

**T.C.
ADİYAMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BİR GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİNİN PANEL OPTİMUM EĞİM
AÇISINA GÖRE PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ZAHİT FURKAN GÜLEŞ

**DANIŞMAN
PROF. DR. İSMAİL BOZKURT**

ADİYAMAN, 2025

Bu tez çalışması BAP Komisyonu tarafından kabul edilen no.lu proje kapsamında desteklenmiştir (Tez Çalışması Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmişse).

ÖZET

BİR GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİNİN PANEL OPTİMUM EĞİM AÇISINA GÖRE PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Zahit Furkan GÜLEŞ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Adıyaman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 07/2025, Sayfa:62
Danışman: Prof. Dr. İsmail BOZKURT

Güneş enerjisi, temiz, sınırsız ve düşük işletme maliyetli yapısıyla en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından. Güneş enerjisinden maksimum düzeyde yararlanmak için kullanılan teknolojilerin verimlilikleri, kurulum yapılacak bölgenin iklimsel koşulları, panel yerleşimi ve sistem tasarımı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Özellikle sabit eğimli sistemler ile optimum eğim açılarına göre ayarlanan sistemlerin performans farklarının incelenmesi, yatırım kararlarının optimizasyonu açısından kritik rol oynamaktadır. Bu tez çalışmasında, optimum eğim açılarına göre ayarlanan sistemlerin sabit sistemlere kıyasla sağlayabileceği verim artışı, Ankara'nın Elmadag ilçesinde kurulu bulunan 3,6 MW kapasiteli sabit eğim açılı güneş enerji santrali örneği üzerinden teknik ve ekonomik boyutlarıyla detaylı şekilde incelenerek analiz edilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, ele alınan güneş enerjisi santrali ve sistem bileşenleri tanıtılmıştır. Ardından, santralin bulunduğu konum dikkate alınarak fotovoltaiik (PV) panellerin optimum eğim ve geliş açıları aylık ve mevsimsel bazda belirlenmiş; bu sayede panel yüzeyine düşen güneş ışınımının en üst düzeye çıkarılması ve elektrik üretim verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir. Gerekli hesaplamalar Matlab yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen optimum açı değerleri doğrultusunda PVGIS simülasyon ortamında sistemin aylık, mevsimsel ve yıllık enerji üretim potansiyeli analiz edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında, sabit sistem ve optimum eğim açılarına göre ayarlanan sistemin performansları karşılaştırılarak ekonomik ve teknik açıdan sağlayabileceği katkılar değerlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, sistemin optimum eğim açısıyla kurulması ve ideal koşullarda bakımının gerçekleştirilmiş olması durumunda; 2022 yılına göre %11,3, 2023 yılına göre %16,2 ve 2024 yılına göre %14,5 oranında daha yüksek gelir elde edilebileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaiik; Güneş enerjisi santrali; PVGIS; Eğim açısı.

ABSTRACT

PERFORMANCE INVESTIGATION OF A SOLAR POWER PLANT ACCORDING TO PANEL OPTIMUM TILT ANGLE

Zahit Furkan GÜLEŞ

Department of Mechanical Engineering

Adıyaman University, Graduate Education Institute, 07/2025, Page:62

Supervisor: Prof. Dr. İsmail BOZKURT

Solar energy is one of the most important renewable energy sources with its clean, unlimited and low operating cost structure. The efficiency of the technologies used to benefit from solar energy at the maximum level depends on various factors such as the climatic conditions of the region where it will be installed, panel placement and system design. In particular, examining the performance differences between fixed-tilt systems and systems adjusted to optimum tilt angles plays a critical role in optimizing investment decisions. In this thesis, the efficiency increase that systems adjusted to optimum tilt angles can provide compared to fixed systems is analyzed in detail with its technical and economic dimensions on the example of a 3.6 MW capacity fixed-tilt solar power plant installed in the Elmadağ district of Ankara. In the first stage of the study, the solar power plant and system components were introduced. Then, considering the location of the plant, the optimum tilt and incidence angles of photovoltaic (PV) panels were determined on a monthly and seasonal basis; thus, it was aimed to maximize the solar radiation falling on the panel surface and increase the electricity production efficiency. The necessary calculations were performed using Matlab software and the monthly, seasonal and annual energy production potential of the system was analyzed in the PVGIS simulation environment in line with the optimum angle values obtained. In the light of the obtained data, the performances of the fixed system and the system adjusted according to the optimum tilt angles were compared and the contributions that could be provided in terms of economy and technique were evaluated. As a result of the study, it was determined that if the system was installed with the optimum tilt angle and maintained under ideal conditions; %11.3 higher income could be obtained compared to 2022, %16.2 compared to 2023 and %14.5 compared to 2024.

Keywords: Photovoltaic; Solar power plant; PVGIS; Tilt angle.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın her aşamasında bana yol gösteren, beni destekleyen ve motive eden, akademik bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak çalışmamın başından sonuna kadar bana rehberlik eden çok değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İsmail BOZKURT'a,

Bu tez çalışmasında kullanılan güneş enerji santraline ait tüm teknik ve üretim verilerini paylaşarak çalışmama önemli katkılarda bulunan ve desteklerini esirgemeyen ROC Enerji Üretim A.Ş.'ye,

Beni en iyi şekilde yetiştirmek için büyük fedakârlık göstererek maddi manevi her konuda yardım ve desteklerini esirgemeyen, her daim doğru yolu gösteren ve beni destekleyen, haklarını asla ödeyemeyeceğim sevgili annem ve babama,

Hayatımın her anında olduğu gibi yüksek lisans eğitimim sürecinde de yanımda olan, her daim desteğiyle beni motive eden ve ilerlememi sağlayan çok sevgili eşime,

Sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Adıyaman Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....
Zahit Furkan GÜLEŞ

İÇİNDEKİLER

BAŞLIK SAYFASI.....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
3. GÜNEŞ ENERJİSİ.....	10
3.1. Dünya’da Güneş Enerjisi	10
3.2. Türkiye’de Güneş Enerjisi.....	12
3.3. Ankara-Elmadağ Güneş Enerji Potansiyelleri.....	13
3.4. Güneş Açıları.....	15
3.4.1. Enlem açısı (L).....	15
3.4.2. Deklinasyon açısı (δ)	16
3.4.3. Saat açısı (h).....	17
3.4.4. Zenit açısı (θ_z)	17
3.4.5. Güneş yükseklik açısı (α)	18
3.4.6. Güneş azimut açısı (z)	18
3.4.7. Yüzey azimut açısı (Z_s)	19
3.4.8. Güneş geliş açısı (θ)	19
3.4.9. Eğim açısı (β)	20
4. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER.....	21
4.1. Fotovoltaik Hücre Çeşitleri.....	24
4.1.1. Birinci nesil fotovoltaik hücreler	24
4.1.1.1. Monokristal PV hücreler	25
4.1.1.2. Polikristal PV hücreler	26
4.1.2. İkinci nesil fotovoltaik hücreler	27

4.2. Fotovoltaik Enerji Sistemi Çeşitleri	28
4.2.1. Şebekeye bağlı (on-grid) PV sistemler.....	28
4.2.2. Şebekeden bağımsız (off-grid) PV sistemler	29
4.3. Fotovoltaik Sistem Elemanları	30
4.3.1. Inverter.....	30
4.3.2. Aküler	31
4.3.2.1. Jel aküler	32
4.3.2.2. AGM aküler	32
4.3.3. Kablolar	32
4.3.4. Solar toplama panoları	33
4.3.5. Konnektörler	34
4.3.6. Trafo	34
5. MATERYAL VE METOT	36
5.1. Materyal.....	36
5.1.1. Elmadağ'da Bulunan 3,6 MWp Kapasiteli Güneş Enerjisi Santrali Teknik Verileri	36
5.1.2. Santral Üretim Verileri.....	38
5.2. Metot	38
5.2.1. Optimum Eğim Açısı (β) ve Güneş Geliş Açısının (θ) Hesaplanması.....	38
5.2.2. PVGIS Çevrimiçi Programı	39
6. TARTIŞMA VE SONUÇ	42
6.1. Elmadağ için PV Panel Optimum Eğim Açısının (β) Belirlenmesi	42
6.2. Elmadağ için PV Panel Güneş Geliş Açısının (θ) Belirlenmesi	43
6.3. Üretim Verilerinin Aylık Olarak Karşılaştırılması	46
6.4. Üretim Verilerinin Mevsimsel Olarak Karşılaştırılması	51
6.5. Üretim Verilerinin Ekonomik Analizi	55
7. ÖNERİLER.....	58
KAYNAKÇA.....	59
ÖZ GEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 5.1. Santrale ait teknik bilgiler	36
Tablo 5.2. Santralin 2018-2024 yılları arasındaki elektrik üretim miktarı	38
Tablo 6.1. Aylık ortalama optimum eğim açısı (β).....	42
Tablo 6.2. $\beta = 30^\circ$ ve $\beta = \text{opt.}$ durumlarında aylık güneş geliş açıları (θ).....	44
Tablo 6.3. $\beta = 30^\circ$ ve $\beta = \text{opt.}$ durumlarında mevsimsel güneş geliş açıları (θ).....	45
Tablo 6.4. 2018-2024 yılları arasındaki aylık ortalama elektrik üretim miktarları, eğik yüzeye gelen güneş ışıınımları ve aylık ortalama verimler	47
Tablo 6.5. 2018-2024 yılları arasındaki mevsimsel ortalama elektrik üretim miktarları, eğik yüzeye gelen güneş ışıınımları ve mevsimsel ortalama verimler	52
Tablo 6.6. 2022, 2023 ve 2024 yılları ve PVGIS simülasyon ($\beta = \text{opt.}$) koşullarında üretilen elektriğin satışından elde edilen aylık gelirler	56

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Dünya yenilenebilir enerji kurulu gücü.....	11
Şekil 3.2. Dünya genelinde bölgelere göre güneş enerjisi kurulu gücü	11
Şekil 3.3. Türkiye'nin güneş enerjisi genel potansiyel görünümü	12
Şekil 3.4. Türkiye'nin aylık ortalama global radyasyon dağılımı	12
Şekil 3.5. Ankara güneş ışınlam haritası	13
Şekil 3.6. Elmadag ilçesi Aylık Global Radyasyon Değerleri (kWh/m ² -gün).....	14
Şekil 3.7. Elmadag ilçesi aylık güneşlenme süreleri (saat)	15
Şekil 3.8. Deklinasyon açısının yıl içerisindeki değişimi	16
Şekil 3.9. Enlem (L), deklinasyon (δ) ve saat (ω , h) açıları.....	17
Şekil 3.10. Güneş yükseklik açısı (α) ve zenit açısı (θ_z)	18
Şekil 3.11. Güneş azimut açısı (z).....	19
Şekil 3.12. Güneş geliş açısı (θ) ve eğim açısı (β)	20
Şekil 4.1. PV hücrenin çalışma prensibi.....	22
Şekil 4.2. PV hücrenin yapısı	22
Şekil 4.3. Güneş hücresi, PV modül ve PV dizi.....	23
Şekil 4.4. Monokristal panel	26
Şekil 4.5. Polikristal panel.....	27
Şekil 4.6. İnce film panel	28
Şekil 4.7. Şebekeye bağlı (on-grid) sistem.....	29
Şekil 4.8. Şebekeden bağımsız (off-grid) sistem.....	30
Şekil 4.9. Konnektör.....	34
Şekil 4.10. Trafo köşkü	35
Şekil 4.11. Yağlı tip hermetik trafo	35
Şekil 5.1. 3,6 MWp kapasiteli güneş enerjisi santrali	37
Şekil 5.2. PVGIS parametre giriş ekranı	40
Şekil 5.3. PVGIS PV output çıktı ekranı.....	41
Şekil 6.1. Ortalama optimum eğim açısının aylara göre değişimi	43
Şekil 6.2. Ortalama optimum eğim açısının mevsimlere göre değişimi	43
Şekil 6.3. ($\beta=30^\circ$) ve (β =aylık ortalama=opt.) durumlarında güneş geliş açılarının aylık değişimi	45

