasyon değerlerini göstermektedir. Global radyasyon değeri en yüksek değerine $183.9 \text{ kWh/m}^2\text{-ay}$ ile Temmuz ayında, en düşük değerine ise $24.9 \text{ kWh/m}^2\text{-ay}$ ile Aralık ayında ulaşmaktadır. Almanya'nın ortalama aylık radyasyon değeri $90.5 \text{ kWh/m}^2\text{-ay}$ 'dır [67].

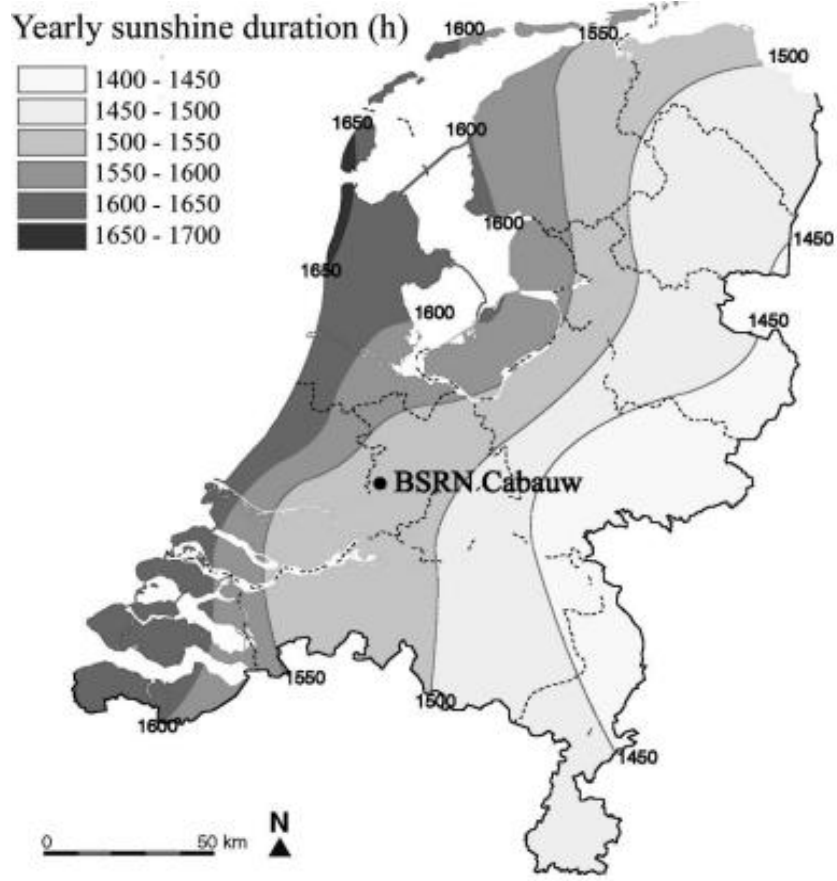


Şekil 4.13. Fransa'nın global radyasyon değerleri (kWh/m²-ay).

Güneşlenmenin en yüksek olduğu süreleri Fransa'nın güneydoğusundaki Marseille bölgesinde gerçekleşmektedir. Marseille'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2858 saat'dir [65].

4.2.5. Hollanda'da Güneş Enerjisi Potansiyeli

Hollanda, Avrupa'nın kuzeybatısında yer almaktadır. Hollanda'nın ortalama yıllık toplam radyasyon değeri 1000 kWh/m² [10]. Ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi, Şekil 4.14'te gösterildiği gibi 1400-1700 saat arasındadır [68].



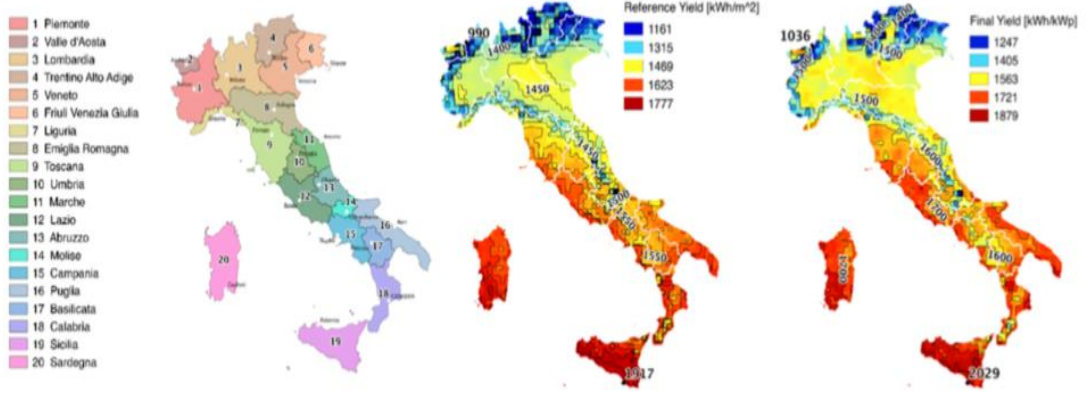
Şekil 4.14. Hollanda'nın yıllık güneşlenme süresinin dağılımı [68].

Hollanda'da güneş enerjisinin zayıf potansiyeline rağmen, kurulu fotovoltaik enerji kapasitesi açısından altıncı sırada yer almaktadır.

4.2.6. İtalya'da Güneş Enerjisi Potansiyeli

İtalya güney Avrupa'da yer almaktadır. İtalya, kurulu fotovoltaik kapasite açısından Avrupa'da ikinci sırada yer almaktadır. İtalya'nın ortalama yıllık toplam radyasyon değeri 1533 kWh/m². Şekil 4.15'te, 2014-2017 yılları kuzey alpin bölgesinde

minimum 990 kWh/m²'den güneyde maksimum 1900 kWh/m²'ye kadar değişen radyasyonu göstermektedir [69].



Şekil 4.15. İtalya Haritaları: İtalya bölgeleri, referans verim (küresel yatay yıllık radyasyon) ve nihai verim (yıllık enerji oranı). 2014-2017 yılları arasında uydudan türetilen radyasyon ve güç tahmininin ortalama değerleri [69].

İtalya bölgeleri arasında en fazla Güneşlenme Süreleri olan "Ustica Island" bölgesi olmaktadır. Ustica Island'nın ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2660 saat'dir [65].

BÖLÜM 5

TÜRKİYE'NİN 1 MW FOTOVOLTAİK GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİ İÇİN GERİ ÖDEME SÜRESİ

Türkiye Güneydoğu Avrupa ve Güneybatı Asya'da yer almaktadır. Türkiye yüzölçümü 783,562 km², nüfusu yaklaşık 85.04 milyondur. 1981-2010 yılları arasında Türkiye'de ortalama sıcaklık 13.5 °C olarak belirlenmiştir [70]. Türkiye'nin ortalama yıllık toplam ışınım değeri 1527.46 kWh/m²'dir.

5.1. GES'DEN ELDE EDİLECEK ENERJİ HESAPLAMALARININ YAPILMASI

Bu bölümde, Türkiye'da zemine monte edilmiş bir şebekeye bağlı 1 MW'lık bir fotovoltaik santralinden elde edilen enerji hesaplanmıştır. LEXRON-400-72M güneş panellerinin kullanıldığı varsayılmıştır. LEXRON-400-72M'nin güneş panelleri monokristal PERC panel olarak alınmıştır. Çizelge 5.1, LEXRON-400-72M panellerinin en önemli elektriksel ve mekanik verilerini göstermektedir.

Çizelge 5.1. LEXRON-400-72M PERC panellerinin en önemli elektriksel ve mekanik verileri [71].

