



**GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNDE SABİT VE HAREKETLİ  
SİSTEMLERİNİN ANALİZİ: ENERJİ KAZANIMININ, YATIRIM  
MALİYETLERİNİN VE ÇEVRESEL ETKİNİN MODELLENMESİ**

**Beyza YILDIRIM**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2025**

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

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

Beyza YILDIRIM

24/07/2025

GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNDE SABİT VE HAREKETLİ  
SİSTEMLERİNİN ANALİZİ: ENERJİ KAZANIMININ, YATIRIM MALİYETLERİNİN  
VE ÇEVRESEL ETKİNİN MODELLENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)

Beyza YILDIRIM

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2025

ÖZET

Yenilenebilir enerji sektörü günümüzde hızla büyümekte olup, 2024 yılı itibariyle dünya genelinde güneş enerjisi santrallerinin kurulu gücü bir önceki yıla kıyasla %20 oranında bir artış göstermiştir. Türkiye özelinde ise, toplam kurulu güç içinde güneş enerjisinin payı 2024 yılı itibariyle %15,3 olarak gerçekleşmiştir ve bu oranın 2025 yılı itibariyle %17,9'a ulaşması öngörülmektedir. Ayrıca, Türkiye'nin 2035 yılı için belirlediği güneş enerjisi kurulu güç hedefi, toplam enerji üretiminde %30 seviyelerine ulaşmayı hedeflemektedir. Bu tez çalışmasında, Kırıkkale iline kurulması planlanan ve 15 MW kurulu güce sahip sabit ve hareketli güneş enerjisi santralleri değerlendirilmiştir. Simülasyon çalışmaları için PVSYST ve PVGIS yazılımı kullanılmıştır. Hem sabit hem hareketli sistemin kıyaslamasını yapabildiğinden dolayı, PVSYST üretim verileri kullanılarak fiyat analizi yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, hareketli güneş enerjisi sistemlerinin sabit sistemlere kıyasla yıllık enerji üretiminde %23,8 oranında daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Ancak, bu sistemin kurulumu için gereken ilave ekipman maliyeti 2.019.996,75 € olarak belirlenmiş olup, sağladığı enerji katkısının finansal karşılığı ise yıllık bazda 643.502,00 \$ olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, sabit ve hareketli sistemlerin çevresel etkileri, geri ödeme süreleri ve ekonomik fizibiliteyi detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, hareketli sistemlerin özellikle yüksek enerji üretim talebine sahip projelerde daha verimli ve ekonomik bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Bilim Kodu : 93412  
Anahtar Kelimeler : Yenilenebilir Enerji, Hareketli ve Sabit Sistem, Güneş Enerjisi  
Sayfa Adedi : 93  
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Hıdır DÜZKAYA

ANALYSIS OF FIXED-TRACKING SYSTEMS IN SOLAR POWER PLANTS:  
MODELLING OF ENERGY GAIN, INVESTMENT COSTS, AND ENVIRONMENTAL  
IMPACT

(M.Sc. Thesis)

Beyza YILDIRIM

GAZİ UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2025

ABSTRACT

The renewable energy sector is rapidly growing, and by 2024, the installed capacity of solar power plants worldwide has increased by 20% compared to the previous year. In Turkey, the share of solar energy in total installed capacity reached 15.3% in 2024, and it is expected to rise to 17.9% by 2025. Additionally, Turkey has set a target for solar energy installed capacity to reach 30% of total energy production by 2035. This thesis evaluates fixed and tracking solar power plants with a total installed capacity of 15 MW planned for installation in Kırıkkale province. PVSYST and PVGIS software were used for simulation studies. Since both fixed and tracking systems can be compared, price analysis was performed using the production data from PVSYST. The analyses revealed that tracking solar energy systems are 23.8% more efficient in annual energy production compared to fixed systems. However, the additional equipment cost required for the installation of this system was determined to be €2,019,996.75, while the financial contribution of the energy produced was calculated as \$643,502. Furthermore, the environmental impacts, payback periods, and economic feasibility of both fixed and tracking systems were evaluated in detail. The findings indicate that tracking systems offer a more efficient and economically viable solution, particularly for projects with high energy production demands.

Science Code : 93412

Key Words : Renewable Energy, Tracer and Fixed System, Solar Energy

Page Number : 93

Supervisor : Dr. Öğr. Üyesi Hıdır DÜZKAYA

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince her zaman yanımda olan, destekleri ve sevgileriyle bana güç veren başta sevgili aileme ardından kıymetli başmühendisim Yunus Emrah AYDIN'a ve değerli yöneticilerime sağladıkları imkânlar için gönülden teşekkür ederim.

Ayrıca, bilgi ve deneyimlerini paylaşarak tezimin gelişimine önemli katkılarda bulunan danışman hocam Doç. Dr. Hıdır DÜZKAYA'ya teşekkürü borç bilirim.



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	v
ABSTRACT .....	vi
TEŞEKKÜR .....	vii
İÇİNDEKİLER .....	viii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI .....	5
3. GÜNEŞ ENERJİSİ .....	17
3.1. Enerji Kaynaklarının Değerlendirilmesi .....	17
3.2. Türkiye ve Kırıkkale'nin Güneş Enerji Potansiyelinin Değerlendirilmesi .....	19
3.3. Ülkemizde Güneş Enerjisiyle İlgili Yönetmelik ve Teşvikler .....	25
3.3.1. Lisanssız GES elektrik üretimi .....	26
3.3.2. Lisanslı GES elektrik üretimi .....	27
3.4. Ülkemizdeki Kurulu Güçlerin Değerlendirilmesi .....	29
3.5. Güneş Enerji Santrallerinde Kullanılan Ekipmanlar .....	30
4. GÜNEŞ ENERJİSİ TAKİP SİSTEMLERİ .....	41
4.1. Eksen Sayısına Göre Sınıflandırma .....	42
4.1.1. Sabit sistemler .....	42
4.1.2. Tek eksenli sistemler .....	44
4.1.3. İki ve çok eksenli sistemler .....	45
4.2. Güneş Işınlarmın Geliş Açısı .....	47

	<b>Sayfa</b>
4.2.1. Denklinasyon açısı ( $\delta$ ) .....	48
4.2.3. Saat açısı ( $\omega$ ) .....	49
4.2.4. Zenit, Azimut ve eğim açısı .....	49
<b>5. SİMÜLASYON METODLARI .....</b>	<b>51</b>
5.1. PVSYST Simülasyon Çalışması .....	51
5.2. PVGIS Metodu .....	52
5.3. PVSYST ve PVGIS Kullanılan Çalışma Örnekleri .....	54
<b>6. YAPILAN ANALİZLER VE DEĞERLENDİRMELER .....</b>	<b>59</b>
6.1. PVSYST Simülasyon Sonucu .....	59
6.1.1. Sabit eksenli sistem PVSYST raporu .....	63
6.1.2. Hareketli sistem PVSyst raporu .....	68
6.1.3. PVSyst Sabit ve hareketli sistem karşılaştırılması .....	71
6.2. PVGIS Metodu .....	72
6.3. PVGIS ve PVSYST Karşılaştırılması .....	76
6.4. EPİAŞ 2023 Yılı PTF Çalışması .....	78
6.5. Maliyet Analizi .....	79
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>83</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>85</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>91</b>
EK-1. Lisanssız GES iş akış şeması .....	92
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>93</b>

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Enerji değerlendirme kriterleri .....	19
Çizelge 3.2. Türkiye'deki bölgelerin fotovoltaik enerji potansiyeli .....	23
Çizelge 3.3. Türkiye'nin ay bazında ortalama güneşlenme potansiyeli .....	23
Çizelge 3.4. Yenilenebilir enerji alım fiyatları .....	28
Çizelge 3.5. Türkiye'nin toplam kurulu gücü içinde yerli enerji kaynaklarına ait kurulu gücün yıllara göre değişimi .....	29
Çizelge 3.6. Türkiye illerine ait optimum panel açısı .....	37
Çizelge 6.1. PVSyst Ufuk profili .....	61
Çizelge 6.2. PVSyst Mevsimsel optimum tilt açısı .....	63
Çizelge 6.3. PVSyst Aylık ortalama optimum tilt açısı .....	63
Çizelge 6.4. PVSyst Simülasyon verilerine göre sabit sistem aylık değeri .....	67
Çizelge 6.5. PVSyst Simülasyon verilerine göre hareketli sistem aylık değeri .....	71
Çizelge 6.6. PVSyst sabit sistem ve hareketli sistem karşılaştırılması .....	72
Çizelge 6.7. PVGIS simülasyon girdileri .....	74
Çizelge 6.8. PVGIS Mevsimsel optimum tilt açısı .....	75
Çizelge 6.9. PVGIS Aylık ortalama optimum tilt açısı .....	75
Çizelge 6.10. PVSyst ve PVGIS karşılaştırılması .....	77
Çizelge 6.11. PVGIS ve PVSyst 30° tilt açısı .....	77
Çizelge 6.12. EPIAŞ aylık PTF verileri .....	78
Çizelge 6.13. Üretim verilerinin fiyatlandırılması .....	79
Çizelge 6.14. Tracker sistemi fiyat çalışması .....	80

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Kaynaklara göre kurulu güç .....	2
Şekil 3.1. Dünya’da enerjinin genel durumu .....	18
Şekil 3.2. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası .....	20
Şekil 3.3. Dünya’da enerjinin genel durumu .....	21
Şekil 3.4. Türkiye’ye ait güneşlenme süresi.....	22
Şekil 3.5. Kırıkkale ili güneş radyasyonu .....	24
Şekil 3.6. Kırıkkale ilçeleri radyasyon değerleri (kWh/m <sup>2</sup> ) .....	25
Şekil 3.7. Şebekeden bağımsız (off-grid) sistem diyagramı .....	31
Şekil 3.8. Şebekeye bağlı (on-grid) sistem diyagramı .....	31
Şekil 3.9. Güneş izleme sistemi ve MPPT cihazlarının sisteme bağlanmalar .....	32
Şekil 3.10. Fotovoltaik hücre çalışma şekli .....	33
Şekil 3.11. Fotovoltaik hücre yapısı ve çalışma prensibi .....	33
Şekil 3.12. Güneş hücrelerinin modül-panel-dizi bağlantısı .....	34
Şekil 3.13. Hücre-modül ilişkisi .....	34
Şekil 3.14. Panel eğim açısı .....	36
Şekil 3.15. İnvvertörün sahada montaj edilmiş hali.....	39
Şekil 4.1. Güneşin konumuna göre panel pozisyonları .....	41
Şekil 4.2. Sabit sistem montaj örneği .....	43
Şekil 4.3. Tek eksenli sistem .....	44
Şekil 4.4. Tracker sistem montaj örneği .....	45
Şekil 4.5. Çift eksenli sistem .....	46
Şekil 4.6. Güneş ışınlarının açısı .....	48
Şekil 4.7. Ay bazında deklinasyon açısı değerleri .....	49

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.8. Zenit, azimut ve eğim açısı gösterimi .....	50
Şekil 5.1. PVSYST sistem arayüzü .....	51
Şekil 5.2. PVGIS sistem arayüzü .....	53
Şekil 6.1. Kırıkkale PVSyst aylık radyasyon değeri .....	59
Şekil 6.2. PVSyst Ufuk tanımlanması .....	60
Şekil 6.3. Raporda kullanılan invertöre ait datasheet .....	62
Şekil 6.4. Raporda kullanılan panele ait datasheet .....	62
Şekil 6.5. PVSyst Sabit sistem yerleşim açısı .....	64
Şekil 6.6. PVSyst Sabit sistem karakteristik çizelgesi .....	64
Şekil 6.7. PVSyst Sabit sistem ana sonuç değerler grafiği .....	65
Şekil 6.8. PVSyst Sabit sisteme ait kayıp diyagramı .....	66
Şekil 6.9. PVSyst Hareketli sistem yerleşimi .....	68
Şekil 6.10. PVSyst Hareketli sistem karakteristikleri .....	69
Şekil 6.11. PVSyst Hareketli sistem ana sonuç değerleri .....	69
Şekil 6.12. PVSyst hareketli sisteme ait kayıp diyagramı .....	70
Şekil 6.13. PVGIS sistem arayüzü .....	73
Şekil 6.14. Aylık PVGIS enerji çıktısı [kWh] .....	75

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler

### Açıklamalar

<b>mm</b>	Milimetre
<b>MW</b>	Megawatt
<b>kWh</b>	Kilowatt saat
<b>m<sup>2</sup></b>	Metrekare

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

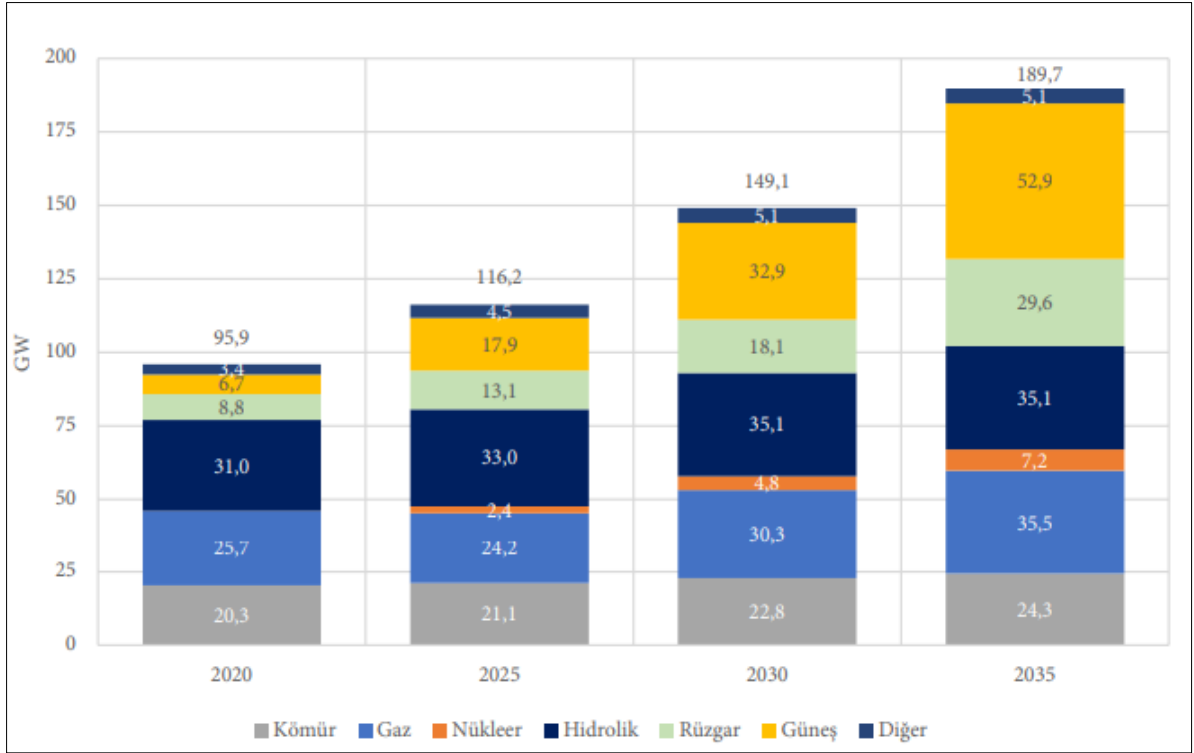
<b>AG</b>	Alçak Gerilim
<b>AC</b>	Alternatif Akımı
<b>DC</b>	Doğru Akım
<b>EPDK</b>	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
<b>ETKB</b>	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
<b>EPIAŞ</b>	Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.
<b>GES</b>	Güneş Enerji Santrali
<b>IRENA</b>	Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
<b>MPPT</b>	Maksimum Güç Noktası
<b>PV</b>	Fotovoltaik Panel
<b>PTF</b>	Piyasa Takas Fiyatı
<b>RES</b>	Rüzgâr Enerji Santrali
<b>TEİAŞ</b>	Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
<b>YEGM</b>	Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü
<b>YEKDEM</b>	Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması
<b>YG</b>	Yüksek Gerilim

## 1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze insanlar yaşamlarını sürdürebilmek amacıyla, birçok alanda enerjiye ihtiyaç duymuşlardır. Hızla gelişmekte olan teknoloji ile bu ihtiyaçlara olan talepler günden güne artmaktadır. Özellikle 1800'lü yıllarda etkisi başlamış olan sanayi devrimiyle birlikte ülkeler elektrik makinelerini kullanabilmek ve enerji üretebilmek adına birbirleriyle yarış durumunun başlamasına sebebiyet vermiştir.

Geçmişten günümüze nihai tüketim değerlerine bakıldığında en çok tercih edilen kaynaklar kömür, petrol, doğal gaz gibi fosil yakıtlardan oluşturmaktadır. Yenilenemeyen enerji diye adlandırılan bu fosil yakıt kaynakları, içerisinde bulunan karbon yoğunluğunun yüksek olmasından dolayı yandığında etrafa yenilenebilir enerji kaynaklarına nazaran çok daha fazla miktarda enerji açığa çıkarmaktadır. Yüksek enerji açığa çıkarmasından dolayı da birçok alanda fosil yakıt kullanımı tercih edilmektedir. Fakat fosil yakıtların yenilenemeyen enerji olması, her coğrafi bölgede eşit miktarda dağılımının olmayıp sadece belli ülkelerin bu kaynaklara yeterli miktarda sahip olması bu duruma alternatif kaynak arayışına yöneltmiştir. Bu esnada artan teknolojiyle birlikte üretim-tüketim dengesini sağlayabilmek adına, yenilenebilir enerji kaynaklarına talep günden güne artmaktadır.

Yenilenebilir enerji alanında Türkiye'de yaşanan gelişmelere baktığımızda, yerli ve milli kaynaklara yönelimi artırmak amacıyla teşvik uygulamaları başlatılmış ve üreticilere yerli aksam desteği sağlanmıştır. Ayrıca, Ekim 2021'de imzalanan Paris Anlaşması çerçevesinde, 2053 yılına kadar "Net Sıfır Emisyonlu Bir Ekonomiye" ulaşma hedefi tüm dünyaya duyurulmuştur. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın verilerine bakıldığında, bu hedef doğrultusunda yapılan yenilenebilir enerji yatırımlarının her yıl büyük bir oranda arttığı gözlemlenmektedir. Bu yatırımlar arasında en büyük orana sahip olan güneş enerjisi, ülkemizde 2020 yılında Şekil 1.1'de de görüldüğü gibi %6,7'lik bir değere sahipken, 2025 yılı için %11,2'lik yükseliş ile %17,9'luk bir kurulu güç değerine ulaşması beklenmektedir. Ayrıca Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının tahminine göre, 2035 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi toplam kurulu gücün 52,9 GW olacağı öngörülmektedir (ETKB, 2024).



Şekil 1.1. Kaynaklara göre kurulu güç (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024)

Yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olan güneş enerjisi, hidrojen atomunun helyuma dönüşmesi sonucunda elde edilmektedir. Güneşten elde edilen enerji sayesinde fosil yakıt kullanımını azaltmasıdır. Güneşten gelen ışınları direkt olarak elektrik enerjisine çevirebildiği için güneş panelleri sıkça tercih edilmektedir. Güneş paneli ile kurulan sistemler, güneş enerjisini elektriğe dönüştürerek karbon ayak izinin azaltılmasına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır.

Güneş enerjisi dönüşümünü belirleyen temel prensip, maksimum verim elde etmek için panellerin ideal olarak güneş ışınlarına dik olarak hizalanmasıdır. Bu nedenle panellerin eğimi çok önemli bir faktör haline gelmektedir. Güneşin yörüngesi sabit güneş panellerine göre optimum açıdan saptığında enerji üretiminin verimliliği düşmeye başlamaktadır. Bu olgu, güneş panellerinin yönünü sürekli olarak ayarlamak ve güneş ışığına maruz kalmalarını optimize etmek için gelişmiş çözümlere olan ihtiyacı altını çizmektedir. Bu bağlamda, yaygın olarak güneş takip sistemleri olarak bilinen hareketli güneş enerjisi sistemleri, PV sistemlerinin performansını ve verimliliğini artırmak için devrim niteliğinde bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Güneş takip cihazları, gün boyunca güneşin hareketini takip etmek için güneş panellerini dinamik olarak yeniden konumlandırmak üzere tasarlanmıştır.

Bu sistemler iki ana kategoriye ayrılır: Tek eksenli izleyiciler ve çift eksenli izleyiciler. Tek eksenli izleyiciler güneşin yolunu takip etmek için tek bir eksen boyunca dönerken, çift eksenli izleyiciler panelleri iki eksen boyunca hareket ettirerek güneşin gökyüzündeki konumunu doğru bir şekilde takip ederek daha da karmaşık bir yaklaşım sunar.

Güneş takip sistemlerinin benimsenmesi, güneş enerjisinin sürdürülebilir bir şekilde entegre edilmesi açısından birçok avantaj sunmaktadır. Bu faydaları inceleyecek olursak,

- **Artan Enerji Üretimi:** Güneş takip sistemleri, sabit güneş panellerine kıyasla enerji üretimini önemli ölçüde artırma potansiyeline sahiptir.
- **Çevresel Faydalar:** Güneş takip sistemleri, enerji üretimini artırarak sera gazı emisyonlarının azaltılmasında önemli bir rol oynar. Daha fazla yenilenebilir enerji üretildikçe fosil yakıtlara olan bağımlılık azalarak daha temiz ve daha sürdürülebilir bir enerji ekosistemine katkıda bulunmaktadır.

Güneş takip sistemlerinin avantajının yanı sıra dezavantajları da söz konusudur. Bunları da inceleyecek olursak;

- **Daha Yüksek İlk Yatırım Maliyetleri:** Mobil güneş enerjisi sistemlerinin uygulanması, kullanılacak malzeme miktarlarının artışı sonrasında sabit güneş panellerinden daha yüksek ön maliyetlere neden olur. Bu maliyeti montaj esnasında kullanılan ilave çelik konstrüksiyon, dönmeyi sağlayan çark ve motor örnek verilebilir.
- **Artan Karmaşıklık:** Hareketli izleme sistemleri doğası gereği daha karmaşıktır ve birden fazla hareketli parçaya sahiptir, bu da sistemin karmaşıklığını artırır. Bu karmaşıklık sonucunda yüksek oranda bakım maliyetleri ve sistem arızaları açığa çıkmaktadır.
- **Azalan Güvenilirlik:** Güneş takip sistemlerinde hareketli bileşenlerin varlığı, sabit güneş panellerine kıyasla güvenilirliğin azalmasına neden olabilir. İzleme mekanizmalarındaki mekanik sorunlar veya arızalar sistemin performansını etkileyebilir.

Bu nedenle güneş takip sistemi kurma kararı, avantajlarının ve dezavantajlarının titizlikle değerlendirilmesini gerektirir. Güneş takip sistemleri, artan enerji üretiminin yüksek yatırım maliyetlerini karşılayabildiği güneş enerjisi santralleri için inkâr edilemez şekilde cazip bir seçenek sunarken, bunların tüm saha uygulamaları için en uygun seçim olmayabileceğini

kabul etmek çok önemlidir. Sabit ve takipli güneş enerjisi sistemleri arasındaki seçim, her bir projenin özel gereksinimleri, kısıtlamaları ve hedefleri dikkate alınarak yapılmalı ve bunun sürdürülebilirlik, verimlilik ve ekonomik uygulanabilirlik hedefleriyle uyumlu olması sağlanmalıdır.



## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu literatür taraması için sabit ve takipli güneş PV sistemlerinin potansiyel yararları ve dezavantajları hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır. Çalışmalar, belirli lokasyona ve iklim bölgesine bağlı olarak hem sabit hem de takipli sistemlerin güneş enerjisi santralleri için uygun seçenekler olabileceğini öne sürmektedir. Ancak izleme sistemleri, sabit sistemlere göre daha yüksek enerji üretimi ve uzun vadede daha düşük maliyetler de dahil olmak üzere bir dizi avantaj sunar.

Asiabanpour ve arkadaşları (2017), İran'daki sabit ve tek eksenli izlemeli güneş PV sistemlerinin ekonomik performansını karşılaştırmaktadır. İlk maliyetler, enerji üretimi ve bakım maliyetleri gibi faktörleri göz önünde bulundurarak iki sistemi değerlendirmek için bir maliyet-fayda analizi kullanmaktadır. Yazarlar, tek eksenli izleme sistemlerinin İran'daki sabit sistemlere göre %25'e kadar daha fazla enerji üretebildiğine değinmişlerdir. Çünkü takip sistemleri güneşin yolunu takip ederek güneş panellerinin güneş ışınlarına her zaman dik durmasını sağlamaktadır. Sonuç olarak takip sistemleri güneş paneli alanı başına daha fazla elektrik üretebilmektedir. Ayrıca, hareketli sistemlerde güneş panellerini hareket ettirmek için motorlar ve aktüatörler gibi ek bileşenlere ihtiyaç duyması ilave bakım ihtiyacını da beraberinde getirmektedir. Yazarlar, izleme sistemlerinin kurulum maliyetlerinin, sabit sistemlerin kurulum maliyetlerinden yaklaşık %20-30 daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca yazarlar, İran'da izleme sistemlerinin geri ödeme süresinin yaklaşık 5-7 yıl olduğunu bulmuşlardır. Makalede, sabit ve hareketli sistemlerin maliyet ve faydalarının ayrıntılı bir dökümünü sunmaktadır. Bu bilgi, farklı konumlarda ve iklim bölgelerinde izleme sistemlerinin ekonomik fizibilitesini değerlendirmek için kullanılabilir.

Marut, Srikasem ve Sumade'nin (2019) yaptığı araştırmada, güneş enerjisi fotovoltaik panellerden elde edilen enerji üzerine güneşi takip eden sistemlerle sabit paneller arasındaki kapsamlı bir karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. Bulgular, güneşi takip eden sistemlerin enerji üretimindeki avantajlarını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Araştırma, güneşi takip eden sistemlerin yıllık ortalama enerji verimliliğinde %15'lik bir artışın yanı sıra, günlük enerji üretiminde de %20'lik bir iyileşme sağladığını göstermektedir. Bu artış, panellerin gün boyunca güneş ışığına daha etkin bir şekilde hizalanması sayesinde elde edilmiştir. Bulgular,

güneşi takip eden sistemlerin enerji üretimindeki artışa rağmen, sabit panellere göre genellikle daha düşük karbon salınımına neden olduğunu göstermiştir. Bu durum, güneşi takip eden sistemlerin daha yüksek verimlilikleriyle elde edilen enerjinin, üretim ve kurulum süreçlerindeki ek karbon emisyonlarını telafi etmeye yettiğini göstermektedir. Sonuç olarak, Marut ve ekibinin çalışması, güneşi takip eden sistemlerin fotovoltaik enerji üretiminde hem performans hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sağladığını ortaya koymaktadır.

Piotrowski ve Farret'in makalesinde (2022), güneş takip topolojisine göre fotovoltaik (PV) panellerin kullanım ömrü boyunca bozulması ve performansındaki değişiklikleri tahmin etmek için bir metodoloji sunmaktadır. Yazarlar, hareketli ve sabit sistemlerin tipik konfigürasyonları tartışmak için Brezilya'da inşa edilen deneysel bir sistemin teknik ve ekonomik analizi kullanılmıştır. Hesaplamalı simülasyonlar OpenDSS, MATLAB ve Homer programlarında 25 yıl süreyle gerçekleştirilmektedir. Sonuçlar, hareketli sistemlerin kullanılmasının, simüle edilen sürenin sonunda biriken bozulmayı sabit topolojiye kıyasla %2,43'e kadar artırabildiğini göstermektedir. Ancak güneş takibi aynı zamanda yıllık elektrik üretimini de ortalama %20,87 arttırmaktadır. Bu durum güneş takibinin teknik ve ekonomik olarak mümkün olduğunu göstermektedir. Yazarlar ayrıca sabit PV paneller için en uygun eğim açısının, konumun enlemine ve güneş radyasyonu profiline bağlı olarak değiştiğini de bulmuşlardır. Enerji üretimini en üst düzeye çıkarmak için mevsimsel olarak ayarlanabilen eğim açısının kullanılmasını öneriyorlar. Ayrıca çalışma konumunda farklı güneş takip topolojileri için PV panellerin kullanım ömrü boyunca bozulmasını ve performansını tahmin etmek için makalede sunulan metodolojiyi de inceliyorlar.

Helwa, Bahgat, Shafee ve El Shenawy (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışma, farklı güneşi takip eden sistemlerin kullanımıyla elde edilebilecek maksimum toplanabilir güneş enerjisini incelemektedir. Çalışmanın ana bulguları, farklı güneşi takip eden sistemlerin güneş enerjisi toplama kapasitelerindeki önemli farklılıklara odaklanmaktadır. Araştırma, güneş takip sistemlerinin, sabit panellere kıyasla yıllık ortalama enerji verimliliğinde %10-15'lik bir artış sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte, panellerin güneş ışığına en iyi şekilde hizalanmasının, özellikle gün içindeki farklı ışık koşullarında, toplanabilir güneş enerjisi üzerinde belirgin etkileri vardır. Çalışma, gün içindeki enerji üretimindeki varyasyonları detaylı bir şekilde analiz ederek, güneşi takip eden sistemlerin özellikle gün batımı ve gün doğumu sırasında daha fazla enerji ürettiğini göstermektedir. Sonuç olarak, Helwa ve

diğerlerinin çalışması, farklı güneş takip eden sistemlerin güneş enerjisi toplama kapasitelerini karşılaştırarak, tasarım ve kullanım önerileri sunmaktadır.

Sawicka-Chudy, Sibiński, Cholewa ve Pawelek (2018), Polonya'nın Lodz kentindeki sabit ve güneş takipli fotovoltaik (PV) sistemlerin performansını araştırmaktadır. Yazarlar tarafından yaklaşık 25 yıllık bir süre boyunca iki sistemin enerji kazancını, yatırım maliyetlerini ve çevresel etkilerini karşılaştırmak için bir simülasyon modeli kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları, hareketli sisteminin sabit sisteme göre %25-30 daha fazla enerji ürettiğini göstermiştir, güneş takip sisteminin geri ödeme süresinin sistemin maliyetine ve elektrik tarifesine bağlı olarak 10-12 yıl olduğunu bulmuşlardır. Çalışmada ayrıca hareketli güneş paneli sisteminin sabit sisteme göre %25-30 daha düşük çevresel etkiye sahip olduğu da bulunulmuştur. Bunun nedeni, hareketli sistemin aynı miktarda güneş ışınımından daha fazla enerji üretmesi ve bu sayede geleneksel enerji üretimine olan ihtiyacın azalmasıdır. Yazarlar, hareketli sistemlerinin sabit sistemlere göre güneş enerjisi üretmenin daha verimli ve çevre dostu bir yolu olduğu sonucuna varmaktadır.

Demirdelen, Alıcı, Esenboğa ve Güldürek (2023), Akdeniz Bölgesi'nde güneş takip sistemlerinin kullanılabilirliğini araştırmış ve üç farklı sistemin performansını detaylı bir şekilde analiz etmiştir. Çalışmada sabit sistemler, tek eksenli güneş takip sistemleri ve çift eksenli güneş takip sistemleri karşılaştırılmıştır. Simülasyon ve deneysel veriler ışığında, tek eksenli ve çift eksenli takip sistemlerinin sabit sistemlere kıyasla enerji üretimini sırasıyla %20-30 ve %35-45 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Akdeniz ikliminin yüksek güneşlenme süresi ve yıllık ortalama 1600-2000 kWh/m<sup>2</sup> seviyesinde değişen güneş ışınımı, bu bölgede güneş takip sistemlerinin etkinliğini artırmaktadır. Ancak, gün içindeki radyasyon değişkenliği, maksimum verim için en uygun takip mekanizmasının belirlenmesini gerektirmektedir. Çalışmada, MATLAB tabanlı simülasyonlar ve saha ölçümleri kullanılarak sistemlerin enerji üretim kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca, her sistem için yatırım geri dönüş süresi (ROI), seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE) ve net bugünkü değer (NPV) gibi ekonomik parametreler değerlendirilmiştir. Ekonomik analizler, çift eksenli sistemlerin en yüksek enerji verimini sağlamakla birlikte, ilk yatırım maliyetinin sabit sistemlere kıyasla yaklaşık %50-70 daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşılık, tek eksenli sistemler, sabit sistemlere kıyasla görece düşük ek maliyetle önemli bir verim artışı sunduğundan, özellikle ROI süresi 6-8 yıl arasında değişen projeler için en uygun seçenek olarak öne çıkmaktadır. Çalışma, farklı sistemlerin toplam sahip olma

maliyeti (TCO) ve bakım gereksinimlerini de ele alarak, karar vericilere güneş takip sistemleri konusunda bütüncül bir bakış açısı sunmaktadır. Sonuç olarak, Demirdelen ve diğerleri tarafından yapılan bu çalışma, sayısal veriler ve yöntemsel analizlerle desteklenen kapsamlı bir değerlendirme sunmakta ve Akdeniz Bölgesi'nde güneş takip sistemlerinin uygulanabilirliği konusunda önemli bir rehber oluşturmaktadır. Bu bulgular, bölgesel iklim koşulları, yatırım bütçesi ve enerji ihtiyacı gibi faktörler doğrultusunda en uygun güneş takip sisteminin belirlenmesine katkı sağlamaktadır.