Şekil 6.4. ($\beta=30^\circ$) ve (β =aylık ortalama=opt.) durumlarında güneş geliş açılarının mevsimsel değişimi	46
Şekil 6.5. Santralin 2018-2024 yılları arasındaki gerçek üretimi ile PVGIS tarafından tahmin edilen üretim miktarlarının karşılaştırılması	49
Şekil 6.6. $\beta=30^\circ$ ve β =opt. için eğik yüzeye gelen aylık ortalama güneş ışıyım miktarlarının karşılaştırılması.....	50
Şekil 6.7. Gerçek ($\beta=30^\circ$), PVGIS ($\beta=30^\circ$), PVGIS (β =opt.) durumları için verimlerin karşılaştırılması.....	51
Şekil 6.8. Santralin 2018-2024 yılları arasındaki gerçek üretimi ile PVGIS tarafından tahmin edilen üretim miktarlarının mevsimsel karşılaştırılması	53
Şekil 6.9. $\beta=30^\circ$ ve β =opt. için eğik yüzeye gelen mevsimsel ortalama güneş ışıyım miktarlarının karşılaştırılması.....	54
Şekil 6.10. Gerçek ($\beta=30^\circ$), PVGIS ($\beta=30^\circ$), PVGIS (β =opt.) durumları için mevsimsel verimlerin karşılaştırılması	55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α	: Alfa
β	: Beta
θ	: Teta
MW	: Megawatt
GW	: Gigawatt
KWh	: Kilowatt-saat
MWp	: Megawatt peak
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
PV	: Fotovoltaik
GEPA	: Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası
GES	: Güneş Enerjisi Santrali
MPPT	: Maksimum Güç Noktası Takibi
DC	: Doğru akım
AC	: Alternatif akım
Opt	: Optimum

1. GİRİŞ

Günümüzde, enerji talebinin artmasıyla birlikte, dünya çapındaki enerji kaynaklarına yönelik arayışlar hız kazanmaktadır. Fosil yakıtların sınırlı olması, çevresel etkileri ve iklim değişikliği gibi küresel sorunlarla mücadelede, insanlık için daha sürdürülebilir bir enerji geleceği elde etmek kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu noktada yenilenebilir enerji kaynakları, umut vadeden bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Yenilenebilir enerji; güneş, rüzgâr, su, jeotermal ve biyokütle gibi doğal kaynaklardan elde edilen enerji türlerini kapsar. Bu kaynaklar, doğanın kendisinden sürekli olarak yeniden üretilen ve sınırsız bir şekilde sağlanabilen enerji potansiyelini temsil eder. Fosil yakıtlara kıyasla daha temiz, çevre dostu ve ekonomik olarak sürdürülebilir olan yenilenebilir enerji, küresel enerji bağımlılığını azaltma ve enerji güvenliği sağlama yolunda önemli bir rol oynamaktadır.

Ülkemizin 2024 yılı elektrik üretiminde kömür %35,2, doğal gaz %18,9, hidrolik enerji %21,5, rüzgâr %10,5, güneş %7,5, jeotermal enerji %3,2 ve diğer kaynaklar %3,2 oranında pay sahibidir. Mayıs 2025 sonu itibarıyla 119.271 MW'a ulaşan kurulu gücümüzün %27,1'i hidrolik enerji, %20,6'sı doğal gaz, %18,4'ü kömür, %11,2'si rüzgâr, %19'u güneş, %1,5'i jeotermal ve %2,2'si ise diğer kaynaklardan oluşmaktadır. Öte yandan Mayıs 2025 sonu itibarıyla lisanssız santraller de dâhil olmak üzere elektrik enerjisi üretim santrali sayısı 36.086'ya yükselmiştir. Mevcut santrallerin 771'i hidroelektrik, 71'i kömür, 381'i rüzgâr, 66'sı jeotermal, 329'u doğal gaz, 34.010'u güneş, 458'i ise diğer kaynaklardan oluşmaktadır (ETKB, 2025).

Güneş enerjisi en temel ve çevre dostu yenilenebilir enerji kaynağıdır. Dünyamıza sınırsız enerji sunan bu kaynak, aynı zamanda birçok farklı enerji türünün de temelini oluşturur. Güneşin bu sınırsız enerjisinden faydalanmanın etkili yollarından biri, güneş ışınımını doğrudan elektriğe dönüştüren fotovoltaik hücreler ve paneller kullanmaktır. Güneş paneli sistemlerinde, güneş ışınımından en yüksek verimi elde etmek için sabit ve güneş takipli sistemler kullanılır. Panellerin eğim açısı, sistemin kurulduğu bölgenin coğrafi konumuna ve mevsimsel değişimlere bağlı olarak farklılık gösterir. Bu nedenle, yıl boyunca güneş ışığından en yüksek düzeyde fayda sağlamak için optimum eğim açısı belirlenerek enerji üretimi artırılabilir (Aydin, 2020).

Güneş enerjisinden maksimum düzeyde yararlanmak için kullanılan teknolojilerin verimlilikleri, kurulum yapılacak bölgenin iklimsel koşulları, panel yerleşimi ve sistem tasarımı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Özellikle sabit eğimli sistemler ile hareketli

sistemlerin performans farklarının incelenmesi, yatırım kararlarının optimizasyonu açısından kritik rol oynamaktadır. Bu çalışmada; optimum eğim açısına göre ayarlanan sistemlerin sabit sistemlere kıyasla sağlayabileceği verim artışı, Ankara'nın Elmadağ ilçesinde kurulu bulunan 3,6 MW kapasiteli sabit eğim açılı güneş enerji santrali örneği üzerinden teknik ve ekonomik boyutlarıyla detaylı şekilde incelenerek analiz edilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, ele alınan güneş enerjisi santrali ve sistem bileşenleri tanıtılmıştır. Ardından, santralin bulunduğu konum dikkate alınarak fotovoltaik (PV) panellerin optimum eğim ve geliş açıları aylık ve mevsimsel bazda belirlenmiş; bu sayede panel yüzeyine düşen güneş ışınımının en üst düzeye çıkarılması ve elektrik üretim verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla Matlab ortamında optimum eğim ve geliş açıları hesaplanmıştır. Hesaplanan aylık ve mevsimsel eğim açıları kullanılarak, PVGIS simülasyon ortamında santralin aylık, mevsimsel ve yıllık enerji üretim potansiyeli belirlenmiş; elde edilen simülasyon sonuçları doğrultusunda sistemin performansı değerlendirilmiştir.

Bu kapsamda, fotovoltaik panellerin yıl boyunca sabit bir açıda kalması ile aylık veya mevsimsel olarak açı ayarı yapılması durumları karşılaştırılmıştır. Her bir durumda en uygun eğim açıları belirlenmiş ve buna göre üretilebilecek yıllık toplam enerji miktarları hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca, üretilen elektriğin kWh başına satış fiyatı dikkate alınarak, santralin 2022, 2023 ve 2024 yıllarındaki gelirleri, simülasyon sonuçlarından elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Bu sayede, sabit sistem ve optimum eğim açılara göre ayarlanan sistemin performansları karşılaştırılarak ekonomik ve teknik açıdan sağlayabileceği katkılar değerlendirilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Güneş enerjisi santrallerinin verimlerini etkileyen en önemli parametrelerden birisi panel eğim açısıdır. Bu kısımda son yıllarda güneş enerjisi santrallerinin üretim performanslarının ve panel eğim açılarının incelendiği çalışmalara yer verilmiştir.

Eğim açısının, şebekeye entegre güneş enerjisi santralının performansı üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamayan çalışmada, Hindistan'ın Bikaner kentinde aynı konumda iki tip eğim açısı test tesisi, yani sabit 30° eğim açısı (1 MW) ve yaz aylarında 13° ve kış aylarında 30° (2,5 MW) olmak üzere iki mevsimsel eğim açısı seçilmiştir. Önerilen 1 MW (sabit eğim açısı) ve 2,5 MW (iki mevsimsel eğim açısı) değerindeki test güneş enerjisi santrallerinin performansı, PVSyst yazılımı kullanılarak elde edilen sonuçların yıllık güneşlenme verileriyle karşılaştırılmasıyla belirlenmiştir. İki mevsimsel eğim açısı dikkate alındığında, PV modüllerine gelen radyasyonun %2,41 oranında artacağı tespit edilmiştir. Dolayısıyla, yıllık kapasite kullanım faktörü (CUF) %0,26 oranında artmıştır (Sharma vd., 2022).

Güneş enerjisi potansiyeli yüksek bir bölge olan Konya'da yer alan iki farklı güneş enerji sisteminin, PVSyst yazılımı kullanılarak modellendiği çalışmada araştırmacılar; bu sistemlerin üretim verilerini karşılaştırarak güneş enerji sistemi tasarımında farklı yaklaşımların etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, aynı panel ve invertör kullanımı, sistem kayıplarının eşit olduğu varsayımı gibi faktörler sabit tutularak, sadece sistemlerin yerleşim açıları değiştirilmiştir. Sabit eksenli sistemde, panelin optimum açısı ve yönü sırasıyla 27° ve güney (azimut 0°) olarak belirlenirken, çift eksenli takip sisteminde ise panelin hem yatay hem de dikey eksenlerde güneşi takip edebilmesi için farklı açı ve yön kombinasyonları (dikeyde 0°, 80° ve azimut açısı -120°, 120°) kullanılmıştır. PVSyst yazılımı ile yapılan benzetim sonuçlarına göre, çift eksenli takip sistemi, sabit eksenli sisteme göre yıllık elektrik enerjisi üretimi açısından %16,7 daha yüksek bir performans göstermiştir. Bu sonuç, çift eksenli takip sistemlerinin güneş ışığını daha etkin bir şekilde yakalayarak enerji üretim verimliliğini artırdığını göstermektedir (Etcı ve Kocalmış Bilhan, 2021).

Fethiye yat limanının enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla gerçekleştirilen bir çalışmada, PVGIS simülasyon programı kullanılarak 1500 kW gücünde bir güneş enerjisi santralının (GES) kurulumu değerlendirilmiştir. Çalışmada, GES panellerinin farklı eğim açılarındaki elektrik üretim performansları aylık bazda incelenmiş ve bu verilerin farklı gruplandırmalarla karşılaştırılması yapılmıştır. PVGIS simülasyon programı ile Fethiye bölgesindeki güneş enerjisi potansiyeli değerlendirilmiş ve GES panellerinin 0° ila 59°

arasında değişen farklı eğim açılarındaki aylık elektrik üretim verileri elde edilmiştir. Bu veriler, panellerin eğim açılarının yılda 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 defa değiştirilmesi durumunda farklı gruplandırmalar yapılarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, panel eğim açılarının sıklıkla değiştirilmesi durumunda elektrik üretim veriminde artış olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle, 31,7°'lik sabit eğim açısına göre, panel eğim açılarının 8 defa değiştirildiği durumda (8'li gruplandırma) yıllık elektrik enerjisi üretiminde %5,24 oranında, yani yaklaşık 129 MWh daha fazla enerji üretimi sağlanmıştır. En düşük artış ise panel eğim açılarının yılda 2 defa değiştirildiği durumda (2'li gruplandırma) gözlemlenmiş olup, bu durumda yıllık elektrik enerjisi üretiminde 95 MWh'lık bir artış elde edilmiştir (Dal, 2021).

Fotovoltaik (PV) sistemlerin verimliliği, birçok faktöre bağlı olup bunlardan en önemlileri arasında eğim açısı ve panel dizim aralığı yer almaktadır. Yapılan çalışmada, Konya ili özelinde farklı panel dizim aralıkları ve eğim açılarının sistem performansı üzerine olan etkilerini incelenmiştir. Çalışmada 3000 m² sabit bir alanda dört ayrı panel dizi aralığı için (2 m, 2,5 m, 3 m ve 4 m) PV sistemleri modellenmiştir. Sistemlerin performans karşılaştırmaları, Konya için uygun bir açı olarak kabul edilen 35° sabit eğim açısı kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca, elektrik üretimi açısından dört farklı durum için optimum eğim açısı (1°, 15°, 21°, 27°) belirlenerek, sistemlerin performansı yeniden değerlendirilmiştir. Farklı dizi aralıklarına sahip sistemlerde yıllık elektrik üretimi, dizi aralığının artmasıyla azalmıştır. En yüksek üretim (622.77 MWh), 2 m dizi aralığı ile elde edilirken, en düşük üretim (385.72 MWh) 4 m dizi aralığı ile elde edilmiştir. Optimum eğim açılarında yapılan simülasyonlarda, elektrik üretimi sabit eğim açısına göre %0,92 ile %6,19 arasında artış göstermiştir. Benzer şekilde, Performans Oranı (PR) değerleri de optimum açılarda daha yüksek bulunmuştur. Sabit eğim açısına sahip sistemler için amortisman süreleri, dizi aralığının artmasıyla uzamakla birlikte, optimum açılarda yapılan yatırımların daha kısa sürede geri dönüşü sağlandığı belirlenmiştir (Aksoy vd., 2023).