STC	LXR-400-72M
Nominal Maximum Power	400W
Open CIRCUIT Voltage (Voc)	47.95V
Module Efficiency	22.60%
Cell Type	Mono-crystalline 157x157mm, 5BB
Cell Arrangement	72 (6x12)
Dimensions	1960 x 992 x 40 mm

GES sisteminden elde edilecek enerjiyi aşağıdaki gibi hesaplamak mümkündür:

$$E = A \times \eta \times H \times PR \quad (5.1)$$

Eşitlikte ;

E : Enerji (kWh)

A : Panelin Toplam Alanı (m²)

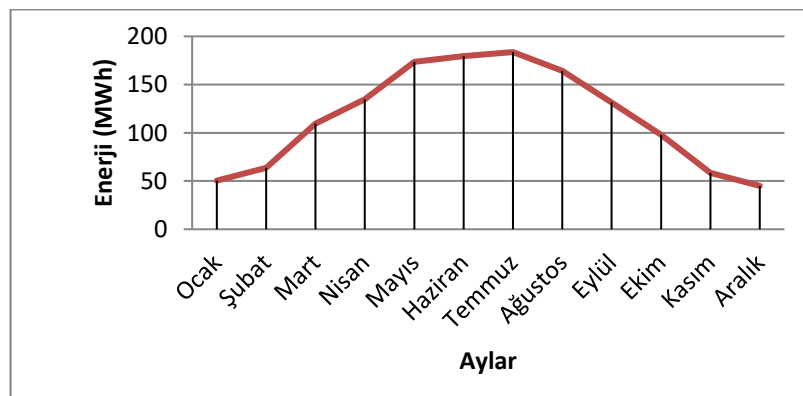
η : Güneş Paneli Verimi (%)

H : Eğimli Panellerde Ortalama Güneş Radyasyonu (kWh/m²)

PR : Performans Oranı

LEXRON-400-72M PERC tipi 1MW'lık bir santral için gereken güneş paneli sayısı 2500'dür (2500 x 400W=1MW). Bir panelin alanı (1.960 x 0.992) 1.944 m², Böylece güneş panellerinin toplam alanı (2500 x 1.944 m²) 4860 m² olmaktadır. LEXRON-400-72M PERC güneş panelinin verimliliği Çizelge 5.1'de gösterildiği gibi %22.6'dır. Performans oranı 0.83 olarak alınmıştır. Karaman ilinin ortalama radyasyon değerleri Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Türkiye'nin ortalama radyasyon değerleri Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

Şekil 4.2'ye bağlı olarak ve eşitlik 5.1 kullanılarak, sonuçlar Türkiye sisteminden bir yılda elde edilen ortalama elektrik enerjisi miktarının 1,392.49182 MWh olduğunu göstermiştir. Türkiye santralinden aylık bazlı elde edilecek ortalama elektrik enerjisi miktarları Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Türkiye'nin 1 MW GES sisteminden elde edilecek ortalama elektrik enerjisi miktarları (MWh).

17.10.2022 tarihine kadar EPIAŞ ŞEFFAFLIK PLATFORMU'na göre piyasa takas fiyatlarının aritmetik ortalaması 0.13635 USD/kWh'dir [72]. Dolayısıyla, Yıllık Kâr (1,392,491.02 kWh x 0.13635 USD/KWh) 189,866.26 USD olarak hesaplanmıştır.

5.2. FOTOVOLTAİK SİSTEMİN İLK YATIRIM MALİYETİ:

1 MW GES kurulumu için gerekli ekipman fiyatları, Çizelge 5.2'de gösterildiği gibi, 2021 yılında Türkiye'nin Van ilinde yapılan araştırmalardan birinde önceden belirlenmiştir. Çizelge 5.2'de yer verilen ekipman ve teçhizatlar 1 MW GES yatırımlarının tümünde genel olarak yer alması gereken unsurlardan oluşmaktadır.

Çizelge 5.2. 1 MW GES kurulumu için gerekli ekipman fiyatları [73].

Ekipman	Açıklama	Tutar (USD)
Fotovoltaik Güneş Paneli (Monokristal silikon yapılı)	2,500 adet 400 Watt, 47.95 V LEXRON marka, Monokristal 72 hücreli	300,000
İnvertör	200 adet, 5 kW, GoodWe marka	45,000
Kontrol ve İzleme Sistemi (SCADA)	4 adet	
Sabit Montaj Yapısı	1 set	
DC Kablolama	21,000 m	
AC Kablolama	3,750 m	
Toplama Panosu	1 set	
Tel Çit ve Dikenli Tel	750 m	
Peyzaj ve Toprak İşleri	1,500 m ³	
Paratoner ve Topraklama Sistemleri (Aktif paratoner başlığı, 6 m direk, 2×50 mm ² bakır iniş iletkeni, 3 m boru)	1 set	200,000
Video Güvenlik ve Kamera Sistemleri (8 kamera (Dış mekân, analog HD, NVR kayıt cihazı (4 TB HDD), 24" ekran, kablolama)	1 set	
Trafo, Köşk ve Hücreler, ENH İşleri	1 set	
Çift Yönlü Sayaç	1 adet	
Tek yönlü sayaç (3 fazlı)	1 adet	
Kablo Tava Sistemleri	800 kg	
Solar kablo (kırmızı ve mavi)	1x6 mm ² PV11-F solar kablo 6000 m	

5×16 mm ² NYF	400 m
3×35 / 16 mm ² XLPE kablo (36 KV)	3000 m
35'lik ve 16'lik XLPE kablo başlığı	426 ve 142 adet
OG+AG harici pano	70 adet
100×10 mm ² bakır baralı modüler hücre	1 adet
1250 A yük ayırıcılı akım ve gerilim ölçü modüler hücresi	1 adet
1250 kesicili trafo koruma modüler hücre	1 adet
1250 A kesicili giriş çıkış modüler hücre	1 adet
Beton Köşk	5 m, çatılı
10 kVA kuru tip trafo	71 adet
4x63 A TMS+KAKR (300 mA)	104 adet
3×63 A NH sigorta ve taşıyıcısı	74 adet
0,28 kV, 100 kA B+C parafudur (AG)	71 adet
OG parafudur	1 takım
Topraklama kazığı (65x65x7) 1.5 m uzunluğund	225 adet
Galvanizli şerit iletken (30×3.5 mm)	600 m
1×16 mm ² NYAF topraklama kablosu	500 m
Fotovoltaik panel konstrüksiyon	1 sistem
Saha aydınlatma ekipmanları	1 takım
Toplam	545,000

Türkiye'nin arazi fiyatlarına erişim zorluğundan dolayı bu çalışmada arazi fiyatına yer verilmeyecektir. Diğer ilk yatırım maliyet unsurları Çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Diğer ilk yatırım maliyet unsurları [73].

Maliyet Unsuru	Tutar (USD)
Proje ve fizibilite raporu hazırlama	2,000
Santral sahasına ve santral içi ulaşım yollarının inşası, inşaat, nakliye, montaj ve kurulum maliyetleri	10,000
Şirket kurulum maliyeti	4,000
İdari bina ve sosyal alan inşası	5,000
İdari süreçlerle ilgili masraflar (lisans alma bedeli, proje onay ve kabul işlemleri, imar ve ÇED kararı)	3,000
Toplam	24,000

1 MW Türkiye santralının ilk yatırım maliyetinin 569,000 USD olduğu hesaplanmıştır.

5.3. YILLIK İŞLETME VE BAKIM MALİYETİ

Yıllık işçilik maliyetleri, GES sigorta bedelleri, dağıtım sistemi kullanım bedelleri, Ticari, teknik ve şirket faaliyetine bağlı işlem maliyetlerini ve diğer giderler bakım ve işletme hesaplamalarına dahil edilmeyecektir. PV tesislerinin yıllık işletme ve bakım maliyetleri aşağıdaki gibi hesaplamak mümkündür:

$$Mt = 0,01 \times Io \quad (5.2)$$

Eşitlikte ;

Mt : PV tesislerinin yıllık işletme ve bakım maliyetleri.