Dawoud ve Lim (2020) Malezya'da bulunan büyük ölçekli güneş enerjisi santrallerinde sabit ve tek eksenli izleyici fotovoltaik (PV) sistemlerinin performansını araştırmaktadır. Yazarlar, simülasyonlar aracılığıyla her iki sistemin enerji verimliliğini ve kapasite faktörünü karşılaştırarak, tek eksenli izleyici teknolojisinin uygulanmasının potansiyel faydalarını değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Yazarlar, Malezya'nın iklim koşulları altında sabit ve tek eksenli izleyici PV sistemlerinin performansını analiz etmek için simülasyonlar kullanmaktadır. Güneş ışınımı, sıcaklık ve rüzgâr hızı gibi mekâna özgü verileri içeren doğrulanmış bir PV simülasyon modeli kullanılmaktadır. Simülasyonlar, temsilci bir yıl için yapılmakta ve her iki sistem için yıllık enerji verimi ve kapasite faktörünün tahmin edilmesine imkân sağlamaktadır. Çalışmanın ana bulgusu, tek eksenli izleyici PV sistemlerinin yıllık enerji verimi açısından sabit sistemlere göre ortalama olarak %15,08 daha başarılı olduğudur. Artan enerji verimi, tek eksenli izleyici sistemler için daha yüksek bir kapasite faktörüne işaret etmekte ve kurulu PV kapasitesinin daha verimli bir şekilde kullanıldığını göstermektedir. Yazarlar, iki sistem arasındaki performans farkının çeşitli faktörler üzerindeki etkisini daha fazla incelemektedir. Tek eksenli izleyicilerin performans avantajının, yüksek ışınım periyotlarında ve güneş radyasyonunda önemli mevsimsel değişkenlik gösteren yerlerde daha belirgin olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, çalışma doğruluğunu sağlamak için doğru hava verileri ve sistem tasarım parametrelerinin önemini vurgulamaktadır. Çalışma, simülasyonlara dayanması ve ekonomik faktörleri dışarıda bırakması gibi bazı sınırlılıkları kabul etmektedir. Gelecek araştırma yönleri, simülasyon sonuçlarını doğrulamak için alan ölçümleri yapmak ve sabit sistemlere kıyasla tek eksenli izleyici sistemlerin maliyet etkinliğini değerlendirmek için teknik-ekonomik analizler gerçekleştirmeyi içerebilir. Bu çalışma, Malezya'daki büyük ölçekli güneş enerjisi santralleri bağlamında sabit ve tek eksenli izleyici PV sistemlerinin performans karşılaştırmasına değerli bir bakış sunmaktadır. Bulgular, tek eksenli izleyici teknolojisinin enerji verimliliğini ve kapasite faktörünü önemli ölçüde artırma potansiyelini göstermekte ve böylelikle bölgede

güneş enerjisi üretiminin verimliliğini ve üretkenliğini artırma için umut verici bir yaklaşım sunmaktadır.

Duffie ve Beckman (2013) çalışmalarında güneş takip sistemlerinin ve sabit eğimli fotovoltaik modüllerin özellikle yüksek enlem bölgelerindeki performansını incelemektedir. Yazarlar güneş takip sistemlerinin ve sabit eğimli fotovoltaik modüllerin yüksek enlem bölgelerinde güneş enerjisi yakalama etkinliğini değerlendirmeyi ve karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Bu iki teknolojinin bu bölgelerdeki verimliliği ve enerji üretimini analiz etmektedirler. Duffie ve Beckman, hem güneş takip sistemlerinin hem de sabit eğimli fotovoltaik modüllerin güneş enerjisi yakalama etkinliğini değerlendirmeye odaklanmaktadır. Bu sistemlerin yüksek enlem bölgelerinde farklı güneş açıları ve ışık koşulları altında nasıl performans gösterdiklerini araştırmakta, güneşin gün içindeki eğimini ve mevsimler boyunca değişen konumunu dikkate almaktadırlar. Çalışma, güneş takip sistemlerinin yüksek enlem bölgelerindeki performansını sabit eğimli fotovoltaik modüllerle karşılaştırmaktadır. Enerji verimi, kapasite faktörü ve genel etkinlik gibi parametreleri ele almaktadır. Analizlerinin sonuçları, güneş takip sistemlerinin yüksek enlem bölgelerindeki sabit eğimli fotovoltaik modüllere kıyasla performansını ortaya koymaktadır. Yazarlar, bu bölgelerde güneş enerjisi yakalama teknolojilerinin avantajlarını ve sınırlamalarını ele almaktadırlar. Ayrıca, güneş enerjisi yakalama verimliliğini optimize etme konusunda güneş takip teknolojisinin potansiyel faydalarını ve pratik sonuçlarını tartışmaktadırlar. Bulgulara göre, belirli bir enlemin üzerinde kesin bir değer belirtilmeden sabit eğimli sistemlerin daha avantajlı hale geldiği gözlemlenmiştir. Bu noktadan itibaren, sabit sistemlerin avantajlı hale gelmesi, güneş takip sistemlerinin performansındaki düşüş veya sabit sistemlerin daha uygun maliyet avantajları gibi faktörlere bağlı olabilir. Çalışma, enerji verimi, kapasite faktörü ve genel etkinlik gibi sayısal parametreler üzerinden güneş takip sistemlerini ve sabit eğimli fotovoltaik modülleri karşılaştırmıştır. Değerlendirmeler, belirli enlemlerde her iki sistem tipinin de performansının detaylı bir şekilde incelenmesini içermektedir. Araştırma, güneşin gün içindeki eğimi ve mevsimler boyunca değişen konumunu dikkate alarak karşılaştırma yapmıştır.

Saldamlı, Kaplan ve Tolun (2022) çalışmalarında güneş paneli performansının güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini ve ekonomikliğini belirlemede önemli bir faktör olduğu sonucuna varmışlardır. Bu makale, üç farklı şekilde tasarlanmış güneş panellerinin performansını karşılaştırarak, güneş paneli tasarımının performans üzerinde önemli bir etkisi olduğunu

göstermektedir. Monokristalin silikon panellerin, polikristalin silikon panellerden yaklaşık %10 daha yüksek performans sergilediğini göstermektedir. Hücre boyutu ve hücre aralığı da performansı önemli ölçüde etkilemektedir. 250 mm x 250 mm hücre boyutuna sahip paneller, 125 mm x 125 mm hücre boyutuna sahip panellerden yaklaşık %5 daha yüksek performans sergilemektedir. 100 mm hücre aralığına sahip paneller ise 150 mm hücre aralığına sahip panellerden yaklaşık %2 daha yüksek performans sergilemektedir. Bu bulgular, güneş paneli tasarımı için en uygun seçenekleri belirlemek için kullanılabilir. Örneğin, bu bulgular, monokristalin silikon panellerin, polikristalin silikon panellerden daha verimli olduğu için, daha yüksek verimlilik gerektiren uygulamalar için daha uygun olduğunu göstermektedir. Ayrıca, bu bulgular, 250 mm x 250 mm hücre boyutuna sahip panellerin, 125 mm x 125 mm hücre boyutuna sahip panellere kıyasla daha yüksek doluluk oranı (%fill factor) ve düşük kenar kayıpları nedeniyle daha verimli olduğunu ve dolayısıyla daha fazla güç çıkışı gerektiren uygulamalar için daha uygun olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, hücre aralığının azaltılması, panel yüzeyinde daha fazla aktif fotovoltaiik (PV) malzeme bulunmasını sağlayarak ışık emilimini artırabilir ve toplam güç üretimini olumlu yönde etkileyebilir. Hücreler arasındaki mesafenin küçülmesi, optik kayıpları azaltırken panelin doluluk oranını artırarak toplam enerji dönüşüm verimini yükseltmektedir. Ancak, hücreler arasındaki optimum mesafenin belirlenmesi, yalnızca ışık emilimi ile sınırlı olmayıp, ısı yönetimi, iç direnç (seri direnç kayıpları) ve gölgeleme etkileri gibi faktörleri de içermektedir. Hücreler arasındaki mesafenin fazla daraltılması, termal birikime ve sıcaklık artışına neden olarak panel verimini düşürmektedir. Ayrıca, hücreler arası bağlantıların sıkılaştırılması, elektrik akımının geçişi sırasında kayıplara neden olabilecek ek dirençler oluşturmaktadır. Bu bağlamda, yapılan analizler, 100 mm hücre aralığına sahip panellerin, 150 mm hücre aralığına sahip panellere kıyasla daha yüksek güç çıkışı sağlayabildiğini göstermektedir. Bu durum, daha kompakt PV modüllerinin, sınırlı alan gerektiren uygulamalar için daha uygun olabileceğini ortaya koymaktadır. Ancak, optimum hücre aralığının belirlenmesi için hem termal etkilerin hem de elektriksel kayıpların detaylı bir şekilde modellenmesi gerekmektedir.

Green, Emery, Hishikawa, Warta ve Dunlop (2017) makalesinde, güneş hücresi verimliliği alanındaki son gelişmeleri özetlemişlerdir. Makale, güneş hücresi verimliliğinin, 1954'te Bell Labs'ta geliştirilen ilk güneş hücresinin %6,4'lük verimliliğinden günümüzde %26,7'lik verimliliğe kadar önemli bir artışa işaret etmektedir. Makalenin bulguları, güneş hücresi verimliliğinin, aşağıdaki faktörler tarafından önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir:

- Hücree malzemesi: 2017 yılı itibariyle, monokristalin silikon hücrelerin verimliliği %26,7'ye, polikristalin silikon hücrelerin verimliliği ise %22,5'e ulaşmıştır. Bu, monokristalin silikon hücrelerin polikristalin silikon hücrelere göre yaklaşık %18 daha verimli olduğu anlamına gelmektedir.
- Hücree yapısı: Tandem güneş hücrelerinin verimliliği, 2017 yılı itibariyle %28'e ulaşmıştır. Bu, geleneksel tek katmanlı güneş hücrelerinin verimliliğinin yaklaşık %200 üzerindedir.
- Üretim yöntemleri: Yeni üretim yöntemleri, 2017 yılı itibariyle %25'ten fazla verimliliğe sahip güneş hücrelerinin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Bu, güneş hücresi verimliliğindeki ilerlemenin önemli bir göstergesidir.

Mellit ve Benghanem (2016) çalışması, farklı güneş PV teknolojilerini karşılaştırarak, sabit PV sistemlerinin takip sistemli PV sistemlerine göre %20-30 daha az maliyetli, ancak %10-20 daha az enerji üretken olduğunu göstermiştir. Çalışma, tek eksenli takip sistemli PV sistemlerinin iki eksenli takip sistemli PV sistemlerine göre %5-10 daha az maliyetli ve %5-10 daha az enerji üretken olduğunu da göstermiştir. Sabit PV sistemleri, takip sistemli PV sistemlerine göre %20-30 daha az maliyetlidir. Örneğin, 1 MW gücünde bir sabit PV sisteminin maliyeti, 1 MW gücünde bir takip sistemli PV sisteminin maliyetinden yaklaşık 200.000 USD daha azdır. Takip sistemli PV sistemleri, sabit PV sistemlerine göre %10-20 daha fazla enerji üretir. Örneğin, 1 MW gücünde bir sabit PV sistemi yılda yaklaşık 1.600.000 kWh enerji üretirken, 1 MW gücünde bir takip sistemli PV sistemi yılda yaklaşık 1.840.000 kWh enerji üretmektedir. Takip sisteminin tipi, takip sistemli PV sistemlerinin enerji üretimini etkilemektedir. Tek eksenli takip sistemli PV sistemleri, iki eksenli takip sistemli PV sistemlerine göre daha az maliyetlidir ve %5-10 daha az enerji üretir. Örneğin, 1 MW gücünde bir tek eksenli takip sistemli PV sistemi yılda yaklaşık 1.720.000 kWh enerji üretirken, 1 MW gücünde bir iki eksenli takip sistemli PV sistemi yılda yaklaşık 1.840.000 kWh enerji üretmektedir.

Patel (2016) çalışmasında, sabit ve takip sistemli güneş panellerinin performansını karşılaştırmaktadır. Çalışma, 2012-2014 yılları arasında Hindistan'ın Gujarat eyaletinde bulunan bir bölgede gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, sabit ve iki eksenli takip sistemli iki adet 10 kWp'lik güneş paneli sistemi kullanılmıştır. Sistemler, bir yıl boyunca izlenerek performansları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın bulgularına göre, takip sistemli güneş paneli sistemi, sabit güneş paneli sistemine göre %27 daha fazla enerji üretmiştir. Takip sistemli

sistemde, günlük enerji üretimi sabit sistemden %35 daha fazla, yıllık enerji üretimi ise %27 daha fazladır. Takip sistemli sistemin verimliliği de sabit sistemden %0,2 daha yüksektir. Çalışmanın bulguları, takip sistemli güneş paneli sistemlerinin, sabit sistemlere göre daha fazla enerji ürettiğini göstermektedir. Bu da takip sistemli sistemlerin daha ekonomik ve çevre dostu bir seçenek olduğunu göstermektedir.

Reddy ve Rao (2015) tarafından yayınlanan makalede, güneş fotovoltaik (PV) sistemlerinde maksimum güç noktası izleme (MPPT) tekniklerinin bir incelemesini sunmaktadır. Makale, MPPT tekniklerinin temellerini, sınıflandırmasını ve uygulamalarını tartışmaktadır. Makalenin bulgularına göre, MPPT teknikleri, PV sistemlerinin performansını önemli ölçüde iyileştirdiği gözlemlenmektedir. Örneğin, sabit panellerde, MPPT kullanan sistemler, kullanmayan sistemlere göre %10-20 daha fazla güç üretebilmektedir. Takip sistemlerinde de MPPT kullanan sistemler, kullanmayan sistemlere göre %20-30 daha fazla güç üretebilmektedir. Makalede MPPT tekniklerinin seçimini etkileyen çeşitli faktörleri de tartışılmaktadır. Bu faktörler arasında, PV sisteminin boyutu, kurulum maliyeti, doğruluk gereksinimleri ve çevresel koşullar yer alır. Sayısal sonuçlar açısından, makale, aşağıdaki MPPT tekniklerinin performansını karşılaştırmaktadır:

- Voltaj-akım (V-I) eğrisi taraması: Bu teknik, PV sisteminin V-I eğrisini tarayarak maksimum güç noktasını belirlenmektedir.
- Diferansiyel gerilim ( $dV/dt$ ): Bu teknik, PV sisteminin  $dV/dt$  değerini izleyerek maksimum güç noktasını belirlenmektedir.
- Diferansiyel akım ( $dI/dt$ ): Bu teknik, PV sisteminin  $dI/dt$  değerini izleyerek maksimum güç noktasını belirlenmektedir.
- Parçacık optimizasyonu (PSO): Bu teknik, bir partikül optimizasyon algoritması kullanarak maksimum güç noktasını belirlenmektedir.

V-I eğrisi taraması, en yaygın kullanılan MPPT tekniğidir. Ancak, bu teknik, yavaş bir izleme hızı ve düşük doğruluk ile karakterize edilir. Diferansiyel gerilim ( $dV/dt$ ) ve diferansiyel akım ( $dI/dt$ ) teknikleri, daha hızlı izleme hızları ve daha yüksek doğruluklar ile karakterize edilir. Ancak, bu teknikler, daha karmaşık kontrol algoritmaları gerektirir. Parçacık optimizasyonu (PSO), en doğru MPPT tekniğidir. Ancak, bu teknik, en karmaşık kontrol algoritmasını gerektirir. Sonuç olarak, güneş PV sistemlerinde MPPT tekniklerinin önemli bir rol oynadığını göstermektedir. MPPT tekniği seçimi, PV sisteminin boyutu,

kurulum maliyeti, doğruluk gereksinimleri ve çevresel koşullar gibi çeşitli faktörlere bağlı olduğu sonucuna varılmaktadır.

Hsieh (2012), Tayvan'ın Taichung şehrinde sabit ve takip sistemli güneş panel sistemlerinin performanslarını karşılaştırmıştır. Çalışmada, sabit ve tek eksenli takip sistemli iki güneş panel sistemi kurulmuştur. Sabit sistem, panelleri 30°'lik bir açıyla güneşe sabitleyen bir montaj sistemine sahiptir. Takip sistemi ise, panelleri güneş ışınlarının maksimum açısına uyacak şekilde ayarlayan bir mekanizmaya sahiptir. Sistemler, bir yıl boyunca gözlemlenmiş ve üretimleri ölçülmüştür. Gözlemler sonucunda, takip sisteminin sabit sisteme göre %20 daha fazla elektrik ürettiği bulunmuştur. Takip sisteminin yıllık ortalama üretim değeri 200 kWh/m<sup>2</sup> iken, sabit sistemin yıllık ortalama üretim değeri 160 kWh/m<sup>2</sup> olmuştur. Çalışmada, takip sisteminin sabit sisteme göre daha yüksek verim sağladığı, özellikle güneşin en yüksek açıda olduğu öğle saatlerinde daha belirgin olduğu bulunmuştur. Örneğin, Temmuz ayında takip sistemi öğle saatlerinde 37.5 kWh/m<sup>2</sup> elektrik üretirken, sabit sistem 32.5 kWh/m<sup>2</sup> elektrik üretmiştir.

Reddy ve diğerlerinin (2015) çalışmasında, tek ve çift eksenli güneş takip sistemi üzerine bir derleme niteliği taşımaktadır. Çalışmanın bulguları, takip sistemlerinin güneş panellerinin enerji üretimini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir. Tek eksenli takip sistemleri, çift eksenli takip sistemlerine göre daha basit ve daha az maliyetlidir, ancak ürettikleri enerji miktarı daha düşüktür. Çift eksenli takip sistemleri daha karmaşık ve pahalıdır, ancak ürettikleri enerji miktarı tek eksenli takip sistemlerinden daha yüksektir.

- Tek eksenli takip sistemleri, sabit panellere kıyasla %10 ila %30 daha fazla enerji üretebilir. Bu, takip sistemlerinin güneş enerjisinden en iyi şekilde yararlanmak için önemli bir araç olduğunu göstermektedir.
- Çift eksenli takip sistemleri, sabit panellere kıyasla %20 ila %40 daha fazla enerji üretebilir. Bu, çift eksenli takip sistemlerinin tek eksenli takip sistemlerinden daha verimli olduğunu göstermektedir.
- Tek eksenli takip sistemlerinin maliyeti, sabit panellerin maliyetinin yaklaşık %10 ila %20'sidir. Bu, tek eksenli takip sistemlerinin sabit panellere göre daha uygun fiyatlı olduğunu göstermektedir.

- Çift eksenli takip sistemlerinin maliyeti, sabit panellerin maliyetinin yaklaşık %20 ila %50'sidir. Bu, çift eksenli takip sistemlerinin sabit panellere göre daha pahalı olduğunu göstermektedir.

Castaner ve Silvestre (2006) çalışmalarında, farklı takip stratejileriyle güneş fotovoltaik sistemlerinin enerji verimliliğini değerlendirmektedir. Bu çalışma, güneş fotovoltaik sistemlerinin enerji üretiminde farklı takip stratejilerinin etkilerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu sistemin denenmesi, İspanya'nın Barcelona kentinde gerçekleştirilmiştir. Bu konum, yıllık ortalama 2500 kWh/m<sup>2</sup> güneş ışınımına sahiptir. Çalışmada kullanılan PV modülü monokristal silikon seçilmiştir. Modüllerin açık devre gerilimi 23,0 V, kısa devre akımı 8,0 A ve verimliliği de %15 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada güneş ışınımının yönünü ve şiddetini takip etmek için iki eksenli güneş takip sistemi kullanılmıştır. Takip sistemi, güneş ışınımını her zaman panellere dik olacak şekilde ayarlamak için bir motor ve bir enkoder kullanmaktadır. Sabit kurulumu sahip olan PV sistemleri yıllık ortalama 1000 kWh enerji üretmektedir. Güneş takip sistemi kullanan PV sistemi ise yıllık ortalama 1100 kWh enerji üretmektedir. Bu, izleme sisteminin enerji verimini %10 artırdığını göstermektedir. Yıllık aylık enerji verimi: İzleme sisteminin enerji verimi artışı, yılın her ayında gözlemlenmektedir. Örneğin, Mayıs ayında sabit kurulumu sahip PV sistemi 130 kWh enerji üretirken, güneş takip sistemi kullanan PV sistemi 143 kWh enerji üretmektedir. Bu, izleme sisteminin enerji verimini %10,7 artırdığını göstermektedir. Kullanılan izleme sistemi sayesinde, enerji verimi artışı günün her saatinde gözlemlenmektedir. Örneğin, öğle saatlerinde sabit kurulumu sahip PV sistemi 30 kWh enerji üretirken, güneş takip sistemi kullanan PV sistemi 33 kWh enerji üretmektedir. Bu, izleme sisteminin enerji verimini günlük yaklaşık olarak %10 artırdığını göstermektedir.

Islam (2014), güneş enerjisi sistemlerinin ekonomik analizi ve çevresel etkilerinin detaylı bir incelemesini sunmaktadır. Çalışma, güneş enerjisi sistemlerinin ekonomik değerlendirmesi ve çevresel etkileri konusunda önemli bulgulara ulaşmıştır. Sabit güneş panel sistemlerinin maliyeti, takip sistemli güneş panel sistemlerine göre daha düşüktür. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nde, sabit güneş panel sistemlerinin maliyeti, takip sistemli güneş panel sistemlerine göre yaklaşık %20 daha düşüktür. Sabit güneş panel sistemlerinin maliyeti, kurulum yöntemine, kullanılan ekipmana ve coğrafi konuma bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, çatılara monte edilen sabit güneş panel sistemleri, zemine monte edilen sabit güneş panel sistemlerinden daha düşük maliyetlidir. Güneş enerjisi

sistemlerinin maliyeti, teknolojik gelişmelerle birlikte azalmaktadır. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nde, güneş panellerinin maliyeti, 2009'dan 2014'e kadar yaklaşık %70 oranında azalmıştır. Güneş enerjisi sistemlerinin çevresel etkileri, fosil yakıtlara dayalı enerji sistemlerine göre çok daha düşüktür. Örneğin, güneş enerjisi sistemleri, fosil yakıtlara dayalı enerji sistemlerine göre yaklaşık %90 daha az sera gazı emisyonuna neden olmaktadır.

Antonanzas, Ibero ve Quinn (2019), Portekiz'in güneyinde, 25 yıllık bir hizmet ömrü ve yıllık 1500 kWh/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu ile bir PV sisteminin yaşam döngüsü analizini (LCA) gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın bulguları, tek eksenli takip sistemlerinin sabit sistemlere göre daha az çevresel etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Tek eksenli takip sistemleri, sabit sistemlere göre %17 daha az sera gazı emisyonu, %13 daha az su kullanımı ve %12 daha az atık üretmektedir. Bu çevresel iyileşme parametrelerine, her iki sistemin yıllık enerji üretimleri dikkate alınarak birim enerji başına (kWh) düşen çevresel etkilerin karşılaştırılması yoluyla ulaşılmıştır. Örneğin, sabit sistemlerin yıllık 25 GWh, tek eksenli sistemlerin ise 28 GWh enerji ürettiği varsayıldığında, birim enerji başına sera gazı emisyonları, su tüketimi ve atık miktarları hesaplanmıştır. Sabit sistemler toplamda 17.200 kg CO<sub>2e</sub> emisyon üretirken, tek eksenli takip sistemleri 14.500 kg CO<sub>2e</sub> emisyon üretmektedir. Su kullanımı sabit sistemlerde 1.200 m<sup>3</sup>, tek eksenli sistemlerde ise 1.000 m<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. Atık üretimi ise sabit sistemlerde 25 ton, tek eksenli sistemlerde 22 ton olarak belirlenmiştir. Bu farklar, takip sistemlerinin güneş radyasyonunu daha verimli kullanarak daha yüksek enerji üretmeleri sayesinde oluşan üretim başına düşen çevresel etkinin azalmasından kaynaklanmaktadır.

Jee, Noh, Kim ve Lee (2022) çalışmalarında sabit ve takip sistemli yüzer güneş panellerinin performansını karşılaştırmaktadır. Çalışmada, her iki sistem de aynı yere kurulmuştur ve her biri 27° eğimli beş adet 310 W kristal silikon fotovoltaik modül ile donatılmıştır. Yıllık enerji verimi: Sabit sistemli panellerin yıllık enerji verimi %13,5 iken, takip sistemli panellerin yıllık enerji verimi %15,2 olarak bulunmuştur. Bu da, takip sistemli panellerin yıllık 1,7 kW/m<sup>2</sup> daha fazla enerji ürettiği anlamına gelmektedir. Günlük enerji verimi: Takip sistemli paneller, gün boyunca sabit sistemli panellere göre daha fazla güneş ışığı almaktadır. Bu nedenle, takip sistemli panellerin günlük enerji verimi, sabit sistemli panellerden ortalama %12 daha yüksektir. Eğim açısı: Takip sistemli paneller, güneşin konumuna göre eğim açısını değiştirerek güneş ışığından daha fazla yararlanmaktadır. Makalede, takip sistemli panellerin eğim açısının %10 artırılmasının, yıllık enerji verimini %0,8 oranında

artırabileceği bulunmuştur. Enerji verimliliği: Takip sistemli paneller, sabit sistemli panellere göre daha yüksek bir enerji verimliliğine sahiptir. Makalede, takip sistemli panellerin enerji verimliliğinin, sabit sistemli panellere göre ortalama %10 daha yüksek olduğu bulunmuştur.

Yukarıdaki incelemelere göre güneş enerjisi santrallerindeki sabit ve hareketli sistemlerin analizine ilişkin birtakım çıkarımları mevcuttur.

- Takip sistemlerinin enerji üretimi ve ekonomi açısından önemli faydalar sağlayabileceğini göstermektedir.
- Çalışmalar bir güneş PV sistemi seçerken belirli konumu ve iklim bölgesini dikkate almanın önemini vurgulamaktadır.
- Sabit ve hareketli güneş PV sistemlerinin performansını tahmin etmek için daha iyi modeller geliştirmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğunu öne sürmektedir.

### 3. GÜNEŞ ENERJİSİ

Güneş ışınları dünya atmosferinden geçerken bir kısmı hava molekülleri tarafından emilir veya su buharı, aerosoller ve bulutlara saçılır. Dünya yüzeyine doğrudan ulaşan güneş ışınımına doğrudan güneş radyasyonu denir. Nasıl ki dünya üzerindeki yaşamın birincil kaynağı güneş ise, her türlü enerji de doğrudan veya dolaylı olarak güneş enerjisine bağlıdır. Güneş enerjisi bilinen en eski birincil enerji kaynağıdır, dünya çapında temiz, yenilenebilir ve bol miktarda bulunmaktadır (Enerji Verimliliği ve Yenilenebilir Enerji, 2024). Günümüzde fosil yakıtların enerji amacıyla yaygın olarak kullanılması nedeniyle küresel ısınma ve kirlilik dünya çapında hemen hemen tüm canlıları etkileyecek düzeye ulaşmıştır. Bu amaçla günlük yaşamda ve sanayide elektrik enerjisinin çevreye en az zarar verecek şekilde üretilmesi, iletilmesi ve tüketilmesi çözülmesi gereken en önemli konulardan biri haline gelmiştir.

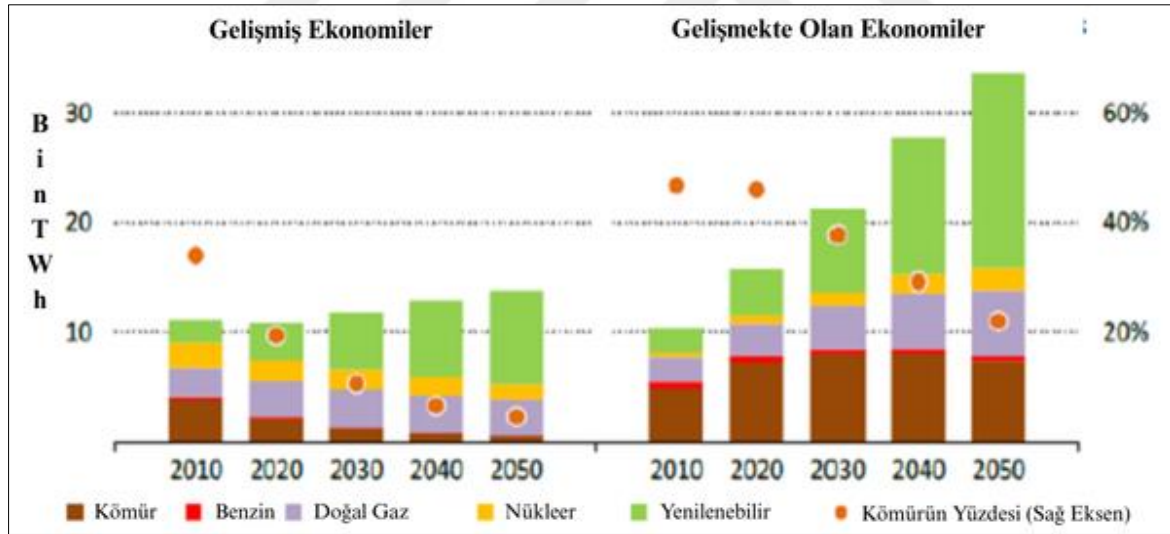
Güneş enerjisinden elektrik üretimi elde edilmesi için, doğrudan ve dolaylı yöntemlerle başvurulmaktadır. Fotovoltaik çeviriciler, güneş enerjisinden doğrudan elektrik enerjisinin elde edilmesini sağlayan sistemlerdir ve bu süreç “doğrudan elektrik üretimi” olarak tanımlanır. Öte yandan, güneş ısısının kullanılarak buhar üretimiyle elektrik elde edilmesi ise “dolaylı elektrik üretimi” olarak ifade edilmektedir. Son yıllarda yaygınlaşan fotovoltaik panellerin, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemler olarak dikkat çekmektedir (Emre, 2023).

#### 3.1. Enerji Kaynaklarının Değerlendirilmesi

Enerji kavramının gelişimine baktığımızda öncelikle 17. yüzyıldaki bir düşünce akımının sonucu olarak açığa çıkmıştır. Ardından bilim insanlarının bilinmezlikleri çözme istekleri üzerine ilerlemeler kaydedilmiştir. Nüfusun artması sonucunda giderek gelişim gösteren teknoloji, toplumsal refah düzeyinin iyileşmesi ve tüm dünyada ve Türkiye’de enerjiye olan talebi giderek artırmaktadır. Bu talebi karşılamak ve sınırlı rezervlere sahip yenilenemeyen enerji kaynaklarının planlı kullanımını sağlamak amacıyla dünyada ve Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı artmıştır. Termodinamiğin kanunlarından enerjinin korunumu kanunu birçok fizik teorisinde geçerliliğini korumaktadır. Dolayısıyla enerji yoktan yaratılamaz, var olan şeyleri yok edemez, ancak enerji kendi değişim ve

dönüşümlerini yaratabilir. Enerji kinetik enerji, potansiyel enerji, kimyasal, termal, elektriksel, mekanik, manyetik, nükleer, ses, ışık gibi birçok biçimde olabilir. Günümüzde kullanılmakta olan enerjinin büyük bir kısmı birincil kaynaklardan gelmektedir. Dünyadaki enerji kaynaklarını değerlendirirken birçok farklı kriterlerin dikkate alınması gerekmektedir. Enerji teknolojilerini değerlendirirken ulusal yapıya ilişkin kriterlerin, teknik standartların, ekonomik kriterlerin ve sosyo ekonomik kriterlerin teker teker incelenmesi gerekmektedir.

Ülkemizin enerji ihtiyacını sürdürülebilir bir şekilde karşılayabilmesi için, hangi enerji kaynaklarının bu talebi karşılayacağına dair kapsamlı bir değerlendirme yapılması ve bu doğrultuda adımlar atılması gerekmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın raporunda yer alan Şekil 3.1'de gelişmekte olan ve gelişmiş ülkelerde elektrik üretiminde kullanılan enerji kaynaklarının dağılımını göstermektedir. Bu Şekilde, 2010-2050 yılları arasında her iki ekonomik grup için yenilenebilir enerji kullanımındaki belirgin artış dikkat çekmektedir (International Energy Agency, 2023).



Şekil 3.1. Dünya'da enerjinin genel durumu (International Energy Agency, 2023)

Dünyadaki enerji kaynaklarını değerlendirirken birçok farklı kriterlerin dikkate alınması gerekmektedir. Enerji teknolojilerini değerlendirirken ulusal yapıya ilişkin kriterlerin, teknik standartların, ekonomik kriterlerin ve sosyo ekonomik kriterlerin teker teker incelenmesi gerekmektedir.

Ülkemizin enerji sorunu yaşamaması için enerji ihtiyacının hangi kaynakların karşılayabileceğinin tespit edilmesi ve buna göre hareket edilmesi gerekmektedir. Enerji politikasında acelecilik ve karmaşanın önlenip, planlı bir enerji politikasının oluşturup uygulanması gerekmektedir

Çizelge 3.1’de bu kriterler, doğrudan veya dolaylı olarak ilgili olduğu düşünülen birçok açıklama unsuru da verilmiştir.