Fotovoltaik (PV) paneller için optimum eğim açısını hesaplamayı amaçlayan çalışmada, eğim açısını günlük olarak değiştirmekten başlayarak tüm yıl boyunca sabit bir eğim açısı kullanmaya kadar kapsamlı simülasyonlar yapılmıştır. İlk olarak hem yatay hem de eğimli yüzeylerin dünya dışı radyasyonu için matematiksel modeller sunulmuştur. Daha sonraki bir aşamada, güneş radyasyonunu maksimize etmek için optimizasyon formülasyonu uyarlanır ve ardından günlük, aylık, mevsimsel, yarı yıllık ve optimum sabit eğim açıları elde edilir. Günlük optimum eğim açısı maksimum güneş radyasyonu üretmesine rağmen, maliyetli ve pratik değildir. Süveyş şehri için 5° ve 50° olarak hesaplanan optimum

değerlerde eğim açısının yılda iki kez değiştirilmesinin, optimum eğim açısının günlük olarak değiştirilmesine çok yakın olan en iyi sonuçları verdiği bulunmuştur. İki yöntem arasındaki fark %1,56 olup çok küçüktür. Ayrıca, iki optimum eğim açısının güneş radyasyonu değeri, sabit optimum eğim açısının 28° olan güneş radyasyonu değerinden %7,77 oranında daha iyidir. Ayrıca, yıllık sabit optimum eğim açısının (28°) Süveyş şehrinin 30° olan enlem açısına neredeyse eşit olduğu bulunmuştur (Abdelaal ve El-Fergany, 2023).

2016 yılında yapılan bir çalışmada, fotovoltaik (PV) panellerin farklı eğim açılarında (15° , 30° , 45° ve 60°) ürettikleri enerji miktarları, belirli aralıklarla yapılan anlık, günlük ve aylık gözlemler ve ölçümler ile hesaplanmıştır. Çalışma, farklı eğim açılarındaki panellerin aylık bazda ürettikleri enerjiyi karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Elde edilen verilere dayanarak, eğim açısının enerji üretimi üzerindeki etkisi yüzdesel olarak hesaplanmıştır. Sonuçlara göre, paneller 15° eğimle yerleştirildiğinde, diğer açılara kıyasla yılın ilk ve son dört ayında yaklaşık %7-10 oranında enerji kaybı yaşanmıştır. Ancak, bu eğim açısı ile konumlandırılan paneller, yılın ortasındaki dört aylık dönemde diğer açılara kıyasla daha verimli olmuştur (Bilgili ve Dağtekin, 2017).

2019 yılında yapılan bir çalışmada ise bir fotovoltaik santraldeki fotovoltaik panellerin performansı ve verimliliği üzerindeki malzeme ve çalışma parametresi etkileri incelenmiştir. Santral, maksimum gücü 230 Wp olan REC 230AE tipi 3600 adet polikristalin PV panelinden oluşmaktadır. Parametre ölçümleri, santral başlatıldıktan üç yıl sonra yapılmıştır. Ölçülen ve hesaplanan veriler, girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki ilişkilerin incelendiği ve daha sonra regresyon analizi ile niceliksel olarak belirlendiği çok boyutlu istatistiksel yöntemler kullanılarak istatistiksel olarak işlenmiştir. ANOVA kullanılarak, panellerin ölçülen verimliliğinin değişkenliği ile yıllara ait performans incelenmiştir. Verimliliğin ise yıllar içinde önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni, PV santralinin standart çalışma koşullarından (25°C) daha düşük sıcaklıktaki koşullarda istatistiksel olarak kanıtlanmış geçerli çalışma süresidir. Analiz sonuçları, PV modül malzemesinin eskimesi nedeniyle verimliliğinin yılda ortalama %0,7-0,8 (ılıman iklim) oranında azaldığına dair referans verilerini ise doğrulamamıştır (Kudelas vd., 2019).

Fotovoltaik (PV) sistemlerin elektrik üretim verimliliği, güneş panellerine düşen gölge miktarından önemli ölçüde etkilenmektedir. Yapılan çalışmada, bir transformatör binasının neden olduğu gölgelemenin, şebekeye bağlı bir güneş enerjisi santralindeki PV dizisinin performansı üzerindeki gerçek dünya etkilerini incelemektedir. Çalışmada, belirli bir güneş enerjisi santralindeki gölgeli ve gölgesiz PV dizilerinin performansları, 12 ay boyunca

düzenli olarak izlenmiştir. Dış iklim koşullarının etkilerini ortadan kaldırmak için, ölçümler her zaman açık ve güneşli havalarda gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, ileri istatistiksel analizlere tabi tutularak gölgelemenin neden olduğu güç kaybı miktarı hesaplanmıştır. Çalışma sonuçları, transformatör binasının gölgesi altında kalan 30 kW'lık PV dizisinin, bir yıllık süreçte toplam 307 kW'lık bir güç kaybına neden olduğunu göstermiştir. Bu, gölgeli dizinin toplam güç kaybının %0,66'sına tekabül etmektedir. PV sistemlerinin ortalama 30 yıllık bir ömrü olduğu düşünüldüğünde, bu kısa süreli güç kaybının uzun vadede MW ölçeğinde önemli bir enerji kaybına yol açacağı açıktır (Keskin vd., 2021).

Güneşlenme potansiyeli yüksek olan Siirt ilinde tek eksenli güneş takip sistemlerinin, sabit sistemlere göre elektrik enerjisi üretim verimliliğini deneysel olarak incelemeyi amaçlamayan çalışmada; Siirt'te güneşlenme süresi ve şiddeti oldukça yüksek olan bir alanda, biri hareketli diğeri sabit olmak üzere iki adet 250 W'lık PV paneli kullanılmıştır. Hareketli panel, güneşin doğuşundan batışına kadar güneşin konumunu takip edecek şekilde tasarlanmış bir izleme sistemi ile donatılmıştır. Bu sistem, radyasyon ölçüm sensörü, elektrikli doğrusal aktüatör, kontrol cihazı ve mekanik düzenden oluşmaktadır. Sabit panel ise uygun bir açıda sabitlenmiştir. Her iki panelin de yük akımı ve panel gerilimi, gün boyunca beşer dakikalık aralıklarla ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak, panellerin ürettiği güç ve toplam enerji değerleri hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlar, hareketli panelin sabit panel göre %30-35 arasında daha fazla elektrik enerjisi ürettiğini göstermiştir. Bu durum, güneş takip sisteminin güneş ışınlarını daha verimli bir şekilde yakalayarak elektrik üretim verimliliğini artırdığını kanıtlamaktadır (Bükün, 2017).

Konya ilinde gerçekleştirilen deneysel çalışmada, fotovoltaik (PV) sistemlerin enerji üretim verimliliğini artırmak amacıyla tek eksenli güneş takip sistemi ile sabit sistem karşılaştırması yapılmıştır. Bu amaçla, özdeş 255 W gücünde iki PV paneli, 37°51'56.30"K, 32°25'4.01"D koordinatlarındaki deney alanına kurulmuştur. Sabit sistem, Konya bölgesi için optimize edilmiş 32° eğim açısıyla sabitlenirken, tek eksenli sistem ise Arduino kontrollü bir mekanizma ile doğu-batı yönünde güneşi takip etmiştir. Nisan 2017'de gerçekleştirilen ölçümlerde, tek eksenli sistemin sabit sisteme göre %23 daha yüksek enerji üretimi sağladığı tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, tek eksenli güneş takip sistemlerinin, özellikle güneş enerjisinin yoğun olduğu bölgelerde enerji üretim verimliliğini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir (Nuhoğlu, 2017).

2023 yılında yapılan bir çalışmada, fotovoltaik (PV) sistemlerin enerji üretim verimliliğini artırmak amacıyla Konya ili için optimum eğim ve azimut açılarının

belirlenmesi hedeflenmiştir. Literatürde genellikle sabit PV paneller için yapılan çalışmaların aksine, bu çalışmada farklı açılardaki paneller üzerine düşen toplam ışıınım değerleri üzerinden bir model geliştirilmiştir. Matlab ortamında gerçekleştirilen simülasyonlar ve deneysel çalışmalar sonucunda, Konya ili için optimum eğim açısının $32,08^{\circ}$ ve azimut açısının 0° olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, PV sistemlerin tasarımında meteorolojik verilerin ve panel oryantasyonunun önemini vurgulamakta ve enerji üretim verimliliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca fotovoltaik (PV) sistemlerin yıllık enerji üretim potansiyelinin, farklı eğim ve azimut açıları için modellenmesi amaçlanmıştır. PV panellerin mevsimsel olarak değişen güneşlenme süreleri ve açıları göz önünde bulundurularak, yıllık enerji üretimi tahminleri yapılmıştır. Geliştirilen model, farklı eğim ve azimut açılarındaki PV sistemlerin elektrik üretimini başarılı bir şekilde tahmin edebilmiştir. Dolayısıyla bu model özellikle enerji üretim planlaması ve şebeke entegrasyonu süreçlerinde önemli bir araç olarak kullanılabileceğini göstermektedir (Arslan, 2023).

Güneş enerjisi sistemlerinde, panelin konumu ve yönü, elde edilen enerji miktarını doğrudan etkileyen en önemli faktörlerdendir. Güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırmak amacıyla yapılan çalışmada, sabit güney yönünde konumlandırılmış fotovoltaik (PV) panellerin, günün farklı saatlerindeki güneş açısına bağlı olarak enerji üretim kayıpları incelenmiştir. Kuzey Yarım Küre koşullarında, güneşin doğuşu ve batışı sırasında güneş ışınlarının panel yüzeyine düşme açısının değişmesi, enerji üretim verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada, farklı yönlere (doğu, batı ve güney) ve optimum eğim açılarında konumlandırılmış PV panellerin enerji üretimi karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, güneş ışıının yoğun olduğu yöne dönük paneller, sabit güney yönündeki panellere göre ortalama %25-32 daha fazla enerji üretimi sağlamıştır. Ayrıca, yapılan simülasyon çalışmaları, yıllık bazda güneş takip sistemlerinin enerji üretim verimliliğini yaklaşık %20 artırabileceğini göstermiştir. Deneysel ve simülasyon sonuçları arasındaki uyum, çalışmanın güvenilirliğini desteklemektedir (Şafak, 2023).

Fotovoltaik (PV) sistemlerin enerji üretim verimliliğini etkileyen faktörlerden biri olan panel oryantasyonu ve takip sistemlerinin etkilerinin incelendiği çalışmada; sabit açılı PV panellerinin farklı eğim açılarında (30° ve 60°) ve güneş takip sisteminin aktif olduğu durumda enerji üretimi karşılaştırılmıştır. Elde edilen verilere göre, sabit açılı panellerde maksimum enerji üretimi, güneş ışınlarının panel yüzeyine yaklaşık 90° açıyla geldiği öğle saatlerinde gerçekleşmiştir. Ancak, güneş takip sistemi sayesinde panellerin güneşin

konumunu sürekli takip etmesiyle, günün büyük bir bölümünde (10:00-16:30) yüksek enerji üretimi elde edilmiştir. Maliyet-fayda analizi sonuçları, güneş takip sistemlerinin başlangıç yatırım maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen, uzun vadede daha yüksek enerji üretimi ve daha kısa geri ödeme süresi sağladığını göstermektedir (Küçükaydın, 2023).

Bir diğer çalışmada, fotovoltaik sistemlerin performansını değerlendirmek amacıyla PVSOL yazılımında farklı güneş takip sistemleri modellenmiştir. Aynı coğrafi konum ve güç değerlerine sahip sabit, tek eksenli ve çift eksenli sistemlerin yıllık enerji üretimi, çeşitli meteorolojik koşullar altında (bulutluluk, sıcaklık vb.) karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Analizler, çift eksenli takip sisteminin yıllık enerji üretiminin, sabit sisteme göre %52,35 ve tek eksenli sisteme göre %8,57 daha fazla olduğunu göstermiştir. Tek eksenli sistem ise sabit sisteme göre %40,33 daha fazla enerji üretmiştir (Alak, 2023).

2020 yılında yapılan bir çalışmada, Erzurum'un iklim koşullarında güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırmak amacıyla tek eksenli takip sistemlerinin etkinliği incelenmiştir. 10 W gücünde sabit ve tek eksenli sistemlerin aynı gün ve konumda karşılaştırıldığı deneylerde, tek eksenli sistemin özellikle sabah ve akşam saatlerinde %15,57'ye varan oranda daha fazla enerji ürettiği gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular, Erzurum gibi güneşlenme süresi kısıtlı bölgelerde, güneş takip sistemlerinin enerji verimliliğini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir (Eltas, 2020).