Io : PV tesisleri için ilk yatırım.

Böylece Türkiye santralının yıllık işletme ve bakım maliyetlerinin 5690 ABD Doları'ya ulaşması beklenmektedir.

Söz konusu maliyetlerin, yıllık enflasyon oranı ile kurdaki değişimleri dengeleyecek şekilde her yıl %3 oranında artacağı varsayılmıştır [73].

5.4. TÜRKİYE'DE KURULU BİR PV SİSTEMİN GERİ ÖDEME SÜRESİ

PV tesislerinin geri ödeme süresi aşağıdaki gibi hesaplamak mümkündür:

$$GÖS = \frac{\text{yatırım tutarı}}{\text{yıllık ortalama net kâr}} \quad (5.3)$$

Çizelge 5.4'te gösterilen finansal hesaplamalar yapıldıktan sonra Türkiye 1 MW santralinin yatırım geri ödeme süresinin 3.17 yıl olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.4. Türkiye'nin Yatırım Geri Ödeme Süresi.

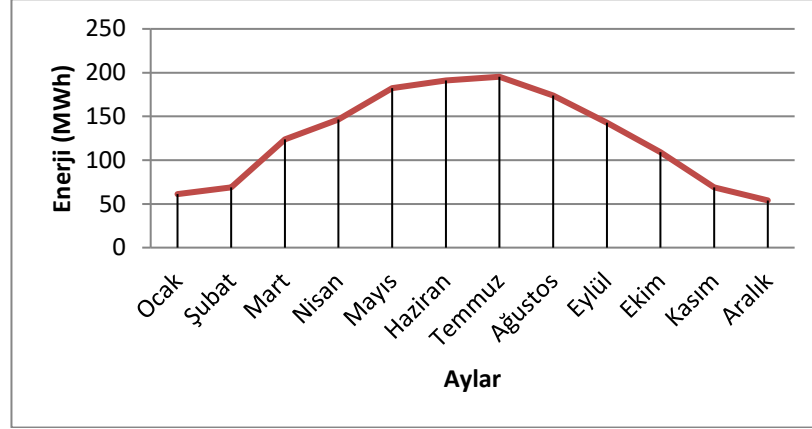
Yıllar	Fayda (USD)	Masraf (USD)	Net Kâr (USD)
0	0	569,000	-569,000
1	189,866.26	5,690	-384,823.74
2	189,866.26	5,860.7	-200,818.18
3	189,866.26	6,036.52	-16,988.44
4	189,866.26	6,217.62	166,660.2
5	189,866.26	6,404.15	350,122.31
6	189,866.26	6,596.27	533,392.3

5.5. KARAMAN'IN GERİ ÖDEME SÜRESİ

Karaman, Türkiye'nin güneyinde yer alan Türkiye'deki illerden biridir. İlin yüzölçümü 8.678 km²'dir. Karaman, yaz ve kış aylarında ılıman sıcaklıklarla karakterize edildiğinden GES kurulumu için uygun bir iklime sahiptir. Karaman'ın Yaz ayları ortalama en yüksek dış sıcaklıkları 31 °C ve kış aylarında ortalama en düşük dış sıcaklıkları -3°C'dir [74]. Karaman ilinin ortalama radyasyon değerleri Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Karaman, 1661 kWh/m² ile Türkiye'nin en yüksek ortalama yıllık toplam radyasyon değerine sahiptir. Bu nedenle Karaman ili 1 MW GES kurmak için uygun görülmektedir.

Şekil 4.4'ye bağlı olarak ve eşitlik 5.1 kullanılarak hesaplamalar yapıldıktan sonra, sonuçlar Karaman sisteminden bir yılda elde edilen ortalama elektrik enerjisi

miktarının 1,516.80302 MWh olduğunu göstermiştir. Karaman santralinden aylık bazlı elde edilecek ortalama elektrik enerjisi miktarları Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Karaman'ın 1 MW GES sisteminden elde edilecek ortalama elektrik enerjisi miktarları (MWh).

Yıllık Kâr (1,516,803.02 kWh x 0.13635 USD/KWh) 206,816.09 USD olarak hesaplanacaktır. 1 MW Karaman santralinin ilk yatırım maliyetinin 569,000 USD ve Yıllık işletme ve bakım maliyetleri 5,690 USD olduğu hesaplanmıştır.

Çizelge 5.4'te gösterilen finansal hesaplamalar yapıldıktan sonra Karaman 1 MW santralinin yatırım geri ödeme süresinin 2.75 yıl olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.5. Karaman'ın Yatırım Geri Ödeme Süresi.

Yıllar	Fayda (USD)	Masraf (USD)	Net Kâr (USD)
0	0	569,000	-569,000
1	206,816.09	5,690	-367,873.91
2	206,816.09	5,860.7	-166,918.52
3	206,816.09	6,036.52	33,861.05
4	206,816.09	6,217.62	234,459.52
5	206,816.09	6,404.15	434,871.46
6	206,816.09	6,596.27	637,091.28

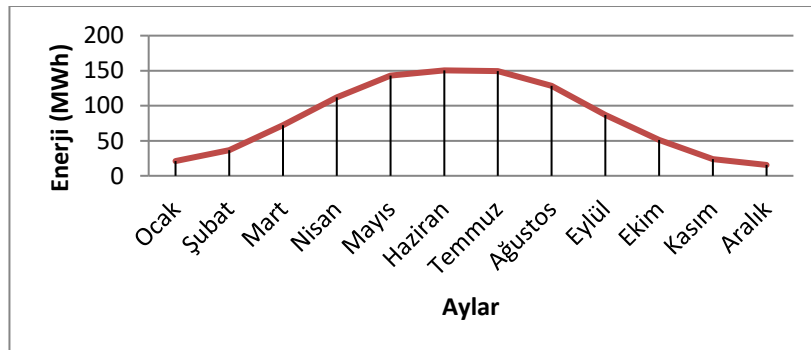
BÖLÜM 6

AVRUPA'NIN 1 MW FOTOVOLTAİK GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİ İÇİN GERİ ÖDEME SÜRESİ

Bu Bölümde sırasında, Türkiye ve Avrupa arasındaki geri ödeme sürelerini karşılaştırmak için 1 MW sistem boyutu ve 0.83 Performans oranı ile LEXRON-400-72M PERC güneş panellerinin kullanımı da dahil olmak üzere sabit bir dizi faktör varsayılacaktır. Ayrıca yıllık %3 artan işletme ve bakım maliyetleri de sabit bir dizi faktör arasındadır.

6.1. ALMANYA'NIN GERİ ÖDEME SÜRESİ

Almanya'da aylık bazda güneş radyasyonunun ortalama değerlerini gösteren Şekil 4.10'dan ve eşitlik 5.1 kullanılarak Almanya sisteminden bir yılda elde edilen ortalama elektrik enerjisi miktarının 990.03973 MWh olduğu bulunmuştur. Şekil 6.1, Almanya'nın 1 MW GES sisteminden aylık bazlı elde edilecek ortalama elektrik enerjisi miktarını göstermektedir. En yüksek ortalama elektrik enerjisi miktarı 150.4204 MWh ile Haziran ayında, en düşük elektrik enerjisi üretimi ise 15.49786 MWh ile Aralık ayında gerçekleşmektedir.



Şekil 6.1. Almanya'nın 1 MW GES sisteminden elde edilecek ortalama elektrik enerjisi miktarları (MWh).