Çizelge 3.1. Enerji değerlendirme kriterleri

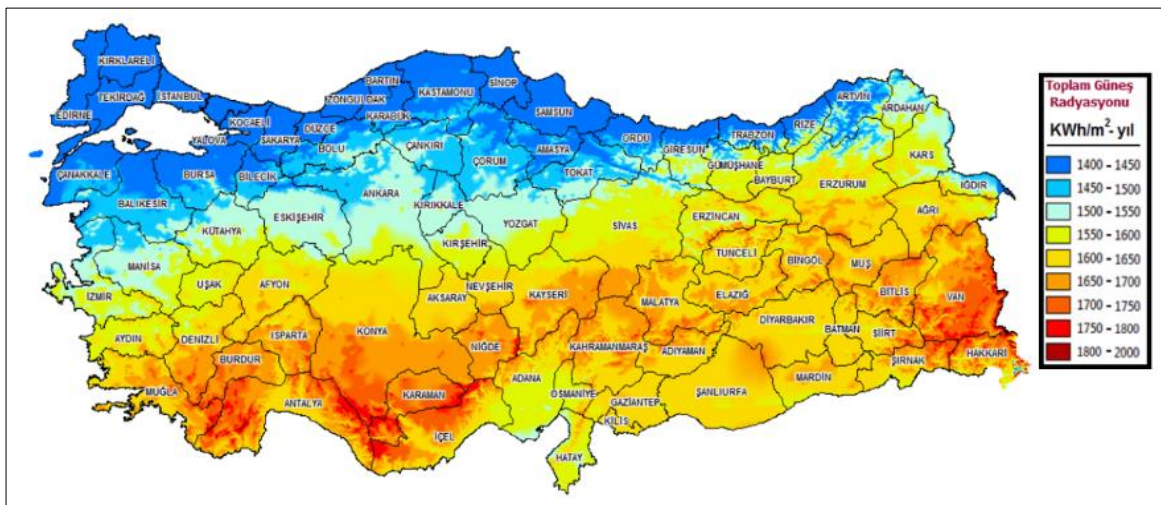
KRİTERLER	AÇIKLAMA
Ülke yapısına ilişkin kriterler	Doğal kaynakların kullanımı Nüfus dağılımı ve uyum sağlama İklim ve coğrafi koşullara uyum sağlama Ulusal hedeflere uyum sağlama
Teknolojik kriterler	Enerji ihtiyacının karşılanmasına katkı Talep dağılımı ve uyum sağlama Teknolojik gelişmişlik düzeyi Teknoloji riski
Ekonomik kriterler	Enerjinin maliyet Maddi ihtiyaç Dış güçlere olan bağımlılık Yeni yatırımların teşvik edilmesi
Sosyo-ekonomik kriterler	Yurt içi istihdam fırsatlarını arttırılması Halk sağlığı üzerindeki etkisi Çevreye olan etkisi Kültürel yapılara etkisi

### 3.2. Türkiye ve Kırıkkale’nin Güneş Enerji Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Türkiye, fosil enerji kaynakları açısından sınırlı rezerve sahip olmasına karşın, yenilenebilir enerji kaynakları açısından oldukça elverişli bir coğrafi konumda bulunmaktadır. Ülkedeki fosil yakıt rezervleri, özellikle petrol, doğalgaz ve taşkömürü, toplam enerji talebini karşılamada yetersiz olup, bu nedenle büyük ölçüde dışa bağımlı bir enerji politikası

izlenmektedir. 2022 yılı itibarıyla Türkiye'nin toplam birincil enerji arzının yaklaşık %70'i ithal kaynaklardan sağlanmaktadır. (Türkiye İstatistik Kurumu, 2022). Enerji ithalatı, Türkiye'nin cari işlemler açığının önemli bir bileşenidir. 2013-2021 yılları arasında enerji ithalatının milli gelire oranı ortalama %5 civarında seyrederken, 2022 yılında bu oran enerji fiyatlarındaki artışla birlikte %11'e yükselmiştir (Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası, 2022). Türkiye'nin enerji ithalatının büyük kısmını doğalgaz ve petrol oluşturmaktadır. 2023 yılı itibarıyla, enerji ithalatı faturasında bir azalma bekleniyor ve enerji fiyatlarındaki düşüş nedeniyle, ithalatın %26,4 oranında azalarak 71 milyar dolara gerilemesi öngörülmektedir. (T.C. Hazine ve Maliye Bakanlığı, 2023). Öte yandan, 2025 yılına kadar Türkiye'nin enerji ithalatındaki dışa bağımlılık oranının yaklaşık %65'e gerilemesi beklenmektedir. Bu düşüş, özellikle yenilenebilir enerji yatırımlarının artması ve yerli enerji üretiminin güçlenmesi ile sağlanacaktır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş, rüzgâr, hidroelektrik) payı 2025 yılı itibarıyla toplam enerji üretiminin %40'ına yaklaşması hedeflenmektedir. Bu gelişmeler, Türkiye'nin enerji arz güvenliğini artırarak dışa bağımlılığını azaltmak adına kritik öneme sahiptir.

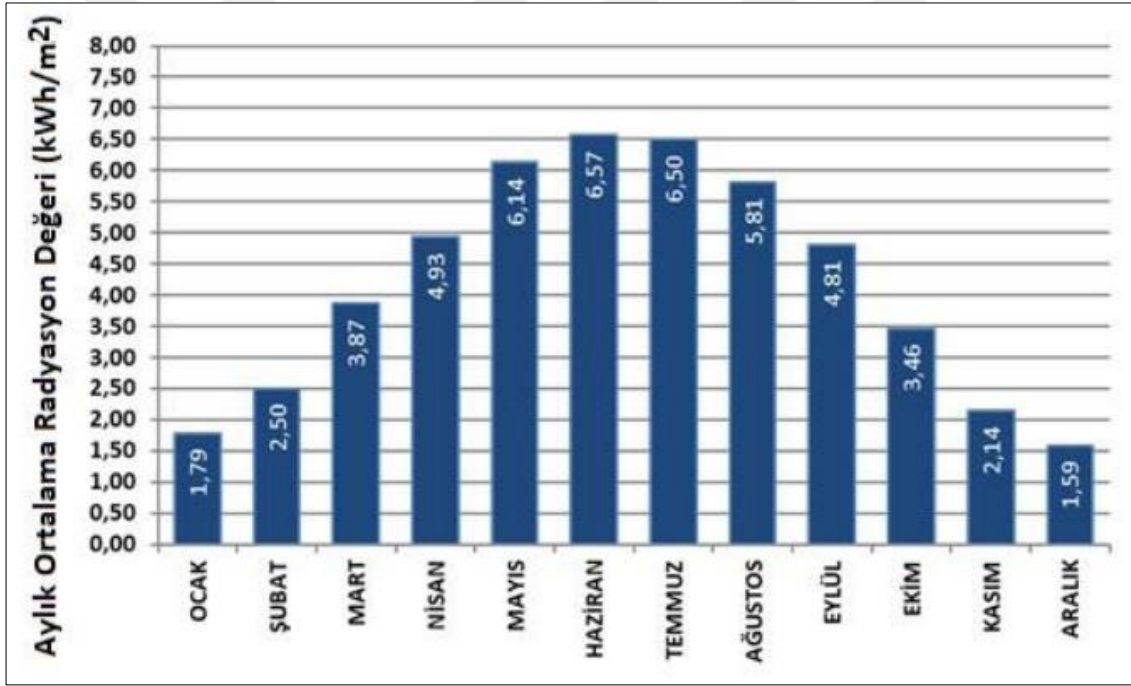
Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanmış olan, Şekil 3.2'deki Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA)'ya göre Türkiye'nin toplamdaki güneşlenme süresinin 2.741 saat olarak gösterilmiştir. Yıllık yaklaşık ışın miktarı ise 1.527,46 kWh/m<sup>2</sup> değerinde hesap edilmiştir.



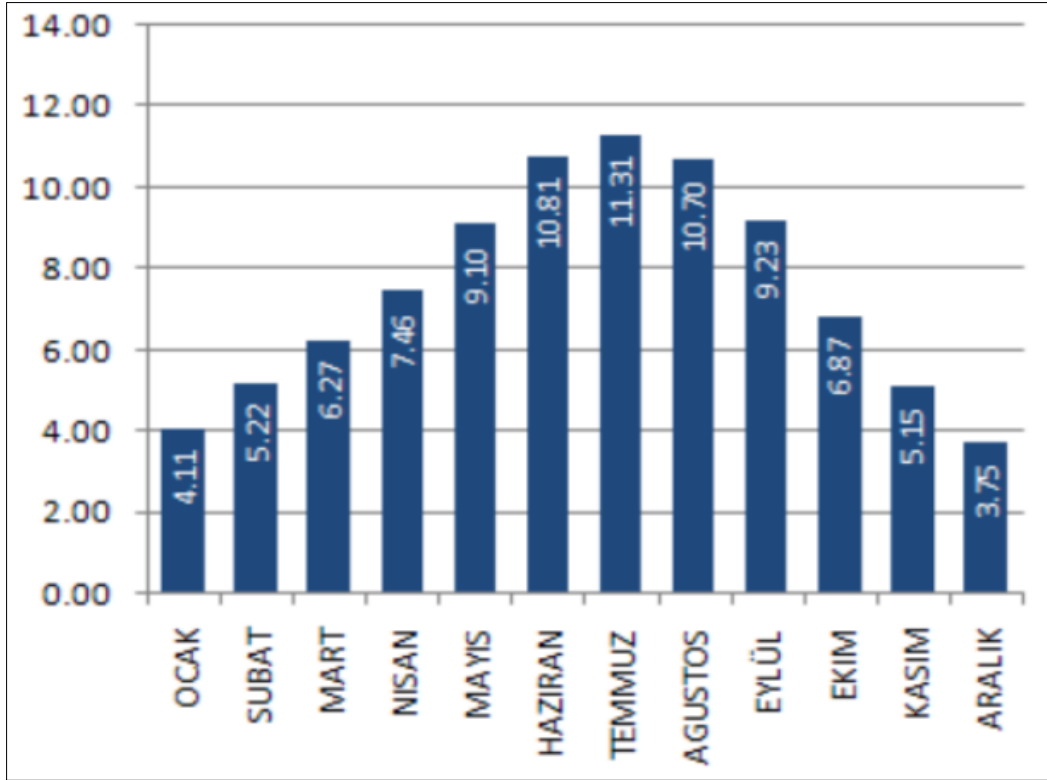
Şekil 3.2. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası (GEPA, 2024)

Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası verileri baz aldığımızda, elde edilen sonuçlar neticesinde ülkemizin kuzey enlemlerinde kalan Karadeniz ve Marmara Bölgesine dahil olan şehirlerde yıllık ortalama güneş radyasyon değeri 1400 kWh/m<sup>2</sup> değerini bulmaktadır. Güney enlemlerinde kalan şehirlerinde ise güneş radyasyon değeri 1800 kWh/m<sup>2</sup> ve üzeri olduğu çıkarımı elde edilmektedir.

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM) verilerinde bakılarak, Türkiye’deki aylara göre düzenlenmiş küresel çaptaki radyasyonun değerleri Şekil 3.3 ve Türkiye’ye ait güneşlenme süresi de Şekil 3.4’teki Şekillerde gösterilmektedir. (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024)



Şekil 3.3. Dünya’da enerjinin genel durumu (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024)



Şekil 3.4. Türkiye'ye ait güneşlenme süresi (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024)

2024 Ocak ayında, Türkiye'nin toplam kurulu gücü 107.041 MW'a ulaşırken, güneş enerjisine ait toplam kurulu gücü de 11.707 MW değerine ulaşmıştır. GES'lere ait olan bu güç değerlerinden, lisanssız GES kurulu gücü 2024 Ocak ayında 10.043 MW'a ulaşırken, lisanslı GES gücü 1.665 MW seviyesine ilerlemiştir (TEİAŞ, 2024).

Türkiye'nin 2015 yılına ait fotovoltaik enerji ve güneşlenme potansiyelini Arslan (2015)'in tez bulguları kullanılarak, Çizelge 3.2'de coğrafi bölge bazında ve Çizelge 3.3'te ay bazında ortalaması gösterilmiştir.

Çizelge 3.2, Türkiye'nin farklı coğrafi bölgelerindeki toplam güneş enerjisi miktarını ve toplam güneşlenme süresini göstermektedir. Güney Doğu Anadolu Bölgesi, yıllık 1460 kWh/m<sup>2</sup> güneş enerjisi miktarı ve 2993 saat güneşlenme süresi ile en yüksek değerlere sahiptir. Karadeniz Bölgesi ise 1120 kWh/m<sup>2</sup> güneş enerjisi miktarı ve 1971 saat güneşlenme süresi ile en düşük değerlere sahiptir. Bu veriler, Türkiye'nin farklı bölgelerindeki güneş enerjisi potansiyelini ve güneşlenme sürelerini karşılaştırmak için kullanılabilir.

Çizelge 3.2. Türkiye'deki bölgelerin fotovoltaik enerji potansiyeli (Arslan, 2015)

Coğrafi Bölge	Toplam Güneş Enerjisi Miktarı (kWh/m <sup>2</sup> -yıl)	Toplam Güneşlenme Süresi (Saat/yıl)
Güney Doğu Anadolu Bölgesi	1460	2993
Akdeniz Bölgesi	1390	2956
Doğu Anadolu Bölgesi	1365	2664
İç Anadolu Bölgesi	1314	2628
Ege Bölgesi	1304	2738
Marmara Bölgesi	1168	2409
Karadeniz Bölgesi	1120	1971

Çizelge 3.3'e baktığımızda her ay için saat bazında değerleri ve toplam sonucu göstermektedir.

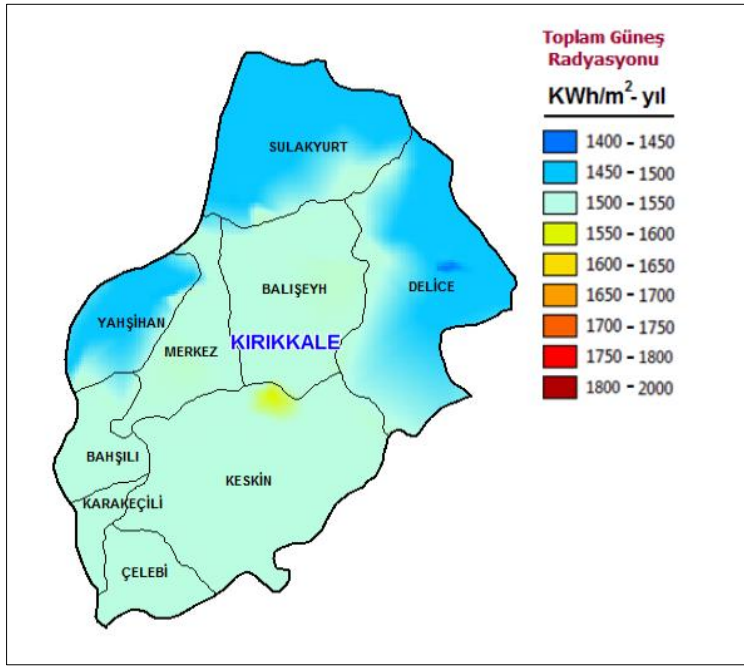
Ocak ayında 106 saat ile başlayan değerler, temmuz ayında 345 saate kadar yükselmiş ve aralık ayında 100 saat ile sona ermiştir. Toplamda, yıllık 2583 saatlik bir değer elde edilmiştir. Bu Çizelge, aylık ortalama değerlerin yanı sıra, yıl boyunca çalışma saatlerinin nasıl değiştiğini göstermektedir.

Çizelge 3.3. Türkiye'nin ay bazında ortalama güneşlenme potansiyeli (Arslan, 2015)

Ay	Değer (saat/ay)
Ocak	106
Şubat	124
Mart	175
Nisan	198
Mayıs	272
Haziran	319
Temmuz	345
Ağustos	327
Eylül	268
Ekim	205
Kasım	143
Aralık	100
Toplam	2583

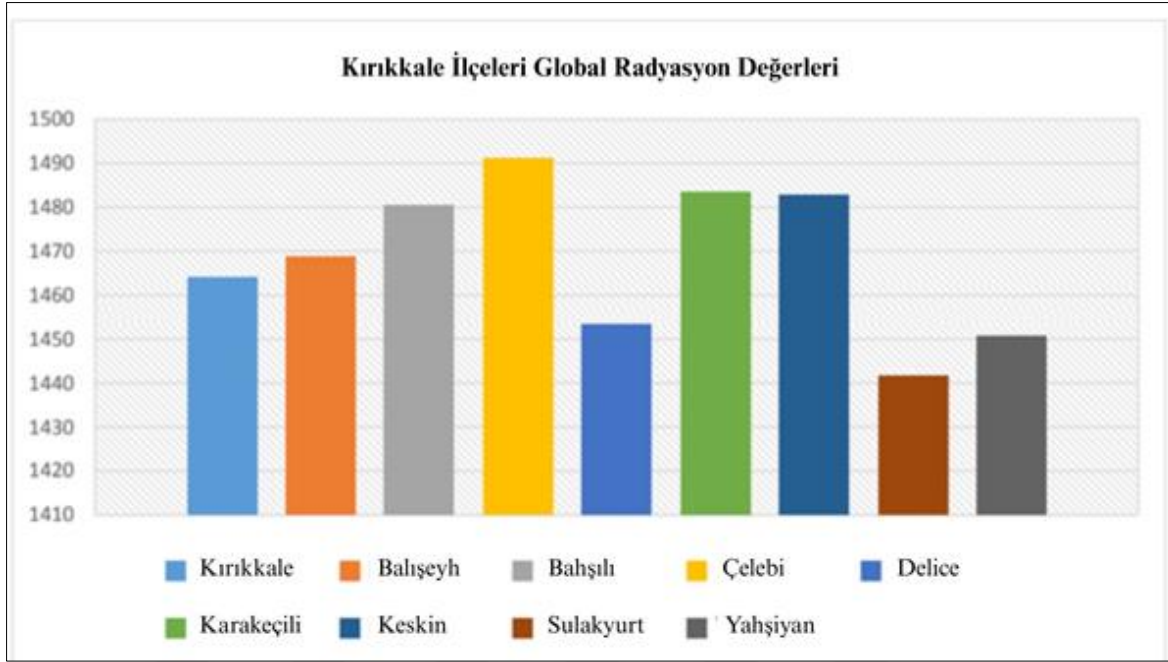
### Kırıkkale İli güneş enerjisi potansiyeli

Bu tez kapsamında, PVSYST yazılımında Kırıkkale ili için güneş enerjisi santral kurulumu ve kurulum sonucu elde edilen veri değerlerinin tahminlenmesi incelenmiştir. Bu kapsamda GEPA tarafından paylaşılan verilere bakılarak, Kırıkkale'nin güneş enerjisi potansiyeli Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Kırıkkale, ortalama 1470 kWh/m<sup>2</sup>'lik güneş radyasyonu değeriyle düşük potansiyele sahip olsa da Türkiye ortalamasının üzerinde değerdedir (GEPA, 2024).



Şekil 3.5. Kırıkkale ili güneş radyasyonu (GEPA,2024)

Şekil 3.6'da Kırıkkale ilçelerinin global radyasyon değerlerini göstermektedir. Bu veriler, Kırıkkale'nin farklı ilçelerindeki güneş enerjisi potansiyelini karşılaştırmak için kullanılmaktadır. En yüksek radyasyon değeri Bahşılı ilçesinde (yaklaşık 1490 kWh/m<sup>2</sup>), en düşük radyasyon değeri ise Delice ilçesinde (yaklaşık 1430 kWh/m<sup>2</sup>) gözlemlenmektedir. Bu bilgiler, güneş enerjisi santralleri için uygun yerlerin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 3.6. Kırıkkale ilçeleri radyasyon değerleri (kWh/m<sup>2</sup>)

### 3.3. Ülkemizde Güneş Enerjisiyle İlgili Yönetmelik ve Teşvikler

Ülkemizde yenilenebilir enerjyle ilgili süreç “lisanslı ve lisanssız elektrik üretimi” şeklinde iki farklı başlıklarda incelenmektedir. Belirli bir kurulu güçlerin üzerindeki yatırımlar lisanslı elektrik üretimi kapsamındadır. Bu durumda yatırımcılar tamamen üretici konumundadırlar. 2019 yılında Cumhurbaşkanlığı kararı ile yayımlanan Resmî Gazete’deki kararnamede elektrik üretim tesisleri için lisanssız 1 MW olan üst sınır 12 Mayıs 2019 itibari ile 5 MW’a çıkarılmıştır. 30772 numaralı Resmî Gazetedeği ilgili kısım EK-2’de paylaşılmıştır. Bu doğrultuda, kurul gücü 5 MW ve altındaki güneş enerji santrallerine olan yatırımlar lisanssız elektrik üretiminde değerlendirilmektedir. (T.C. Resmî Gazete, 2019)

Lisanssız elektrik üretiminin kapsamına 5 MW ve altı kurulu güçteki GES yatırımları dahil olmaktadır. Bu yatırımlar daha çok çatı, bireysel veya bazı şirketlerin kurduğu GES’ler, tüketiminin fazlası üretilmiş olan enerji, ilgili bölgede bulunan şebeke işletmesine satılır. Kurulu sistemde elde edilecek olan üretim miktarı tüketimi karşılayamadığında ise, sistem kurulu olduğu şebeke işletmesi üzerinden kalan enerji ihtiyacı karşılanabilmektedir. Buradaki en büyük amaç ise şebekeden bağımsız enerji ihtiyaçlarının kurulu GES’ler ile karşılanarak elektrik sistemi üzerindeki yükün azaltılmasıdır. Bir diğer amacı ise gereğinden

fazla üretilmiş olan enerjinin dağıtım hatlarına entegre edilmesiyle bölgede yük ihtiyacının dengelenmesidir.

Lisanslı ve Lisanssız yatırımların kısaca farklarından bahsedecek olursak;

- Lisanssız (5 MW altı) yatırımlarda üretilmiş olan enerjinin tüketilen kısmı haricindeki kalan güç, ilgili sistemlerin kurulu olduğu alanda bulunan şebekeye devlet desteği ile satılabilmektedir.
- Kurulum alanının boyutları uygun ve uzun ömürlü yatırım olarak güneş enerji santralleri düşünüldüğünde, lisans başvurusu daha uygundur. Çünkü kamu kurumları ve arazileri haricinde güneş enerji santrallerinin çatıya kurulması zorunluysa, lisanslı projelerde böyle bir durum söz konusu değildir.
- Her iki üretimde yol haritasında benzerlikler olsa da lisanslı elektrik üretiminde ön lisans ve lisans alma zorunluğu vardır.

### 3.3.1. Lisanssız GES elektrik üretimi

Güncel mevzuatlara göre, 5 MW'ın altındaki elektrik üretim tesisleri, ön lisans veya lisans almadan muaf tutulmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üreten gerçek veya tüzel kişiler, söz konusu ön lisans ve lisans muafiyeti kapsamında ihtiyacın ötesinde ürettikleri elektrik enerjisini sisteme verdiğinde, bu elektrik enerjisi ilgili 50 yetkili tedarik şirketi aracılığıyla Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması (YEKDEM) kapsamınca değerlendirilmektedir. Lisanssız elektrik üretim tesisleri yönetmeliği kapsamına giren üretim tesisleri, dördüncü paragraf kapsamındaki belirtilen istisnalar haricinde, dağıtım sistemine bağlanmaktadır. İlgili şebeke işletmecisi, üretim tesisinin teknik özelliklerine ve bağlantı noktası itibarıyla dağıtım sisteminin mevcut kapasitesine göre üretim tesisini Yüksek Gerilim (YG) veya Alçak Gerilim (AG) seviyesinden dağıtım sistemine bağlama yetkisine sahiptir. Bağlantı başvuru talebi, sadece ilgili mevzuat ve teknik düzenlemeler çerçevesinde reddedilebilmektedir. Lisanssız GES süreç haritasını gösteren iş akış şeması EK-1'de paylaşılmıştır.

Lisanssız elektrik üretimi için başvurular, ilgili şebeke işletmecisine sunulan belgelerle yapılır. Belgelerin eksiksiz olduğu durumda, belirlenen bağlantı görüşü için teknik değerlendirme Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'ne (YEGM) gönderilir. Teknik değerlendirme olumlu sonuçlanırsa, başvuru sahibine İlgili Şebeke İşletmecisi tarafından

bağlantı anlaşması çağrı mektubu verilir. Çağrı mektubunu takiben, gerekli izinlerin sağlanabilmesi için 6 aylık bir zaman verilir. Bu zaman zarfında proje onayı alınmalıdır. İlgili izin işlerinin tamamlanmasının ardından, ilgili şebeke işletmesine bağlantı anlaşması için başvuru yapılır. Belgelerin eksiksiz olması durumunda, bağlantı anlaşması imzalanarak proje inşaat süreci başlatılır.

Proje tamamlanma süreleri, kaynak türüne bağlı olarak belirlenmiştir. Tamamlanan projeler, Bakanlık veya Bakanlık tarafından yetkilendirilmiş bir kurum tarafından geçici kabul edilmektedir. Geçici kabul, tesisin/projenin belirlenmiş kriter ve izinler içerisinde tamamlanıp tamamlanmadığına dair uygunluk kontrolünü içerir. Herhangi bir olumsuz durum olmadığı takdirde, bir ay içerisinde sistem kullanım anlaşması yapılır ve tesis devreye alınarak üretim süreci başlatılır. (YEGM, 2018)

### **3.3.2. Lisanslı GES elektrik üretimi**

Lisanslı güneş enerji santralleri, tüzel kişilerin elektrik üretimi için izin almaları ile başlamaktadır. Güncel mevzuata göre 5 MW ve üzeri üretimde bulunacak olan tesislerin lisans alması zorunludur. (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2024). Lisanslı tesislerde üretilen enerji doğrudan şebekeye verilir, piyasa değerinde satılabilmektedir. YEGEM'in resmî web sitesinde yer alan yol haritasına göre, Türk Ticaret Kanunu'na uygun bir şirketin kurulması durumunda, rüzgâr veya güneş enerjisi yatırımı gerçekleştirilecek bölgede bir yıl süresince rüzgâr veya güneş değerlerini gözlemek amacıyla ölçüm istasyonları tesis edilir. Bir yılın sonunda elde edilen ölçüm verileri, Meteoroloji Genel Müdürlüğü veya akredite edilmiş kuruluşlara gönderilerek onaylandığında, yönetmelik gereği belirlenen evraklar hazırlanarak ön lisans başvurusu belirlenen tarihlerde gerçekleştirilmektedir.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), ön lisans başvurularını değerlendirerek uygun bulunduğu durumlarda, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından teknik bir değerlendirmeye tabi tutulmaktadır. Değerlendirmelerin uygun bulunması durumunda, EPDK'ya bilgi verilmektedir ve aynı bölge içindeki diğer başvurularla birlikte Türkiye Elektrik İletim AŞ (TEİAŞ) tarafından belirlenen kurulu güç için en yüksek ücreti taahhüt eden başvurunun seçilerek EPDK'ya bildirilmesi gerekmektedir. Ön lisans'ın şirkete verilmesinin ardından, şirket, tesis kurulumu için gereken tüm izinleri tamamlar ve tesisin imar planlarına işlenir. Bu aşamadan sonra, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK)

tarafından "Lisans" verilir. Tesisin projeleri, ilgili kurumlar tarafından onaylandıktan ve inşaat ile kurulum süreçleri tamamlandıktan sonra, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) veya ETKB'nin yetkilendirdiği kuruluşlar tarafından kabul edilir ve tesis ticari işletmeye alınmaktadır (YEGM, 2018).

GES'lerde, 5 MW'dan büyük olan ve lisans alımı zorunlu olan santrallerin kurulum izni alabilmeleri için bir dizi gereksinimleri karşılaması beklenmektedir. Bunlar arasında yıllık enerji koşulu olarak 1650 kWh/m<sup>2</sup>, bölgede ekstre gücü kaldırabilecek bir trafo merkezinin mevcut olması ve çevresel etki değerlendirme raporuna göre fotovoltaik sisteminin bölgede tesis edilmesine engel olacak olumsuz sonuçlar içermemesi yer almaktadır. Bu konuyla ilgili detaylar Elektrik Piyasası Yönetmeliği'nde bulunmaktadır. Lisanslı üreticilerin sisteme satışı ise, 01 Mayıs 2023 tarihli 32177 sayılı Resmî Gazete'de yayınlanan 7189 Sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararına istinaden uygulanacaklar fiyatlar Çizelge 3.4'te sunulmuştur (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2024).

Çizelge 3.4. Yenilenebilir enerji alım fiyatları (YEKDEM, 2024)

Yenilenebilir Enerji Kaynağına Dayalı Üretim Tesis Tipi	Alım Fiyatı (TL KR/KWH)	Yerli Aksam Desteği (TL KR/KWH)
Rezervuarlı Hidroelektrik Üretim Tesisi	241,78 TL	49,06 TL
Nehir Tipi Hidroelektrik Üretim Tesisi	226,67 TL	49,06 TL
Karasal Rüzgâr Enerjisine Dayalı Üretim Tesisi	177,98 TL	49,06 TL
Deniz Üstü Rüzgâr Enerjisine Dayalı Üretim Tes.	241,78 TL	65,48 TL
Jeotermal Enerjisine Dayalı Üretim Tesisi	339,20 TL	49,06 TL
Çöp Gazı / Atık Lastiklerin İşlenmesinde Yan Ürünlerden Elde Edilen Kaynaklar Tesisi	177,98 TL	49,06 TL
Biyometanizasyon	290,47 TL	49,06 TL
Termal Bertaraf	226,52 TL	36,75 TL
Güneş Enerjisine Dayalı Üretim Tesisi	177,98 TL	49,06 TL
Rüzgâr veya Güneş Enerjisiyle Bütünleşik Üretim	209,89 TL	65,48 TL
Pompaj Depolamalı Hidroelektrik Üretim Tesisi	339,20 TL	65,48 TL
Dalga veya Akıntı Enerjisine Dayalı Üretim Tes.	226,67 TL	65,48 TL

### 3.4. Ülkemizdeki Kurulu Güçlerin Değerlendirilmesi

Dünyada sanayileşme ve artan nüfus sonucunda enerjiye duyulan ihtiyaç da artmaktadır. Dünya çapındaki enerji kaynaklarının kısıtlı olması ülkeleri alternatif enerji kaynaklarını kullanmaya yönlendirmiştir. Türkiye'de elektrik tüketimi ile elektrik üretiminde günümüze kadarki yıllar itibariyle büyük bir değişiklik meydana gelmiştir. Aynı zamanda ekonomik ve teknolojik gelişmişlik seviyesinde de önemli artış gözlenmiştir

Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen kurulu güçlere ait, 2014 itibari ile yıllık değişim süreci Çizelge 3.5'te görülmektedir. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ)'a ait olan bu verilerine bakıldığında diğer yenilenebilir kaynaklara nazaran, en çok artış güneş enerjisinde olmuştur. Güneş enerjisinin değişim oranı 8 yılda 40 MW'dan 9425 MW'a çıkarak, yaklaşık 235 katı değer kazanmıştır. (TEİAŞ, 2024)

Çizelge 3.5. Türkiye'nin toplam kurulu gücü içinde yerli enerji kaynaklarına ait kurulu gücün yıllara göre değişimi (TEİAŞ, 2024)

Yıllar	Barajlı MW	Göl ve Akarsu MW	Hidrolik Santral MW	Jeotermal MW	Rüzgâr MW	Güneş MW
2014	16.606,9	7.036,3	23.643,2	404,9	3.629,7	40,2
2015	19.077,2	6.790,6	25.867,8	623,9	4.503,2	248,8
2016	19.558,6	7.122,5	26.681,1	820,9	5.751,3	832,5
2017	19.776,0	7.497,1	27.273,1	1.063,7	6.516,2	3.420,7
2018	20.536,1	7.755,3	28.291,4	1.282,5	7.005,4	5.062,8
2019	20.642,5	7.860,5	28.503,0	1.514,7	7.591,2	5.995,2
2020	22.925,0	8.058,9	30.983,9	1.613,2	8.832,4	6.667,4
2021	23.280,4	8.212,2	31.492,6	1.676,2	10.607,0	7.815,6
2022	23.275,2	8.296,3	31.571,5	1.691,3	11.396,2	9.425,4
2023	23.650,2	8.313,9	31.801,2	1.691,3	11.803,3	11.315,9
2024	23.671,0	8.329,0	32.100,5	1.691,3	12.077,0	13.602,0

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının paylaştığı güncel verileri ile, Türkiye'deki elektrik kurulu gücü 2024 Ağustos ayı itibari ile 113.932 MW olarak hesaplanmıştır. Aynı zamanda yine 2024 yılı Ağustos ayı sonu itibarıyla kurulu gücümüzün kaynaklara göre dağılımı; %28,3'ü hidrolik enerji, %21,7'si doğal gaz, %19,2'si kömür, %10,8'i rüzgâr, %16,2'si güneş, %1,5'i jeotermal ve %2,4'ü ise diğer kaynaklar şeklindedir. (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024) Ülkemizde güneş enerjisi santrallerinde yapılmış olan ilk yatırım 2014 yılında başlamıştır. 40 MW olarak başlayan kurulu güneş enerjisi gücü, ülkemizde günümüz itibari ile 10 bin MW'a yaklaşmıştır.