Bir diğer çalışmada, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırmak amacıyla farklı açılarda konumlandırılmış üç adet fotovoltaik panelin performansı incelenmiştir. Diyarbakır'ın coğrafi konumu ve Kasım ayı için yapılan güneş açısı hesaplamalarına göre, optimum eğim açısının 58 derece olduğu belirlenmiştir. Bu değere yakın üç farklı açıda yerleştirilen panellerin gün içindeki akım ve gerilim değerleri sürekli olarak ölçülmüştür. Elde edilen veriler ışığında, optimum açıda konumlandırılan panelin diğerlerine göre daha yüksek enerji üretimi sağladığı tespit edilmiştir. Bu sonuç, güneş enerji sistemlerinin tasarımında güneş açısının önemini vurgulamaktadır (Özlük, 2023).

Isparta ilinin güneş açıları dikkate alınarak yapılan çalışmada, dört farklı PV panel sistemi tasarlanmış ve prototip olarak üretilmiştir. Bu sistemler, sabit açılı (0°, 10°, 33°) ve güneş takipli olmak üzere farklı konfigürasyonlarda incelenmiştir. Her bir sistemde, PV panellerine gelen güneş ışıını miktarı ve bu ışıını sonucu oluşan akım ve gerilim değerleri ölçülerek sistemlerin verimleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, güneş takipli sistem, 33° sabit açılı sisteme göre %21 daha yüksek verim sağlamıştır. Bu durum, güneş

takip sistemlerinin güneş ışınlarını daha etkili bir şekilde yakalayarak enerji üretim kapasitesini artırdığını göstermektedir (Aydoğdu, 2019).

Bir diğer araştırmada, 550 W kurulu güce sahip, şebeke bağlantısı olmayan bir fotovoltaik (PV) enerji sistemi için beş farklı güneş takip sisteminin maliyet ve performans karşılaştırması yapılmıştır. İncelenen sistemler; sabit, mevsimsel, yatay, dikey ve çift eksenli takip sistemleridir. Analiz için PVsyst veri tabanından elde edilen aylık ortalama güneş ışıınımı ve sıcaklık verileri kullanılmıştır. Bu beş ayrı güneş takip sistemi içinde çift eksenli takip sisteminde, en yüksek kullanılabilir güneş enerjisi (1049.9 kWh) ve en düşük kayıp enerji (57.03 kWh) değerlerine ulaşılmıştır. Ancak, üretilen enerjinin bir kısmı (297.23 kWh) kullanılamadığı için sistemde fazla enerji durumu oluşmuştur. Sabit eksen sisteminde ise en düşük kullanılabilir güneş enerjisi (764.77 kWh) ve en yüksek kayıp enerji (93.36 kWh) değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Üretilen fazla enerji miktarı ise diğer sistemlere göre en düşük seviyede (51.84 kWh) kalmıştır. Bu araştırma, şebeke bağlantılı ve bağımsız fotovoltaik enerji sistemlerinin güç üretim kapasitelerini hem teknik performans hem de ekonomik sürdürülebilirlik açısından değerlendirmektedir. Elde edilen bulgular, gerçek uygulamalarda daha verimli ve etkili sistemlerin tasarlanmasına katkı sağlayacak önemli bilgiler sunmaktadır (Çınaroğlu, 2023).

3. GÜNEŞ ENERJİSİ

Güneş, Dünya'ya en yakın yıldızdır ve aynı zamanda en önemli enerji kaynağıdır. Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde gerçekleşen nükleer füzyon reaksiyonlarından doğan ışıma enerjisidir. Bu reaksiyonlarda hidrojen atomları helyuma dönüşerek muazzam miktarda enerji açığa çıkar.

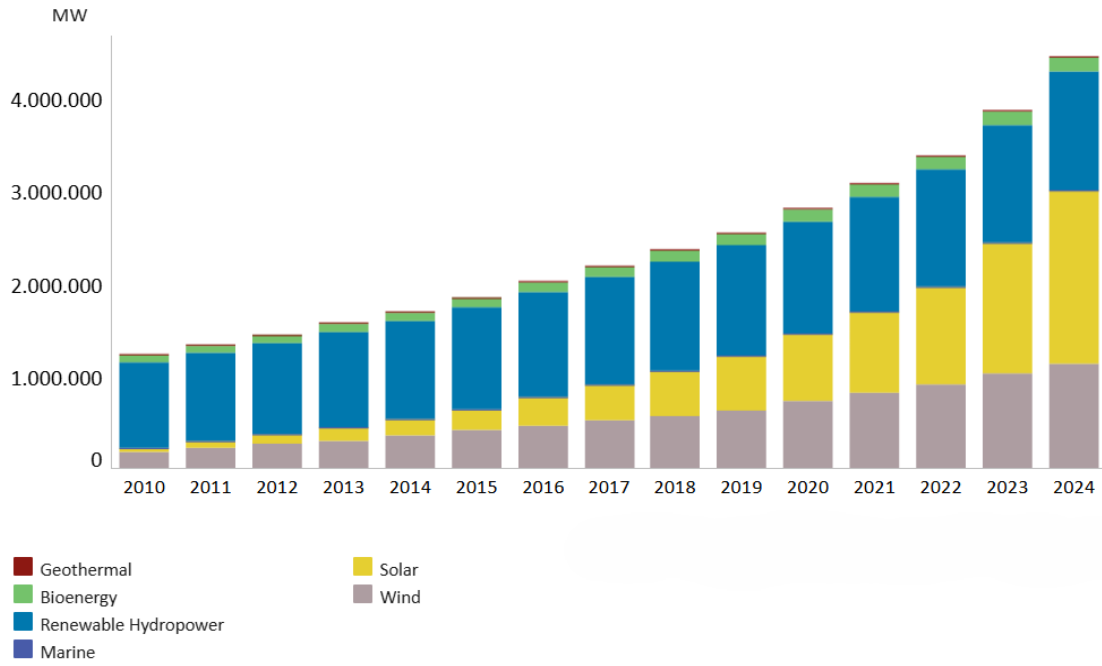
Yaklaşık $3,9 \times 10^{26}$ W güce sahip olan Güneş, Dünya'ya ışık ve ısı sağlayan, temiz ve tükenmez bir enerji kaynağıdır. Bu enerjinin sadece küçük bir kısmı Dünya'ya ulaşmakta olsa da bu miktar bile insanlığın tüm enerji ihtiyacını karşılamak için fazlasıyla yeterlidir. Atmosferin dış yüzeyine her metrekareye ortalama 1.367 W güce sahip güneş ışığı düşmektedir. Atmosfere gelen bu ışınların bir bölümü atmosfer tarafından emilirken, bir bölümü de yansıtılır ve geri kalanı Dünya'ya ulaşır (ETKB, 2024).

Güneş enerjisi; çok büyük bir potansiyele sahip olması, sıfır yakıt maliyeti ve yok denecek kadar az çevresel etkisi ile diğer yenilenebilir enerji kaynakları arasında öne çıkmaktadır.

3.1. Dünya'da Güneş Enerjisi

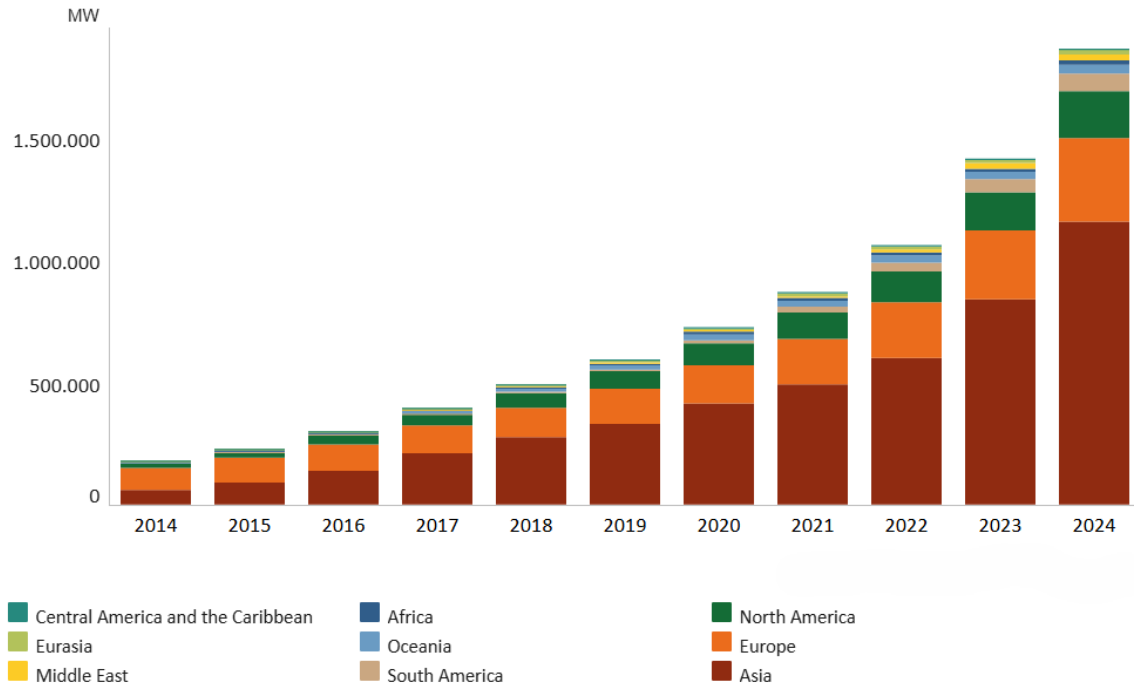
Dünya enerji talebi hızla artarken, sınırlı fosil yakıt rezervleri iklim değişikliği gibi ciddi sorunlara yol açmaktadır. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi giderek artmaktadır. Hidroelektrik, rüzgâr ve güneş enerjisi, elektrik üretiminde en yaygın kullanılan yenilenebilir kaynaklar arasındadır. Özellikle güneş enerjisi teknolojilerindeki hızlı gelişmeler sayesinde, güneş panellerinin verimliliği artmış ve maliyetleri düşmüştür. Bu durum, güneş enerjisini temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak daha da cazip hale getirmiştir. Ülkeler, güneş gibi sonsuz bir enerji kaynağını kullanarak enerji ihtiyacını karşılamak ve çevreyi korumak için çeşitli çalışmalar yapmaktadır. Güneş enerjisi teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde, birçok ülke güneş panelleri ve diğer sistemler aracılığıyla elektrik üretmektedir.

2024 yılında küresel yenilenebilir enerji kapasitesi, önceki yıla göre yaklaşık %15 oranında artarak toplam 4.448 GW seviyesine ulaşmıştır. Bu toplam kapasitenin 1.865 GW'ı güneş, 1.283 GW'ı hidroelektrik, 1.133 GW'ı rüzgâr enerjisinden elde edilmektedir. Güneş enerjisi, Şekil 3.1'de de görüldüğü gibi yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde son yıllarda en çok gelişme kaydeden enerji kaynaklarındandır (Irena, 2025).



Şekil 3.1. Dünya yenilenebilir enerji kurulu gücü (Kaynak: Irena, 2025)

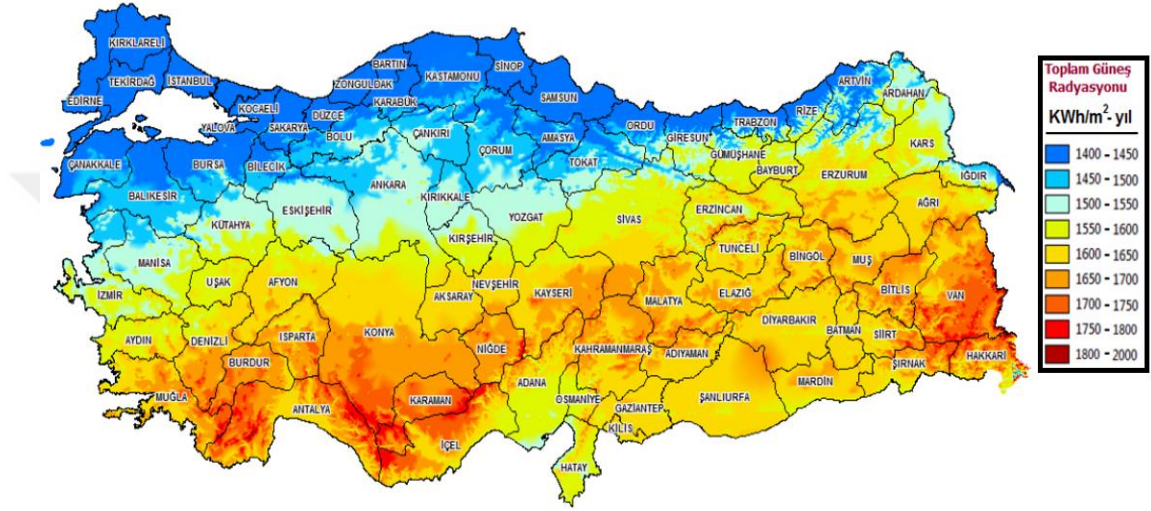
Dünya genelinde bölgelere göre güneş enerjisi kurulu güç durumuna baktığımızda ise Şekil 3.2’de görüldüğü üzere Asya kıtası 1.156 GW ile lider konumdadır (Irena, 2025).