Almanya, 2019 yılında günlük 8.6 milyar fit küp doğal gaz tüketerek Avrupa'nın en büyük doğal gaz tüketicisi olmuştur. Almanya'nın en büyük doğal gaz ihracatçıları Rusya, Hollanda ve Norveç'tir. Almanya'nın sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) terminalleri yoktur, ancak doğal gaz boru hatlarıyla Avrupa'nın geri kalanına iyi bir şekilde bağlıdır. Almanya, Kuzey Akım boru hattı ve Yamal-Avrupa boru hattı yoluyla Rusya'dan doğal gaz ithal etmektedir [75]. 2021'de Almanya'da gazın elektrik üretimine katkısı yaklaşık %15'dir [76]. 24 Şubat 2022'de Rusya-Ukrayna savaşı başlamış ve gaz fiyatlarında büyük bir artışa neden olmuş ve bu da Avrupa'da elektrik fiyatlarının yükselmesine neden olmuştur. Almanya'da 01/01/2021 - 28/02/2022 arasındaki piyasa takas fiyatlarına göre aylık bazda ortalama elektrik fiyatı 103.96 EUR/MWh iken, 01/03/2022 - 30/09/2022 arası aylık bazda ortalama elektrik fiyatları 277.08 EUR/MWh'ya yükselmiştir [77]. Bu nedenle, bu çalışma sırasında Almanya'nın geri ödeme sürelerini hesaplamak için iki fiyat dahil edilecektir. Dolayısıyla Rus-Ukrayna savaşı öncesi dönemde yıllık kâr (990.03973 MWh x 103.96 EUR/MWh) 102,924.53 EUR, Rusya-Ukrayna savaşı sonrası dönemde yıllık kâr ise (990.03973 MWh x 277.08 EUR/MWh) 277,320.21 EUR olarak hesaplanmıştır.

Fraunhofer Güneş Enerjisi Sistemleri Enstitüsü tarafından Şubat 2022'de yayınlanan bir rapora göre, Almanya'da 2020 için ortalama ilk yatırım maliyeti 570 EUR/KWp olarak gerçekleşmiştir [20]. Böylece, 1 MW PV santralının ortalama ilk yatırım maliyeti 570,000 EUR olacaktır. eşitlik 5.2 kullanılarak yıllık işletme ve bakım maliyeti 5,700 EUR olarak belirlenmiştir.

Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2'de gösterilen finansal hesaplamalar yapıldıktan sonra 1 MW'lık bir santral için savaş öncesi yatırım geri ödeme süresinin 5.7 yıl, savaş sonrası geri ödeme süresinin ise 2.22 yıl olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6.1. Savaş öncesi Almanya'nın Yatırım Geri Ödeme Süresi.

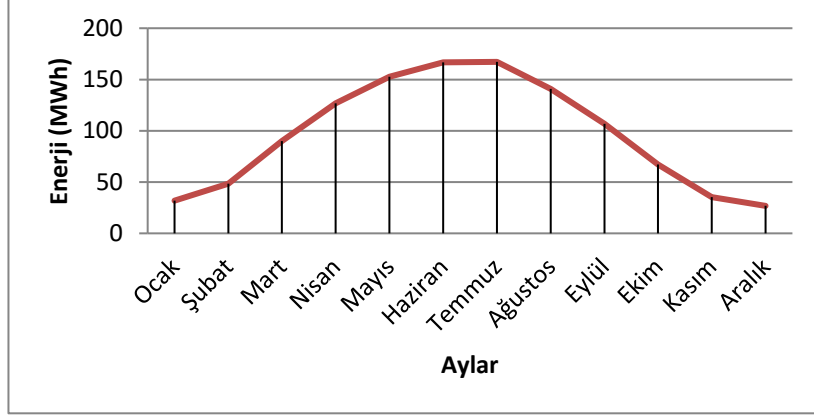
Yıllar	Fayda (EUR)	Masraf (EUR)	Net Kâr (EUR)
0	0	570,000	-570,000
1	102,924.53	5,700	-472,775.47
2	102,924.53	5,871	-375,721.94
3	102,924.53	6,047.13	-278,844.54
4	102,924.53	6,228.54	-182,148.56
5	102,924.53	6,415.40	-85,639.43
6	102,924.53	6,607.86	10,677.24
7	102,924.53	6,806.10	106,795.67
8	102,924.53	7,010.28	202,709.92
9	102,924.53	7,220.59	298,624.17
10	102,924.53	7,437.21	394,111.49

Çizelge 6.2. Savaş sonrası Almanya'nın Yatırım Geri Ödeme Süresi.

Yıllar	Fayda (EUR)	Masraf (EUR)	Net Kâr (EUR)
0	0	570,000	-570,000
1	277,320.21	5,700	-298,379.79
2	277,320.21	5,871	-26,930.58
3	277,320.21	6,047.13	244,342.5
4	277,320.21	6,228.54	515,434.17

6.2. FRANSA'NIN GERİ ÖDEME SÜRESİ

Fransa'da aylık bazda güneş radyasyonunun ortalama değerlerini gösteren Şekil 4.13'dan ve eşitlik 5.1 kullanılarak Fransa sisteminden bir yılda elde edilen ortalama elektrik enerjisi miktarının 1,161.06318 MWh olduğu bulunmuştur. Şekil 6.2, Fransa'nın 1 MW GES sisteminden aylık bazlı elde edilecek ortalama elektrik enerjisi miktarını göstermektedir. En yüksek ortalama elektrik enerjisi miktarı 167.19455 MWh ile Temmuz ayında, en düşük elektrik enerjisi üretimi ise 26.80218 MWh ile Aralık ayında gerçekleşmektedir.



Şekil 6.2. Fransa'nın 1 MW GES sisteminden elde edilecek ortalama elektrik enerjisi miktarları (MWh).

Fransa'nın yerli doğalgaz üretimi çok azdır. Sonuç olarak, Fransa 2015 yılında yaklaşık 1.4 trilyon fit küp tutarındaki doğal gaz kaynaklarının neredeyse tamamını ithal etmiştir. Fransa, çeşitli sınır ötesi boru hatları aracılığıyla Hollanda, Norveç ve Rusya'dan doğal gaz ithal etmektedir [78]. Bu nedenle, Fransa'daki Rus-Ukrayna savaşından sonra elektrik fiyatları Almanya'da olduğu gibi çarpıcı bir şekilde yükselmiştir. Fransa'da 01/01/2021 - 28/02/2022 arasındaki piyasa takas fiyatlarına göre aylık bazda ortalama elektrik fiyatı 121.62 EUR/MWh iken, 01/03/2022 - 22/10/2022 arası aylık bazda ortalama elektrik fiyatları 305.13 EUR/MWh'dir [77]. Dolayısıyla Rus-Ukrayna savaşı öncesi dönemde yıllık kâr $(1,161.06318 \text{ MWh} \times 121.62 \text{ EUR/MWh})$ 141,208.5 EUR iken, Rusya-Ukrayna savaşı sonrası dönemde yıllık kâr ise $(1,161.06318 \text{ MWh} \times 305.13 \text{ EUR/MWh})$ 354,275.21 EUR olarak hesaplanmıştır.

Fraunhofer Güneş Enerjisi Sistemleri Enstitüsü tarafından Şubat 2022'de yayınlanan bir rapora göre, Fransa'da 2020 için ortalama ilk yatırım maliyeti 768 EUR/KWp olarak gerçekleşmiştir [20]. Böylece, 1 MW PV santralının ortalama ilk yatırım maliyeti 768,000 EUR olacaktır. Eşitlik 5.2 kullanılarak yıllık işletme ve bakım maliyeti 7,680 EUR olarak belirlenmiştir.

Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4'de gösterilen finansal hesaplamalar yapıldıktan sonra 1 MW'lık bir santral için savaş öncesi yatırım geri ödeme süresinin 5.6 yıl, savaş sonrası geri ödeme süresinin ise 2.27 yıl olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6.3. Savaş öncesi Fransa'nın Yatırım Geri Ödeme Süresi.

Yıllar	Fayda (EUR)	Masraf (EUR)	Net Kâr (EUR)
0	0	768,000	-768,000
1	141,208.5	7,680	-634,471.5
2	141,208.5	7,910.4	-501,173.4
3	141,208.5	8,147.71	-368,112.61
4	141,208.5	8,392.14	-235,296.25
5	141,208.5	8,643.90	-102,731.65
6	141,208.5	8,903.22	29,573.63
7	141,208.5	9,170.32	161,611.81
8	141,208.5	9,445.43	293,968.88
9	141,208.5	9,728.79	425,448.59
10	141,208.5	10,020.65	556,636.44

Çizelge 6.4. Savaş sonrası Fransa'nın Yatırım Geri Ödeme Süresi.

Yıllar	Fayda (EUR)	Masraf (EUR)	Net Kâr (EUR)
0	0	768,000	-768,000
1	354,275.21	7,680	-421.404.79
2	354,275.21	7,910.4	-75.039.98
3	354,275.21	8,147.71	271.087.52
4	354,275.21	8,392.14	616.970.59

6.3. İSPANYA'NIN GERİ ÖDEME SÜRESİ

İspanya, 1600 kWh/m² yıllık ortalama toplam ışınım değeri ile Avrupa'daki en yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Eşitlik 5.1 kullanılarak , İspanya'da 1 MW kapasiteli bir fotovoltaik santralden ortalama elektrik enerjisi üretiminin 1,458.62208 MWh/yıl olması beklenmektedir.

Avrupa'nın en büyük yedinci doğal gaz tüketicisi olan İspanya, 2016'da yaklaşık 1 trilyon fit küp kullanmıştır. Doğal gaz, İspanya'nın 2016'daki toplam enerji tüketiminin yaklaşık %19'unu oluşturmuştur. İspanya neredeyse hiç doğal gaz üretilmemektedir ve önemsiz miktarda rezervi vardır. bu da ülkeyi talebi karşılamak için neredeyse tüm doğal gazı ithal etmeye zorlamaktadır. İspanya, iki denizaltı boru hattı aracılığıyla Cezayir'den doğal gaz ithal etmektedir. 2016 yılında Cezayir'den yapılan boru hattı ithalatı, toplam doğal gaz ithalatının %42'sini oluşturmaktadır. 2016 yılında İspanya'nın doğal gaz ithalatının neredeyse yarısı (466 Milyar fit küp)

sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG) dır. İspanya'nın en büyük üç LNG tedarikçisi Cezayir, Katar ve Nijerya'dır. 2016 yılında Cezayir, İspanya'nın toplam doğal gaz ithalatının yaklaşık %52'sini sağlamıştır [79]. Doğal gaz, elektrik üretiminin neredeyse üçte birini oluşturmaktadır [80]. İspanya'nın Rus gazına bağımlılığının olmaması nedeniyle Rusya-Ukrayna savaşının başlamasından sonra elektrik enerjisi piyasaları Fransa ve Almanya'daki kadar önemli ölçüde etkilenmemiştir. İspanya 'da 01/01/2021 - 28/02/2022 arasındaki piyasa takas fiyatlarına göre aylık bazda ortalama elektrik fiyatı 124.25 EUR/MWh iken, 01/03/2022 - 31/09/2022 arası aylık bazda ortalama elektrik fiyatları 181.77 EUR/MWh'dir [81]. Dolayısıyla Rus-Ukrayna savaşı öncesi dönemde yıllık kâr (1,458.62208 MWh x 124.25 EUR/MWh) 181,233.79 EUR, Rusya-Ukrayna savaşı sonrası dönemde yıllık kâr ise (1,458.62208 MWh x 181.77 EUR/MWh) 265,133.74 EUR olarak hesaplanmıştır.

Fraunhofer Güneş Enerjisi Sistemleri Enstitüsü tarafından Şubat 2022'de yayınlanan bir rapora göre, İspanya'da 2020 için ortalama ilk yatırım maliyeti 620 EUR/KWp olarak gerçekleşmiştir [20]. Böylece, 1 MW PV santralının ortalama ilk yatırım maliyeti 620,000 EUR'dur. Eşitlik 5.2 kullanılarak yıllık işletme ve bakım maliyeti 6,200 EUR olarak belirlenmiştir.

Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6'de gösterilen finansal hesaplamalar yapıldıktan sonra 1 MW'lık bir santral için savaş öncesi yatırım geri ödeme süresinin 3.6 yıl, savaş sonrası geri ödeme süresinin ise 2.41 yıl olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6.5. Savaş öncesi İspanya'nın Yatırım Geri Ödeme Süresi.

Yıllar	Fayda (EUR)	Masraf (EUR)	Net Kâr (EUR)
0	0	620,000	-620,000
1	181,233.79	6,200	-444,966.21
2	181,233.79	6,386	-270,118.42
3	181,233.79	6,577.58	-95,462.21
4	181,233.79	6,774.91	85,996.67
5	181,233.79	6,978.16	260,252.3
6	181,233.79	7,187.50	434,298.59

Çizelge 6.6. Savaş sonrası İspanya'nın Yatırım Geri Ödeme Süresi.

Yıllar	Fayda (EUR)	Masraf (EUR)	Net Kâr (EUR)
0	0	620,000	-620,000
1	265,133.74	6,200	-361,066.26
2	265,133.74	6,386	-102,318.52
3	265,133.74	6,577.58	156,237.64
4	265,133.74	6,774.91	414,596.47

BÖLÜM 7

SONUÇLAR

Bu çalışmada, Türkiye'de ve fotovoltaik enerji kurulu gücü en yüksek olan Avrupa ülkelerinde güneş enerjisi potansiyeli araştırılmış, araştırma sonucunda İspanya'nın yıllık ortalama 1600 kWh/m² ile en yüksek ortalama toplam radyasyon değerine sahip olduğu, Türkiye ise 1527.46 kWh/m² yıllık ortalama toplam radyasyon değeri ile üçüncü sırada yer almaktadır. Çizelge 7.1, yapılan araştırma sonucuna göre Türkiye ve Avrupa ülkelerinde güneş enerjisi potansiyelini göstermektedir.

Çizelge 7.1. Türkiye ve Avrupa ülkelerinde güneş enerjisi potansiyeli.

Ülke	Ortalama yıllık toplam radyasyon değeri (kWh/m ²)
İspanya	1,600
İtalya	1,533
Türkiye	1,527.46
Fransa	1,274.1
Almanya	1,086
Hollanda	1,000
Birleşik Krallık	949

Ayrıca bu çalışmada, GES sistemlerinin Türkiye ve Avrupa'daki geri ödeme sürelerinin karşılaştırılması için 1 MW sistem boyutu ve 0.83 Performans oranı ile LEXRON-400-72M PERC güneş panellerinin kullanımı da dahil olmak üzere sabit bir dizi faktör varsayılmıştır. Ayrıca yıllık %3 artan işletme ve bakım maliyetleri de sabit bir dizi faktör arasındadır. Ayrıca 2022 yılının başlarında başlayan Rusya-Ukrayna savaşı nedeniyle Avrupa'da enerji fiyatları büyük bir şekilde yükselmiş, bunun sonucunda fotovoltaik santrallerin geri ödeme süreleri (Rusya-Ukrayna savaşı öncesi ve sonrası) olmak üzere iki dönem üzerinden hesaplanmıştır. Bu çalışma sırasında, Rusya-Ukrayna sonrası Türkiye'de 17-10-2022'ye kadar piyasa takas