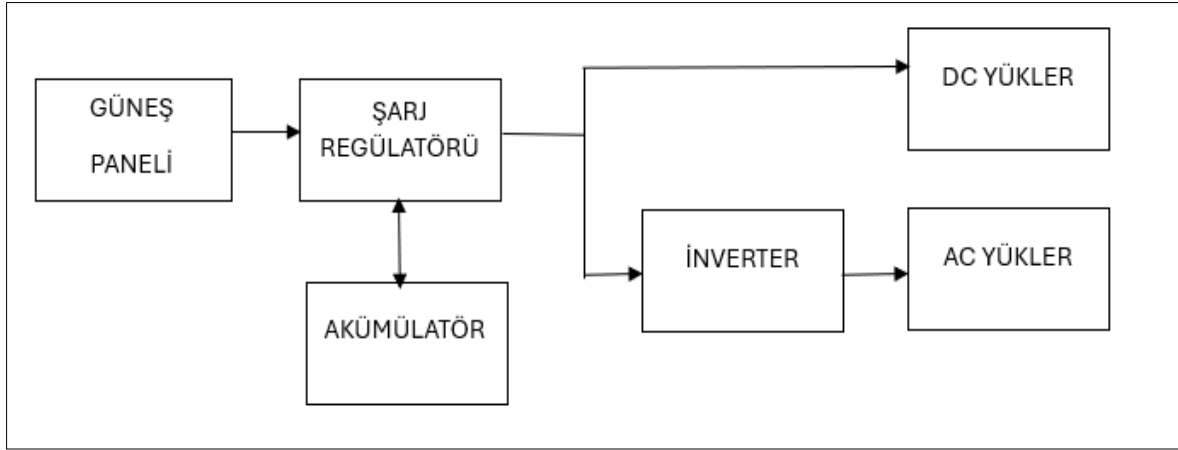
Ülkemizde Ağustos 2024 sonu itibariyle bulunan elektrik enerjisi üretim santrali sayısı, lisanssız santraller dâhil olmak üzere 31.241'e ulaşmıştır. Mevcut santrallerin 764'ü hidroelektrik, 69'u kömür, 365'i rüzgâr, 63'ü jeotermal, 342'si doğal gaz, 29.163'ü güneş ve 475'i diğer kaynaklı santrallerden oluşmaktadır. Güneş enerjisi santralleri, toplam santral sayısının yaklaşık %93,4'ünü oluşturmaktadır. (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024)

### **3.5. Güneş Enerji Santrallerinde Kullanılan Ekipmanlar**

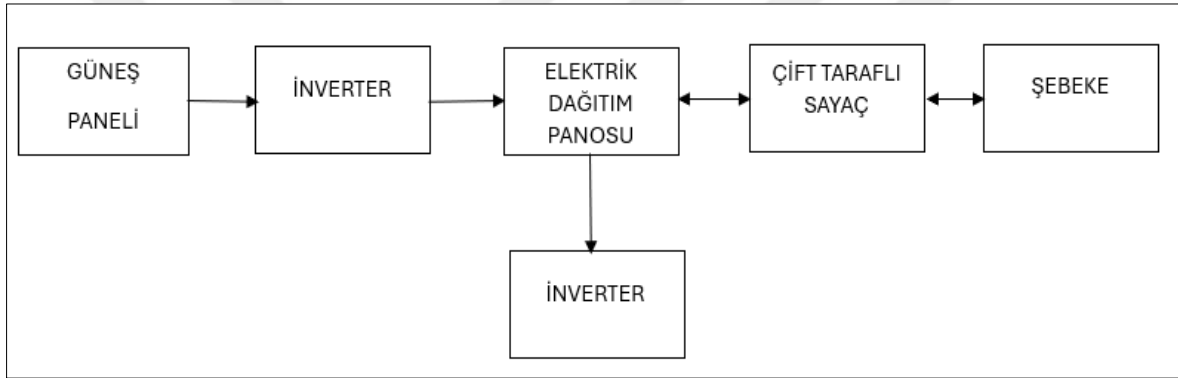
Güneş Enerji Santralleri, şebekeye bağlı (on-grid) ve şebekeden bağımsız (off- grid) olarak iki şekilde incelenmektedir. Off-Grid dediğimiz şebekeden bağımsız sistemlerde enerji depolamak için aküye ihtiyaç duymaktadır. Çünkü bu sistemlerin şebeke bağlantısı yoktur ve kendi kendine yetecek şekilde dizayn edilmiştir.

Sabit güneş enerji sistemleri ile hareketli güneş enerji sistemlerini karşılaştırdığımızda, On-Grid olarak adlandırılan şebekeye bağlı sistemler, şebeke elektriğine bütünleşmiş bir biçimde çalışır. Bu sistemlerde, enerji depolamak için özel bir aküye ihtiyaç duyulmaz; fazla enerji üretildiğinde enerji doğrudan şebekeye aktarılır.

Tersine, ihtiyaçtan az enerji üretildiğinde ise şebekeden ihtiyaç kadar enerji çekilir. Bu iki sistem arasındaki en temel farklılık budur. Şebekeye bağlı sistem ve şebekeden bağımsız sistem genel gösterimleri, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'te gösterildiği üzere, aşağıda bulunmaktadır. Hem sabit hem de hareketli güneş enerji sistemlerinde kullanılan paneller, invertörler, aküler gibi üretim için gerekli olan tüm ekipmanların detayları ve özellikleri alt başlıklarda ele alınmıştır.



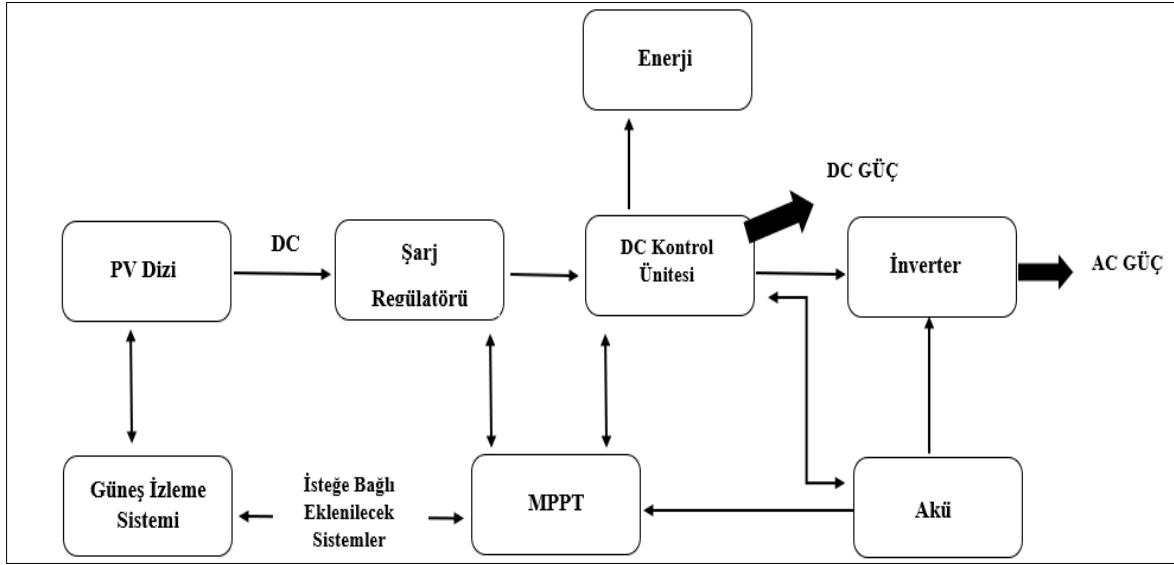
Şekil 3.7. Şebekeden bağımsız (off-grid) sistem diyagramı



Şekil 3.8. Şebekeye bağlı (on-grid) sistem diyagramı

### Güneş enerjisi elektrik üretim sistem ekipmanları

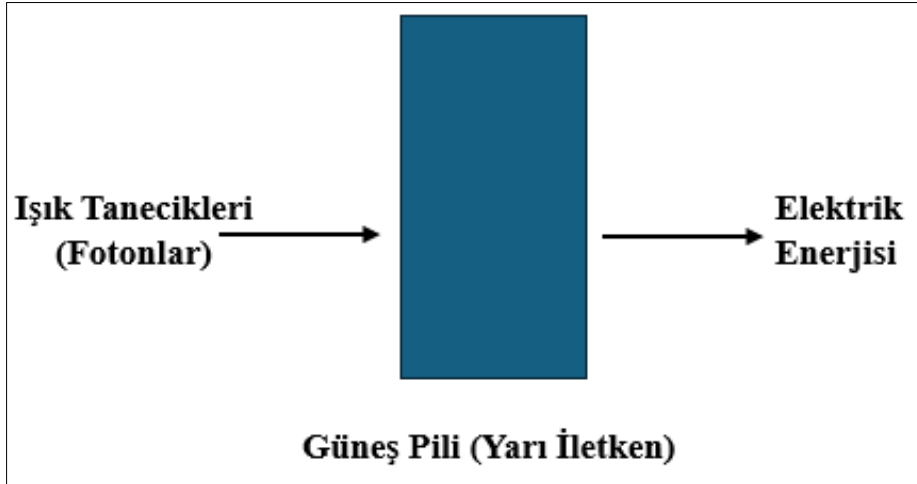
Güneş ışınlarının enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi, fotovoltaik (PV) hücreler sayesinde gerçekleştirilmektedir. PV hücrelerin bir araya getirilerek oluşturulan PV panel, daha yüksek güç çıkışını sağlama kapasitesine sahiptir. Bu elde edilen enerjinin etkili bir şekilde kullanılabilmesi için, PV panel bir sistem içerisine entegre edilir. Bu sistem, inverter (dönüştürücü), akü (batarya), şarj regülatörü gibi ana sistem ekipmanlarını içermektedir. Solar kablolar, bağlantı elemanları, devre anahtarları (termik manyetik şalter ve sigortalar), bağlantı kutuları ve sistem tasarımına bağlı olarak transformatör dahili sistem elemanları Şekil 3.9'daki gibi rol oynamaktadır. Ayrıca, fotovoltaik modüllerin maksimum güç noktasında (MPPT) çalışmasını sağlamak üzere maksimum güç noktası izleyicisi de kullanılabilir



Şekil 3.9. Güneş izleme sistemi ve MPPT cihazlarının sisteme bağlanmalar

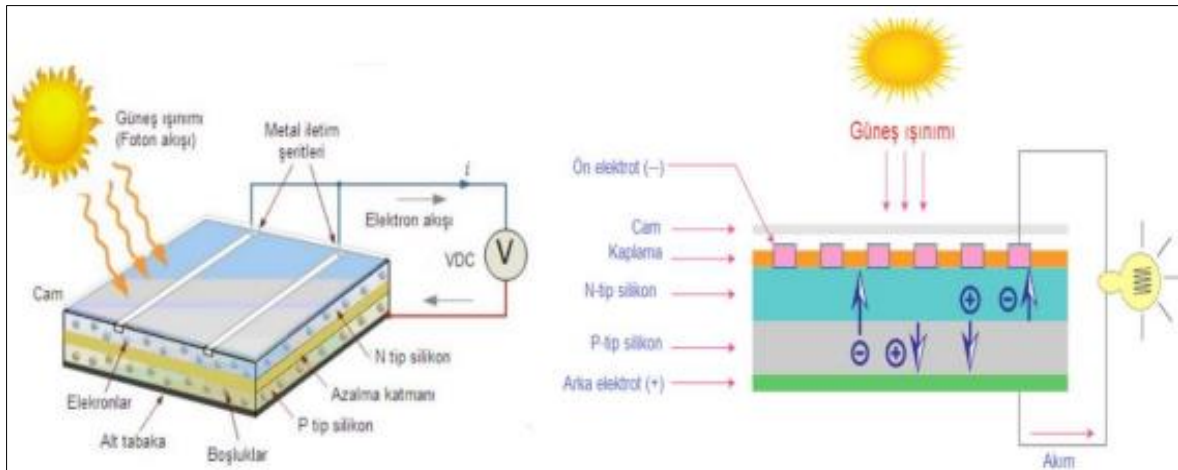
### Fotovoltaik hücre

Fotovoltaik modülün en temel bileşeni güneş hücresidir. Bu hücreler, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken malzemelerden Şekil 3.10'daki gibi üretilmiştir. Fotovoltaik kelimesini ele aldığımızda 'foto' kelimesi ışık, 'voltaik' kelimesi ise gerilim üreten anlamına gelmektedir. Burada fotovoltaik, ışık ile gerilim üretimi olarak ifade edilebilir. Bu sistemlerde kullanılan fotovoltaik piller, yarı iletken malzemelerdir. Bu yarı iletken malzemeler, güneşten aldıkları ışığı elektrik enerjisine dönüştüren bir yapıya sahiptir ve bu sistemin yapı taşlarıdır. Fotovoltaik hücreler, genellikle silikon tabanlıdır ve güneş ışığı tarafından uyarılarak elektrik akımı üretirler. Işığa maruz kaldıklarında, elektronlar serbestleşir ve elektriksel bir akım oluşturmak için elektrik alanında hareket ederler. Bu elektrik akımı daha sonra kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürülür (Aksangör, 2019).



Şekil 3.10. Fotovoltaik hücre çalışma şekli (Aksangör, 2019)

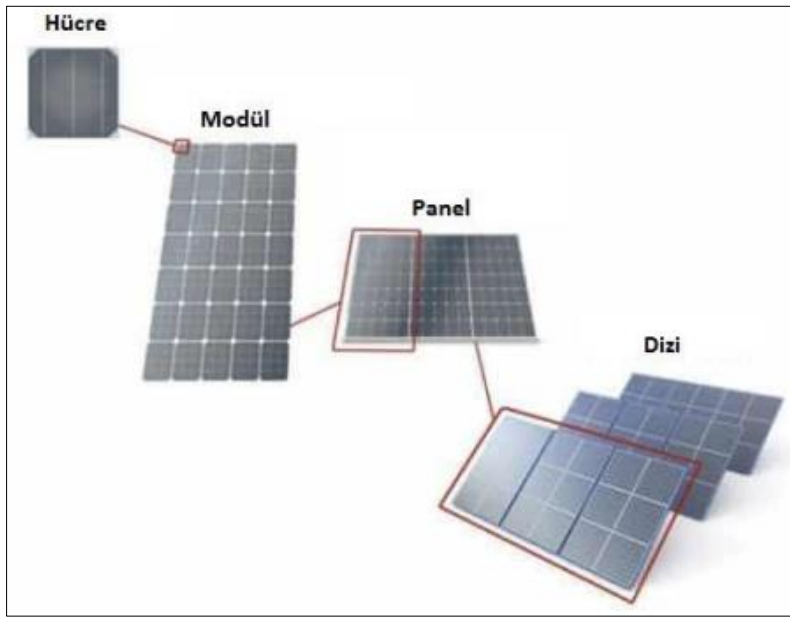
Fotovoltaik hücrelerin çalışma prensipleri, güneş ışınlarının hücre yüzeyine çarpması durumunda, fotonların bir kısmının yarı iletken içinde absorbe olma mekanizmasını içermektedir. Fotonlardaki enerjinin yarı iletken malzemeye transferi, hücrenin ön kontak bölgesine yakın bir alanda elektriksel bir alanın ortaya çıkmasına neden olur. Bu alan, elektron-boşluk çiftlerini harekete geçirerek elektronların serbest bırakılmasını tetikler. Serbest bırakılan elektronlar, elektrik alan içindeki boşluklara doğru hareket etmeye çabalar. Bu elektron akışı, p-bölgesine doğru yönlendirilerek birleşmeyi yeniden sağlamak amacıyla başlatılır. Elektron akışı, hücrenin potansiyel alanında bir gerilim meydana getirir ve bu durumda akım oluşur. Sistem ihtiyaç durumuna göre, transformatörler, koruma ekipmanları ve akülerle birlikte de kullanılabilir (Çelik, 2024). Fotovoltaik hücrelerin yapı ve çalışma prensibi Şekil 3.11’de gösterilmektedir.



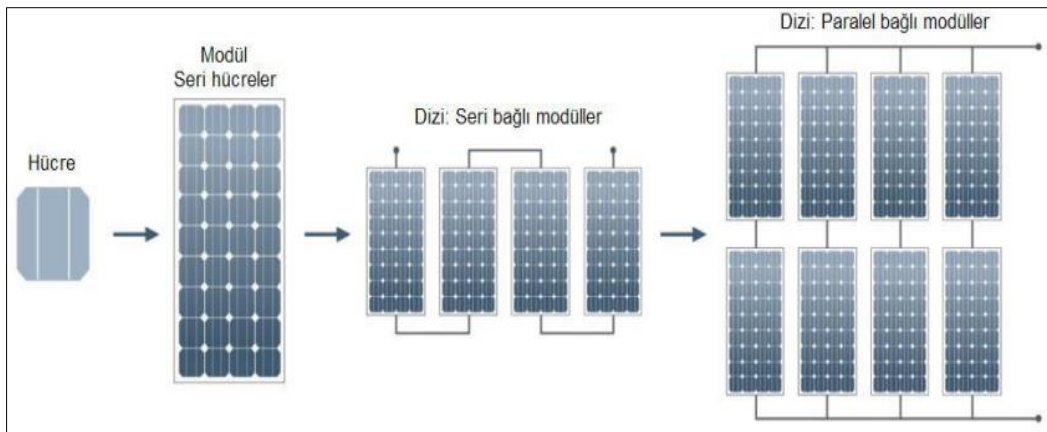
Şekil 3.11. Fotovoltaik hücre yapısı ve çalışma prensibi (Çelik, 2024)

## Paneller

Elektriksel olarak seri veya paralel bağlantılar aracılığıyla birleştirilen modüller, "panel" terimiyle ifade edilmektedir. Paneller, yüksek güçlere erişim sağlayarak enerji ihtiyacını karşılama amacını taşır. Panel sistemlerinde çıkış gücü genellikle 12 V, 24 V, 48 V gibi değerlere kadar ulaşabilir. Özellikle büyük ölçekli enerji taleplerine yönelik olarak panellerin birleştirilmesiyle ortaya çıkan yapıya ise "örgü" ismi verilmektedir.



Şekil 3.12. Güneş hücrelerinin modül-panel-dizi bağlantısı



Şekil 3.13. Hücre-modül ilişkisi (Tunçer, 2022)

Modüllerin paralel bağlantısı sonucunda oluşan çıkış gerilimi ve akımın matematiksel ifadeleri sırasıyla Eşitlik 3.1 ve Eşitlik 3.2'de gösterilmiştir.

$$V = V_1 = V_2 = V_3$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (3.1)$$

$$I = I_1 = I_2 = I_3$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (3.2)$$

Modüllerin seri bağlantısı sonucunda oluşan çıkış gerilimi ve akımın matematiksel ifadeleri sırasıyla Eşitlik 3.3 ve Eşitlik 3.4'te verilmiştir.

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (3.3)$$

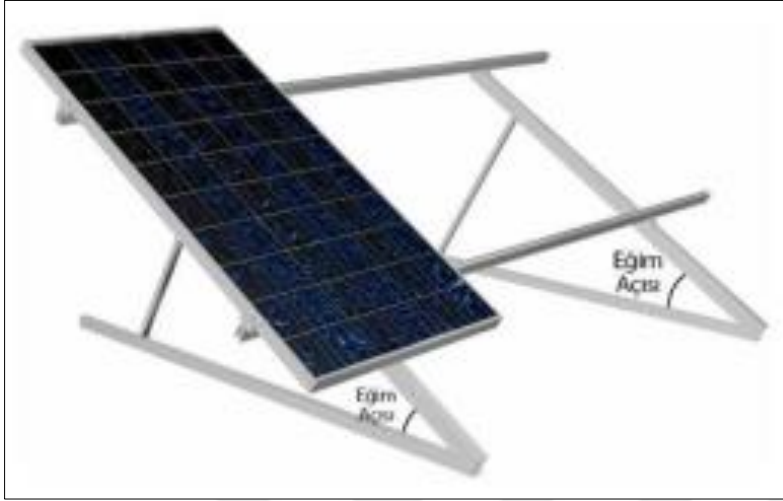
$$I = I_1 = I_2 = I_3 \quad (3.4)$$

Güneş panellerinin yerleşimi öncesinde alınması gereken önlemler mevcuttur. Örneğin paneller genellikle alüminyum veya çelik konstrüksiyonlar üzerine yerleştirilmekte olup, bu yerleşimlerin beton temeller üzerinde inşa edilmesi tercih edilmelidir. Yerleşim planı yapılırken, her bir düzenek için 28 panelden fazla kullanılmaması sağlanmalı, aynı zamanda arazi düzgün bir şekilde temizlenerek gölgelenmenin önüne geçilmeli ve ısı yayılımına bağlı yangın riski en düşük seviyeye indirilecek şekilde önlemler alınmalıdır.

#### *Optimum panel açısı hesabı*

Panel eğim açısı Şekil 3.14'te gösterildiği gibi panellerin montajı yapıldıktan sonra yer düzlemi ile arasında kalan açıdır. Bu değerın hesaplanabilmesi için enlem, boylam ve arazinin eğim bilgilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Panellerin araziye montajı sırasında eğim değerine göre, panelden üretilen enerji miktarında değişiklikler gözlemlenmektedir. Özellikle sabit sistemli güneş enerji santralleri için bu açının hesaplanması oldukça önemlidir. Bu hesaplama yöntemleri, güneş panellerinin verimliliğini artırmak için farklı bölgelerde uygulanabilir. Örneğin, Mammadova ve Nasibov (2023), Azerbaycan'daki üç şehir için yaptıkları çalışmada, panel eğim açısının mevsimsel ve aylık olarak ayarlanmasının enerji üretiminde sırasıyla %4,2 ve %4,91 oranında artış sağladığını belirtmişlerdir. Benzer şekilde, İnan ve ark. (2024), Türkiye'deki yedi şehir üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada, panel eğim açısının mevsimsel ve aylık ayarlanmasının enerji üretimini

sırasıyla %4,20 ve %5,05 oranında artırdığını tespit etmişlerdir. Bu bulgular, panel eğim açısının bölgesel enlem ve mevsimsel değişikliklere göre optimize edilmesinin, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir.



Şekil 3.14. Panel eğim açısı

Optimum panel eğim açısının belirlenmesinde iki temel yöntem kullanılmaktadır. Birinci yöntemde, panel eğim açısı, sıcaklığın maksimum olduğu aylar baz alınarak hesaplanır. Türkiye’de bu aylar genellikle haziran, temmuz ve ağustos olup, bu dönemlerde güneş ışınımı en yüksek seviyelere ulaşır.

İkinci yöntemde panel eğim açısı, enlem değerlerine bağlı olarak üç farklı eşitlikle tanımlanmaktadır. Enlem değeri  $25^\circ$ ’den küçük olan bölgelerde panel eğim açısı, enlem değerinin 0,87 katsayısı ile çarpılmasıyla hesaplanır (Eşitlik 3.5). Enlem  $25^\circ$ – $50^\circ$  aralığında ise  $0,87 \cdot \text{Enlem}$  ifadesine  $3,1^\circ$ ’lik düzeltme eklenerek optimum açı elde edilir (Eşitlik 3.6). Enlem derecesi  $50^\circ$  ve üzeri olduğunda ise enerji verimliliğini korumak amacıyla panel eğimi  $45^\circ$  olarak sabitlenir (Eşitlik 3.7) (Şahin,2024).

Enlem değeri  $< 25^\circ$  ise;

$$\text{Panel Eğimi} = \text{Enlem} \times 0,87 \quad (3.5)$$

$25^\circ < \text{Enlem değeri} < 50^\circ$ ;

$$\text{Panel Eğimi} = \text{Enlem} \times 0,87 + 3,1 \quad (3.6)$$

$50^\circ < \text{Enlem değeri}$ ;

$$\text{Panel eğimi} = 45^\circ \quad (3.7)$$

olarak hesaplanmaktadır.

Çizelge 3.6'da 2. eşitlik kullanılarak Türkiye'nin illerine ait optimum panel açısı hesaplanmıştır (Şahin, 2024)

Çizelge 3.6. Türkiye illerine ait optimum panel açısı (Şahin, 2024)

Sıra No	İl Adı	Enlem Değeri	Eğim Açısı	Sıra No	İl Adı	Enlem Değeri	Eğim Açısı
1	Adana	37	35	42	Kahramanmaraş	37,6	36
2	Adıyaman	37,8	36	43	Karabük	41,2	39
3	Afyonkarahisar	38,8	37	44	Karaman	37,2	35
4	Ağrı	39,6	38	45	Kars	40,6	38
5	Aksaray	38,4	37	46	Kastamonu	41,4	39
6	Amasya	40,6	38	47	Kayseri	38,7	37
7	Ankara	39,9	38	48	Kırıkkale	39,8	38
8	Antalya	36,9	35	49	Kırklareli	41,7	39
9	Ardahan	41,1	39	50	Kırşehir	39,1	37
10	Artvin	41,2	39	51	Kilis	36,7	35
11	Aydın	37,9	36	52	Kocaeli	40,9	39
12	Balıkesir	39,6	38	53	Konya	37,9	36
13	Bartın	41,6	39	54	Kütahya	39,4	37
14	Batman	37,9	36	55	Malatya	38,4	37
15	Bayburt	40,3	38	56	Manisa	38,6	37
16	Bilecik	40,1	38	57	Mardin	37,3	36
17	Bingöl	39,1	37	58	Mersin	36,8	35
18	Bitlis	38,4	37	59	Muğla	37,2	35
19	Bolu	40,6	38	60	Muş	38,9	37
20	Burdur	37,5	36	61	Nevşehir	38,7	37
21	Bursa	40,3	38	62	Niğde	38	36
22	Çanakkale	40,2	38	63	Ordu	41	39
23	Çankırı	40,6	38	64	Osmariye	37,2	35
24	Çorum	40,6	38	65	Rize	41	39
25	Denizli	37,8	36	66	Sakarya	40,7	39
26	Diyarbakır	37,9	36	67	Samsun	41,3	39
27	Düzce	40,8	39	68	Sırt	37,9	36
28	Edirne	41,7	39	69	Sinop	42	40
29	Elazığ	38,7	37	70	Sivas	39,7	38
30	Erzincan	39,8	38	71	Şanlıurfa	37,2	35
31	Erzurum	39,9	38	72	Şarnak	37,4	36
32	Eskişehir	39,8	38	73	Tekirdağ	41	39
33	Gaziantep	37,1	35	74	Tokat	40,3	38
34	Giresun	40,9	39	75	Trabzon	41	39
35	Gümüşhane	40,4	38	76	Tunceli	39,3	37
36	Hakkari	37,6	36	77	Uşak	38,7	37
37	Hatay	36,4	35	78	Van	38,5	37
38	Iğdır	39,9	38	79	Yalova	40,7	39
39	Isparta	37,8	36	80	Yozgat	39,8	38
40	İstanbul	41	39	81	Zonguldak	41,5	39
41	İzmir	38,4	37				

Kırıkkale Bahşılı ilçesi için yaptığımız çalışmaya bakacak olursak,

Enlem değeri: 39,8

25 <Enlem Değeri (39,8) <50

$$\text{Panel Eğim Açısı: Enlem} \times 0,87 + 3,1 = 39,8 \times 0,87 + 3,1 = 37,8 \quad (3.8)$$

### *İnvertör*

Fotovoltaik (PV) paneller, elektrik enerjisi üretimini doğru akım (DC) temelinde gerçekleştirmektedir. DC, zaman içinde yön ve şiddetini sabit tutan, ancak güce bağlı olarak anlık akım değerlerini değiştiren bir karakteristik sergiler. Günlük hayatta, özellikle haberleşme cihazları, elektronik aletler ve belirli elektrik motorları gibi cihazlarda DC değerleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak çoğu elektrikli cihazda Alternatif Akım (AC) tercih edilmektedir. Bu tercih, alternatif akımın zaman içinde yön ve şiddetin değişmesinden kaynaklanmaktadır. Şebeke gerilimi genellikle 220 V ve 50 Hz değerindedir. DC frekansının olmaması ve yük direncinin saf direnç olmasından dolayı, endüktif cihazların kullanımını kısıtlamaktadır. Bundan dolayı, fotovoltaik panellerden elde edilen DC enerjinin AC'ye dönüştürülebilmesi için inverter (dönüştürücü) kullanılmaktadır. Bu teknolojik dönüşüm, fotovoltaik enerjinin yaygın kullanımını desteklemektedir.

İnvertörlerin verimliliği, teknolojik gelişmelerle birlikte artarak günümüzde %98 seviyelerine ulaşmıştır. Enerji sistemleri için kullanılan invertörler çeşitli türlerde bulunmaktadır. Piyasadaki dizi invertörlerin kullanım oranı yaklaşık %42 civarındadır. Bunlar genellikle konut projeleri ile küçük ölçekli (5 MW ve altı kurulu güce sahip) ticari projelerde tercih edilmektedir. Merkezi invertörler ise toplam kullanımın %54'ünü oluşturmakta olup, genellikle lisanslı ve 5 MW üzeri kurulu güç hedefleyen projelerde tercih edilmektedir. Mikro ve diğer evirici türleri ise piyasanın geri kalan kısmını temsil etmektedir (Amrollahi, 2017).

İnverterlerin etkili bir şekilde çalışabilmesi için, panellerin dizileri arasındaki uyumsuzluğun mümkün olduğunca azaltılmasını gerekir. Bu nedenle, fotovoltaik diziler; kurulum açıları, gölge etkileri, sıcaklık ve tozlanma faktörleri gibi unsurlar göz önünde bulundurularak dikkatlice tasarlanmaktadır. Dizi eviricileri, diyot kaynaklı kayıpların olmaması bakımından avantaj sağlar. İnvertörün sahaya montaj edilmiş hali Şekil 3.15'te gösterilmektedir.



Şekil 3.15. İnvörtörün sahada montaj edilmiş hali

#### *Şarj kontrol ünitesi*

Fotovoltaik (PV) modüllere gün içinde düşen ışınım değerlerindeki değişkenlik nedeniyle, akım ve gerilim değerlerinde farklılıklar gözlemlenir. Şarj kontrol cihazları, fotovoltaik enerji sistemlerinden elde edilen doğru akımı düzenleyen ve akü grubunun şarj olabilmesi için elektriği stabil hale getiren sistem elemanlarının başında gelir. DC şarj akımı ve voltajının düzenlenip istikrarlı hale getirilmesi, akülerin enerji depolaması açısından kritik bir öneme sahiptir.

Şarj kontrol cihazları, enerji sistemlerinde üretilen gerilim ve akımın sürekli değişkenlik göstermesi nedeniyle kullanılmaktadır. Ayrıca, aküden panellere ters akımın oluşmasını önleyerek şarj kontrol cihazları, sistem performansı için hayati bir rol oynamaktadır. Akü tam kapasiteye ulaştığında, şarj kontrol cihazları fotovoltaik panelden gelen elektriği keserek aküyü aşırı yükten korurlar. Genel olarak piyasada iki tür şarj kontrol cihazı bulunmaktadır. Bunlar Maximum Power Point Tracking (MPPT) ve Pulse Width Modulation (PWM)'dir (Adaramola, 2015).

#### *SCADA sistemi kurulması*

Kapsamlı ve entegre bir veri tabanlı kontrol ve izleme sistemi olan SCADA ile bir tesise ait tüm ekipmanların kontrolünden üretim planlamasına, çevre kontrol ünitelerinden yardımcı

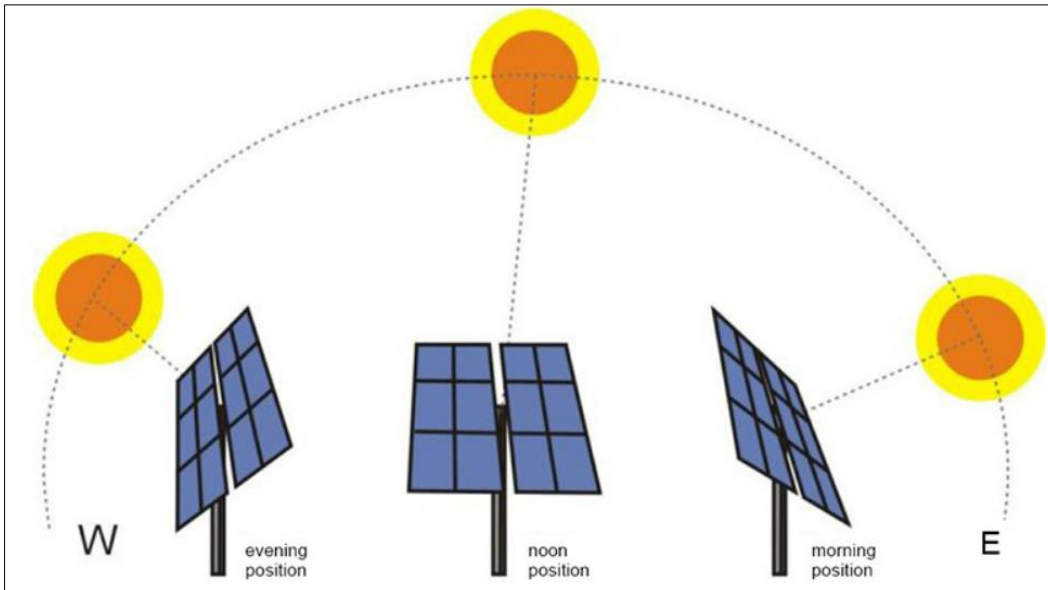
işletmelere kadar tüm birimleri kapsamaktadır. Otomatik kontrolü, gözetlenmesi ve sonuçların raporlanması sağmaktadır. Temel olarak SCADA yazılımından izleme, kontrol, veri toplama, verilerin kaydı ve saklanması işlevlerini gerçekleştirmektedir. Sahadaki retimi ekranda anlık olarak izlemek veya aylık üretimlerin karşılaştırmaları yapabilmek için SCADA sistemi kullanılması gerekmektedir.



## 4. GÜNEŞ ENERJİSİ TAKİP SİSTEMLERİ

Güneş enerjisi teknolojisi, ilk olarak sabit sistemlerle sıcak su üretimi amacıyla kullanılmış olsa da günümüzde gelişen fotovoltaik (PV) hücre teknolojisi sayesinde elektrik üretiminde de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. PV hücreler, yarı iletken malzemelerden üretilmekte olup, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme prensibine dayanmaktadır. Bu hücrelerin devreye entegrasyonu, elde edilmesi hedeflenen güç kapasitesine bağlı olarak gerçekleştirilmektedir. Seri bağlantı yöntemi sistem gerilimini artırırken, paralel bağlantı yöntemi toplam akım kapasitesini yükselterek güç üretiminin optimize edilmesine olanak tanımaktadır (Öztürk ve Yıldız, 2023).