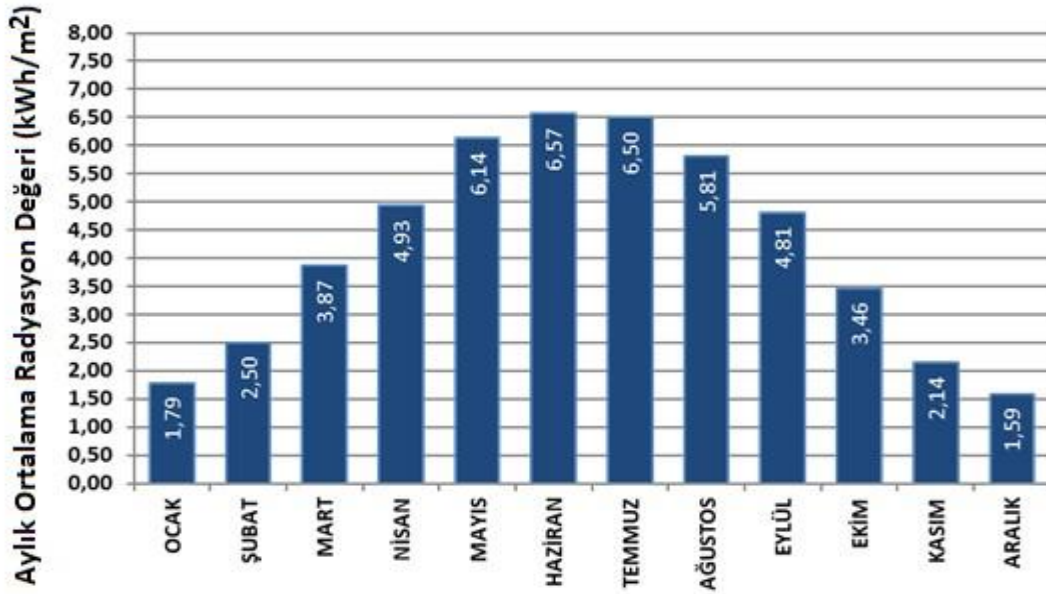
Şekil 3.2. Dünya genelinde bölgelere göre güneş enerjisi kurulu gücü (Kaynak: Irena, 2025)

3.2. Türkiye’de Güneş Enerjisi

Türkiye, güneş enerjisi açısından oldukça avantajlı bir coğrafi konuma sahiptir. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) verilerine göre, ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2741 saat olarak kaydedilmiş olup ortalama yıllık toplam ışıınım değeri 1527,46 kWh/m² olarak belirlenmiştir (ETKB, 2024). GEPA’da yer alan genel potansiyel görünümü ve aylık ortalama global radyasyon dağılımı Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’te yer almaktadır.



Şekil 3.3. Türkiye’nin güneş enerjisi genel potansiyel görünümü (Kaynak: ETKB, 2024)



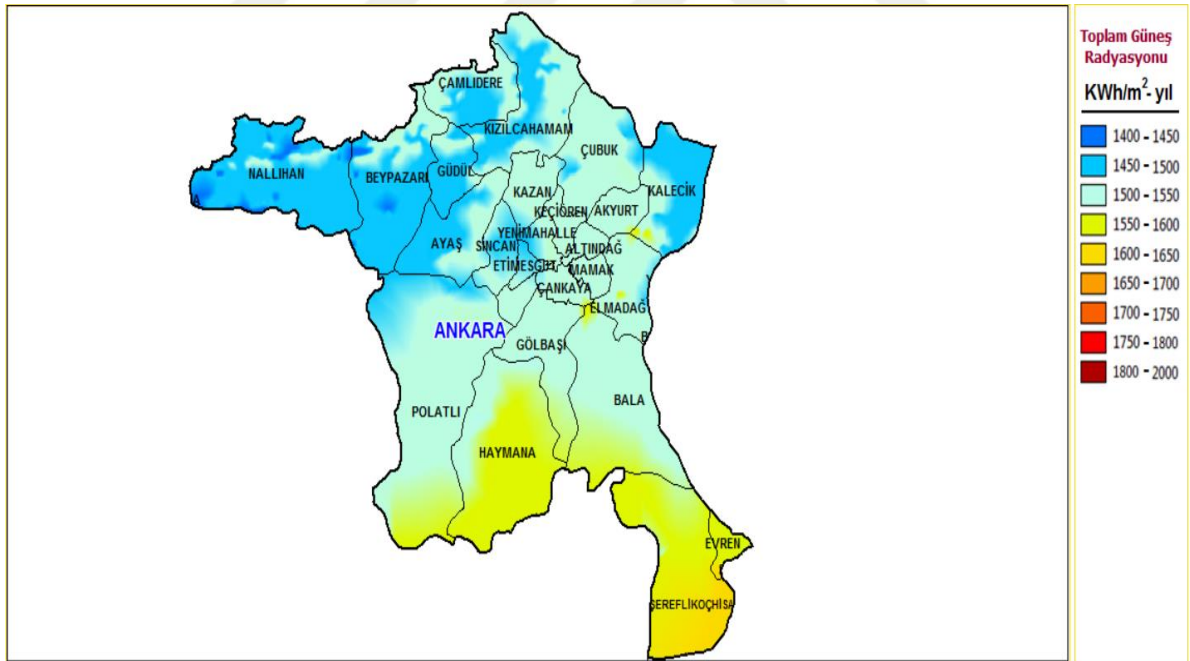
Şekil 3.4. Türkiye’nin aylık ortalama global radyasyon dağılımı (Kaynak: ETKB, 2024)

2025 yılı Mayıs ayı sonu itibarıyla ülkemiz kurulu gücü 119.271 MW'a ulaşmıştır. Mayıs 2025'in sonunda, güneş enerjisine dayalı elektrik kurulu gücümüz 22.660 MW olarak belirlenmiş ve toplam kurulu güç içindeki payı %19 olarak hesaplanmıştır (ETKB, 2025).

3.3. Ankara-Elmadağ Güneş Enerji Potansiyelleri

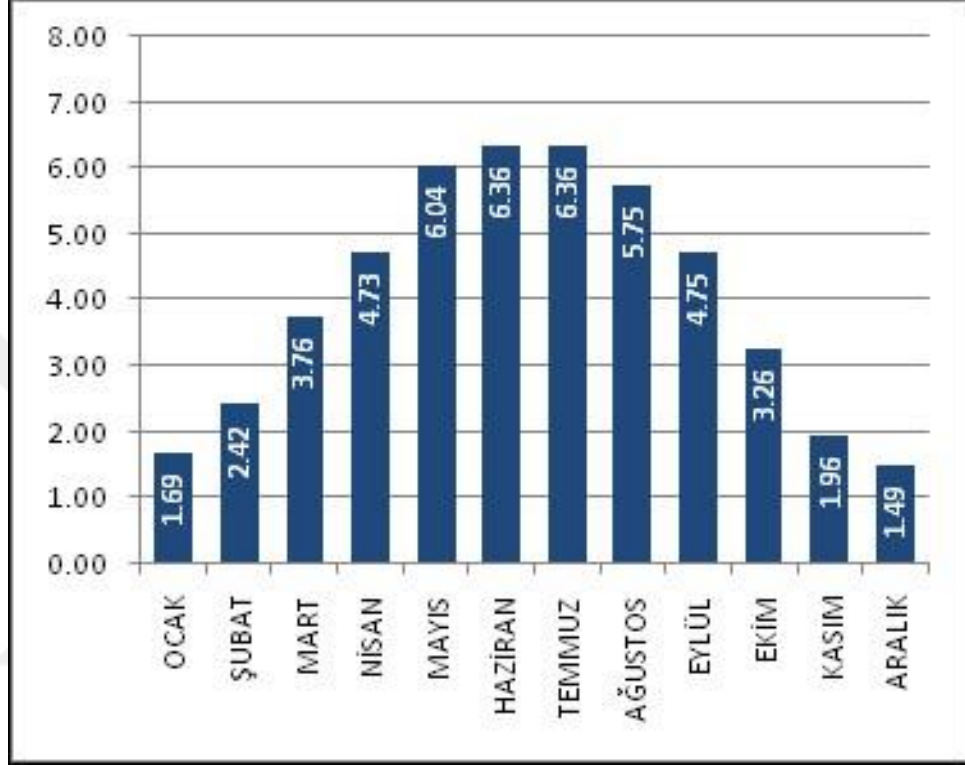
26.897 km²'lik bir alana sahip olan Ankara, 39,57 K enlemi ile 32,53 D boylamları arasında yer alır. Deniz seviyesinden yüksekliği yaklaşık 890 m'dir. Ankara'nın güney ve orta bölümlerinde karasal iklim hâkim olup kış ayları soğuk ve kar yağışlı yaz ayları sıcak ve kurak geçmektedir. En sıcak aylar temmuz ve ağustos aylarıdır. İldeki ortalama en yüksek gündüz sıcaklıkları 27-41 °C'dir. En düşük gece sıcaklıkları ortalama -24 ila -1 °C arasındadır.

Ankara'nın güneş ışınım haritası Şekil 3.5'de gösterilmiştir. Burada görüldüğü üzere Ankara'nın güneş radyasyon değerleri, yerine ve konumuna göre 1450-1600 kWh/m²-yıl güneş ışınım potansiyeline sahip olduğu görülmektedir (GEPA, 2025).



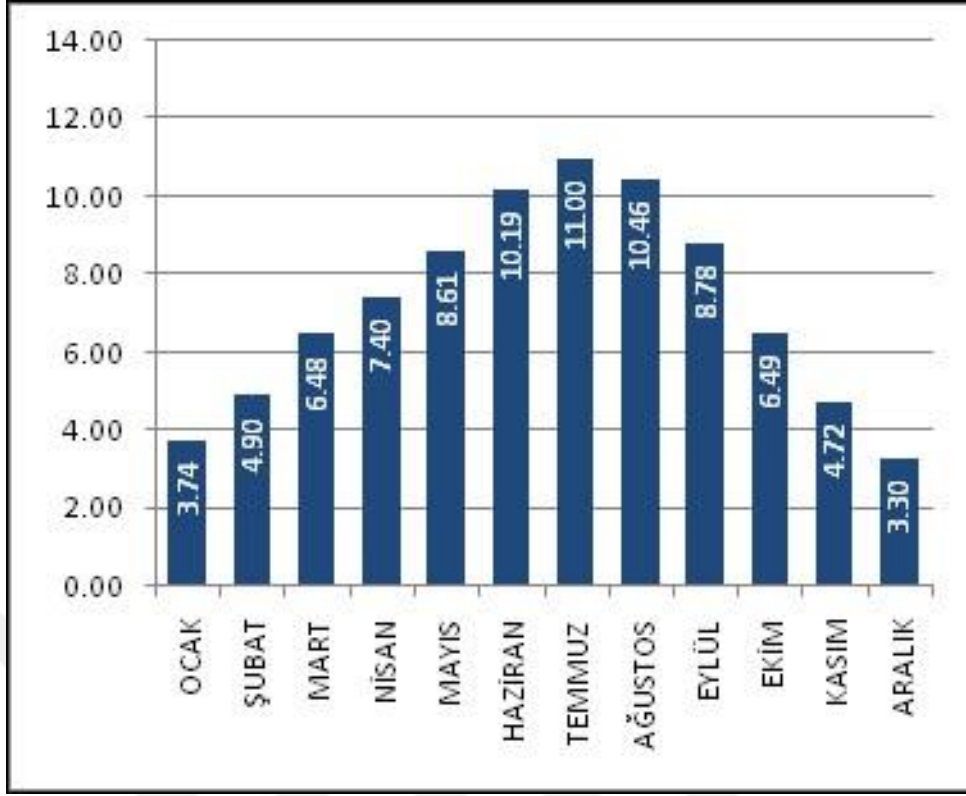
Şekil 3.5. Ankara güneş ışınım haritası (Kaynak: GEPA, 2025)

Şekil 3.6’da incelenen santralin kurulu olduğu Elmadag ilçesinin aylık ortalama global radyasyon değerleri görölmektedir (GEPA, 2025). Buna göre global radyasyon değeri 6,36 kWh/m²-gün ile haziran ve temmuz aylarında en yüksek, aralık ayında ise 1,49 kWh/m²-gün ile en düşük seviyededir.