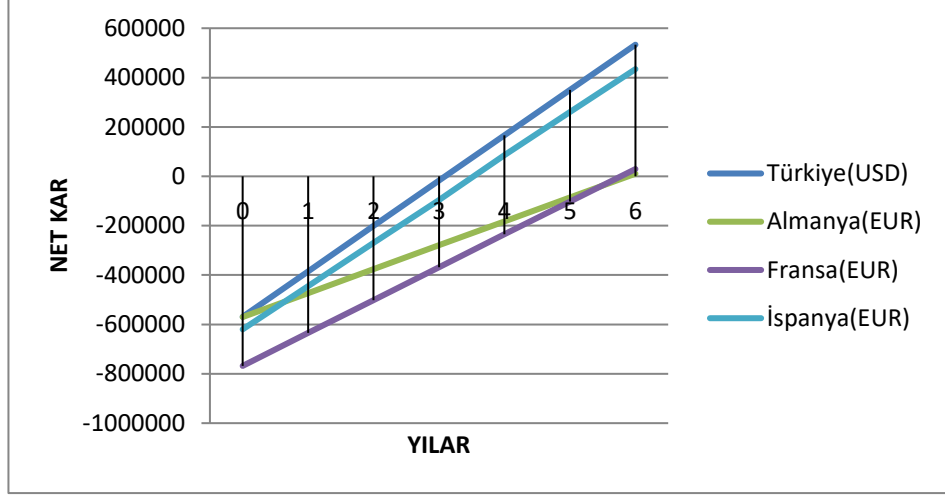
fiyatlarının aritmetik ortalaması 0.13635 USD/KWh idi. Rusya-Ukrayna savaşından önceki döneme gelince, 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanunun eki I sayılı cetvele göre, güneş enerjisine dayalı lisanslı elektrik üretim tesislerinin 30/06/2021 tarihine kadar işletmeye girmeleri halinde, bu santrallerden üretilen elektrik enerjisi için 10 yıl boyunca YEK Destekleme Mekanizması (YEKDEM) kapsamında 0.133 USD/kWh fiyattan alım garantisi sağlanmaktadır [73]. Bu nedenle Türkiye için geri ödeme süresi bu dönem üzerinden hesaplanmıştır.

Rusya-Ukrayna savaşı öncesi olan ilk dönemdeki sonuçlar, en yüksek geri ödeme süreleri 2.75 yıl ile Türkiye'nin Karaman ilinde ve ardından 3.17 yıl ile Türkiye'de bulunmuştur. İspanya, Fransa ve Almanya'da ise geri ödeme süreleri sırasıyla 3.6, 5.6 ve 5.7 yıldır. Çizelge 7.2, çalışmanın yapıldığı ülkeler için geri ödeme sürelerini azalan sırada göstermektedir. Şekil 7.1, çizginin x eksenine kesildiği noktada geri ödeme sürelerinin ortaya çıktığı, çalışmanın yapıldığı ülkeler için geri ödeme sürelerini göstermektedir.

Rusya-Ukrayna savaşı sonrası olan ikinci dönemdeki sonuçlar, en yüksek geri ödeme süreleri 2.22 yıl ile Almanya'da ve ardından 3.27 yıl ile Fransa'da bulunmuştur. İspanya, Türkiye'nin Karaman ili ve Türkiye'de ise geri ödeme süreleri sırasıyla 2.41, 2.75 ve 3.17 yıldır. Çizelge 7.3 ve Şekil 7.2, savaş sonrası geri ödeme sürelerini göstermektedir.

Çizelge 7.2. Rusya-Ukrayna savaşı öncesi geri ödeme süreleri.

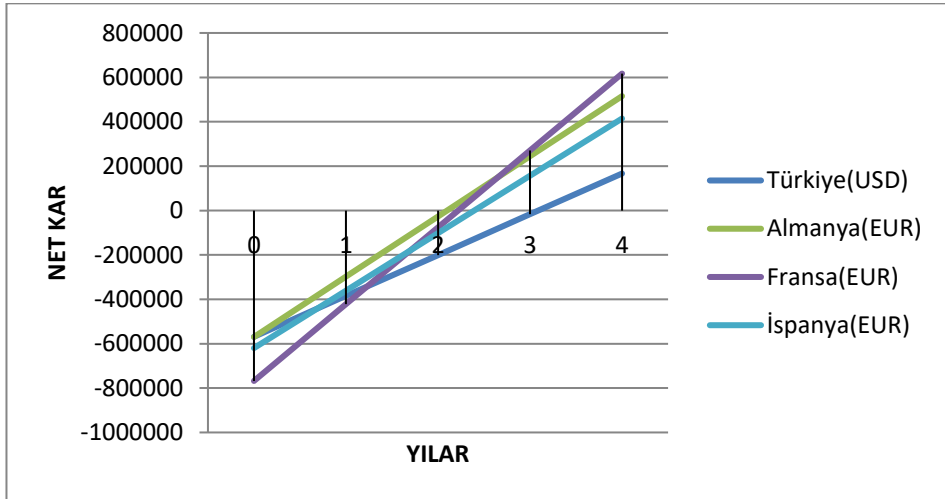
Ülke	Geri Ödeme Süresi (yıllar)
Türkiye	3.17
İspanya	3.6
Fransa	5.6
Almanya	5.7



Şekil 7.1. Rusya-Ukrayna savaşı öncesi geri ödeme süreleri.

Çizelge 7.3. Rusya-Ukrayna savaşı sonrası geri ödeme süreleri.

Ülke	Geri Ödeme Süresi (yillar)
Almanya	2.22
Fransa	2.27
İspanya	2.41
Türkiye	3.17



Şekil 7.2. Rusya-Ukrayna savaşı sonrası geri ödeme süreleri.

KAYNAKLAR

1. Al-Waeli, A. H. A., Kazem, H. A., Chaicha, M. T., and Sopian, K., "Photovoltaic/thermal (PV/T) Systems: Principles, Design, and Applications", *Springer Nature*, Switzerland, 1-3 (2019).
2. Andre, T. and Guerra, F., "Renewables 2020 Global Status Report", *REN21*, Paris, 27-36 (2020).
3. Internet: Gromicko, N., "Advantages of Solar Energy - InterNACHI®", <https://www.nachi.org/advantages-solar-energy.htm> (2022).
4. Bennett, J., "The agency of assemblages and the North American blackout", *Public Culture*, 17 (3): 445–465 (2005).
5. Internet: Anadolu Ajansı, "Her Yıl Yaklaşık 50 Milyar Dolar Enerjiye Harcanıyor", <https://www.aa.com.tr/tr/sirkethaberleri/egitim/her-yil-yaklasik-50-milyar-dolar-enerjiye-harcaniyor/655256> (2022).
6. TÜRKİYE PETROLLERİ A.O., "Petrol ve Doğal Gaz Sektör Raporu", *Türkiye Petrolleri A.O.*, Ankara, 34-38 (2020).
7. Internet: Duvar Gazete, "665 Milyar Doları Nasıl Yaktık?", <https://www.gazeteduvar.com.tr/665-milyar-dolari-nasil-yaktik-makale-1535547> (2022).
8. EUROPEAN COMMISSION, "Energy prices and costs in Europe {SWD (2019) 1 Final}", *European Commission*, Brussels, 1-13 (2019).
9. Whiteman, A., Akande, D., Elhassan, N., Escamilla, G., Lebedys, A., and Arkhipova, I., "RENEWABLE CAPACITY STATISTICS 2021", *International Renewable Energy Agency (IRENA)*, Abu Dhabi, 23-26 (2021).
10. Smets, A. H., Jäger, K., Isabella, O., Swaaij, R. A. van, and Zeman, M., "Solar Energy The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems", *UIT Cambridge*, Delft, The Netherlands And Berlin, 726-729 (2015).
11. Internet: Clean Technica, "Solar Power Energy Payback Time Is Now Super Short - CleanTechnica", <https://cleantechnica.com/2018/03/25/solar-power-energy-payback-time-now-super-short/> (2022).
12. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems and ISE with support of PSE Projects GmbH, "Photovoltaics Report", *Fraunhofer ISE*, Freiburg, 3-10

(2021).