Güneş takip sistemleri, fotovoltaik panellerin gün boyunca güneş ışığını maksimum düzeyde almasını sağlayan mekanik sistemlerdir. Bu sistemler, güneşin konumunu dinamik olarak takip ederek, panel yüzeyine düşen ışınım miktarını artırmakta ve böylece elektrik üretim verimliliğini sabit sistemlere kıyasla önemli ölçüde artırmaktadır. Nitekim yapılan çalışmalara göre, sabit açılı panellere kıyasla güneş takip sistemlerinin enerji üretimini yıllık bazda %20 ila %40 oranında artırabildiği tespit edilmiştir (Mammadova ve Nasibov, 2023). Şekil 4.1’de tipik bir güneş takip sisteminin temel çalışma prensibi gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Güneşin konumuna göre panel pozisyonları

## 4.1. Eksen Sayısına Göre Sınıflandırma

Güneş takip sistemleri tasarım ve hareket mekanizmasına bağlı olarak tek eksenli (single-axis) ve çift eksenli (dual-axis) ve çok eksenli olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

### 4.1.1. Sabit sistemler

Sabit eğimli sistemler olarak da adlandırılan sabit güneş enerjisi sistemleri, güneş panellerinin yere göre sabit bir açıda konumlandırıldığı ve güneşin hareketini takip etmediği güneş paneli kurulumlarıdır. Açı genellikle yıl boyunca enerji üretimini optimize etmek için konumun enlemine göre ayarlanır. Sabit sistemlerin hareketli parçaları olmadığından montajı kolaydır ve daha az bakım gerektirir. Uygun maliyetlidirler ve nispeten düşük enerji üretimi gereksinimi olan uygulamalar için uygundur (Smith, 2023).

#### Avantajları

**Uygun Maliyetli:** Sabit güneş enerjisi sistemleri, hareketli parçalar veya karmaşık izleme mekanizmaları gerektirmediğinden, kurulum ve bakım maliyetleri oldukça düşüktür. Bu nedenle, özellikle düşük maliyetli enerji üretimi arayışında olan bölgelerde tercih edilmektedir.

**Kolay Bakım:** Sabit sistemlerde, hareketli bileşenlerin bulunmaması, sistemin minimum bakım gereksinimiyle çalışmasını sağlar. Bu da uzun vadeli bakım maliyetlerini azaltır ve sistemin güvenilirliğini artırır.

**Kararlı İklimlere Uygun:** Sabit sistemler, güneş ışığının düzenli ve sabit olduğu bölgelerde daha verimli çalışır. Özellikle, mevsimsel değişimlerin minimum düzeyde olduğu, örneğin ekvatorial bölgelerde, sabit sistemler daha etkili olabilir. Bununla birlikte, belirli bir enlem değeri veya güneşlenme süresi sonrası sabit sistemlerin verimliliği azalma eğilimindedir. Örneğin, enlem değeri 40° ve üzerindeki bölgelerde, güneş ışığının düşme açısı sabit sistemlerin verimliliğini olumsuz etkileyebilir. Bu tür bölgelerde güneş izleme sistemlerinin kullanımı daha verimli olabilir. Ayrıca, yıllık güneşlenme süresi 1500 saatten az olan bölgelerde de sabit sistemlerin verimliliği daha düşük olabilir, çünkü güneş ışığına maruz kalma süresi kısadır.

### *Dezavantajları:*

Optimumun Altında Enerji Üretimi: Sabit güneş enerjisi sistemleri, güneş ışığının açısı ve yoğunluğundaki değişimlere uyum sağlamakta zorluk çeker. Özellikle güneşin doğrudan tepede olmadığı sabahın erken saatlerinde ve öğleden sonra geç saatlerde, izleme sistemlerine kıyasla daha düşük enerji üretimi sağlar. Örneğin, güneşin 15-30 derece arasında bir açıyla vurduğu saatlerde, sabit sistemler ortalama %15-30 daha az verimlilik gösterir (İpek, 2021). Bu nedenle, sabit sistemler, güneş ışığını maksimum verimle yakalamak için ideal değildir. Güneşin farklı zamanlardaki konumuna uyum sağlayamamalarından dolayı, enerji üretim verimlilikleri düşer.

Optimum Alanlar: Sabit sistemler için en uygun alanlar şu şekilde tanımlanabilir:

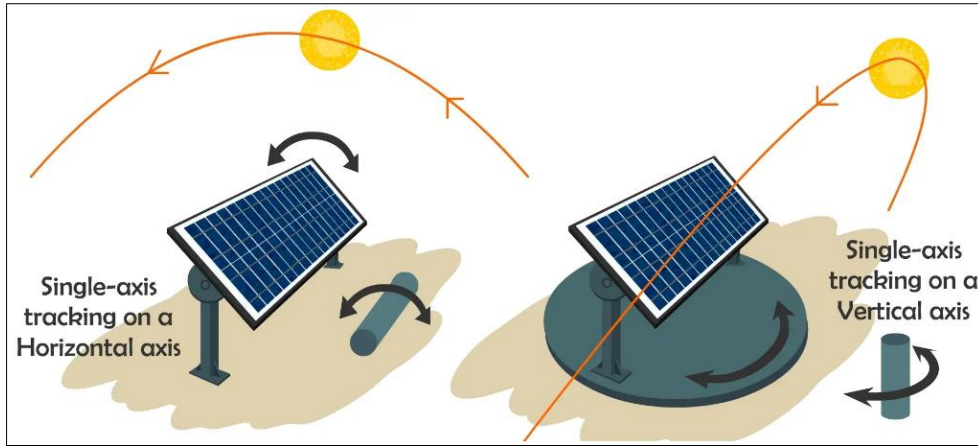
- Güneş ışığının yıl boyunca istikrarlı ve tutarlı olduğu bölgeler: Bu bölgelerde, sabit sistemler daha verimli olabilir, çünkü güneş ışığının mevsimsel değişimi minimum düzeyde olacaktır.
- Küçük ölçekli konut ve ticari kurulumlar: Maliyet tasarrufu sağlamak için sabit sistemler tercih edilebilir. Bu tür kurulumlar, genellikle daha düşük yatırım gerektiren, bütçe dostu seçeneklerdir.
- Erişimi zor alanlar veya sınırlı bakım kapasitesine sahip bölgeler: Sabit sistemler, hareketli parçaları olmadığı için bakım ve onarım gereksinimleri minimum düzeyde kalır. Şekil 4.2’de sabit sistem güneş panelleri montaj örneği gösterilmiştir.
- Çatı tipi GES’ler: Çatı sistemlerinde kurulum kolaylığı ve düşük maliyet açısından sabit sistemler uygun olabilir.



Şekil 4.2. Sabit sistem montaj örneği (Özkal, 2017)

#### 4.1.2. Tek eksenli sistemler

Tek eksenli güneş takip sistemleri, tek eksen etrafında dönerek güneşin gökyüzündeki yolunu takip edecek şekilde tasarlanmıştır. Bu, güneş panellerinin doğrudan güneş ışığına maruz kalma oranını maksimuma çıkarmasını sağlar ve bu da sabit sistemlere kıyasla enerji çıkışını artırır. Şekil 4.3'te de görüldüğü gibi temel olarak iki tür tek eksenli izleme sistemi vardır: panellerin güneşi doğudan batıya takip ettiği yatay eksen ve panellerin kuzeyden güneye hareket ettiği dikey eksen. Tek eksenli izleyiciler, şebeke ölçekli güneş enerjisi çiftlikleri ve daha büyük ticari kurulumlar için popüler bir seçimdir (Jones, 2023).



Şekil 4.3. Tek eksenli sistem (Brown, 2023)

Genellikle yıl içerisinde belirli aralıklarla eğim açısı manuel olarak ayarlanarak doğu-batı yönünde otomatik hareketi sağlanmaktadır. Tek eksenli sistemler, iki eksenli sistemlere göre daha uygun maliyetlidir, ancak verimlilik açısından daha düşük verimlere sahiptir. Tek eksenli güneş takip sistemleri, güneş yörüngesine ve hava durumuna bağlı olarak eksende hareketlerini gerçekleştirmektedir.

**Arazi Kullanımı:** Hareketli bileşenleri barındırmak için sabit sistemlerden daha fazla arazi alanına ihtiyaç duyabilirler.

**Uygun alanlar;**

- Güneşin konumunda önemli mevsimsel değişikliklerin yaşanmadığı bölgeler: Güneş ışınımının yıl boyunca tutarlı olduğu bölgelerde, özellikle  $30^\circ$  ile  $45^\circ$  enlemleri arasında bulunan alanlar daha verimli sonuçlar verir. Bu bölgelerde güneş ışınımı genellikle

1,500 kWh/m<sup>2</sup> ile 1,800 kWh/m<sup>2</sup> arasında değişir ve bu, tek eksenli sistemlerin verimliliğini artırır (TEİAŞ, 2022).

- Yüksek enerji talebi ve artan enerji üretimiyle kurulum maliyetini dengeleme yeteneği olan bölgeler: Enerji talebinin yüksek olduğu bölgelerde, örneğin sanayinin yoğun olduğu veya büyük şehirlerde, güneş ışınımı yılda ortalama 1,600 kWh/m<sup>2</sup>'yi aşabilir. Bu tür bölgelerde, enerji talebini karşılamak için yapılan yatırım geri dönüş süreleri (payback period) genellikle 4-6 yıl arasında değişmektedir. Bununla birlikte, artan enerji üretimi ve düşük kurulum maliyetleri, tek eksenli sistemlerin bu tür alanlarda tercih edilmesine olanak tanır (Yılmaz, 2023).

**Bakım ve Maliyet:** Motorlar ve sensörler de dahil olmak üzere hareketli parçalar nedeniyle bakım maliyetleri daha yüksektir. Optimum performansı sağlamak için düzenli denetimler, temizlik ve yeniden kalibrasyon gereklidir.

Şekil 4.4'te tracker sisteminin dahil olduğu montaj örneği gösterilmiştir.

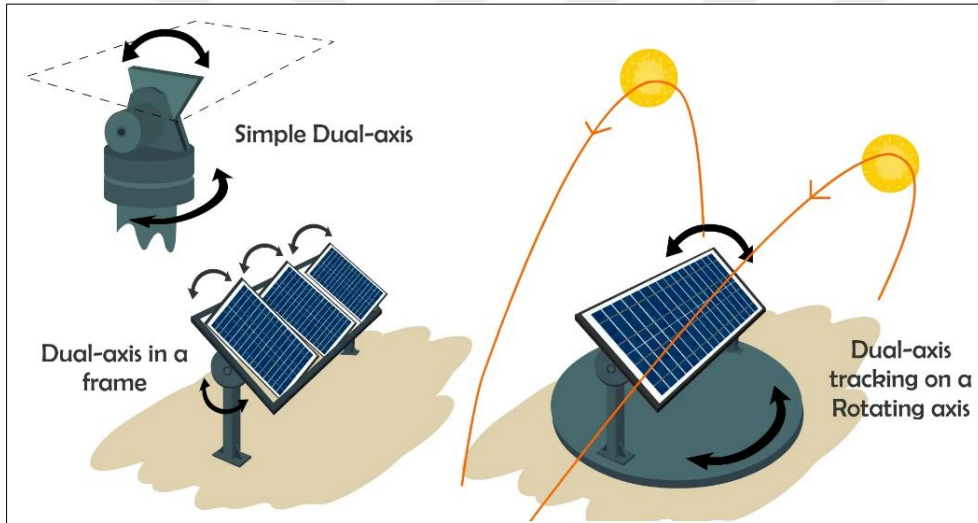


Şekil 4.4. Tracker sistem montaj örneği (Yılmaz, 2023)

#### 4.1.3. İki ve çok eksenli sistemler

Çok eksenli güneş takip sistemleri, güneşin hareketini çok daha hassas bir şekilde izleyerek, güneş panellerini hem yatay hem de dikey yönlerde hareket ettirebilen gelişmiş teknolojilerdir. Bu sistemler, panellerin her zaman gelen güneş ışığına dik açıyla yerleştirilmesini sağlayarak maksimum enerji verimliliği elde edilmesine imkân tanır (Kara

& Yıldız, 2021). İki eksenli izleyiciler, güneş ışığının panellerin yüzeyine en verimli şekilde ulaşmasını sağlayacak şekilde güneşin her iki hareket yönünü de takip eder. Bu nedenle çok eksenli sistemler, fotovoltaik verimliliği artırmanın yanı sıra, güneş enerjisi üretiminde en yüksek verimi elde etmek için ideal bir çözümdür (Şahin & Demir, 2020). Bu teknolojiler, özellikle yüksek verimli konsantre güneş enerjisi (CSP) sistemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir. CSP sistemleri, güneş ışığının bir noktada toplanarak ısı enerjisiye dönüştürülmesini sağlayan sistemlerdir ve çok eksenli takip sistemleri ile çalışarak bu tür sistemlerin verimliliğini artırmaktadır (Acar, 2022). Şekil 4.5'te çok eksenli tracker sistem montaj örneği gösterilmiştir. Ayrıca, çok eksenli izleyiciler, bazı gelişmiş fotovoltaik kurulumlarda da kullanılmakta, bu sayede güneş ışığını daha verimli bir şekilde toplayarak enerji üretim kapasitesini artırmaktadır (Celik, 2022).



Şekil 4.5. Çift eksenli sistem (Brown, 2023)

### *Avantajları*

**Maksimum Enerji Üretimi:** Çok eksenli izleyiciler, panelleri sürekli olarak güneşin konumuna göre hizalayarak en yüksek enerji verimini sağlar. Yapılan birçok çalışma, çok eksenli izleyicilerin enerji üretiminde %40'a kadar daha yüksek verimlilik sağladığını ortaya koymaktadır (Günay, 2021).

**Optimum Verimlilik:** Güneş ışığını çeşitli açılardan yakalayarak tüm gün boyunca yüksek verimli olmalarını sağlar.

Yüksek Talepli Uygulamalara Uygun: Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi (CSP) ve gelişmiş fotovoltaik kurulumlar için idealdir.

#### *Dezavantajları*

*Yüksek kurulum maliyetleri:* Çok eksenli sistemler kurulumu en pahalı olanlardır ve gelişmiş izleme teknolojisi gerektirir.

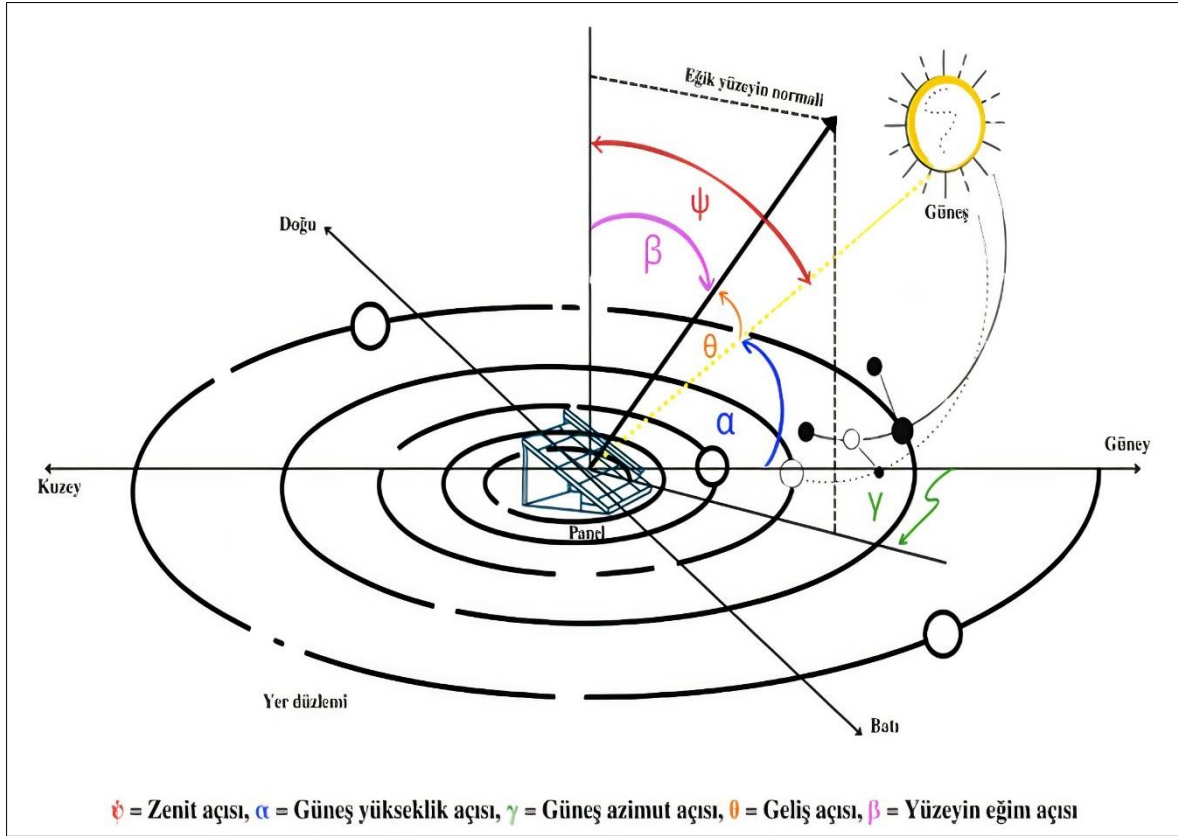
*Karmaşık bakım:* Çok sayıda hareketli eksen nedeniyle bakım karmaşık ve maliyetli olabilir.

*Alan gereksinimi:* Bu sistemler hem sabit hem de tek eksenli sistemlerden daha fazla alana ihtiyaç duyar.

Çift eksenli takip cihazlarında bulunan sistemler, tek eksenli cihazlara göre daha gelişmiştir. Bu sistem doğudan batıya hareketinin yanı sıra, kuzeyden güneye doğru hareketi de söz konusudur. Ayrıca satış pazarına baktığımızda çift eksenli takip cihazlarının veriminin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

## **4.2. Güneş Işınlarmın Geliş Açısı**

Güneş ışınları fotovoltaik panellere dik açıyla yaklaştıkça, panelden elde edilen verim de doğru orantılı bir şekilde artmaktadır. Gün içerisinde alınabilecek maksimum verim için geliştirilen güneş takip sistemleri sayesinde yön ve açı hesaplanarak sistemi hareket ettirmektedir. Güneş ışınlarının yüzey ile yaptığı açıları Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

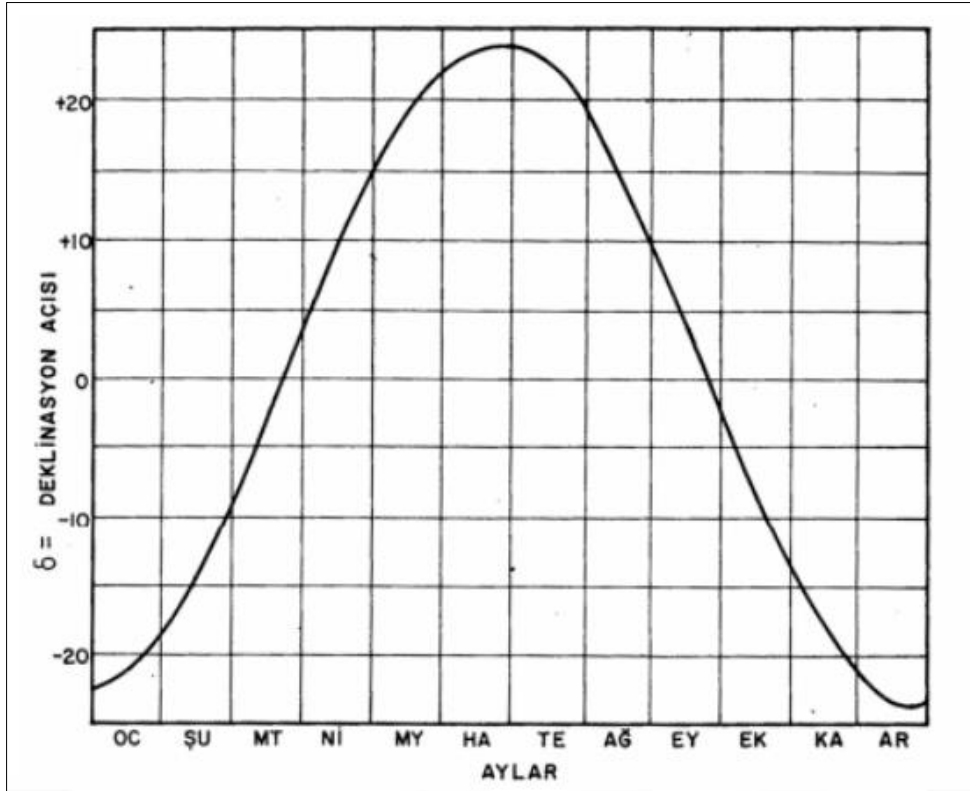


Şekil 4.6. Güneş ışınlarının açısı (Şahin, 2024)

#### 4.2.1. Denklinasyon açısı ( $\delta$ )

Dünyanın kendi eksenini etrafında dönüşü esnasında  $\pm 23,4$  derecelik bir eğikliğinin sonucundan kaynaklanan açıdır. Bu açı mevsimsel olarak farklılık göstermektedir. Sadece ekinoks (gece ve gündüzlerin eşit olduğu) dönemlerde bu açı değeri 0 derece olmaktadır. Sapma açısı, Güneş enerjisi sistemlerinin tasarımında ve enerji üretimi tahminlerinde önemli bir faktör olarak dikkate alınır.  $n$  yılın ilgili günü olmak üzere deklinasyon açısı (4.1) Eşitliği ile hesaplanır (Meyer ve ark., 2021).

$$\delta = 23,45^\circ \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (4.1)$$



Şekil 4.7. Ay bazında deklinasyon açısı değerleri (Meyer ve ark., 2021)

#### 4.2.3. Saat açısı ( $\omega$ )

Yerel saatin (LST), güneş hareketinden kaynaklı açısal değere dönüşmesini temsil etmektedir. Bu açı değerini güneş hareketi baz alınarak hesaplanmaktadır. Güneş tam gökyüzünde olduğu durumda (öğlen saati) bu açı değeri  $0^\circ$  kabul edilmektedir. Öğleden önceki değerler eksi, öğleden sonraki değerler artı şeklinde adlandırılır. Dünya konumu her saatte  $15^\circ$  değiştiğinden, ilgili hesaplamalar Eşitlik (4.2)'deki gibi yapılmaktadır (Meyer ve ark., 2021).

$$\omega = 15^\circ(LST - 12) \quad (4.2)$$

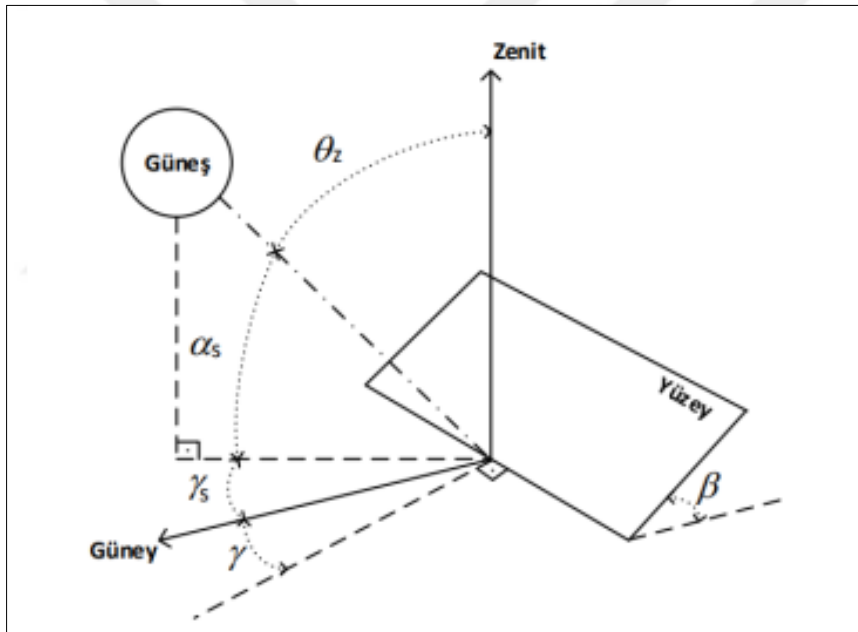
#### 4.2.4. Zenit, Azimut ve eğim açısı

Zenit açısı; güneş ışınlarının yatay yüzeyi ile dikeyi arasındaki açıdır. Bu açı, öğlen saatlerine doğru azalmakla birlikte tam öğlen vaktinde de  $0^\circ$  olarak kabul edilmektedir. Bu açı  $\theta_z$  olarak ifade edilmektedir. Güneş yükseklik açısı, güneş ışınlarının yatay düzlem ile yaptığı açığı denir. Bu açı  $\alpha$  olarak tanımlanmaktadır. Zenit açısıyla bağlantısı ise  $\alpha$

=  $90^\circ - \theta_z$  olarak ifade edilmektedir. Zenit açısı hesabını eşitlik (4.3)'teki gibi yapılmaktadır. Bu eşitlikte bulunan  $\varphi$  enlem açısını,  $\delta$  deklinasyon açısını ve  $\omega$  saat açısının değerlerini göstermektedir.

$$\theta_z = \cos^{-1} (\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega) \quad (4.3)$$

Azimut açısı; güneşin kuzeyi ve güneyinin eksenini arasındaki yaptığı açıya “güneş azimutu açısı” denilmektedir.  $\gamma_s$  olarak adlandırılmaktadır.  $\gamma$  değeri ise yüzey ile yaptığı azimut açı değeridir. Yüzeyin yatay düzlem ile yaptığı eğim açısı ise  $\beta$  olarak adlandırılmaktadır. (Durusu, 2016). Bu açıların detayı Şekil 4.8’ de gösterilmektedir.



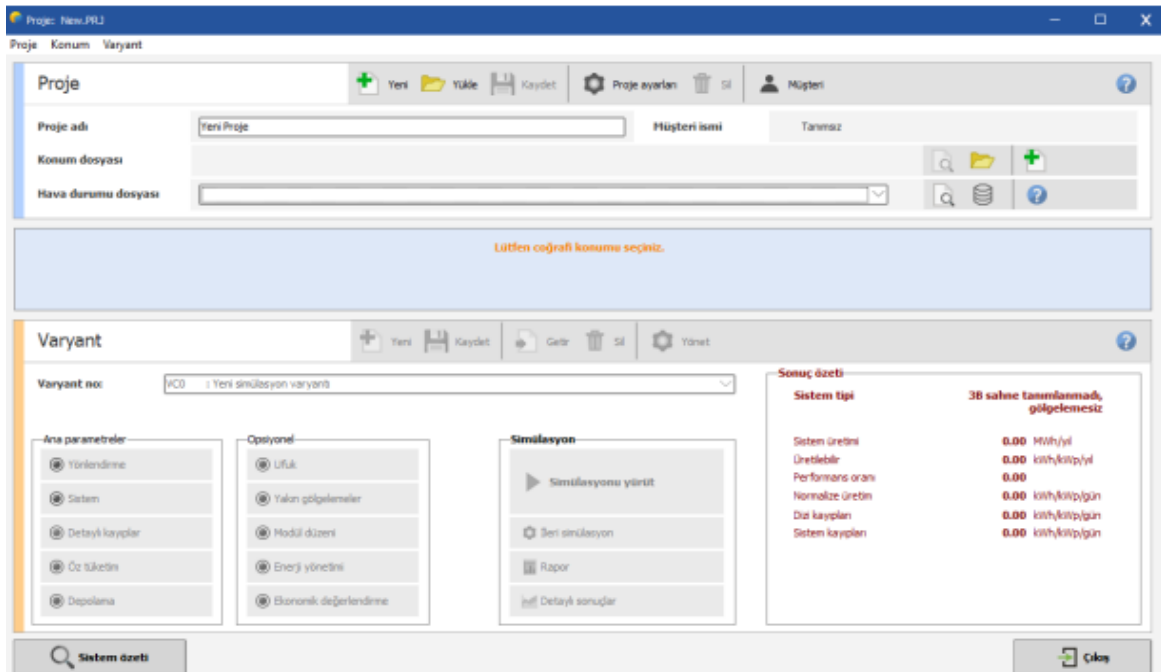
Şekil 4.8. Zenit, azimut ve eğim açısı gösterimi (Durusu, 2016)

## 5. SİMÜLASYON METODLARI

Bu tez çalışmasında, 15 MW'lık sabit ve hareketli sistemlerden elde edilecek olan değerleri belirlenmesi için PVSYST ve PVGIS yazılımları kullanılmıştır. Bu yazılımlar hakkında genel bilgiler verilir, çalışma mantıkları açıklanmıştır. Ayrıca güncel literatür taramasıyla birlikte kullanım alanlarına değinilmiştir.

### 5.1. PVSYST Simülasyon Çalışması

PVSyst yazılımı, İsviçre'de bulunan Cenevre Üniversitesi tarafından yazılımsal olarak geliştirilmiş olup, güneş enerjisi yatırım sistemlerinde kullanılan benzetim programıdır. (Akcan, 2020). Yazılım, şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız sistemler gibi çeşitli PV uygulamalarını kapsar. Mevcutta yapılmış veya tasarım aşamasında olan güneş enerji santrallerinde; veri analizi yapılması, boyutlandırılma öngörülmesi, kullanılacak ekipman seçimi ve marka/model karşılaştırılmasını sağlayan programdır. Meteorolojik verileri sayesinde aylık ve yıllık bazda birçok ülke, şehir için sıcaklık verilerine ulaşılması mümkündür. Ayrıca Google Maps özelliği sayesinde birçok ülke, arazi, konum gibi verilerine ulaşım söz konusu olduğundan GES inşa edilecek alanı seçme imkânı da kullanıcılara sağlanmıştır.



Şekil 5.1. PVSYST sistem arayüzü

PVsyst, PV modüllerinin elektriksel davranışını modellemek için tek diyotlu modeli kullanır. Bu model, bir PV hücresinin davranışını aşağıdaki denklemle tanımlar:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{N_{cs} \cdot \gamma \cdot k_B \cdot T_c}{q \cdot (V + I \cdot R_s)} \right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (5.1)$$

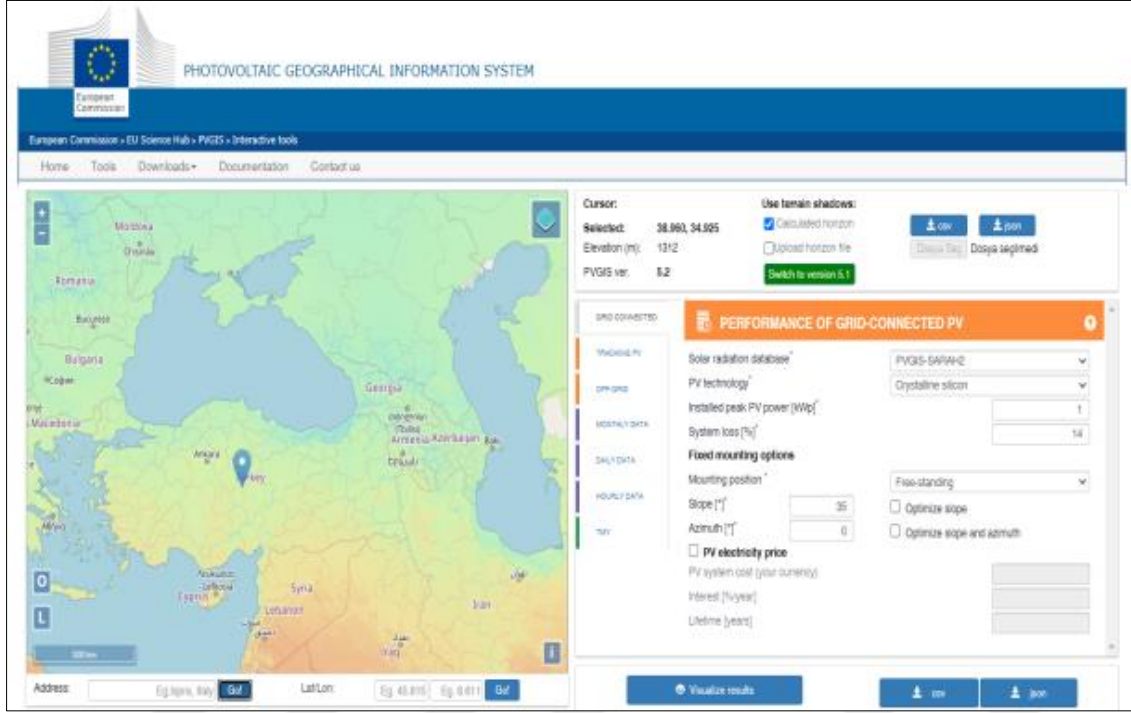
- I : Modülün ürettiği akım (A)
- V : Modülün uçlarındaki gerilim (V)
- $I_{ph}$  : Fotovoltaik akım (A)
- $I_0$  : Diyotun ters doyma akımı (A)
- $R_s$  : Seri direnç ( $\Omega$ )
- $R_{sh}$  : Şönt direnç ( $\Omega$ )
- q : Elektron yükü ( $1.602 \times 10^{-19}$  C)
- $N_{cs}$  : Seri bağlı hücre sayısı
- $\gamma$  : Diyot kalite faktörü
- $k_B$  : Boltzmann sabiti ( $1.381 \times 10^{-23}$  J/K)
- $T_c$  : Hücre sıcaklığı (K)

Bu model, PV modülünün akım-gerilim (I-V) karakteristiğini tanımlamak için kullanılır ve modülün performansını farklı ışınım ve sıcaklık koşullarında tahmin etmeye olanak tanımaktadır. PVsyst, ayrıca, gölgeleme kayıplarını değerlendirmek için ışınımın bileşenlerini (doğrudan, yaynık ve albedo) ayrı ayrı ele alır ve her bir bileşen için gölgeleme faktörleri hesaplamaktadır. Özellikle, doğrudan bileşen için güneşin konumuna bağlı olarak bir gölgeleme faktörü tanımlanmaktadır. Yaynık ve albedo bileşenleri için ise tüm gökyüzü yönleri üzerinde integrasyon yapılmakta, güneşin konumundan bağımsız gölgeleme faktörleri belirlenmektedir (PVSyst, 2024).

## 5.2. PVGIS Metodu

PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), uydu etkileşimi ve meteoroloji verilerini kullanarak kendi içerisinde hesaplama yapan ücretsiz programdır. Bu program kullanılarak, sabit montaj seçeneği ile çatı ve arazi GES'lerin saatlik, günlük ve saatlik güneş radyasyonu hesaplaması tahmin edilmektedir. Şekil 5.2'de gösterilen PVGIS'in herhangi bir

simülasyon çıktısı, kendi sistem değerlerimizi girdiğimizde bize elde edilebilecek gücü tahmin eden bir uygulamadır. Ayrıca bu uygulamada hareketli sistem karşılaştırılmadığından, sadece sabit sistemlerin değer çıktıklarına erişebilmektedir.