Şekil 3.6. Elmadag ilçesi Aylık Global Radyasyon Değerleri (kWh/m²-gün) (Kaynak: GEPA, 2025)

Şekil 3.7’de ise Elmadag ilçesinin aylık ortalama güneşlenme süreleri görölmektedir (GEPA, 2025). Güneşlenme süresinin en düşük değeri aralık ayında 3,30 saattir. Daha sonra ocak ayı 3,74 saat ile takip etmektedir. Şubat, mart, nisan, mayıs, haziran aylarında güneşlenme süreleri artarak devam etmektedir. En yüksek güneşlenme süresine ise temmuz ayında 11 saat ile ulaşmaktadır.



Şekil 3.7. Elmadag ilçesi aylık güneşlenme süreleri (saat) (Kaynak: GEPA, 2025)

3.4. Güneş Açıları

Güneş, dünyamızın en önemli enerji kaynağıdır. Uzayda, Dünya'nın dış atmosferinde güneş ışınımının şiddeti yaklaşık 1367 W/m^2 olarak ölçülür. Ancak bu enerjinin tamamı yeryüzüne ulaşamaz. Atmosferdeki gazlar, su buharı ve bulutlar, güneş ışınlarının bir kısmını emer veya yansıtır. Böylece yeryüzüne ulaşan güneş ışınımının miktarı, atmosferik koşullara ve günün saatine göre değişir. Yeryüzüne ulaşan güneş ışınları ile yüzeyler arasında oluşan açılar, güneş açıları olarak adlandırılır. Bu açılar, güneşin gökyüzündeki konumuna, yeryüzündeki konuma (enlem ve boylam) ve yılın zamanına bağlı olarak değişir. Güneş açıları, güneş enerjisi sistemlerinin tasarımı ve verimliliği açısından büyük önem taşır (Özlük, 2023).

3.4.1. Enlem açısı (L)

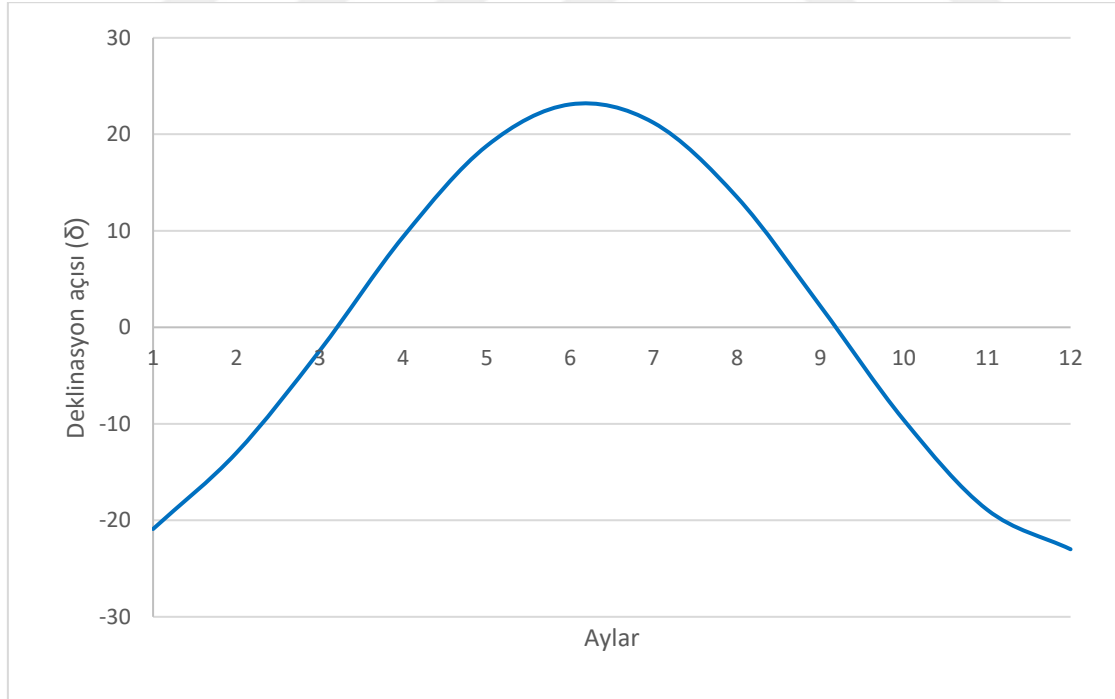
Dünya üzerindeki bir noktanın yer merkezine olan doğrunun, Ekvator düzlemi ile oluşturduğu açıya enlem açısı denir. Bu açı, Ekvator'un kuzeyinde pozitif, güneyinde negatif olmak üzere -90° ile $+90^\circ$ arasında değerler alır.

3.4.2. Deklinasyon açısı (δ)

Dünya'nın ekvator düzlemi ile güneş ışınlarının yeryüzüne geliş doğrultusu arasındaki açıya deklinasyon açısı denir. Dünya'nın eksen eğikliği nedeniyle deklinasyon açısı, yıl boyunca yaklaşık $-23,45^\circ \leq \delta \leq +23,45^\circ$ arasında değişkenlik gösterir. Bu açı, Dünya'nın Güneş etrafındaki konumuna göre sürekli değişir. Yaz gündönümü (21 Haziran) civarında Kuzey Yarımküre'de en yüksek değerine ($+23,45^\circ$) ulaşırken, kış gündönümü (21 Aralık) civarında en düşük değerine ($-23,45^\circ$) ulaşır. İlkbahar ve sonbahar ekinoksları (21 Mart ve 23 Eylül) tarihlerinde ise Güneş ışınları Ekvator'a dik geldiği için deklinasyon açısı sıfır olur. Eğer Dünya'nın eksen eğikliği olmasaydı, Güneş ışınları her zaman Ekvator'a dik gelirdi ve deklinasyon açısı daima sıfır olurdu. Deklinasyon açısı aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (3.1)$$

Buradaki “n” 1 Ocak’tan itibaren gün sayısıdır. Deklinasyon açısının bir yıl içerisindeki değişimi Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



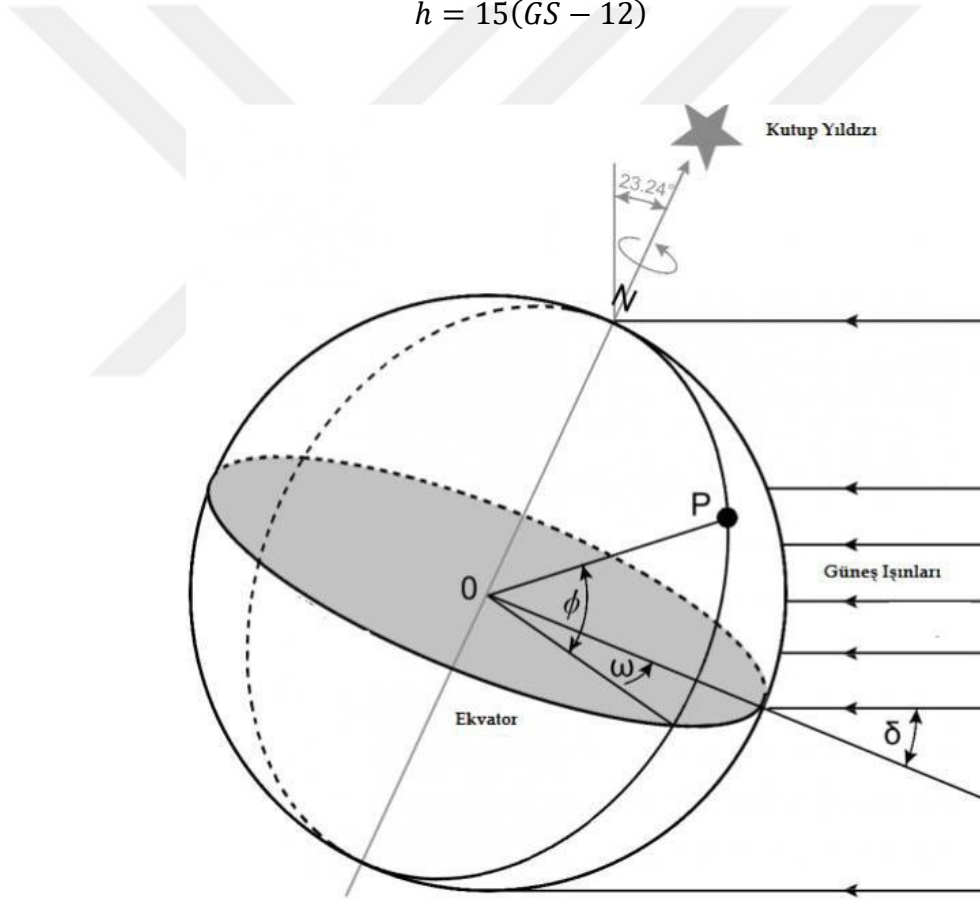
Şekil 3.8. Deklinasyon açısının yıl içerisindeki değişimi

3.4.3. Saat açısı (h)

Saat açısı (h), güneş ışınlarının ulaştığı boylam ile yeryüzündeki referans alınan konumun boylamı arasında kalan açıdır. Bu açı, güneşin öğle vaktinden önce ise negatif (-), sonra ise pozitif (+) olarak kabul edilir. Güneşin tam öğle vaktinde, güneş saati (GS) 12:00 olarak varsayılır. Güneş öğlesi ile referans saat arasındaki zaman farkı, 15 ile çarpılarak güneşin saat açısı hesaplanır. Bu 15 sayısı, Dünya'nın Güneş etrafında 360°'lik bir tam tur dönüşünü 24 saate bölerek elde edilen sabittir. Başka bir deyişle, bu katsayı, Dünya'nın Güneş etrafında bir saatte kat ettiği açıyı ifade eder (Türk, 2022).

Güneş açısı aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$h = 15(GS - 12) \quad (3.2)$$



Şekil 3.9. Enlem (L), deklinasyon (δ) ve saat (ω, h) açıları (Kaynak: Şafak, 2023)

3.4.4. Zenit açısı (θ_z)

Yatay düzlemin normali ile güneş ışınları arasında oluşan açığa zenit açısı (θ_z) denir. Zenit açısı güneşin gün içerisindeki konumuna göre sürekli değişir. Güneş ufukta, yani

doğarken veya batarken, ışınları yer yüzeyine neredeyse paralel bir açıyla geldiği için zenit açısı 90 dereceye yaklaşır. Tam tersi olarak, güneş tam tepedeyken ışınları yer yüzeyine dik olarak geldiği için zenit açısı sıfıra eşit olur. Yatay yüzeylerdeki güneş zenit açısı için aşağıdaki denklem kullanılır:

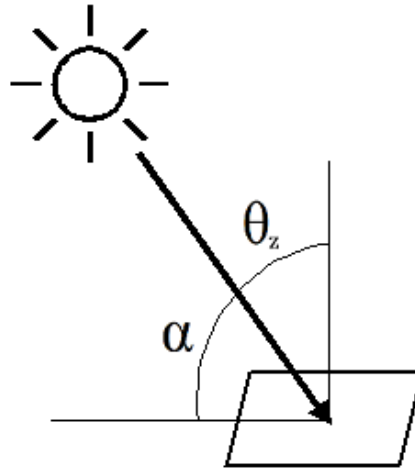
$$\cos(\theta_z) = \cos(\delta) \cdot \cos(L) \cdot \cos(h) + \sin(L) \cdot \sin(\delta) \quad (3.3)$$

3.4.5. Güneş yükseklik açısı (α)

Güneş yükseklik açısı (α), güneş ışınlarının yatay düzlemle yaptığı açı olarak tanımlanır. Bu açı, güneş ışınlarının yer yüzeyine çarpma açısı olarak da düşünülebilir. Güneş yükseklik açısı, gün doğumu ve gün batımında 90° iken, güneş ışınlarının yere dik olarak geldiği durumda (öğle) ise 0° olur.

$$\alpha = 90 - \theta_z \quad (3.4)$$

$$\sin(\alpha) = \cos(\theta_z) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \quad (3.5)$$



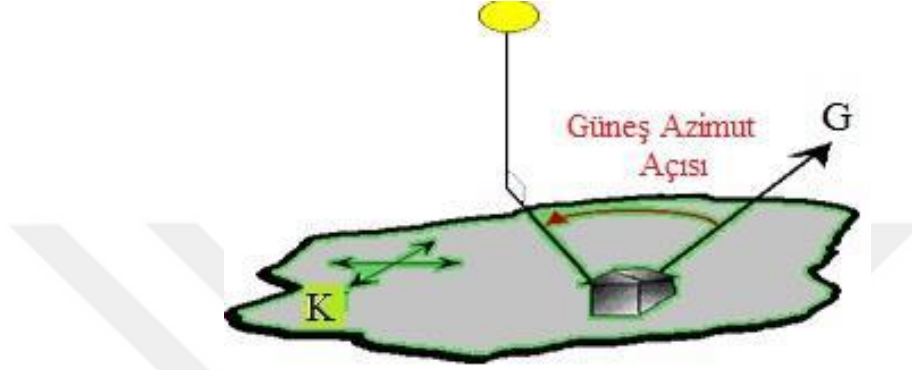
Şekil 3.10. Güneş yükseklik açısı (α) ve zenit açısı (θ_z) (Kaynak: Gezgin, 2023)