13. Kessler, W., "Comparing energy payback and simple payback period for solar photovoltaic systems", *E3S Web Of Conferences*, 22: 00080 (2017).
14. Lüle, F., Koyuncu, T., and Kaya, A., "Payback Periods of Three Identical Solar Photovoltaic Power Plants", *Engineering Sciences*, 14 (4): 200–206 (2019).
15. Taner, T. and A. S. Dalkilic, "A feasibility study of solar energy-techno economic analysis from Aksaray city, Turkey", *Journal Of Thermal Engineering*, 3 (5): 1–1 (2017).
16. BÜYÜKZEREN, R., ALTINTAŞ, H. B., MARTİN, K., and KAHRAMAN, A., "Binalardaki Fotovoltaik Uygulamasının Teknik, Çevresel ve Ekonomik İncelenmesi: Meram Tıp Fakültesi Hastanesi Örneği", *EMO Bilimsel Dergi*, 5 (10): 9–14 (2015).
17. Internet: Tsvetomira, T., "Solar Payback Times in Europe on the Slide - Otovo", <https://renewablesnow.com/news/solar-payback-times-in-europe-on-the-slide-otovo-644921/> (2022).
18. Price, G. D., "Renewable Power and Energy Photovoltaic Systems", *Momentum Press*, NEW YORK, 63;184 (2018).
19. N.M. Pearsall, "Introduction to photovoltaic system performance", The Performance of Photovoltaic (PV) Systems, *Woodhead Publishing*, Newcastle Upon Tyne, 1–19 (2016).
20. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems and ISE with support of PSE Projects GmbH, "Photovoltaics Report", *Fraunhofer ISE*, Freiburg, 4-46 (2022).
21. Benda, V., "Crystalline Silicon Solar Cell and Module Technology", A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems, *Academic Press*, PRAGUE, 181–213 (2018).
22. Green, M. A., "Thin-film solar cells: review of materials, technologies and commercial status", *Journal Of Materials Science: Materials In Electronics*, 18 (1): 15–19 (2007).
23. Kim, S. O., "A STUDY OF THE STAEBLER-WRONSKI EFFECT AND AMORPHOUS SILICON SOLAR CELLS", Yüksek Lisans Tezi, *Technische Universiteit Delft*, Delft, 10–12 (2013).
24. Qarony, W., Hossain, M. I., Hossain, M. K., Uddin, M. J., Haque, A., Saad, A. R., and Tsang, Y. H., "Efficient amorphous silicon solar cells: characterization, optimization, and optical loss analysis", *Results In Physics*, 7: 4287–4293 (2017).

25. Li, J., Aierken, A., Zhuang, Y., Xu, P., H.Q, W., Q.Y, Z., X.B, W., J.H, M., X, Y., Q.Y, C., S.Y, Z., C.R, Y., and Y, S., "1 MeV electron and 10 MeV proton irradiation effects on inverted metamorphic GaInP/GaAs/InGaAs triple junction solar cell", *Solar Energy Materials And Solar Cells*, 224: 111022 (2021).
26. Yamaguchi, Masafumi., "High-efficiency GaAs-based solar cells", *Post-Transition Metals*, London, 107-128 (2020).
27. Basumatary, P. and Agarwal, P., "A short review on progress in perovskite solar cells", *Materials Research Bulletin*, 149: 111700 (2022).
28. Blaabjerg, F., Chen, Z., and Kjae, S. B., "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems", *IEEE Transactions On Power Electronics*, 19 (5): 1184–1194 (2004).
29. Sharma, R. and Tiwari, G. N., "Technical performance evaluation of stand-alone photovoltaic array for outdoor field conditions of New Delhi", *Applied Energy*, 92: 644–652 (2012).
30. Salam, Z. and Ab Rahman, A., "Efficiency for Photovoltaic Inverter: A Technological Review", *2014 IEEE Conference On Energy Conversion (CENCON)*, IEEE: 175–180 (2014).
31. Alsema, E. A. and Wild-Scholten, M. J. de, "Environmental impacts of crystalline silicon photovoltaic module production", *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 895: (2005).
32. Alsema, E. A., Wild-Scholten, M. J. de, and Fthenakis, V. M., "ENVIRONMENTAL IMPACTS OF PV ELECTRICITY GENERATION-A CRITICAL COMPARISON OF ENERGY SUPPLY OPTIONS", *21st European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Dresden (EU-PVSEC): 3201–7 (2006).
33. Sinke, W. C., Van Hooff, W. M. ., Coletti, G., Ehlen, B. E., Wild-Scholten, M. J. de, Hahn, G., Van Kerschaver, E., Beaucarne, G., and Metz, A., "Wafer-based crystalline silicon modules at 1 Euro/Wp. Final results from the CrystalClear integrated project", *Energy Research Centre of the Netherlands*, Netherlands, (2009).
34. Ludin, Norasikin Ahmad, et al., "Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: a review.", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96: 11–28 (2018).
35. Alsema, E. A. and Nieuwlaar, E., "Energy viability of photovoltaic systems", *Energy Policy*, 28 (14): 999–1010 (2000).
36. Stoppato, A., "Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation", *Energy*, 33 (2): 224–232 (2008).

37. Yue, D., You, F., and Darling, S. B., "Domestic and overseas manufacturing scenarios of silicon-based photovoltaics: Life cycle energy and environmental comparative analysis", *Solar Energy*, 105: 669–678 (2014).
38. Tirmikçi, C. A. and Yavuz, C., "Environmental impact of a 290.4 kWp grid-connected photovoltaic system in Kocaeli, Turkey", *Clean Technologies And Environmental Policy*, 22 (9): 1943–1951 (2020).
39. Wild-Scholten, D. and Schottler, M., "Solar as an environmental product. Thin-film modules. Production processes and their environmental assessment", *Energy Research Centre of the Netherlands ECN, Netherlands*, 11-12 (2009).
40. Jungbluth, N., Tuchschnid, M., Wild-Scholten, M. de, and , "Life Cycle Assessment of Photovoltaics: update of ecoinvent data V2. 0" *ESU-services Ltd, Petten*, 50 : 1–22 (2008).
41. Fthenakis, V. and Alsema, E., "Photovoltaics Energy Payback Times, Greenhouse Gas Emissions and External Costs: 2004–early 2005 Status", *Progress In Photovoltaics: Research And Applications*, 14 (3): 275–280 (2006).
42. Raugei, M., Bargigli, S., and Ulgiati, S., "Life cycle assessment and energy payback time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to poly-Si", *Energy*, 32 (8): 1310–1318 (2007).
43. Raugei, M. and Frankl, P., "Life cycle impacts and costs of photovoltaic systems: Current state of the art and future outlooks", *Energy*, 34 (3): 392–399 (2009).
44. BENLİ, H. and GÜRTÜRK, M., "Investigation of The Effect of Pv Panel Efficiency Parameter on Investment Payback Period", *International Journal Of Innovative Engineering Applications*, 5 (2): 88–92 (2021).
45. Internet: Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, "GEPA", <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx> (2022).
46. Ghazi, S. and Ip, K., "The effect of weather conditions on the efficiency of PV panels in the southeast of UK", *Renewable Energy*, 69: 50–59 (2014).
47. ÖZDEMİR, G., "INVESTMENT ANALYSIS OF SOLAR ENERGY SYSTEMS", Yüksek Lisans Tezi, *Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 21–22 (2013).
48. Ketjoy, N., Chamsa-ard, W., and Mensin, P., "Analysis of factors affecting efficiency of inverters: Case study grid-connected PV systems in lower northern region of Thailand", *Energy Reports*, 7: 3857–3868 (2021).
49. Zdyb, A. and Gulkowski, S., "Performance Assessment of Four Different Photovoltaic Technologies in Poland", *Energies*, 13 (1): 196 (2020).