Şekil 5.2. PVGIS sistem arayüzü

PVGIS, güneş ışınımı verilerini uydu görüntülerinden ve meteorolojik ölçümlerden elde etmektedir. Bu veriler, belirli bir konum için global, direkt ve difüz ışınım bileşenlerine ayrılmaktadır. PVGIS, PV sistemlerinin enerji üretimini tahmin etmek için şu temel formülü kullanılmaktadır:

$$E = G \times \eta \times A \quad (5.2)$$

Burada:

- E : Üretilen enerji (kWh)
- G : Eğimli yüzeye düşen global ışınım (kWh/m<sup>2</sup>)
- η : PV sisteminin toplam verimliliği
- A : PV modülünün toplam alanı (m<sup>2</sup>)

PVGIS, enerji üretimini tahmin ederken PV sisteminin bileşenlerini ve sistem kayıplarını dikkate alır. Sistem verimliliği ( $\eta$ ) şu bileşenleri içerir:

$$\eta = \eta_{\text{modül}} \times \eta_{\text{inverter}} \times \eta_{\text{kayıplar}} \quad (5.3)$$

$\eta_{\text{modül}}$ : PV modülünün verimliliği\

$\eta_{\text{inverter}}$ : İnverterin verimliliği\

$\eta_{\text{kayıplar}}$ : Kabloleme, gölgeleme ve sıcaklık kayıpları gibi diğer faktörler

PVGIS, güneş ışınımı hesaplamalarında şu temel bileşenleri dikkate alır:

*Global Yatay Işınım (GHI)*

$$GHI = DNI \times \cos(\theta_z) + DHI \quad (5.4)$$

DNI = Direkt normal ışınım

$\theta_z$  = Güneş zenit açısı

DHI = Yayınlık yatay ışınım

*Eğilimli Yüzeyde Global Işınım*

$$G_{\text{tilt}} = DNI \times \cos(\theta_i) + DHI \times F_{\text{sky}} + GHI \times \rho \times F_{\text{ground}} \quad (5.5)$$

$\theta_i$ : Güneş ışınının yüzeye geliş açısı

$F_{\text{sky}}$ : Gökyüzünden gelen yayınlık ışınım oranı

$\rho$ : Albedo katsayısı

$F_{\text{ground}}$ : Yerden yansıyan ışınım oranı

### 5.3. PVSYST ve PVGIS Kullanılan Çalışma Örnekleri

Yıldırım ve Düzkaya (2024), Türkiye'nin Kırıkkale ilinde sabit ve tek eksenli izleme sistemlerine sahip güneş enerji santrallerinin enerji üretim verimliliğini karşılaştırmak amacıyla Pvsyst yazılımını kullanmışlardır. Çalışmalarında, her iki sistemin enerji üretim

performansını detaylı bir şekilde inceleyerek, izleme sistemlerinin, sabit sistemlere kıyasla enerji üretimindeki potansiyel artışları kapsamlı bir biçimde değerlendirmişlerdir. Bu araştırma, PVSyst yazılımının, farklı güneş enerji sistemi tasarımlarının performansını karşılaştırmak için son derece etkili ve güvenilir bir araç olduğunu açıkça ortaya koymuştur.

Öztürk ve arkadaşları (2023), Ağrı ilinde yer alan 999 kW kapasiteli bir güneş enerji santralının performansını, PVSyst ve PVGIS yazılımlarını kullanarak simüle etmişlerdir. Çalışma kapsamında, santralin enerji üretiminin hangi çevresel ve teknik parametrelere bağlı olarak değiştiği kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve simülasyon sonuçları, gerçek üretim verileriyle karşılaştırılarak doğruluğu değerlendirilmiştir. Bu tür simülasyon analizlerinin, güneş enerjisi santrallerinin farklı coğrafi bölgelerdeki performansını değerlendirmek ve sistem tasarımlarını optimize etmek açısından kritik bir öneme sahip olduğu vurgulanmıştır.

Mammadov ve arkadaşları (2024), PVGIS verilerini kullanarak PVSyst yazılımında gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarını karşılaştırarak, bu verilerin doğruluğunu derinlemesine incelemişlerdir. Çalışma, güneş enerjisi sistemlerinin performansını, farklı eğim açıları altında analiz etmiş ve her iki açıdan da en uygun ekonomik ve teknik koşulları sağlayan eğim açılarını belirlemiştir. Bu tür bir analiz, güneş enerji sistemlerinin yerel koşullara göre optimize edilmesi ve daha verimli hale getirilmesi için önemli bir yol haritası sunmaktadır.

Kınalı (2020), Konya ve Karaman illerindeki güneş enerjisi üretim tesislerinin gerçek tasarım verileri ile üretim sonuçlarını, PVGIS dahil olmak üzere bir dizi simülasyon yazılımı kullanarak karşılaştırmıştır. Çalışmada, PVGIS yazılımı aracılığıyla elde edilen simülasyon verilerinin, gerçek üretim verileriyle uyumu dikkatlice incelenmiş ve programın doğruluk oranı, güneş enerjisi üretim tahminlerinin güvenilirliğini gösterecek şekilde analiz edilmiştir. Sonuç olarak, PVGIS'in özellikle yerel verilerle uyumlu simülasyon sonuçları sağladığı ve güneş enerjisi projelerinin planlanmasında önemli bir araç olduğu sonucuna varılmıştır.

Ceylan ve Taşdelen (2018), Isparta ilinde kurulu 1 MW'lık bir güneş enerji santralının performansını değerlendirmek amacıyla PVGIS dahil olmak üzere çeşitli simülasyon programları kullanmışlardır. Çalışmada, santralin enerji üretim kapasitesini simüle eden sonuçlar, gerçek üretim verileriyle karşılaştırılmış ve PVGIS yazılımının, gerçek verilere oldukça yakın ve güvenilir sonuçlar sunduğu tespit edilmiştir. Bu bulgu, PVGIS'in

fotovoltaik sistemlerin tasarımı ve performans tahminlerinde etkin bir araç olarak kullanılabileceğini desteklemektedir.

Dal ve Yılmaz (2020), Muğla'nın Fethiye ilçesinde bulunan orta ölçekli bir ticari yat limanının elektrik ihtiyacını güneş enerjisi ile karşılamanın olanaklarını araştırmışlardır. Bu çalışmada, PVGIS yazılımı kullanılarak yat limanının bulunduğu coğrafi konumda, en uygun fotovoltaik sistem gücü belirlenmiş ve yıllık elektrik talebini karşılayabilecek en uygun sistem tasarımı ortaya konulmuştur. Simülasyon sonuçlarına göre, 31,7° eğim açısına sahip 1500 kW kurulu güce sahip bir fotovoltaik sistemin, yat limanının elektrik talebini başarılı bir şekilde karşılayacağı belirlenmiştir.

Bu kapsamda Demirci, Özer, Taplamacıoğlu ve Düzkaya (2024) tarafından yapılan ve ICETEA 2024 konferansında sunulan çalışmada, Azerbaycan'ın üç farklı şehri (Bakü, Nahçıvan ve Şuşa) için fotovoltaik panellerin eğim açıları PVGIS kullanılarak aylık, mevsimlik ve yıllık olarak optimize edilmiştir. PVGIS'in sunduğu uydu tabanlı meteorolojik veri analizleriyle, farklı açılarda elde edilen enerji üretim miktarları karşılaştırılmıştır. Çalışmada, panellerin enlem açısına göre sabit şekilde kurulması durumuna kıyasla;

- Yıllık optimum eğim açısının %0.66'ya kadar,
- Mevsimsel ayarlamamanın %4.2'ye kadar,
- Aylık ayarlamamanın ise %4.91'e kadar daha fazla enerji üretimi sağladığı görülmüştür.

Bu kazançların ekonomik açıdan da anlamlı olduğu, özellikle aylık eğim ayarı ile yatırımın geri dönüş süresinin kısalabileceği vurgulanmıştır.

Akcan ve arkadaşları (2020) tarafından simülasyon doğruluğu üzerine kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, Türkiye'nin güneydoğusunda yer alan 30 kW kapasiteli bir güneş enerjisi santralinin performansı, PVsyst yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Yazarlar, simülasyon sonuçlarını gerçek sistem performansı ile karşılaştırarak, PVsyst'in enerji üretimi ve sistem tasarımı üzerine sağladığı doğru tahminlerin doğruluğunu ortaya koymuşlardır. Bu bağlamda, PVsyst'in güneş enerjisi santrali performansının simülasyonunda yüksek doğruluk sunduğu ve sistem tasarımının optimizasyonunda güvenilir bir araç olduğu sonucuna varılmıştır.

Çınaroğlu ve Nalbantoğlu (2021) tarafından Kilis ilinde gerçekleştirilen bir çalışmada PVSYST'in geniş uygulama alanları detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu çalışmada, farklı coğrafi bōlgelerde yer alan ũ fotovoltaik enerji santralinin performansı, PVsyst yazılımı kullanılarak simũle edilmiş ve enerji ũretim kapasiteleri ile verimlilikleri analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, PVsyst'in coğrafi ve sistemsel farklılıklara gōre yũksek doğrulukla simũlasyon sonuçları sunduğunu ve bu yazılımın, çeşitli bōlgelere ve sistem yapılarına uyarlanabilen, gũvenilir bir simũlasyon aracı olarak kullanılabileceğini gōstermektedir.



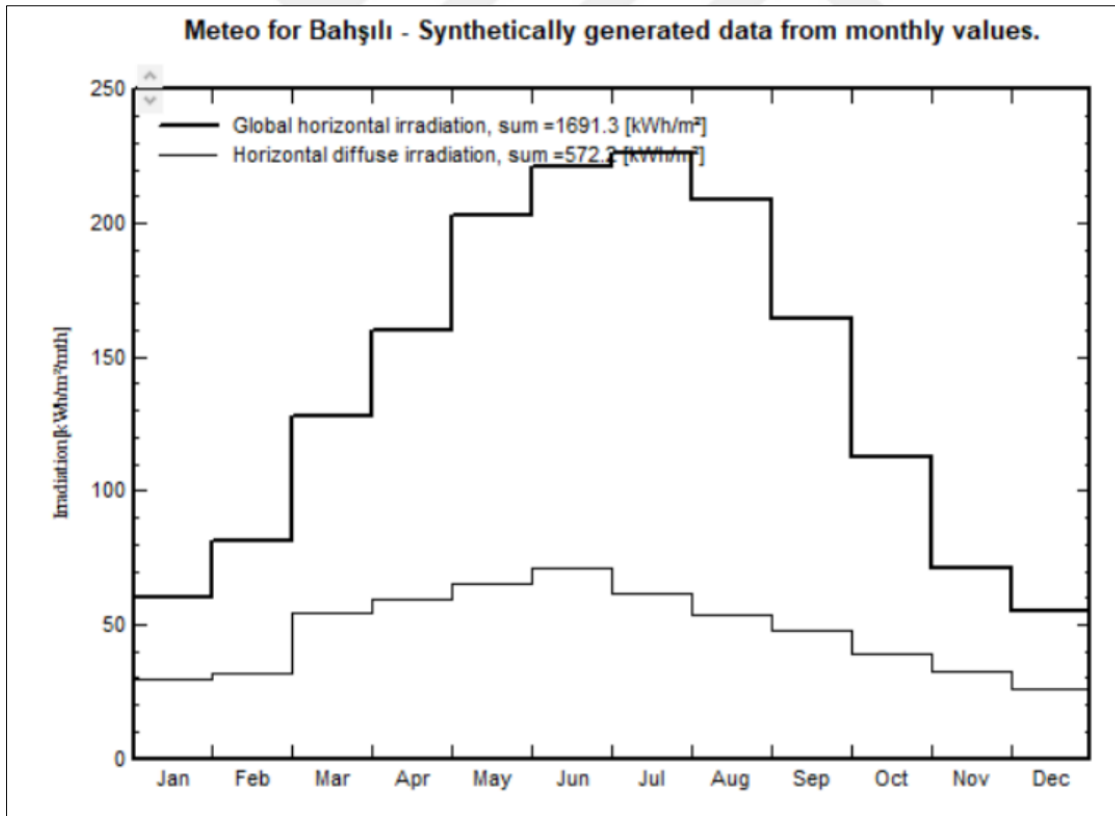


## 6. YAPILAN ANALİZLER VE DEĞERLENDİRMELER

### 6.1. PVSYST Simülasyon Sonucu

PVSYST simülasyon değeri kullanılarak, kurulacak olan sabit ve hareketli 15 MW'lık sistemlerin kıyaslanması yapılmıştır. Şeffaf bir karşılaştırma verileri elde edebilmek için panel modeli, invertör modeli ve çevresel faktör değerleri her iki sistem projelerinde aynı tutulmuştur. Ayrıca rapor oluşturulurken konum Meteonorm 7.2 verileri kullanılarak Bahşili/Kırıkkale seçilmiştir.

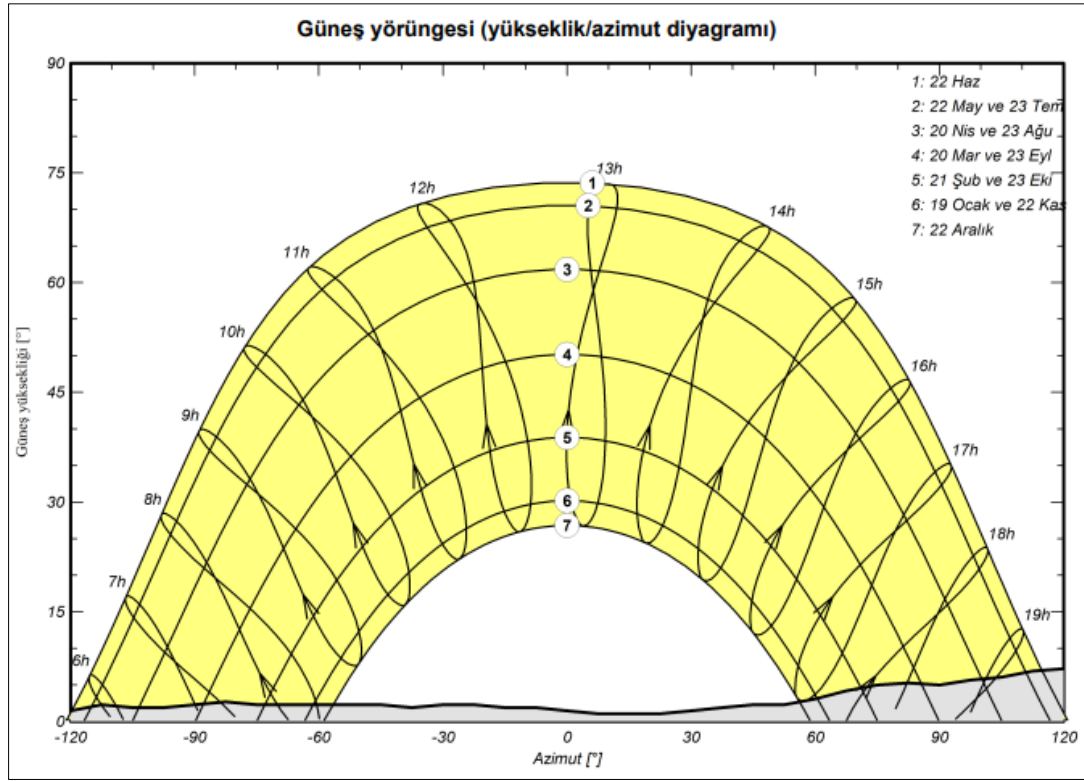
Bölgenin aylık ortalama güneş radyasyon verileri Şekil 6.1'de gösterilmektedir. Bu grafiğe göre Kırıkkale için en yüksek radyasyon değerinin temmuz ayında, en düşük radyasyon değerinin ise aralık ayında olduğu görülmektedir.



Şekil 6.1. Kırıkkale PVSyst aylık radyasyon değeri

Ufuk tanımlamaları, belirli bir güneş ışığının fotovoltaik panellere ulaşımını doğal ve yapay engellerin belirleme sürecidir. Bu süreç, panelin gelen doğrudan ve dolaylı ışımının

açısından kritik bir rol oynamaktadır. Ufuk tanımlamasında adı geçen albedo, panel yüzeyine gelen elektromanyetik ışınların yansıma kapasitesini belirten bir parametredir. Albedo değeri, panelin yüzey yapısına, renginin özelliklerine ve kapladığı alanın büyüklüğüne göre değişiklik göstermektedir. Ufuk çizgilerinin tanımlanmasına ilişkin simülasyon çıktıları Şekil 6.2’de yer almaktadır.



Şekil 6.2. PVSyst Ufuk tanımlanması

Veri tabanından alınan ufuk tanımlama verileriyle, yazılım güneş ışınlarının panel yüzeyine geliş açısını ve hareketini analiz ederek bir ufuk profili oluşturur. Bu oluşturulan profilin verileri, Çizelge 6.1’de yer almaktadır.

Çizelge 6.1. PVSyst Ufuk profili

Horizon from PVGIS website API, Lat=39°44'44', Long=33°27'7', Alt=718m														
Ortalama yükseklik	3.2 °				Albedo faktörü	0.74								
Difüz faktörü	0.94				Albedo oranı	100 %								
Ufuk profili														
Azimet [°]	-180	-173	-165	-158	-150	-143	-135	-120	-113	-105	-98	-90	-83	-75
Yükseklik [°]	3.1	1.5	1.1	1.5	0.8	0.8	1.5	1.5	2.3	1.9	1.9	2.3	2.7	2.3
Azimet [°]	-45	-38	-30	-23	-15	-8	0	8	23	30	38	45	53	60
Yükseklik [°]	2.3	1.9	2.3	2.3	1.9	1.9	1.5	1.1	1.1	1.5	1.9	2.3	2.3	3.1
Azimet [°]	68	75	83	90	98	105	113	128	135	143	158	165	173	180
Yükseklik [°]	4.2	5.0	5.3	5.0	5.7	6.1	6.9	7.6	8.0	8.0	6.5	5.3	4.2	3.1

Bu çalışma, PVSYST yazılımı temelinde gerçekleştirilmiş olup, sistemin doğruluğu ve güncelliği için gerekli olan tüm veriler düzenli olarak güncellenmektedir. Bu tezde, Phono Solar markasına ait PS-550-M6H-24-TH-1500V modeli fotovoltaik paneli ile Huawei Teknoloji firması tarafından üretilen SUN2000-100KTL-M1-400Vac model invertör tercih edilmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılan yazılım, sistemin hedeflenen enerji üretim kapasitesine göre optimize edilmiştir. Farklı panel ve invertör modellerinin kullanılması durumunda, açık devre gerilimi (Voc), kısa devre akımı (Isc), sıcaklık katsayıları, nominal güç kapasitesi ve maksimum MPPT (Maximum Power Point Tracking) gerilim aralığı gibi teknik parametrelerin yeniden değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu parametrelerin detayları, ilgili teknik veri sayfalarında (datasheet) verilmiş olup, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te gösterilmektedir.

**Grid inverter definition**

Main parameters | Efficiency curve | Additional parameters | Output parameters | Sizes and Technology | Commercial data

Model: SUN2000-100KTL-M1-400Vac  
 File name: Huawei\_SUN2000\_100KTL\_M1\_400Vac.OND  
 Manufacturer: Huawei Technologies  
 Data source: Manufacturer 2021  
 Original PVsyst database  
 Prod. Since 2021

**Input side (DC PV field)**

Minimum MPP Voltage: 200 V  
 Min. Voltage for PNom: N/A V  
 Maximum current per MPPT: N/A A  
 Nominal MPP Voltage: 600 V  
 Maximum MPP Voltage: 1000 V  
 Absolute max. PV Voltage: 1100 V  
 Power Threshold: 150 W

**Output side (AC grid)**

Monophased:   
 Triphased:   
 Biphased:   
 Frequency: 50 Hz , 60 Hz   
 Grid voltage: 400 V  
 Nominal AC Power: 100 kVA  
 Maximum AC Power: 110 kVA  
 Nominal AC current: 144 A  
 Maximum AC current: 160 A

**Efficiency**

Maximum efficiency: 98.66%  
 Efficiency defined for 3 voltages:

Contractual specifications, without real physical meaning: ? Required

Nominal PV Power: N/A kW  
 Maximum PV Power: N/A kW  
 Maximum PV Current: 260 A

Copy to table | Print | Cancel | OK

Şekil 6.3. Raporda kullanılan invertöre ait datasheet

**Definition of a PV module**

Basic data | Sizes and Technology | Model parameters | Additional Data | Commercial | Graphs

Model: PS-550-M6H-24-TH-1500V  
 File name: PhonoSolar\_PS\_550\_M6H\_24\_TH\_1500V.PAN  
 Manufacturer: Phono Solar  
 Data source: Datasheets 2023  
 Original PVsyst database  
 Prod. Since 2023

Nom. Power (at STC): 550.0 Wp Tol. +/- 0.0 1.5 %  
 Technology: Si-mono

**Manufacturer specifications or other measurements**

Reference conditions: GRef 1000 W/m<sup>2</sup>, TRef 25 °C  
 Short-circuit current: Isc 13.820 A, Open circuit Voc 49.59 V  
 Max Power Point: Impp 13.240 A, Vmpp 41.55 V  
 Temperature coefficient: muIsc 6.9 mA/°C, Nb cells in series 72 x 2  
 or muIsc 0.050 %/°C

**Internal model result tool**

Operating conditions: GOper 1000 W/m<sup>2</sup>, TOper 25 °C  
 Max Power Point: Pmpp 550.2 W, Current Impp 13.21 A, Temper. coeff. -0.34 %/°C, Voltage Vmpp 41.7 V  
 Short-circuit current: Isc 13.82 A, Open circuit Voc 49.6 V  
 Efficiency: / Cells area 23.07 %, / Module area 21.30 %

**Model summary**

Main parameters: R shunt 1400 Ω, Rsh(G=0) 5500 Ω  
 R serie model 0.17 Ω, R serie max. 0.17 Ω, R serie apparent 0.30 Ω  
 Model parameters: Gamma 0.976, IoRef 0.02 nA, muVoc -147 mV/°C, muPMax fixed -0.35 /°C

Show Optimization | Copy to table | Print | Cancel | OK

Şekil 6.4. Raporda kullanılan panele ait datasheet

Ayrıca PVSYST kullanılarak, koordinatları belirlenen şehirlere ait anlık, aylık ve mevsimsel optimum tilt açısı hesaplanmaktadır. Kırıkkale/Bahşili bölgesine ait yapılan çalışmanın detayları mevsim bazında değerlendirme Çizelge 6.2’de, aylık bazda değerlendirme ise Çizelge 6.3’te gösterilmektedir.

Çizelge 6.2. PVSyst Mevsimsel optimum tilt açısı

Mevsim	Optimum Tilt Açısı (°)
İlkbahar	34
Yaz	13
Sonbahar	34
Kış	57

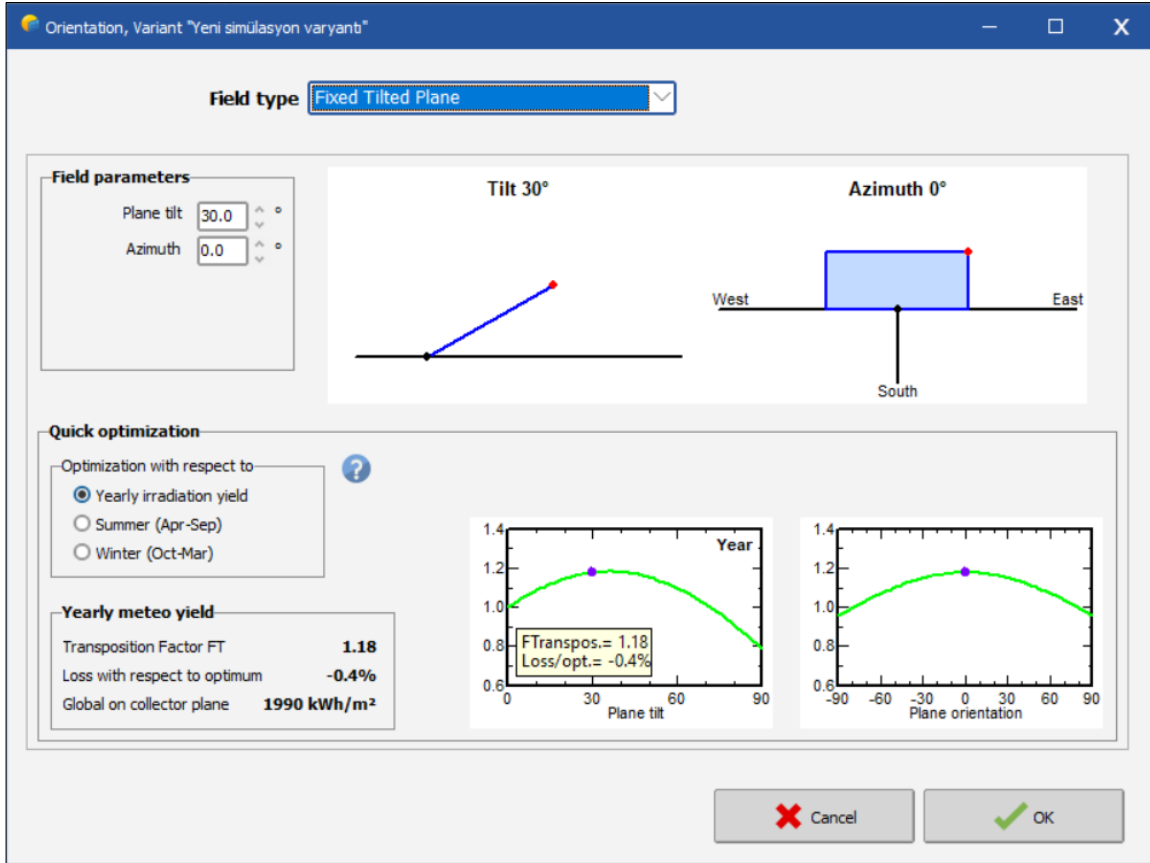
Çizelge 6.3. PVSyst Aylık ortalama optimum tilt açısı

Aylık Optimum Tilt Açısı											
Oca	Şub	Mar	Nis	May	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Kas	Ara
57°	56°	53°	45°	38°	32°	32°	33°	38°	46°	52°	57°

### 6.1.1. Sabit eksenli sistem PVSYST raporu

Sabit eksenli fotovoltaik sistemlerde, güneş panellerinin yerleşimi, her bölgenin coğrafi konumuna bağlı olarak belirli bir tilt açısı ile optimize edilmektedir. Bu açı, güneş ışınımının en verimli şekilde alınabilmesi için önemli bir parametredir ve her bölgeye özgü olarak hesaplanmaktadır. Türkiye genelinde, bu tilt açısının ortalama değeri 30-35 derece arasında değişmektedir. Bu açı, 24 saatlik bir zaman diliminde güneş ışınımından elde edilecek enerji veriminin maksimum seviyeye ulaşacağı değeri ifade eder.

Çalışma kapsamında, Şekil 6.5’te gösterilen sistemde tilt açısı 30° olarak seçilmiştir. Yani, fotovoltaik panellerin yerleştirildiği zemin ile paneller arasındaki açı 30°’dir. Bu yerleşim, sistemin sabit eksenli olduğu göz önünde bulundurularak, tüm gün boyunca güneş ışınımına aynı doğrultuda maruz kalacak şekilde optimize edilmiştir. Bu sayede, panel yüzeyinin güneş ışığından aldığı enerji, yıl boyunca en verimli şekilde toplanmakta ve sistemin enerji üretimi maksimize edilmektedir.



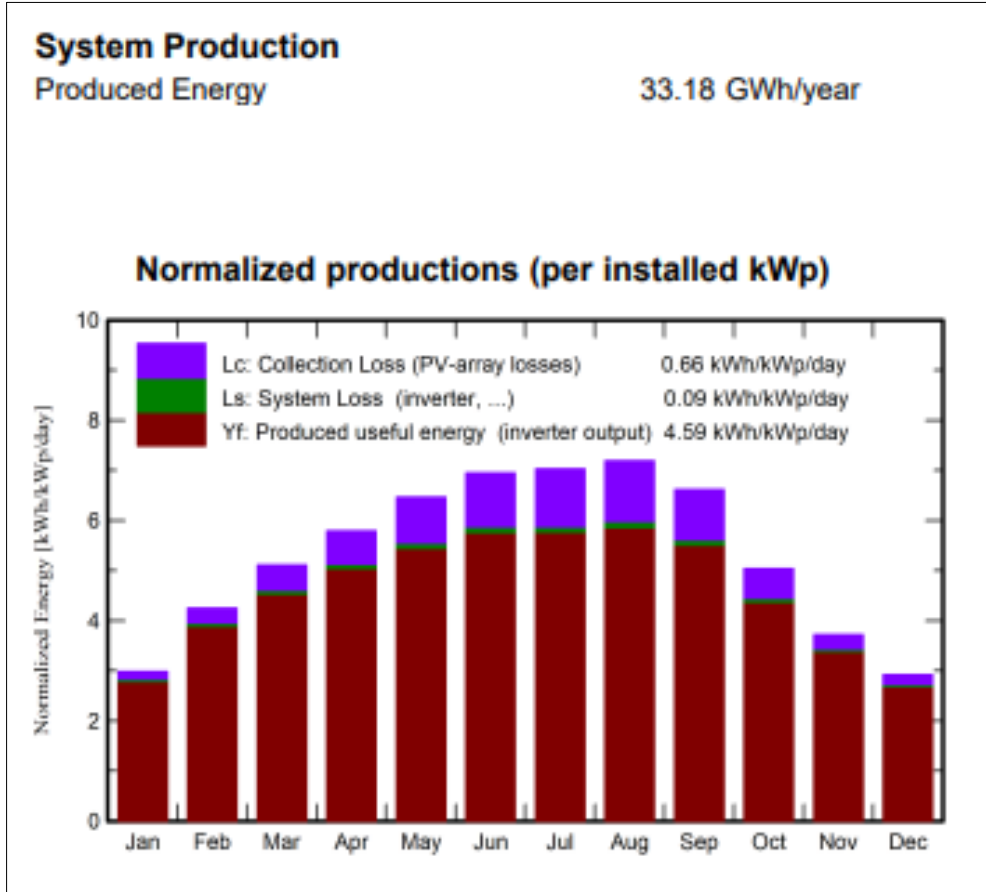
Şekil 6.5. PVSyst Sabit sistem yerleşim açısı

Panel ve invertör modeli seçilip, kurulu alanın gücü 15 MW belirlendikten sonra, PVSyst bu sistemde ne kadar invertör ve panele ihtiyaç olduğunu belirlemektedir. Şekil 6.6'da 36000 adet PV Modül kullanıldığı ve 150 adet de invertör kullanıldığı görülmektedir.

PV Array Characteristics			
<b>PV module</b>		<b>Inverter</b>	
Manufacturer	Phono Solar	Manufacturer	Huawei Technologies
Model	PS-550-M6H-24-TH-1500V	Model	SUN2000-100KTL-M1-400VAc
(Original PVSyst database)		(Original PVSyst database)	
Unit Nom. Power	550 Wp	Unit Nom. Power	100 kWAc
Number of PV modules	36000 units	Number of inverters	150 units
Nominal (STC)	19.80 MWp	Total power	15000 kWAc
Modules	2250 Strings x 16 In series	Operating voltage	200-1000 V
<b>At operating cond. (50°C)</b>		Max. power (=>33°C)	110 kWAc
Pmpp	18.07 MWp	Pnom ratio (DC:AC)	1.32
U mpp	605 V	Power sharing within this inverter	
I mpp	29884 A		
<b>Total PV power</b>		<b>Total inverter power</b>	
Nominal (STC)	19800 kWp	Total power	15000 kWAc
Total	36000 modules	Max. power	16500 kWAc
Module area	92997 m²	Number of inverters	150 units
		Pnom ratio	1.32

Şekil 6.6. PVSyst Sabit sistem karakteristik çizelgesi

Şekil 6.7'ye baktığımızda da üretilen enerjinin 33,18 GWh/year olduğu ve aylara göre PV kayıpları, Lc 0,66 kWh/kWp/gün, invertör kayıpları, Ls 0,09 kWh/kWp/gün, üretim sonucu kullanılabilen enerji miktarı 4,59 kWh/kWp/gün'dür.