3.4.6. Güneş azimut açısı (z)

Güneş azimut açısı (z), güneş-dünya doğrultusunun yatay düzlem üzerindeki izdüşümünün, kuzey-güney doğrultusu ile yaptığı açıyı ifade eder. Bu açı, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliği ve yönlendirilmesi gibi hesaplamalarda kullanılır. Güneş azimut

açısı; güneyden doğuya doğru negatif (-), güneyden batıya doğru pozitif (+) olduğu kabul edilir. Bu açı (z) öğle saat 12:00'da 180°'dir. Güneş azimut açısı aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır:

$$\sin(z) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(h)}{\cos \alpha} \quad (3.6)$$



Şekil 3.11. Güneş azimut açısı (z) (Kaynak: Menak, 2018)

3.4.7. Yüzey azimut açısı (Z_s)

Yüzey azimut açısı, bir yüzeyin normalinin yatay düzlem üzerindeki izdüşümü ile güney doğrultusu arasındaki açıyı ifade eder. Güney yönüne bakan yüzeyler için bu açı sıfırdır; batıya doğru pozitif, doğuya doğru ise negatif değer alır.

$$-180^\circ \leq Z_s \leq 180^\circ \quad (3.7)$$

3.4.8. Güneş geliş açısı (θ)

Güneş geliş açısı (θ), herhangi bir yüzeye gelen güneş ışınlarının, o yüzeyin normali ile yaptığı açıdır. Bu açı, yüzey güneş ışınlarına dik olduğunda 0° , paralel olduğunda ise 90° olur. Güneş enerjisi sistemlerinin tasarımında, geliş açısı önemli bir parametre olarak kullanılır. Güneş geliş açısı şu aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanabilir (Kalogirou, 2009):

$$\cos(\theta) = \sin(\delta) \sin(L) \cos(\beta) - \sin(\delta) \cos(L) \sin(\beta) \cos(Z_s) + \cos(\delta) \cos(L) \cos(\beta) \cos(h) + \cos(\delta) \sin(L) \sin(\beta) \cos(Z_s) \cos(h) + \cos(\delta) \sin(\beta) \sin(Z_s) \sin(h) \quad (3.8)$$

Kuzey yarım kürede güneye bakan yüzeyler için geliş açısı denklemi ($Z_s=0$ için);

$$\cos(\theta) = \sin(L) \sin(\delta) \cos(\beta) - \cos(L) \sin(\delta) \sin(\beta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \cos(\beta) + \sin(L) \cos(\delta) \cos(h) \sin(\beta) \quad (3.9)$$

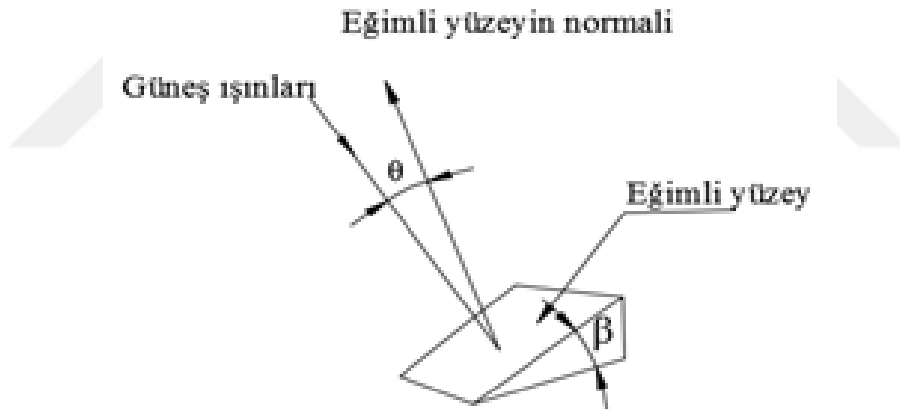
Denklem sadeleştirildiğinde aşağıdaki gibidir:

$$\cos(\theta) = \sin(L - \beta) \sin(\delta) + \cos(L - \beta) \cos(\delta) \cos(h) \quad (3.10)$$

3.4.9. Eğim açısı (β)

Eğim açısı (β) fotovoltaik panelin yüzeyle oluşturduğu açıyı ifade eder.

$$0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ \quad (3.11)$$



Şekil 3.12. Güneş geliş açısı (θ) ve eğim açısı (β) (**Kaynak:** Arslan, 2023)

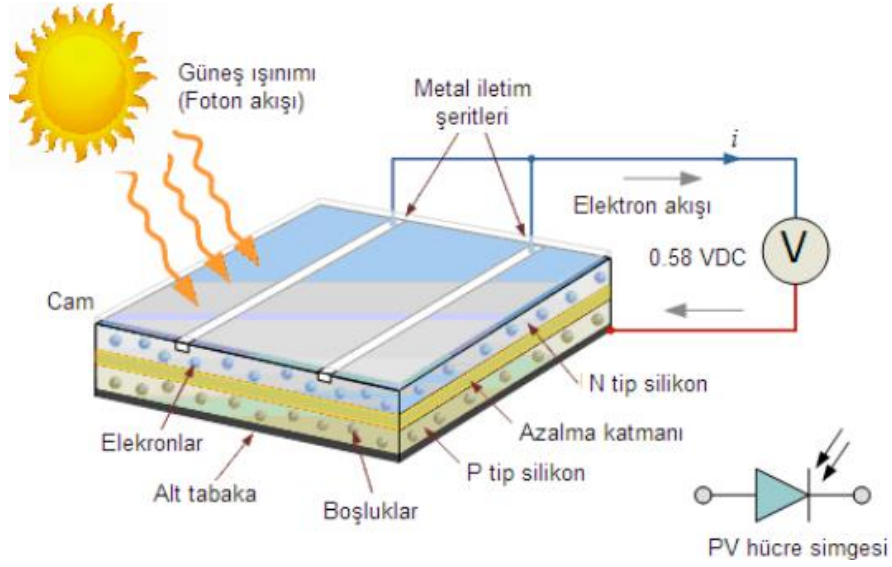
4. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

Fotovoltaik (PV) güneş teknolojilerinin temelini oluşturan güneş modülleri, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme özelliğine sahiptir. Bu teknolojinin kökenleri, 1839 yılında Fransız bilim insanı Edmond Becquerel'in bir sıvı içindeki elektrotun ışık etkisiyle elektrik üretmesi gözlemiyle başlamıştır. Daha sonraki yıllarda diğer bilim insanlarının çalışmaları katı maddelerde de benzer etkiler olduğunu ortaya koymuştur. Örneğin, 1877'de W. G. Adams ve R. E. Day, katı selenyumda fotovoltaik etkiyi gözlemlemişlerdir. 1883'te ise C. Fritts, selenyum üzerine ince bir altın tabakasıyla kaplı ilk güneş hücresini geliştirmiştir. Bu hücre, o dönem için oldukça düşük bir verimlilik olan %1'lik bir verimle çalışmaktaydı (ETKB, 2024).

20.yüzyılın başlarında, Albert Einstein'ın fotoelektrik etkisi üzerine yaptığı çalışmalar, fotovoltaik olayı daha iyi anlamamızı sağlamıştır. Einstein, ışık enerjisinin parçacıklar (fotonlar) halinde davrandığını ve bu parçacıkların maddeye çarptığında elektronları serbest bırakabileceğini göstermiştir. Bu teori, güneş hücrelerinin çalışma prensibini açıklamak için önemli bir adım olmuştur.

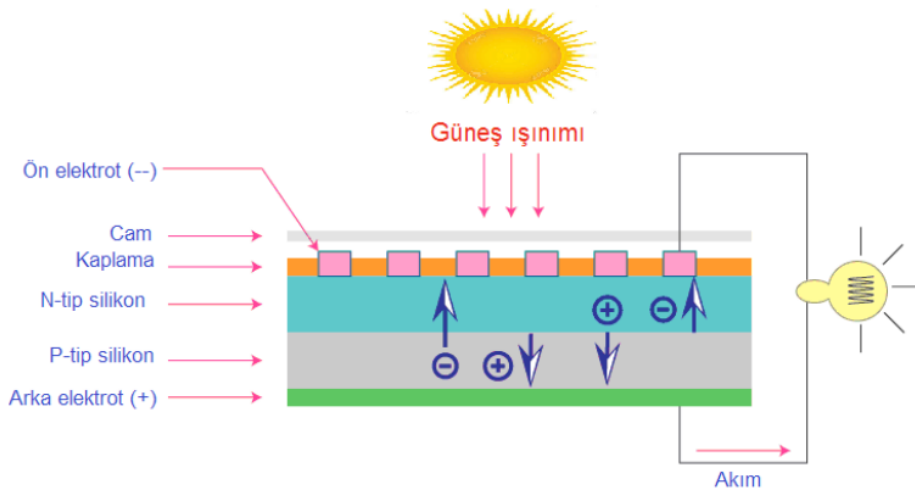
Silisyum temelli güneş hücrelerinin geliştirilmesiyle birlikte fotovoltaik teknolojilerde büyük bir sıçrama yaşanmıştır. 1954 yılında Bell Laboratuvarları tarafından üretilen ilk silikon p-n eklemli güneş hücresi, bu teknolojinin ticarileşmesi için önemli bir dönüm noktası olmuştur. Bu tarihten itibaren güneş enerjisi, sürekli olarak gelişen ve iyileşen bir teknoloji olarak hayatımıza girmiştir.

Fotovoltaik (PV) teknolojisi, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme prensibine dayanır. Bu dönüşüm, yarı iletken malzemelerin özel bir yapısı olan p-n ekleminde gerçekleşir. Fotovoltaik güneş teknolojisinin temel prensibi, fotovoltaik dönüşüm sürecidir. Bu süreç iki ana aşamadan meydana gelir. İlk aşamada, pozitif ve negatif yüke sahip taşıyıcılar, yani yük çiftleri, oluşturulur. İkinci aşamada ise bu yük çiftleri, bir elektrik alanı yardımıyla birbirinden ayrılır. PN birleşimi oluşturulurken, elektron bakımından zengin olan n-tipi yarı iletken malzeme, pozitif yük fazlalığı bulunan p-tipi yarı iletken malzeme ile bir araya getirilir. Bu birleşim bölgesinde doğal olarak bir elektrik alanı bulunur. Enerji dönüşümü, büyük ölçüde bu bölgede gerçekleşir. Güneşten gelen fotonlar, bu bölgedeki elektronlara enerji aktarır ve böylece negatif ve pozitif yükler oluşur. Oluşan bu yükler, mevcut elektrik alanı sayesinde birbirinden ayrılarak devrede doğru akım üretir. (Şekil 4.1) Üretilen doğru akım, gerektiğinde bir akü sisteminde depolanabilir veya DC/AC inverterler aracılığıyla elektrik şebekesine iletilebilir.



Şekil 4.1. PV hücrenin çalışma prensibi (Kaynak: Demiröz, 2023)

Güneş enerjisini elektriğe dönüştüren fotovoltaik sistemlerin temel yapı taşı olan güneş hücreleri, genellikle n tipi ve p tipi olarak adlandırılan iki farklı yarı iletken malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulur (Şekil 4.2). Bu iki farklı tip yarı iletkenin birleştiği bölgeye p-n eklemi denir. P-n eklemi üzerinde, genellikle metal bir elektrot bulunur. Bu elektrot, üretilen elektrik enerjisinin dış devreye aktarılmasını sağlar. Hücrenin en üst kısmı ise, güneş ışığının daha fazla emilmesini sağlamak ve yansımayı azaltmak amacıyla özel bir anti-yansıma kaplama ile kaplanır. Bu sayede, güneş ışığından elde edilen enerji verimliliği artırılır. En dış katmanda ise, hücreyi çevresel etkenlerden korumak ve dayanıklılığını artırmak için genellikle cam veya polimer bir kaplama kullanılır (H. H. Öztürk, 2017).