50. Ozcan, O. and Ersoz, F., "Project and cost-based evaluation of solar energy performance in three different geographical regions of Turkey: Investment analysis application", *Engineering Science And Technology, An International Journal*, 22 (4): 1098–1106 (2019).
51. II, W. W. C., "Afterword: A Sustainable Economic and Finance Proposal", *Sustainable Cities and Communities Design Handbook, Second. Ed., Butterworth-Heinemann*, 573–583 (2018).
52. CEBECİ, S., "TÜRKİYE'DE GÜNEŞ ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETİM POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ", Uzmanlık tezi, *İktisadi Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü*, Ankara, 26–38 (2017).
53. Held, A., Ragwitz, M., Gephart, M., de Visser, E., and Klessmann, C., "Design features of support schemes for renewable electricity. Task 2 report.", *ECOFYS*, Utrecht, 38-43 (2014).
54. Lucas, H., Ferroukhi, R., and Hawila, D., "Renewable Energy Auctions in Developing Countries", *International Renewable Energy Agency (IRENA)*, Abu Dhabi, 9-15 (2013).
55. IRENA, "RENEWABLE ENERGY AUCTIONS: STATUS AND TRENDS BEYOND PRICE", *International Renewable Energy Agency (IRENA)*, Abu Dhabi, 8-11 (2019).
56. Cansino, J. M., Pablo-Romero, M. del P., Román, R., and Yñiguez, R., "Tax incentives to promote green electricity: An overview of EU-27 countries", *Energy Policy*, 38 (10): 6000–6008 (2010).
57. Ogunlana, A. O. and Goryunova, N. N., "Tax Incentives for Renewable Energy: the European experience", *The European Proceedings Of Social & Behavioural Sciences (EpSBS)*, 19: 507–513 (2017).
58. Internet: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Güneş - T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı", <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes> (2022).
59. Internet: Copernicus Climate Change Service (C3S), "Sunshine Duration and Clouds", <https://climate.copernicus.eu/ESOTC/2019/sunshine-duration-and-clouds> (2022).
60. Internet: GLOBAL SOLAR ATLAS, "SOLAR RESOURS MAP", <https://globalsolaratlas.info/download/europe-and-central-asia> (2022).
61. Internet: Deutscher Wetterdienst DWD, "Global Radiation (Mean 30-Year Monthly and Annual Sums)", https://www.dwd.de/EN/ourservices/solarenergy/maps_globalradiation_mvs.html#buehneTop (2022).

62. Internet: RU-GELD.DE, "Sunshine in Germany: The Number of Sunny Days, Hours of Sunshine Quantity in Germany by Year, Season, Month, and Also by Federated State", <https://ru-geld.de/en/country/weather-and-climate/sunshine.html> (2022).
63. Montoya, F. G., Aguilera, M. J., and Manzano-Agugliaro, F., "Renewable energy production in Spain: A review", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 33 (May): 509–531 (2014).
64. Polo, J., "Solar global horizontal and direct normal irradiation maps in Spain derived from geostationary satellites", *Journal Of Atmospheric And Solar-Terrestrial Physics*, 130–131: 81–88 (2015).
65. Internet: Current Results, "Average Sunshine a Year in Europe", <https://www.currentresults.com/Weather/Spain/annual-days-of-sunshine.php> (2022).
66. Urs, R. R., Ali, Z., Marzband, M., Saleem, K., Mohammadi-Ivatloo, B., and Anvari-Moghaddam, A., "A technical assessment on photovoltaic power generation under varying weather profile – Northumbria university pilot", *2020 IEEE 29th International Symposium On Industrial Electronics (ISIE)*, IEEE: 811–815 (2020).
67. Kalyanpur, A., Mercadier, M., and Blanc, P., "Gisement solaire en France : caractérisation de la ressource énergétique, profil de répartition et volatilité", *Environnement & Technique*, 331: 54–59 (2017).
68. Hinssen, Y. B. and Knap, W. H., "Comparison of pyranometric and pyrheliometric methods for the determination of sunshine duration", *Journal Of Atmospheric And Oceanic Technology*, 24 (5): 835–846 (2007).
69. Pierro, M., Moser, D., Perez, R., and Cornaro, C., "The value of PV power forecast and the paradox of the “single pricing” scheme: The Italian case study", *Energies*, 13 (15): 3945 (2020).
70. Internet: Çevresel Etki Değerlendirmesi İzin Ve Denetim Genel Müdürlüğü, "ÇEVRESEL GÖSTERGELER", https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/icerikler/cevresel_gostergeler_-2021tr-rev-20220622105837.pdf (2022).
71. Internet: ACS Enerji ve Teknoloji LTD STI, "LEXRON-72M Data Sheet", <https://www.acsenerji.com/> (2022).
72. Internet: EPIAŞ Şeffaflık Platformu, "Piyasa Takas Fiyatı (PTF)", <https://seffaflik.epias.com.tr/transparency/piyasalar/gop/ptf.xhtml> (2022).
73. YALILI, M., "Lisanslı Fotovoltaik Güneş Enerji Santrali Yatırımının Finansal Analizi: Van İli Örneği", *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10 (3): 1055–1074 (2021).

74. Internet: Weather Spark, "Karaman İklimi, Aylık Hava Durumu, Ortalama Sıcaklığı (Türkiye)", <https://tr.weatherspark.com/y/97718/Karaman-Türkiye-Ortalama-Hava-Durumu-Yil-Boyunca> (2022).
75. Internet: U.S. Energy Information Administration (EIA), "Energy Sector in Germany", <https://www.eia.gov/international/analysis/country/DEU> .
76. Internet: Statistisches Bundesamt, "Gross Electricity Production in Germany", <https://www.destatis.de/EN/Themes/Economic-Sectors-Enterprises/Energy/Production/Tables/gross-electricity-production.html> (2022).
77. Internet: NORD POOL, "DAY-AHEAD PRICES", <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/de-lu/monthly/?view=table> (2022).
78. Internet: U.S. Energy Information Administration (EIA), "Energy Sector in France", <https://www.eia.gov/international/analysis/country/FRA> (2022).
79. Internet: U.S. Energy Information Administration (EIA), "Energy Sector in Spain", <https://www.eia.gov/international/analysis/country/ESP> (2022).
80. Internet: International Energy Agency (IEA), "Spain Natural Gas Security Policy", <https://www.iea.org/articles/spain-natural-gas-security-policy> (2022).
81. Internet: The nominated electricity market operator (NEMO), "Monthly Report on the Development of the Electricity Market", <https://www.omie.es/en/publications?page=0> (2022).

ÖZGEÇMİŞ

Mohannad GYAM, ilkokulu Al-Rashaida Erkek İlköğretim Okulu'nda ve ortaokulu Jerash ortaokulunda tamamladı. 2011 yılında Albalqa' Applied Üniversitesi mühendislik teknolojisi Fakültesi Elektrik Enerjisi Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2016 yılında iyi derecele mezun oldu. 2020 yılında Karabük Üniversitesinde enerji sistemleri mühendisliği bölümünü yüksek lisans başladı.