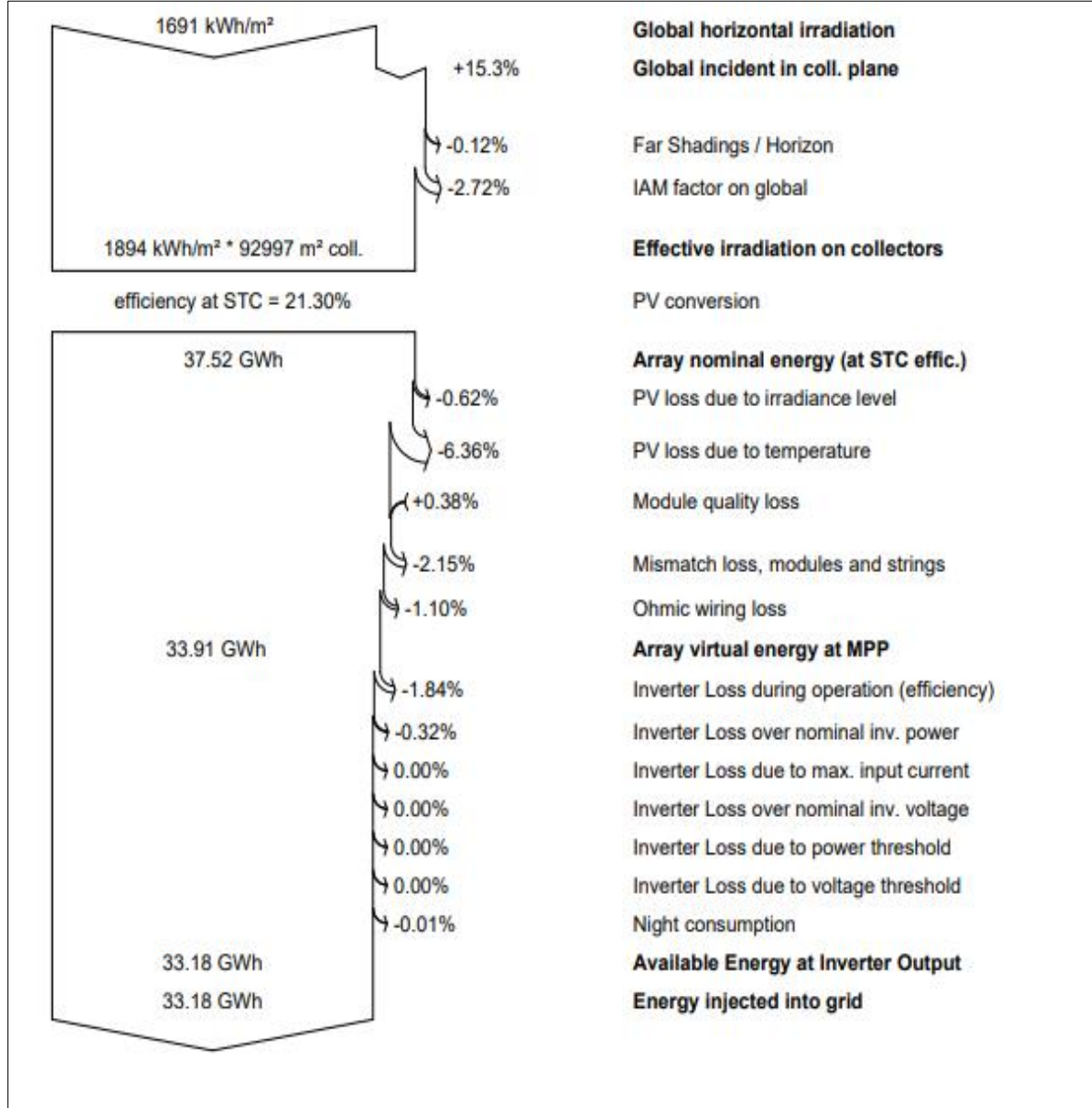


Şekil 6.7. PVSyst Sabit sistem ana sonuç değerler grafiği

Sisteme ait kayıp diyagramı, Şekil 6.7'de yüzdeler şeklinde detaylı bir şekilde sunulmuştur. Bu diyagram, sistemin farklı bileşenlerinde meydana gelen kayıpların etkisini görsel olarak ortaya koymaktadır. Standart test koşulları altında yapılan ölçümler, kullanılan fotovoltaik panellerin verimliliğinin %21,30 olarak belirlenmiştir. Bu değer, panelin güneş ışığından elde ettiği enerji oranını göstermektedir.

Yapılan hesaplamalar sonucunda, sistemin toplamda 37,52 GWh elektrik üretmesi beklenmektedir. Ancak, sistemdeki PV kayıpları, invertör verimliliği, kablo kayıpları ve diğer teknik faktörler göz önünde bulundurulduğunda, elde edilecek net enerji miktarının yaklaşık olarak 33,18 GWh olacağı öngörülmektedir. Bu kayıplar, sistemin gerçek enerji

üretimini etkileyen önemli faktörler olup, hesaplamalar bu kayıpların minimize edilmesi için gereken önlemlerle optimize edilmiştir.



Şekil 6.8. PVsyst Sabit sisteme ait kayıp diyagramı

PVsyst simülasyon yazılımı kullanılarak, bir yıl boyunca her ay için üretilen enerji, panel yüzeyine gelen güneş ışınımı, ortalama sıcaklık değerleri ve IEC standardına dayalı olarak referans verim, dize verimliliği, nihai verimlilik ve performans oranının aylık değişimleri hesaplanmıştır. Çizelge 6.4'te, aylık olarak toplam ve etkin global ışınım, dizelerden elde edilen enerji, şebekeye aktarılan enerji miktarı ve ortalama sıcaklık değerleri sunulmuştur. Elde edilen verilere göre, en yüksek global ışınım miktarının ve üretilen enerjinin temmuz

ayında gözlemlendiği, en yüksek şebekeye aktarılan enerji (E\_Grid) miktarının ise ağustos ayında gerçekleştiği tespit edilmiştir.

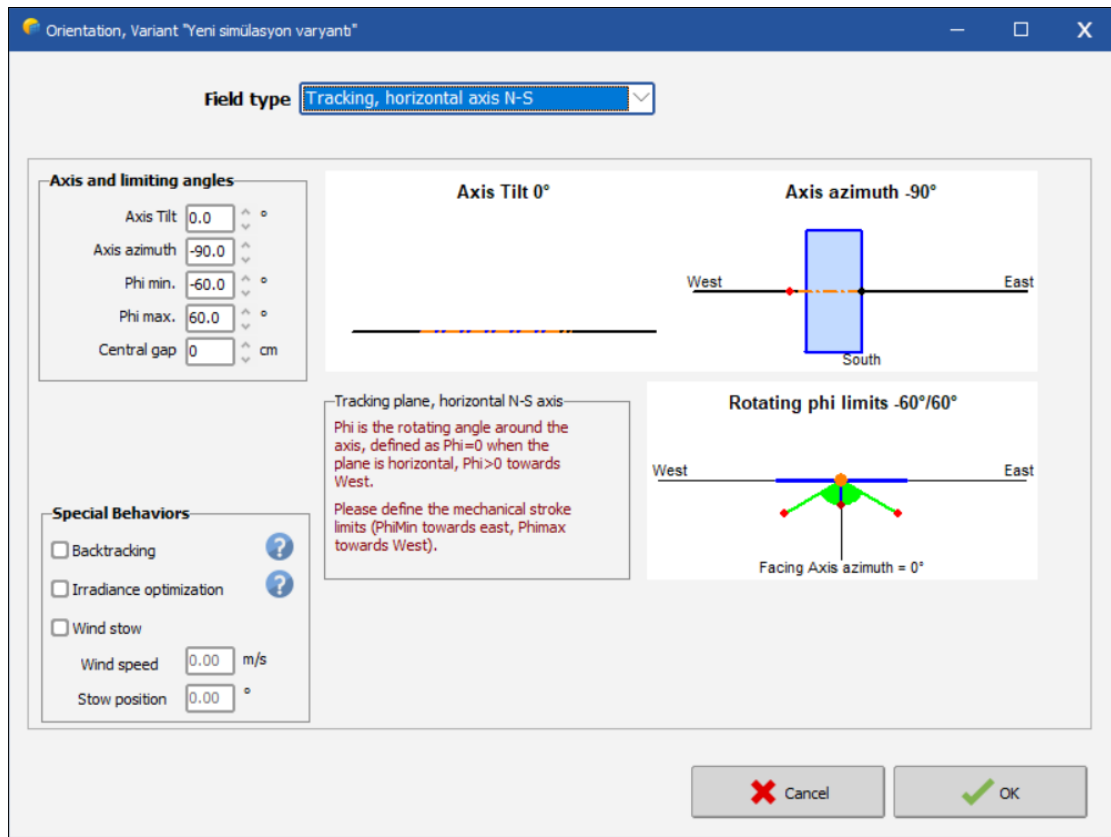
Çizelge 6.4. PVSyst Simülasyon verilerine göre sabit sistem aylık değeri

	Global Işıma kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh/m <sup>2</sup>	EArray GWh	E_Grid GWh	PR Ratio
Ocak	60,3	29,80	1,741	1,710	0,934
Şubat	81,2	31,70	2,197	2,158	0,917
Mart	127,9	54,10	2,833	2,782	0,888
Nisan	159,6	59,30	3,051	2,996	0,872
Mayıs	203,1	65,40	3,411	3,348	0,844
Haziran	221,4	70,80	3,492	3,426	0,830
Temmuz	226,1	62,00	3,612	3,541	0,821
Ağustos	209,1	53,60	3,675	3,601	0,816
Eylül	164,0	48,10	3,336	3,273	0,833
Ekim	112,3	38,80	2,735	2,686	0,868
Kasım	71,3	32,30	2,044	2,009	0,911
Aralık	55,0	26,30	1,679	1,649	0,921
YIL	1691,3	572,20	33,807	33,179	0,860

Sonuç olarak PVSyst'ten elde edindiğimiz rapordaki değerlere baktığımızda, Kırıkkale ili Bahşılı ilçesine sabit sistemli olarak kurulması istenilen 15 MW'lik GES'in, yıl içerisinde üreteceği miktarın yaklaşık olarak 33,179 GWh olacağı tahmin edilmiştir. Bu değerde üretim kayıpları, PV kayıpları ve çevresel etkiler sonucu oluşabilecek kayıplar ön görülerek hesaplamaya dahil edilmemiştir. Ayrıca 2024 yılına ait bu değere bakıldığında en çok katkı sağlayan ay ağustos ayı olup, üretimin en düşük gözlemlendiği ay ise aralık ayı olarak gösterilmektedir.

### 6.1.2. Hareketli sistem PVSyst raporu

Hareketli sistemler, sabit sistemlere kıyasla belli bir açı üzerinde ve sabit bir şekilde araziye yerleştirilmez. Dolayısıyla günün farklı saatlerinde güneşin konumundan kaynaklı olacak şekilde farklı açılarda görmemiz mümkündür. Bu hareketi sağlayabilmek için sistemde ekstra olarak tracker sistemi ve haberleşme modülleri kullanılmaktadır. PVSyst raporunda seçtiğimiz sisteme ait panellerin yerleşim konumu, tracking sisteminin montaj tipi, yüzeyle yapacağı max-min açı değerleri Şekil 6.9'da belirtilmiştir.



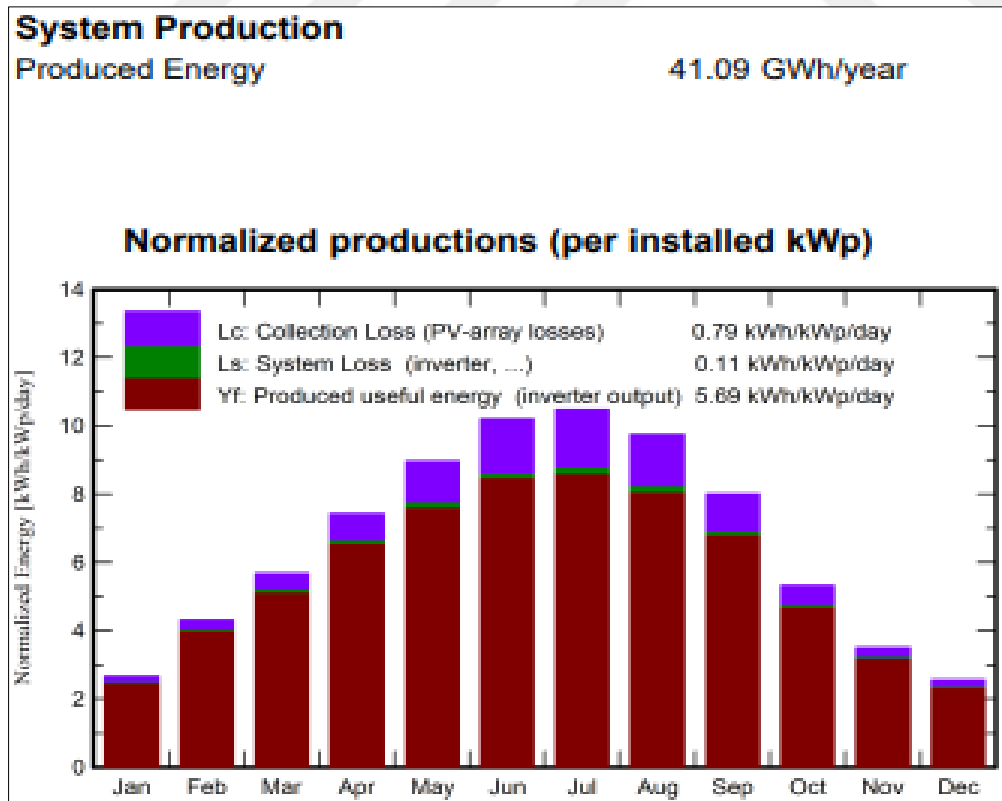
Şekil 6.9. PVSyst Hareketli sistem yerleşimi

Sabit sistemde seçilmiş olan panel ve invertör modeli hareketli sistemde de seçilip, kurulu alanın gücü 15 MW belirlendikten sonra, PVSyst bu sistemde ne kadar invertör ve panele ihtiyaç olduğunu belirlemektedir. Şekil 6.10'da 36 000 adet PV Modül kullanıldığı ve 150 adet de invertör kullanıldığı görülmektedir. Bu sayılar sabit sistemde de kullanılan değerlerle örtüşmektedir.

PV Array Characteristics			
<b>PV module</b>		<b>Inverter</b>	
Manufacturer	Phono Solar	Manufacturer	Huawei Technologies
Model	PS-550-M6H-24-TH-1500V	Model	SUN2000-100KTL-M1-400Vac
(Original PVsyst database)		(Original PVsyst database)	
Unit Nom. Power	550 Wp	Unit Nom. Power	100 kWac
Number of PV modules	36000 units	Number of inverters	150 units
Nominal (STC)	19.80 MWp	Total power	15000 kWac
Modules	2250 Strings x 16 In series	Operating voltage	200-1000 V
<b>At operating cond. (50°C)</b>		Max. power (=>33°C)	110 kWac
Pmpp	18.07 MWp	Pnom ratio (DC:AC)	1.32
U mpp	605 V	Power sharing within this inverter	
I mpp	29884 A		
<b>Total PV power</b>		<b>Total inverter power</b>	
Nominal (STC)	19800 kWp	Total power	15000 kWac
Total	36000 modules	Max. power	16500 kWac
Module area	92997 m <sup>2</sup>	Number of inverters	150 units
		Pnom ratio	1.32

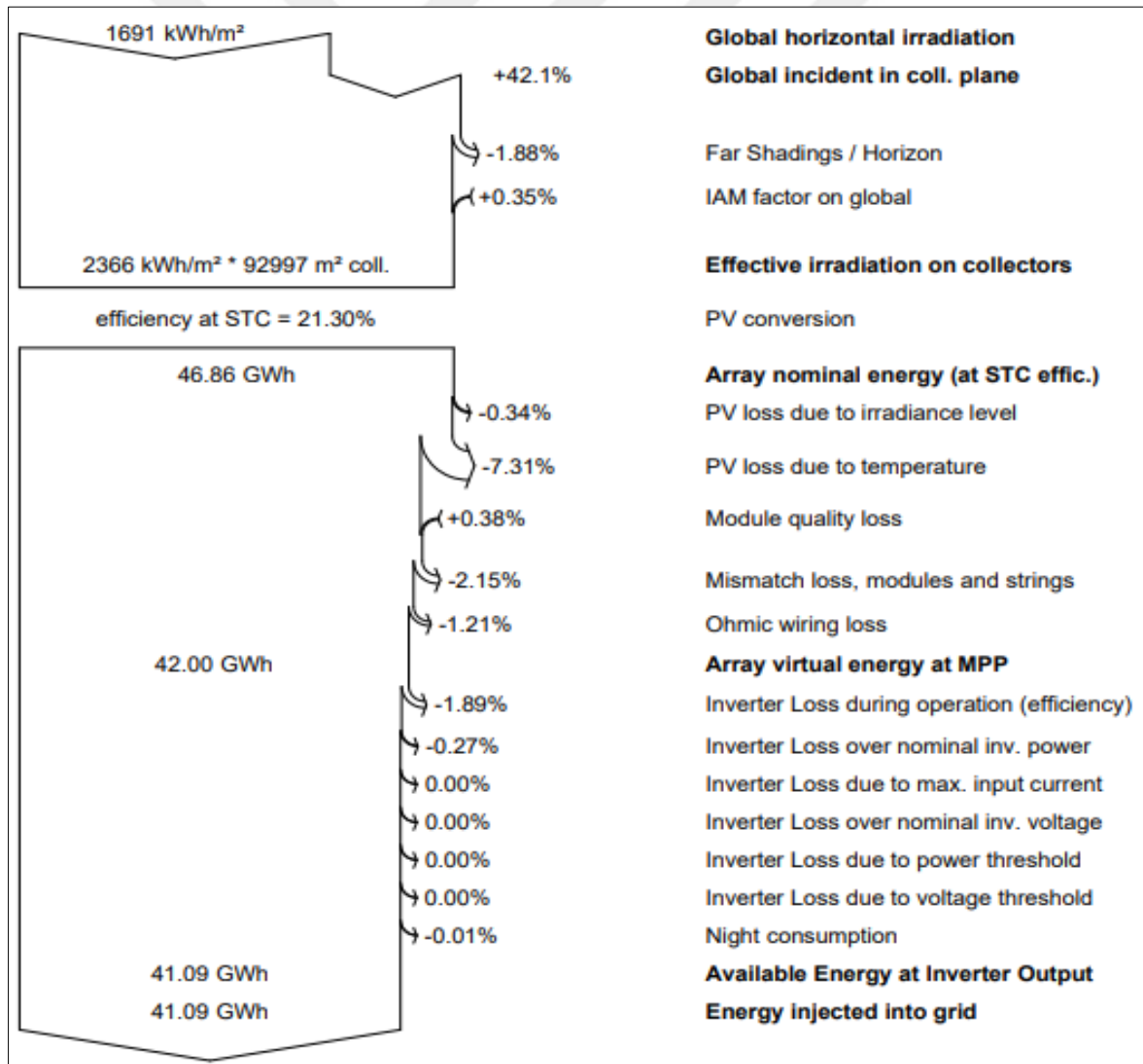
Şekil 6.10. PVSyst Hareketli sistem karakteristikleri

Şekil 6.11'e baktığımızda da üretilen enerjinin 41,09 GWh/year olduğu ve aylara göre PV kayıpları, Lc 0,79vkWh/kWp/gün, invertör kayıpları, Ls 0,11 kWh/kWp/gün, üretim sonucu kullanılabilen enerji miktarı 5,69 kWh/kWp/gün'dür.



Şekil 6.11. PVSyst Hareketli sistem ana sonuç değerleri

Sisteme ait kayıp diyagramı, Şekil 6.12’de yüzdelik değerler halinde ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu diyagram, sistemin her bileşenindeki kayıpların etkisini açık bir şekilde göstermektedir. Yapılan ölçümler, standart test koşulları altında kullanılan fotovoltaik panellerin verimliliğinin %21,30 olduğunu ortaya koymaktadır. Bu verimlilik değeri, panellerin güneş ışığından elde ettikleri enerji oranını temsil etmektedir. Hesaplamalar neticesinde, sistemin toplam elektrik üretiminin yaklaşık 46,86 GWh olması beklenmektedir. Ancak, fotovoltaik sistemdeki PV kayıpları, invertör verimliliği, kablo kayıpları ve diğer teknik faktörler dikkate alındığında, elde edilecek net enerji miktarının yaklaşık 41,09 GWh olacağı öngörülmektedir. Bu kayıplar, sistemin enerji üretiminde önemli bir etkiye sahiptir ve yapılan hesaplamalar, kayıpların minimize edilmesi için gerekli optimizasyonları yansıtmaktadır.



Şekil 6.12. PVSyst hareketli sisteme ait kayıp diyagramı

Çizelge 6.5'te, PVSyst simülasyon programından elde edilen rapor verilerine dayanarak, Kırıkkale ili Bahşılı ilçesinde sabit sistemle kurulması planlanan 15 MW gücündeki güneş enerjisi santralının yıl boyunca üreteceği toplam enerji miktarının yaklaşık 41,088 GWh olacağı öngörülmüştür. Bu üretim miktarına en fazla katkıyı sağlayan ay ağustos ayı olup, üretimin en düşük olduğu ay ise aralık ayı olarak belirlenmiştir.

Çizelge 6.5. PVSyst Simülasyon verilerine göre hareketli sistem aylık değeri

	Global Işıma kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh/m <sup>2</sup>	EArray GWh	E_Grid GWh	PR Ratio
Ocak	60.3	29.80	1.556	1.529	0.936
Şubat	81.2	31.70	2.263	2.223	0.928
Mart	127.9	54.10	3.217	3.159	0.905
Nisan	159.6	59.30	3.974	3.902	0.886
Mayıs	203.1	65.40	4.776	4.683	0.851
Haziran	221.4	70.80	5.147	5.045	0.832
Temmuz	226.1	62.00	5.414	5.301	0.824
Ağustos	209.1	53.60	5.067	4.961	0.829
Eylül	164.0	48.10	4.129	4.050	0.852
Ekim	112.3	38.80	2.938	2.886	0.885
Kasım	71.3	32.30	1.935	1.903	0.917
Aralık	55.0	26.30	1.472	1.447	0.922
YIL	1691.3	572.20	41.887	41.088	0.864

### 6.1.3. PVSyst Sabit ve hareketli sistem karşılaştırılması

PVSyst'ten elde edilen verileri sabit ve hareketli sistemi Çizelge 6.6'da kıyaslayacak olursak, aralarındaki üretim farkı her ay farklı olduğu gözlemlenmektedir. Bu farkların en yüksek hissedildiği ay yaklaşık 2 GW fark bulunan temmuz ayı olarak gözlemlenmektedir.

Aynı şekilde, belirlenen bu farkın en az olduğu aylar için Kış ayları (Ekim, Kasım) örnek gösterilmektedir.

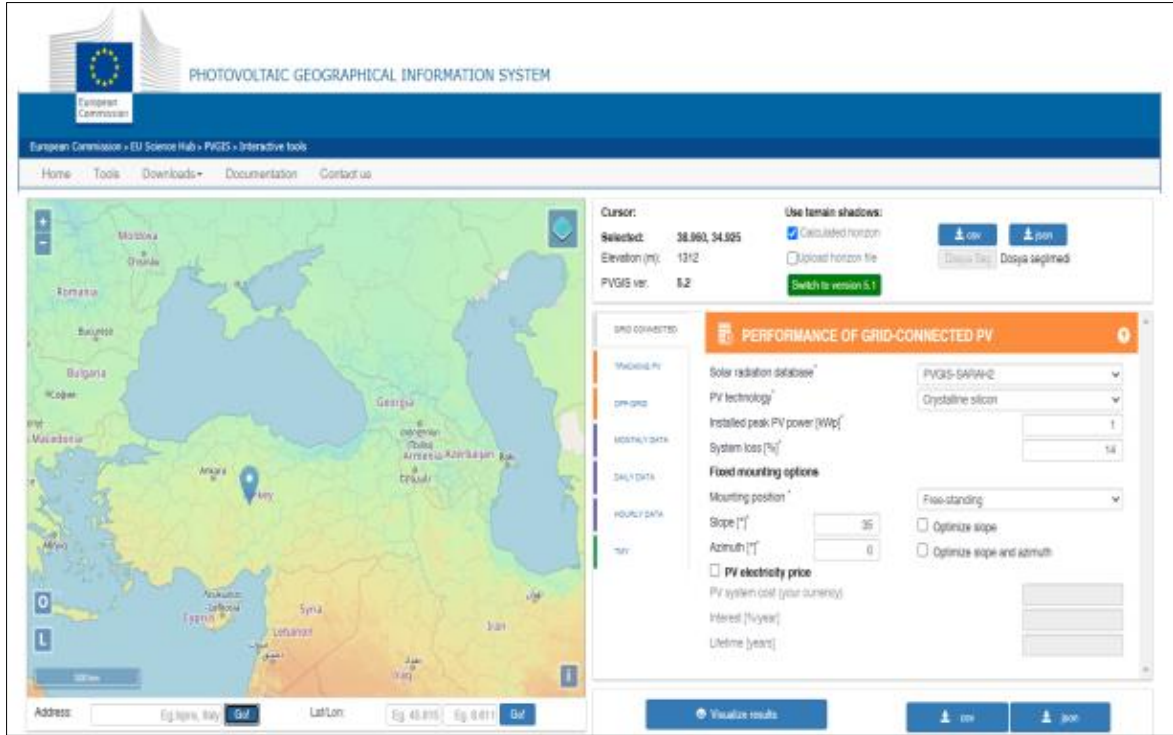
Çizelge 6.6. PVSyst sabit sistem ve hareketli sistem karşılaştırılması

	Sabit Sistem E_Grid (GWh)	Hareketli Sistem E_Grid (GWh)
Ocak	1.710	1.529
Şubat	2.158	2.223
Mart	2.782	3.159
Nisan	2.996	3.902
Mayıs	3.348	4.683
Haziran	3.426	5.045
Temmuz	3.541	5.301
Ağustos	3.601	4.961
Eylül	3.273	4.050
Ekim	2.686	2.886
Kasım	2.009	1.903
Aralık	1.649	1.447
<b>YIL</b>	<b>33.179</b>	<b>41.088</b>

## 6.2. PVGIS Metodu

PVGIS, uydu etkileşimi ve meteoroloji verilerini kullanarak kendi içerisinde hesaplama yapan ücretsiz programdır. Bu program kullanılarak, sabit montaj seçeneği ile çatı ve arazi GES'lerin saatlik, günlük ve saatlik güneş radyasyonu hesaplaması tahmin edilmektedir. PVGIS (Şekil 6.13) herhangi bir simülasyon çıktısı, kendi sistem değerlerimizi girdiğimizde bize elde edilebilecek gücü tahmin eden bir uygulamadır.

Ayrıca bu uygulamada hareketli sistem karşılaştırılmadığından, sadece sabit sistemlerin değer çıktıklarına erişebilmektedir.



Şekil 6.13. PVGIS sistem arayüzü

PVGIS çalışma mantığı olan güneş paneli yüzeyine düşen toplam güneş radyasyon değeri, elde edilen toplam güç ve panel sıcaklığına bağlı olan değerler 6.1'den 6.5'e kadar tanımlanan denklemlere göre hesaplanır (Gracia ve Huld, 2013).

$$GT = GbT + GdT + GrT \quad (6.1)$$

Denklem 6.1'e göre;  $GT$  panelin yüzeyine gelen toplam radyasyon değerini ifade etmektedir.  $GbT$  eğimli yüzeye gelen direkt radyasyon değeri,  $GdT$  difüz radyasyon değeri ve  $GrT$  yansıyan radyasyon değerini [ $W/m^2$ ] göstermektedir.

$$P(G'_T, T') = G'_T * (\rho_{SCT,m} + k_1 \ln(G'_T) + k_2 \ln(G'_T)^2) + k_3 T' + k_4 T' \ln(G'_T) + k_5 T' \ln(G'_T)^2 + k_6 T'^2 \quad (6.2)$$

$$G'_T \equiv G_T / G_{SCT}$$

$$T' \equiv T_{mod} - T_{SCT}$$

$$\eta_{rel}(G'_T, T') \equiv P(G'_T, T') / (\rho_{SCT,m} G'_T) \quad (6.3)$$

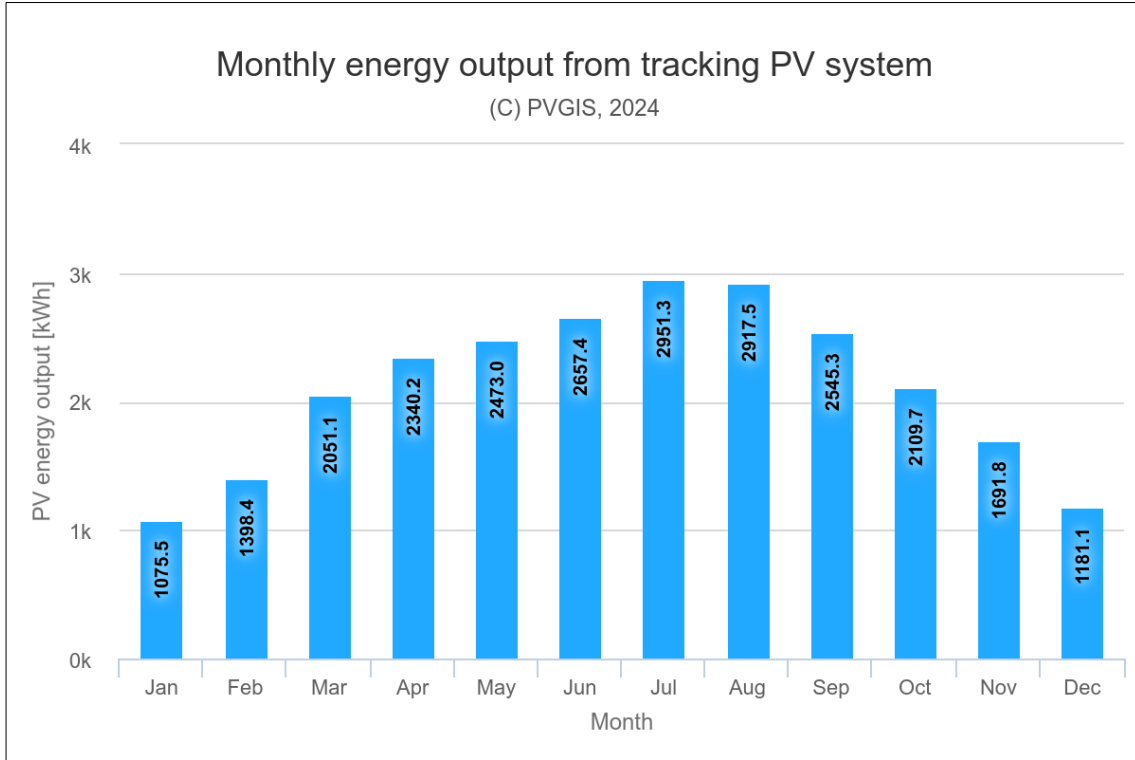
Denklemlerde, toplam güneş radyasyonu  $GT'$  ve panel sıcaklığı  $T'$  olarak gösterilmektedir.  $k_1$  ile  $k_6$  arasındaki katsayılar, PV panel türüne özgü Avrupa Güneş Test Kurulumu tarafından ölçülen verilere bağlıdır. PSTC terimi, standart test koşulları altında maksimum gücü temsil etmektedir.  $T_{mod}$  Değeri panel sıcaklığını belirtmektedir ve Sistemde bahsedilen GSTC değeri  $1000 \text{ W/m}^2$  ve  $T_{SCT}$  değeri  $25^\circ\text{C}$ 'dir.  $\eta_{rel}$  Denklemi ile sistemin verimliliği belirtilir (Inan, 2024).

PVGIS simülasyonu için değerlendirilen parametreler Çizelge 6.7'de belirtilmiştir.

Çizelge 6.7. PVGIS simülasyon girdileri

Simülasyon Girdileri	Değerler
Lokasyon Kullanılan Veri Tabanı	Kırıkkale/Türkiye PVGIS-SARAH-2
Eğim Açısı	$30^\circ$
Azimet Açısı	$0^\circ$
Kullanılan PV	Kristal Silikon
Kurulu Güç	15 MW

Kırıkkale lokasyonu için kurulacak olan sabit sistem güneş enerjisi santraline ait çalışma için PVGIS tabanına girildiğinde Şekil 6.14'deki değerler elde edilmektedir. Simülasyon gerçekleştirilirken %2,74 ışıınım geliş açısı, %0,46 spektral etkiler, %7,59 sıcaklık ve düşük ışıınıma bağlı kayıplarda sonuç raporunda yer almaktadır. Sistemin tahmini toplam genel kaybı %9,71 olarak sonuç raporunda hesaplanmıştır



Şekil 6.14. Aylık PVGIS enerji çıktısı [kWh]

Ayrıca PVGIS kullanılarak, koordinatları belirlenen şehirlere ait anlık, aylık ve mevsimsel optimum tilt açısı hesaplanmaktadır. Kırıkkale/Bahşili bölgesine ait yapılan çalışmanın detayları mevsim bazında değerlendirme Çizelge 6.8’de, aylık bazda değerlendirme ise Çizelge 6.9’da gösterilmektedir.

Çizelge 6.8. PVGIS Mevsimsel optimum tilt açısı

Mevsim	Optimum Tilt Açısı (°)
İlkbahar	25–26
Yaz	12–13
Sonbahar	49
Kış	57–58

Çizelge 6.9. PVGIS Aylık ortalama optimum tilt açısı

Aylık Optimum Tilt Açısı											
Oca	Şub	Mar	Nis	May	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Kas	Ara
57°	51°	40°	24°	11°	5°	8°	21°	36°	51°	59°	62°

### 6.3. PVGIS ve PVSYST Karşılaştırılması

PVSyst ve PVGIS yazılımlarından elde edilen tilt açıları arasındaki farklılıklar, her iki yazılımın kullandığı yöntem ve veri kaynaklarındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Bu farklılıklar kısaca;

#### *Veri kaynakları*

- *PVSyst*, kullanıcının belirlediği yerel iklim verileri, sistem tasarım parametreleri ve panel özelliklerine dayanarak özelleştirilmiş simülasyonlar gerçekleştirmektedir. Bu yazılım, yerel güneş ışınımı, sıcaklık koşulları ve panel/inverter verimlilikleri gibi parametreleri dikkate alarak daha ayrıntılı sonuçlar üretmektedir.
- *PVGIS* ise daha genel ve geniş kapsamlı veritabanlarına, özellikle uydu verileri ve tarihsel ışınım verilerine dayanarak hesaplamalar yapmaktadır. Bu nedenle, bölgesel verilerin genel eğilimlerine odaklanarak, her bir bölgeye özel ince parametreleri göz ardı edilebilmektedir.

#### *Modelleme yöntemleri*

- *PVSyst*, güneş enerjisi sistemlerinin performansını daha kapsamlı bir şekilde modelleyerek, sistemin dinamik özelliklerini (panel verimliliği, inverter kayıpları, sıcaklık etkisi gibi) ve çevresel faktörleri detaylı olarak hesaba katmaktadır. Bu, daha hassas ve gerçekçi simülasyon sonuçlarının elde edilmesini sağlamaktadır.
- *PVGIS* ise, daha basit bir modelleme yaklaşımı benimseyerek, temel güneş ışınımı verilerine ve genel bölgesel analizlere dayalı tahminler yapmaktadır. Bu yaklaşım, yerel varyasyonları ve ince detayları göz önünde bulundurmamaktadır.

Bu tez kapsamında kullanılmış olan PVSyst ve PVGIS yazılımlarına ait karşılaştırma Çizelge 6.10'da gösterilmiştir. Bu Çizelgedan faydalanarak, her iki yazılımda ortak olan veya farklı olan özellikler kısaca gözlemlenebilmektedir.

Çizelge 6.10. PVSyst ve PVGIS karşılaştırılması

	PVGIS	PVSYST
Şebeke Tasarımı (On/Of Grid)	X	√
Meteororm Veri Erişimi	√	√
PV ve İnvörtör Seçimi	X	√
Kayıp Analizi	X	√
Işınım Değer Verisi (KWh)	√	√
Tilt Açısı Ayarlama	√	√
Sabit Sistem Tasarımı	√	√
Hareketli Sistem Tasarımı	X	√

PVGIS ve PVSyst'te sabit sistemde 30° tilt açısı ile elde ait değerleri Çizelge 6.11'de karşılaştırılması gösterilmiştir.

Çizelge 6.11. PVGIS ve PVSyst 30° tilt açısı

AYLAR	PVGIS VERİLERİ (KWh)	PVSYST VERİLERİ (KWh)
Ocak	1,075	1,710
Şubat	1,398	2,158
Mart	2,051	2,782
Nisan	2,340	2,996
Mayıs	2,473	3,348
Haziran	2,657	3,426
Temmuz	2,951	3,541
Ağustos	2,917	3,601
Eylül	2,543	3,273
Ekim	2,109	2,686
Kasım	1,697	2,009
Aralık	1,181	1,649
TOPLAM	25,392	33,179

Üretimdeki farklılıkların en bariz sebepleri;

- PVGIS verilerinde sadece arazinin seçilip, kullanılan invertör ve panel verilerin girilmemesi.
- PVGIS kullanılacak malzemelerden kaynaklanabilecek (kablo, panel vs.) gibi kayıpları net bilmemesi.

#### 6.4. EPİAŞ 2023 Yılı PTF Çalışması

PTF, Gün öncesi piyasasında verilmiş teklifler sonucunda, arz ve talebin kesiştiği noktada meydana gelen fiyattır. EPİAŞ sitesinde gün ve saat olarak elektrik satışı şeffaf bir şekilde paylaşmaktadır. Çizelge 6.12’de EPİAŞ’ın 2023 yılında yayımladığı değerlerin Çizelge haline getirilmiş hali gösterilmiştir. Burada renklendirme çalışması olarak, fiyat bazında yüksek saat ve değerlerin olduğu noktalar kırmızı renkte gösterilirken, düşük fiyatlandırmadan satışın olduğu değerler yeşil olarak belirtilmiştir. Bu fiyatlar ise MW başına USD birim fiyatı olarak gösterilmektedir.

Çizelge 6.12. EPİAŞ aylık PTF verileri

2024	AYLAR BAZINDA DEĞERLENDİRİLMESİ											
PTF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
00:00	165,5	143,4	97,6	107,3	112,8	81,3	84,3	90,5	81,8	84,4	68,1	69
01:00	161,2	139	99,4	93,6	102,3	75,9	78,3	83,5	74,2	81,1	62,8	65
02:00	153,1	125,7	97,5	79,3	91,2	67,9	73,6	76,6	68	74,8	59,3	57,2
03:00	147,7	121,6	96,1	75,9	85,9	66,7	71,4	70,6	64,9	69,7	55,5	52,7
04:00	148,8	119,4	101,7	84,7	87,4	67,6	70,2	70,5	62,4	67,8	54,6	54,3
05:00	156,9	118,8	106,2	87,7	87,7	63,4	65,3	70,5	67,2	73,9	58,2	61,6
06:00	166	132,5	106,1	83,6	74,6	56,1	64,4	69,1	66,7	82,2	68,8	71,8
07:00	176,5	137,3	98,1	65,9	69,3	51,7	57,5	62,7	66,1	81,9	71,3	74,5
08:00	212,4	167	136,8	93,1	100,8	68,2	74,3	84,9	75,7	90,5	84,1	84,5
09:00	215,7	167,4	141,2	98,1	105,7	69,4	75,1	87,9	76,5	85,4	85,4	85,1
10:00	215,5	162	117,3	84,4	93	59,4	72,1	86,2	69,8	76	76,5	75,6
11:00	200,2	162,6	107,4	81,6	93,9	63,3	71,1	85,8	69,2	73,4	70,5	75,3
12:00	160,9	134,8	90,4	63,7	73,8	48,5	59,2	71,3	57,1	55,3	53,8	56,8
13:00	159,5	135,1	95,4	65,4	81,5	57,3	65,5	77,4	64,6	66	63,7	61,3
14:00	172,4	140,9	108,1	78,8	91,4	65,7	73	88,3	73,1	78,5	74	67,4
15:00	178,7	141,8	107,7	80,8	90	66,2	73,6	89,2	74,3	83	80,2	72,7
16:00	200,4	152,6	108,9	86,8	87,1	67,6	72,6	90	78,6	90,1	88,2	81,4
17:00	221,3	174,7	117,9	100,6	98,5	75,9	76,9	91	86,8	95,6	91,5	87,7
18:00	220,9	187,5	141,3	117,9	109	77	84,7	94,3	91,9	96	90,9	89,4
19:00	208,2	183,9	148,7	123,8	126,8	87,8	91,8	96,3	96,9	96	84,8	81,2

Çizelge 6.12. (devam) EPIAŞ aylık PTF verileri

20:00	207,7	176,3	138,9	131	132,3	99,3	92,8	98,5	94,1	93,9	82,5	80,4
21:00	206,3	175,1	127,9	126,9	130,7	97,6	93,2	96,4	83,4	89,7	79,7	80,8
22:00	178,1	145,1	109,3	101	106,1	80,5	81,1	89,7	76,4	83,1	73,6	72,2
23:00	157,1	129,7	92,6	91,2	98,9	73,6	76,6	85,2	69,8	75,8	59	58,5
Ortalama												
PTF USD/MW	182,9	148,9	112,2	91,8	97,1	70,3	74,9	83,6	74,6	81	72,4	71,6

### 6.5. Maliyet Analizi

Sabit ve hareketli sistemlerin kıyaslanması PVSYST yazılımı kullanılarak incelenmiş olup, her iki sistem kullanıldığında %23,82'lik bir fark gözlemlenmiştir. PVSYST'ten elde edilen sabit ve hareketli sisteme ait üretim verilerini, Çizelge 6.12'de bulunan EPIAŞ verileri ile kıyasladığımızdaki sonuç Çizelge 6.13'te gösterilmiştir. Bu sonuca göre, Kırıkkale'de kurulan 15 MW'lık bir santralde hareketli sistem kullanıldığında, yıllık 643 502 00 \$'lık üretimde artışın olduğu gözlemlenmektedir.

Çizelge 6.13. Üretim verilerinin fiyatlandırılması

Aylar	Sabit Sistem Üretimi (MWh)	Hareketli Sistem Üretimi (MWh)	Ortalama PTF Fiyatı (USD/MW)	Sabit Sistem Toplam Kazanç	Hareketli Sistem Toplam Kazanç	Fiyat Farkı (Hareketli-Sabit)
Ocak	1710	1529	183	312.930,00 \$	279.807,00 \$	-33.123,00 \$
Şubat	2158	2223	139	299.962,00 \$	308.997,00 \$	9.035,00 \$
Mart	2782	3159	112	311.584,00 \$	353.808,00 \$	42.224,00 \$
Nisan	2996	3902	92	275.632,00 \$	358.984,00 \$	83.352,00 \$
Mayıs	3348	4683	97	324.756,00 \$	454.251,00 \$	129.495,00 \$
Haziran	3426	5045	70	239.820,00 \$	353.150,00 \$	113.330,00 \$
Temmuz	3541	5301	75	265.575,00 \$	397.575,00 \$	132.000,00 \$
Ağustos	3601	4961	84	302.484,00 \$	416.724,00 \$	114.240,00 \$
Eylül	3273	4050	75	245.475,00 \$	303.750,00 \$	58.275,00 \$
Ekim	2686	2886	81	217.566,00 \$	233.766,00 \$	16.200,00 \$
Kasım	2009	1903	72	144.648,00 \$	137.016,00 \$	-7.632,00 \$
Aralık	1649	1447	72	118.728,00 \$	104.184,00 \$	14.544,00 \$
Toplam Kazanç:						643.035,00 \$

15 MW'lık sisteme, tracker sistemi kullanıldığında arazi şartları, alanın metre karesi düşünüldüğünde 181 adet uzun masa 22 adet kısa masa kullanımı program tarafından uygun görülmüştür. Bu masalar üzerinde gerekli olan TCU motor, çark, montaj elemanları gibi detayların birim fiyat ve toplam malzeme çalışmasına ait verilerin detayı Çizelge 6.14'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.14. Tracker sistemi fiyat çalışması

Malzeme Adı	Uzun Masa	Kısa Masa	Birim Fiyat	Uzun Masa (181 adet) Tutarları	Kısa Masa (22 adet) Tutarları
SRT Post SRF8- 2834mm	15	10	€ 45,08	€ 122.392,20	€ 9.917,60
SRT Girder Assembly pre- assembled 8	15	10	€ 300,80	€ 816.672,00	€ 66.176,00
SRT Spacer2 Post lateral 3mm	30	20	€ 1,85	€ 10.045,50	€ 814,00
SRT Driver Shaft- 5455 mm	13	0	€ 30,87	€ 72.637,11	-
SRT Driver Shaft- 5309 mm	1	0	€ 30,05	5.439,05	-
SRT Driver Shaft- 5545 mm	0	8	€ 31,38	-	€ 5.522,88
SRT Driver Shaft- 5399 mm	0	1	€ 30,50	-	€ 671,00
SRT Connector Drive Shaft ST	28	18	€ 20,13	€ 102.018,84	€ 7.971,48
SRT Drive Shaft Motor Unit II	1	1	€ 10,61	€ 1.920,41	€ 233,42
SRT Support Motor Unit	1	1	€ 17,92	€ 3.243,52	€ 394,24
SRT Purlin Girder connection outer part	30	20	€ 0,96	€ 5.212,80	€ 422,40
Snap Ring for shaft Motor Unit I / II	1	1	€ 0,74	€ 133,94	€ 16,28
SRT Purlin Connector	14	10	€ 3,32	€ 8.412,88	€ 730,40
SRT Purlin SH- 11068 mm 01/01	2	0	€ 150,00	€ 54.300,00	-
SRT Purlin SH- 11068 mm 01/02	2	0	€ 150,00	€ 54.300,00	-
SRT Purlin SH- 11068 mm 01/03	2	0	€ 150,00	54.300,00	-
SRT Purlin SH- 11453 mm 01/04	2	0	€ 150,00	€ 54.300,00	-
SRT Purlin SH- 10683 mm 01/05	2	0	€ 98,87	€ 35.790,94	-
SRT Purlin SH- 11068 mm 01/06	2	0	€ 102,43	€ 37.079,66	-
SRT Purlin SH- 11068 mm 01/07	2	0	€ 102,43	€ 37.079,66	-
SRT Purlin SH- 11068 mm 01/08	2	0	€ 102,43	€ 37.079,66	-
SRT Purlin SH- 9967 mm 02/01	0	2	€ 95,24	-	€ 4.190,56
SRT Purlin SH- 9969 mm 02/02	0	2	€ 95,24	-	€ 4.190,56
SRT Purlin SH- 9969 mm 02/03	0	2	€ 95,24	-	€ 4.190,56
SRT Purlin SH- 9243 mm 02/04	0	2	€ 85,54	-	€ 3.763,76
SRT Purlin SH- 9969 mm 02/05	0	2	€ 92,26	-	€ 4.059,44
SRT Purlin SH- 9969 mm 02/06	0	2	€ 92,26	-	€ 4.059,44
SRT Rafter U 70mm 3510mm	79	53	€ 17,26	€ 246.800,74	€ 20.125,16

Çizelge 6.14. (devam) Tracker sistemi fiyat çalışması

SRT Connector Rafter- Purlin	158	106	€ 0,36	€ 10.295,28	€ 839,52
SRT Rafterfix	158	106	€ 0,21	€ 6.005,58	€ 489,72
SRT Support Unit grid powered	1	1	€ 8,76	€ 1.585,56	€ 192,72
TCU	1	1	€ 400,00	€ 72.400,00	€ 8.800,00
BOLT HX ISO4014 M12X110 8.8 ZF*	30	20	€ 0,37	€ 2.009,10	€ 162,80
NUT HX ISO4032 M12 8 ZF*	30	20	€ 0,04	€ 217,20	€ 17,60
WASHER ISO7089 12 200 HV ZF*	60	40	€ 0,02	€ 217,20	€ 17,60
BOLT HX ISO4017 M6X16 8.8 ZF	30	20	€ 0,02	€ 108,60	€ 8,80
BOLT SH CH ISO 10642 M12X25 8.8 ZF	6	6	€ 0,10	€ 108,60	€ 13,20
BOLT HX ISO4017 M12X40 8.8 ZF	4	4	€ 0,13	€ 94,12	€ 11,44
NUT HX ISO4032 M12 8 ZF	4	4	€ 0,04	€ 28,96	€ 3,52
WASHER ISO7089 12 200 HV ZF	8	8	€ 0,02	€ 28,96	€ 3,52
BOLT HX ISO4014 M10X95 8.8 ZF	28	18	€ 0,19	€ 962,92	€ 75,24
NUT HX SL ISO7042 M10 8 ZF	28	18	€ 0,02	€ 101,36	€ 7,92
WASHER ISO7089 10 200HV ZF	56	36	€ 0,02	€ 202,72	€ 15,84
BOLT HX ISO4017 M10X30 8.8 ZF	60	40	€ 0,02	€ 217,20	€ 17,60
NUT HX ISO4032 M10 8 ZF	60	40	€ 0,02	€ 217,20	€ 17,60
WASHER ISO7089 10 200HV ZF	120	80	€ 0,02	€ 434,40	€ 35,20
BOLT HX ISO4017 M12X25 8.8 ZF	112	80	€ 0,02	€ 405,44	€ 35,20
NUT HX ISO4032 M12 ZF	112	80	€ 0,04	€ 810,88	€ 70,40
WASHER ISO7089 12 200HV ZF	224	160	€ 0,02	€ 810,88	€ 70,40
BOLT HX ISO4017 M10X40 8.8 ZF	158	106	€ 0,12	€ 3.431,76	€ 279,84
NUT HX ISO4032 M10 8 ZF	158	106	€ 0,01	€ 285,98	€ 23,32
BOLT FL LS EN1665 M6X16 8 ZF	4	4	€ 0,03	€ 21,72	€ 2,64
NUT FL SL EN1664 M6 8 ZF	4	4	€ 0,06	€ 43,44	€ 5,28
BOLT HX ISO4017 M8X30 8.8 ZF	4	4	€ 0,11	€ 79,64	€ 9,68
NUT HX ISO4032 M8 8 ZF	4	4	€ 0,02	€ 14,48	€ 1,76
WASHER ISO7089 8 200HV ZF	8	8	€ 0,02	€ 28,96	€ 3,52
BOLT FL.SELF LOCK EN1665 M6X16 8 ZF	624	416	€ 0,03	€ 3.388,32	€ 274,56
NUT FL. SELF LOCK EN1664 M6 8 ZF	624	416	€ 0,06	€ 6.776,64	€ 549,12
			Ara Toplam	€ 1.870.492,01	€ 149.504,74
Toplam					€ 2.019.996,75

Çizelge 6.14'te yer alan verilere göre, 15 MW'lık üretim kapasitesine sahip tracker sistemin kurulumu, sabit sistemin malzeme fiyatına ilave olarak 2.019.996,752 € ek bir maliyet gerektirmektedir. PVSyst simülasyon verilerine göre, tracker sistemin sağladığı üretim artışı sonucunda, yıllık 643.502,00 \$ tutarında bir kâr elde edileceği öngörülmektedir. Tracker sistemlerinin bakım maliyetleri, genellikle kurulum maliyetlerinin %4-5'i kadar olup bu oran, sistemin karmaşıklığına, kullanılan teknolojilere ve bakım gereksinimlerine göre değişiklik gösterebilir. Örneğin, hareketli parçaların (motorlar, dişliler, sensörler) olduğu sistemlerde, bakım ve onarım maliyetleri sabit sistemlere göre daha yüksek olabilir. Ayrıca yıllar içinde bu oran artabilir. Çünkü hareketli sistemlerin bakım gereksinimleri, yaşlandıkça artan yıpranmalara ve arızalara bağlı olarak değişir. Tracker sistemlerin kullanım ömürleri için genellikle 20 yıl garanti verilmektedir. Ancak, bu süre zarfında yıllık bakım maliyetlerinin yanı sıra, işçilik ve parça değişim maliyetleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu bağlamda, tracker sisteminin ilave kurulum maliyetini kurtarma süresi yaklaşık 4 yıl olarak hesaplanmış olup, bu süre sonunda sistem kullanıcıya net kâr sağlamaya başlamaktadır. Bu hesaplamalar sahadan elde edilen veri ve sektör tecrübelerine dayalı olarak detaylandırılmış ve başa baş noktasının ortalama 4 yıl hesabının belirlenmesi sağlanmıştır.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde yenilenemeyen enerji kaynaklarının, başta fosil yakıtlar olmak üzere, her geçen gün azalması ve bu yakıtların kullanımı sonucunda çevreye verdiği zararlı etkiler dolayısıyla dünya çapındaki birçok ülkenin enerji politikasında değişikliğe yönelmiştir. Bu değişiklikler yenilenebilir enerjiyi iyileştirebilme adına düzenlenmiştir. Bu düzenlemelerin en önemli sonuçlarından birisi de yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talepleri artmıştır. Günümüzde güneş enerjine olan yatırımlar, Türkiye dahil birçok ülkede en çok yatırım yapılan yenilenebilir kaynaklardan birisidir. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, sabit ve çatı uygulamalarında gelişmeler devam etmektedir. Ayrıca ülkemizde güneş enerjisinininse olan yatırımların diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına nazaran artışın çok olma sebebi, 5 MW altı üretimlerde lisans zorunluluğunun olmaması ve üreticilerin kendi arazi/çatılarına dahi montajını elde edebilme şansına sahip olması talep sayısını arttırmaktadır.

Ülkemiz jeopolitik konumu nedeniyle, 4 mevsim güneşlenme potansiyeline sahiptir. Ülkemizin güneşlenme süresi 2,741 saat olup, yıllık ortalama toplam radyasyon değeri 1,527,46 kWh/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Güneş radyasyon miktarı en çok yazın olmasından dolayı üretim en fazla yaz aylarında olurken, üretim miktarı en az kış aylarında olduğu gözlemlenmektedir. Güneş enerjisi santrallerinin kurulumu ilk aşamada her ne kadar yüksek maliyetli olsa da ileriye dönük anlamda getirisi yüksek olan yatırımlardır. Hareketli sistemde kullanılan ilave tracker ekipmanları yatırım maliyetini arttırmanın yanı sıra, üretim değerlerini de arttırdığı gözlenmektedir. Ayrıca santrallerde kullanılacak olan PV panelleri, invertör, AC-DC kablolar, montaj ekipmanları gibi birçok malzeme seçimi de fiyat ve üretim değerlerini etkileyen unsurlardan birisidir.

Ayrıca, konumu bilinen bölgelerdeki üretim değerini önceden tahmin edebilmek için birçok yazılımlar geliştirilmiştir. Bu yazılımlardan hem hareketli sistemleri hem de sabit sistemlerin üretim verileri ve kayıplar gibi birçok analizi sonucunu gösteren PVSyst yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca PVSyst'e göre daha az veri girilerek elde edilen ve sadece sabit sistem için kıyaslama yapılan PVGIS yazılımlarından elde edilen değerler incelenerek karşılaştırılmıştır. Ayrıca aynı bölgede için kurulması planlanan 15 MW'lık GES santrali için güncel piyasa fiyatları araştırılmış olup, yaklaşık 2.019.996,752 €'lık ilave bir tracker sistem maliyeti gözlenmiştir.

Kırıkkale ilinde aynı koşullar altında 15 MW'lık santral kurulması için (konum, invertör, panel markası, modeli vb.) PVSyst sürüm 7.4.2 yazılımı kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bu değerler, sabit sistem için üretimin 33,18 (E\_Grid) GWh/yıl olacağını tahmin edilmektedir. Sabit sistem için hesaplamalarda 30° azimut değeri varsayılarak değerlendirilmiştir. Hareketli sistemler için ise değerlendirme -180° azimut değeri seçilerek yapılmış ve sonuç 41,09 (E\_Grid) GWh/yıl olmuştur. Bu iki sonuç karşılaştırıldığında, izleme sistemi kullanıldığında üretimin sabit sisteme göre %23,82 daha fazla olacağı görülmektedir.

Fiyatlandırma ve üretim farkları göz önünde bulundurulduğunda, sabit sistemin kurulumu için gerekli olan malzeme fiyatına ilave olarak tracker sistemin kurulumu için ek olarak 2.019.996,752 € tutarında bir yatırım yapılması gerekmektedir. PVSyst simülasyon verilerinden elde edilen sonuçlar, tracker sistemin sağladığı üretim artışı sayesinde yıllık yaklaşık 643.502,00 \$ kâr elde edileceğini ortaya koymaktadır. Tracker sistemlerinin bakım maliyetleri, genellikle toplam kurulum maliyetinin %4 ila %5'i arasında değişmektedir. Bu oran, sistemin tasarımına, kullanılan teknolojiye ve bakım gereksinimlerine bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Ayrıca, hareketli sistemlerin yaşlanması ve bileşenlerinin zamanla aşınması nedeniyle bakım maliyetlerinde yıllar içinde artış gözlemlenebilir. Fotovoltaik panellerin genel olarak 20 yıl garanti süresi sağladığı kabul edilse de bu süre zarfında yıllık bakım maliyetleri, işçilik ve yedek parça değişim giderleri gibi faktörlerin de dikkate alınması gerekmektedir. Hareketli ve sabit sistemlerin üretim farkları ve tracker sisteminin kurulumuna ilişkin ek maliyet farkı incelendiğinde, tracker sisteminin ilave kurulum maliyetini geri kazanma süresi yaklaşık 4 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu sürenin ardından sistemin ekonomik açıdan kâra geçmesi beklenmektedir. Elde edilen bu sonuçlar, saha verileri ve mevcut teknolojik uygulamalara dayalı olarak detaylandırılmış ve başa baş noktasının kesin olarak yaklaşık 4 yıl olarak belirlenmesi sağlanmıştır. Bu hesaplamalar, sistemin uzun vadeli performansı ve yatırım geri dönüş oranları göz önünde bulundurularak optimize edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- ABC Solar Enerji. (2024). Lisanssız GES iş akış şeması. Retrieved February 6, 2025, from: [http://www.abcsolarenerji.com/SayfaDetay\\_LiSANSSiZ\\_GES\\_is\\_AKis\\_sEMASi\\_156.html](http://www.abcsolarenerji.com/SayfaDetay_LiSANSSiZ_GES_is_AKis_sEMASi_156.html)
- Acar, T. (2022). Konsantre güneş enerjisi sistemlerinde çok eksenli izleyicilerin rolü. *Yenilenebilir Enerji Teknolojileri*, 17(4), 85-101.
- Adaramola, M. S., Vagnes, E. E. (2015). Preliminary assessment of a small-scale rooftop PV-grid tied in Norwegian climatic conditions. *Energy Conversion and Management*, 458-465.
- Akcan, E., Kuncan, M., Minaz, M. R. (2020). Simulation of performance of a 30 kW solar power plant in the southeastern region of Turkey using PVsyst. *Renewable Energy Journal*, 45(3), 211-220.
- Akcan, E., Kuncan, M., Minaz, M. R. (2020). PVsyst yazılımı ile 30 kw şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin modellenmesi ve simülasyonu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (18), 248-261.
- Aksangör, N. N. (2019). *Ankara şartlarında bir fotovoltaik sistemin PVsyst programı yardımı ile performans analizi*. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 96.
- Akyol, E. (2019). *Hareketli ve sabit fotovoltaik sistemlerin İstanbul iklim koşulları altında performanslarının karşılaştırılması*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul.
- Amrollahi, M. H., Bathaee, S. M. T. (2017). Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind generation together with energy storage system in a stand-alone micro-grid subjected to demand response. *Applied Energy*, 202, 66-77.
- Arslan, E. (2015). *Güneş enerjisi potansiyelinin bölgesel analizi ve enerji üretim sistemlerine uyarlanması*. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi. Ankara.
- Asiabanpour, B., Almusaied, Z., Aslan, S., Mitchell, M., Leake, E., Lee, H., Bland, A. (2017). Fixed versus sun tracking solar panels: an economic analysis. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(4), 1195-1203.
- Celik, H. (2022). Fotovoltaik sistemlerde çok eksenli izleyici kullanımı: Verimlilik ve maliyet analizi. *Enerji Araştırmaları Dergisi*, 19(2), 144-158.
- Çelik, R. (2024). *T-kavşak yolu çevresindeki güneş enerjisi santralinin parlama analizi: Isparta örneği*, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı. Yüksek Lisans Tezi. Bilecik.

- Ceylan, R., Taşdelen, S. (2018). Isparta ili için fotovoltaik programlarının simülasyon sonuçlarının doğruluğunun incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(3), 895-903.
- Çınaroğlu, M. S., Nalbantoğlu, M. (2021). Simulation of photovoltaic power plants in Kilis using PVsyst: A comparison of energy production capacities. *Solar Energy Systems*, 52(6), 123-135.
- Dal, M., Yılmaz, C. (2020). Ticari bir yat limanının elektrik ihtiyacının fotovoltaik teknoloji ile karşılanabilirliğinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(4), 1125-1138.
- Demirci, M., Aytug Ozer, R., Duzkaya, H., Taplamacioglu, M. C. (2024). Investigation and economic analysis of the optimum tilt angle of solar panels for three cities in Azerbaijan. *Scientific Works/Elmi Eserler*, 44-49.
- Demirdelen, T., Alici, H., Esenboğa, B., Güldürek, M. (2023). Performance and economic analysis of designed different solar tracking systems for Mediterranean climate. *Energies*, 16(10), 4197.
- Durusu, A. (2016). *Fotovoltaik güneş santral tasarımı ve saha optimizasyonu için yeni bir yaklaşım*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Doktora tezi. İstanbul.
- Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2023). Lisanssız elektrik üretimine dair yönetmelik.:<https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/5-12808/2023-yili-yekdem-basvurularina-iliskin-duyuru> (Erişim Tarihi: 30.11.2022)
- Enerji Verimliliği ve Yenilenebilir Enerji. (2024). Solar radiation basics. Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-radiation-basics>
- Emre, Ö. (2019). *Isparta ili için güneş enerjisi santrali (fotovoltaik) çatı uygulamasından elde edilen saha verileri ile simülasyon verilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi* Isparta Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı. Yüksek lisans tezi, Isparta.
- European Commission (EU). (2024). Photovoltaic geographical information system (PVGIS). Retrieved from <https://ec.europa.eu/jrc/en/PVGIS/docs/methods>
- Gracia, A. M., Huld, T. (2013). Performance comparison of different models for the estimation of global irradiance on inclined surfaces. *European Commission: Luxemburg*.
- Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. D. (2017). Guidelines for optimization of the absorber layer energy gap for high-efficiency Cu (In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells.
- Günay, F. (2021). Çok eksenli sistemlerin güneş enerjisi üretimindeki verimlilik artışı. *Güneş Enerjisi Dergisi*, 24(3), 120-132.
- Hsieh, Y. Y. (2012). Comparison of performance between fixed and sun-tracking solar panel systems. *Applied Energy*.

- International Energy Agency. (2021). Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector, *Int Energy Agency*, 39.
- İnan, A., Qali, A. A. J., Düzkaya, H., Taplamacıoğlu, M. C. (2024). Optimization of the tilt angle of solar panels for seven cities in Türkiye. *Turkish Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 4(3), 181-189.
- İpek, M. (2021). Güneş enerjisi sistemleri ve verimlilik analizi: Sabit ve takipçi sistemlerin karşılaştırılması. *Güneş Enerjisi Araştırmaları Dergisi*, 12(2), 98-106.
- Kara, M., Yıldız, B. (2021). Konsantre güneş enerjisi sistemlerinin karşılaştırılması: Çok eksenli izleyiciler ile tek eksenli izleyiciler. *Uluslararası Enerji ve Çevre Dergisi*, 8(1), 55-67.
- Kınalı, E. (2020). *Güneş enerjisi simülasyon programlarının gerçek verilerle doğruluk analizi: Konya ve Karaman illeri örneği*, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi. Konya.
- Lim, S. C., Dawoud, B. M. (2021). Performance comparison of fixed and single axis tracker photovoltaic system in large scale solar power plants in Malaysia. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 21(1), 10-17.
- Mammadova, N., Nasibov, E. (2023). Investigation and economic analysis of the optimum tilt angle of solar panels for three cities in Azerbaijan. *International Conference on Energy and Environmental Technologies in Engineering and Architecture (ICETEA 2024)*, 44-48.
- Marut, K., Srikasem, S., Sumade, S. (2019, July). Comparison of Energy from Solar Photovoltaic Between The Solar Tracking and Fixed Panel. In *2019 16th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) IEEE*. 329-332.
- Mellit, A., Benghane, M. (2016). Comparative study of different solar photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Meyer, R., Schlecht, M., Chhatbar, K., Weber, S. (2021). Solar resources for concentrating solar power systems. In *Concentrating solar power technology* 73–98.
- Nasibov, E. (2023). (Mammadova & Nasibov, 2023 içinde yer alır).
- Özkal, F.M., 2017, Güneş enerjisi panellerinin taşıyıcı sistem tasarımı için yapısal en iyileme yaklaşımı, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Erzincan Üniversitesi, Erzincan, *Uluslararası Katılımlı 7. Çelik Yapılar Sempozyumu*.
- Öztürk, H., Kaya, M., Demir, T. (2023). Şebeke bağlantılı güneş enerji santralinin modellenmesi ve simülasyon analizi: Ağrı/Çukurçayır köyü 999 kW güneş enerjisi santrali örneği. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 13(2), 321-336.
- Öztürk, M., Yıldız, S. (2023). Optimization of the tilt angle of solar panels for seven cities in Türkiye. *ResearchGate*.

- Patel, H. (2016). Performance comparison of fixed and tracking photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*.
- Piotrowski, L. J., Farret, F. A. (2022). Feasibility of solar tracking and fixed topologies considering the estimated degradation and performance of photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 244, 111834.
- Reddy, K. S. (2015). A review on different tracking techniques for extracting maximum power from solar photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Kaplan, Y. A., Tolun, G. G. (2022). Comparison of the performance of solar panels designed in three different ways under the same conditions.
- Saner, S. H. (2015). *Türkiye’de güneş enerjisi santralleri yer seçimi ve çevresel etkileri: Karapınar ve Karaman enerji ihtisas endüstri bölgeleri örneklerinin değerlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Sawicka-Chudy, P., Sibiński, M., Cholewa, M., Pawełek, R. (2018). Comparison of solar tracking and fixed-tilt photovoltaic modules in Lodz.
- Şahin, A. (2024). *Bir güneş enerjisi santralının PVSOL ve PVsyst programları aracılığıyla tasarım ve analizi* (Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Şahin, S., & Demir, A. (2020). Çok eksenli güneş izleyicilerinin güneş enerjisi üretimindeki katkıları ve uygulama alanları. *Güneş Enerjisi Teknolojileri*, 10(1), 44-59.
- Singh, D. P., Dharni, S. S., Banwit, S. S., Goyal, D. (2020). Performance comparison of fixed and tracking type solar plants. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 9,612-620.
- Türkiye ulusal enerji planı. Ankara, Türkiye: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022)
- T.C. Hazine ve Maliye Bakanlığı. (2023). Türkiye’nin enerji ithalatı ve cari işlemler dengesi. Hazine ve Maliye Bakanlığı Yayını.
- T.C. Resmî Gazete. (2019, May 12). Resmî gazete, 30772. Ankara: Başbakanlık Basımevi.
- Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası [TCMB]. (2022). Kutu 2.2: Türkiye’nin enerji ithalatı ve cari işlemler dengesi. Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası Yayını.
- Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ). (2024). Santral kurulu güç raporları. <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/kurulu-guc-raporlari> (Erişim Tarihi: 27.01.2024).
- Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (2024). 2024 Nisan Ayı Kurulu Güç Raporu. Enerji Ajansı.
- Türkiye İstatistik Kurumu [TÜİK]. (2022). Türkiye’nin enerji ithalatı. Türkiye İstatistik Kurumu Yayını.

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü. (2018). <http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir.aspx> (Erişim Tarihi: 16.09.2018).

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü. (2024). Güneş enerji potansiyel atlası. <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator> (Erişim Tarihi: 29.10.2024).

Yıldırım B., Duzkaya H., (2024). Analysis of Fixed-Tracking Systems in Solar Power Plants. *11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*.

Yılmaz, H. (2023). Güneş enerjisi sistemlerinin verimlilik analizleri: Tek eksenli ve çift eksenli sistemlerin karşılaştırılması. *Enerji Verimliliği Dergisi*, 15(3), 110-120.







**EKLER**





*Gazili olmak ayrıcalıktır*