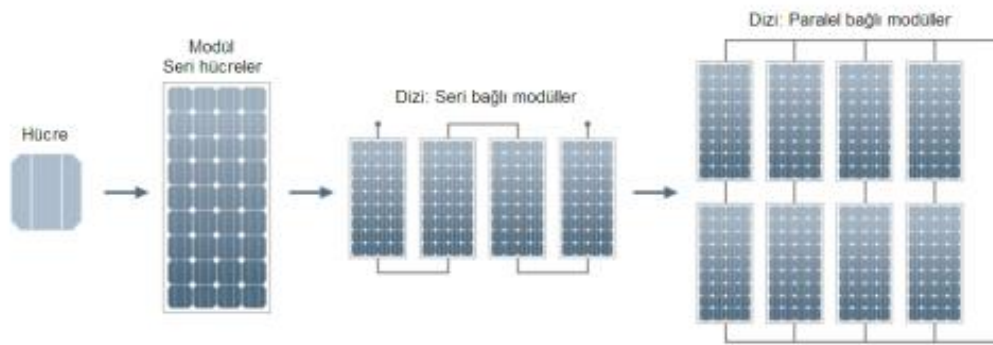


Şekil 4.2. PV hücrenin yapısı (Kaynak: Demiröz, 2023)

En yaygın kullanılan malzeme, yarı iletken özelliği sayesinde güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çeviren silisyumdur. Ancak silisyumun yanı sıra kadmiyum sülfür, galyum arsenit ve kadmiyum tellür gibi diğer yarı iletken maddeler de güneş hücrelerinde kullanılmaktadır. Bu malzemelerin her birinin, verimlilik, maliyet ve uygulama alanlarına göre kendine özgü avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Güneş hücreleri, yapılarına göre iki ana başlıkta incelenebilir: kristal ve amorf. En çok kullanılan silisyum güneş hücreleri; monokristal, polikristal, ince film ve şerit şeklinde olmak üzere farklı teknolojilerde ihtiyaçlara göre üretilirler. Güneş hücrelerinin boyutları ve şekilleri, kullanım alanlarına göre değişiklik gösterir. Genellikle kare, dikdörtgen veya daire şeklinde olan bu hücrelerin ortalama alanı 100 cm² civarındadır ve kalınlıkları ise 0,2-0,4 mm arasında değişir (ETKB, 2024).

Güneş enerjisinden daha fazla elektrik elde etmek amacıyla, güneş hücreleri birbirine seri ya da paralel bağlanarak daha büyük ve güçlü sistemler oluşturulur. Bu yapıya fotovoltaik (PV) modül denir (Şekil 4.3). PV modüller tek başlarına üretebileceklerinden çok daha fazla elektrik enerjisi sağlamak için tasarlanmıştır. Bu modüller, genellikle dayanıklı ve hava koşullarına karşı dirençli bir çerçeve içerisine yerleştirilir. Birden fazla PV modülün birbirine bağlanmasıyla ise PV dizisi oluşturulur. Bu sayede, ihtiyaç duyulan elektrik enerjisi miktarına göre daha büyük ve güçlü sistemler elde etmek mümkün olur. PV dizilerinde modüller, güç talebine bağlı olarak seri veya paralel olarak bağlanabilir. Seri bağlama, sistemin gerilimini artırırken, paralel bağlama ise akım kapasitesini artırır. Böylece, birkaç W'lık küçük bir sistemden MW'lık büyük enerji santrallerine kadar çok çeşitli uygulamalarda güneş enerjisi kullanılabilir (H. H. Öztürk, 2017).



Şekil 4.3. Güneş hücresi, PV modül ve PV dizi (Kaynak: H. H. Öztürk, 2017)

4.1. Fotovoltaik Hücre Çeşitleri

4.1.1. Birinci nesil fotovoltaik hücreler

Güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik (PV) sistemlerin temel yapı taşları, monokristal ve polikristal silikon hücrelerdir. Bu hücreler, uzun yıllardır güneş enerjisi sektöründe en yaygın kullanılan teknolojiler arasında yer alır. Bugün kurulu olan güneş panellerinin büyük bir çoğunluğunda (%80-90) bu tür hücreler kullanılmaktadır.

Silisyum, dünya üzerinde oksijenden sonra en bol bulunan element olmasına rağmen, doğada genellikle silisyum dioksit (kum) formunda bulunur. PV hücrelerinde kullanılacak kadar saf silisyum elde etmek için uzun ve karmaşık bir saflaştırma süreci gerekmektedir.

Bu süreç, öncelikle silisyum dioksitin karbon ile yüksek sıcaklıkta (yaklaşık 2000°C) reaksiyona sokulmasıyla başlar. Bu reaksiyon sonucunda, silisyum dioksitteki oksijen atomları karbon ile birleşerek karbondioksit ve karbonmonoksit gazları halinde sistemden ayrılır ve arkalarında yüksek saflıkta (yaklaşık %99) amorf silikon bırakır (Sağlam, 2018).

Ancak bu saflık seviyesi, PV hücrelerinde kullanılmak için hala yeterli değildir. Silisyumun son saflaştırma aşaması olarak bilinen Siemens işlemi, kimyasal buhar çöktürme yöntemine dayanır. Bu işlemde, yüksek saflıkta silisyum elde etmek için bazı adımlar uygulanır. Öncelikle, kısmen saflaştırılmış silisyum, hidrojen klorür (HCl) gazı ile reaksiyona sokulur. Bu reaksiyon sonucu, silisyumun istenmeyen diğer elementlerden ayrışmasını sağlayan triklorosilan (SiHCl_3) ve hidrojen (H_2) gazları oluşur. Elde edilen triklorosilan ve hidrojen gazları, içerisinde ince silisyum çubuklarının bulunduğu özel olarak tasarlanmış reaktörlere gönderilir. Bu reaktörler, yaklaşık 1000-1200°C gibi yüksek sıcaklıklara ısıtılır. Yüksek sıcaklıkta, triklorosilan molekülleri parçalanır ve silisyum atomları, silisyum çubukların yüzeyinde saf halde birikmeye başlar. Zamanla silisyum çubuklarının çapları, üzerlerinde biriken saf silisyum tabakası sayesinde artar. Bu çubuklar, yaklaşık 10-15 cm çapa ulaştığında polikristal silikon külçeleri olarak adlandırılır. Elde edilen polikristal silikon külçeleri, daha sonra güneş hücresi üretimi için uygun boyutlarda ve kalınlıklarda dilimlenerek yonga plakaları haline getirilir. Bu yonga plakaları hem monokristal hem de polikristal güneş hücrelerinin üretim sürecinde ham madde olarak kullanılır (Gökçe, 2020).

4.1.1.1. Monokristal PV hücreler

Monokristal silikon, günümüzde elektronik endüstrisinden güneş enerjisine kadar geniş bir kullanım alanına sahip, son derece saf ve düzenli bir yapıya sahip bir malzemedir. Bu malzemenin benzersiz özellikleri, onu elektronik çipler ve güneş pilleri gibi teknolojilerin temel yapı taşı haline getirmiştir.

Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümünde önemli bir rol oynayan monokristal silikon güneş hücreleri, yüksek verimlilik ve uzun ömür özellikleriyle öne çıkar. Bu hücrelerin üretim sürecinde en sık kullanılan yöntemlerden biri, 1971 yılında geliştirilen Czochralski yöntemidir. Czochralski metodu, son derece saf ve düzenli bir kristal yapıya sahip monokristal silikon çubukların üretilmesini sağlar. Bu yöntemde şu adımlar izlenir:

- Eriyik Oluşturma: Öncelikle, yüksek saflıkta silisyum dioksit (SiO_2) bir kapta çok yüksek sıcaklıklara ısıtılarak eritilir.
- Çekirdek Oluşturma: Erimiş silisyumun içine küçük bir çekirdek kristal daldırılır. Bu çekirdek, yeni kristalin büyüyeceği temel görevi görür.
- Çekme İşlemi: Çekirdek, eriyik silikonun içinden yavaşça yukarı doğru çekilirken aynı zamanda döndürülür. Bu sırada, eriyik silikon çekirdek üzerinde katılaşarak tek bir kristal oluşturur.
- Silindir Oluşumu: Çekme işlemi sırasında, çekirdek üzerindeki katılaşma devam eder ve uzun bir silindir şeklinde monokristal silikon çubuğu elde edilir.
- Dilimleme: Elde edilen silindir, güneş hücrelerinin üretimine uygun kalınlıkta (genellikle 0,2-0,3 mm) dilimler halinde kesilir.

Czochralski metoduyla elde edilen monokristal silikon dilimleri, genellikle koyu mavi veya siyah renktedir ve p tipi yarı iletken özellik gösterir. Bu dilimler, n tipi yarı iletken bir malzeme ile birleştirilerek p-n eklemi oluşturulur. Bu eklem, güneş ışığı altında elektronların hareket etmesini sağlayarak elektrik akımı üretir. Böylece, monokristal silikon güneş hücreleri elde edilir (Öztürk, 2021).

Üretim sürecinde kullanılan Czochralski yöntemi sayesinde, monokristal silikon güneş hücreleri, neredeyse kusursuz bir kristal yapıya sahip, yüksek saflıkta bir malzeme olarak elde edilir. Bu da monokristal panellerin, diğer güneş panel türlerine göre daha yüksek bir verimlilik oranına sahip olmasını sağlar. Ancak, piyasada bulunan monokristal güneş panellerinin verimliliği, üretim süreçlerindeki bazı sınırlamalar ve diğer faktörler nedeniyle genellikle %19-%21 aralığında seyretmektedir (Sağlam, 2018).



Şekil 4.4. *Monokristal panel* (**Kaynak:** Güneş, 2021)

4.1.1.2. Polikristal PV hücreler

Polikristal panellerin üretimi, monokristal panellere göre daha basit bir süreç izler. Czochralski yönteminde kullanılan karmaşık ve maliyetli silindirik ingot oluşturma ve kesme işlemleri, polikristal panellerde yer almaz. Bunun yerine, polisilikon doğrudan eritilir ve kalıplara dökülerek külçeler haline getirilir. Bu sayede üretim süresi kısalmış ve maliyetler düşer. Ancak, bu basitleştirilmiş sürecin bir sonucu olarak polikristal panellerin yapısı homojen değildir. Polikristal paneller, çok sayıda küçük kristalin bir araya gelmesiyle oluşur. Bu küçük kristallerin farklı yönlerde ve boyutlarda olması, malzemenin elektriksel özelliklerinin homojen olmamasına neden olur (Güneş, 2021).

Polikristal panellerdeki kristal yapının homojen olmaması, elektronların malzemenin içindeki hareketini engelleyerek enerji kayıplarına yol açar. Bu durum, polikristal panellerin verimliliğinin monokristal panellere göre daha düşük olmasına neden olur. Günümüzde piyasada bulunan polikristal güneş panellerinin verimliliği, genellikle %16-%19 aralığında seyretmektedir.



Şekil 4.5. *Polikristal panel* (**Kaynak:** Güneş, 2021)

4.1.2. İkinci nesil fotovoltaik hücreler

Güneş enerjisi teknolojilerinde sıklıkla kullanılan ikinci nesil fotovoltaik hücreler, genel olarak ince film güneş hücreleri olarak adlandırılır. Bu hücreler, kristal silikon temelli ilk nesil hücrelere göre daha farklı bir yapıya ve özelliklere sahiptir.

İnce film hücrelerinin verimliliği, kristal silikon hücrelere göre genellikle daha düşüktür ve %7-14 arasında değişir. Ancak, düşük maliyetleri, esneklikleri ve diğer avantajları sayesinde, özellikle büyük ölçekli enerji üretimi yerine, daha küçük ölçekli uygulamalarda ve bina entegre sistemlerde tercih edilirler (Akar, 2016). İnce film hücrelerin avantajları şunlardır:

- İnce film hücreleri, üretim süreçlerinin daha basit ve daha az enerji gerektirmesi sayesinde kristal silikon hücrelere göre daha ekonomiktir.
- İnce film teknolojisi, cam, plastik veya metal gibi farklı yüzeylere uygulanabilen esnek yapılar oluşturmaya imkân verir. Bu sayede, binaların çatılarında veya cephelerinde dekoratif bir element olarak kullanılabilirler.
- İnce film hücrelerinin, yüksek sıcaklıklarda verim kaybı yaşama eğilimi daha azdır. Bu özellik, özellikle sıcak iklimlerde avantaj sağlar.

- İnce film hücreleri, gölgelenmeye karşı daha toleranslıdır. Bir hücrenin gölgelenmesi, diğer hücrelerin performansını önemli ölçüde etkilemez.

İnce film güneş hücreleri, farklı yarı iletken malzemelerden üretilen ve günümüzde fotovoltaik sektöründe önemli bir yer tutan dört ana kategoriye ayrılır: kadmiyum tellür (Cd-Te), amorf silisyum (a-Si), bakır indiyum selenür (CIS) ve bakır indiyum galyum diselenür (CIGS).

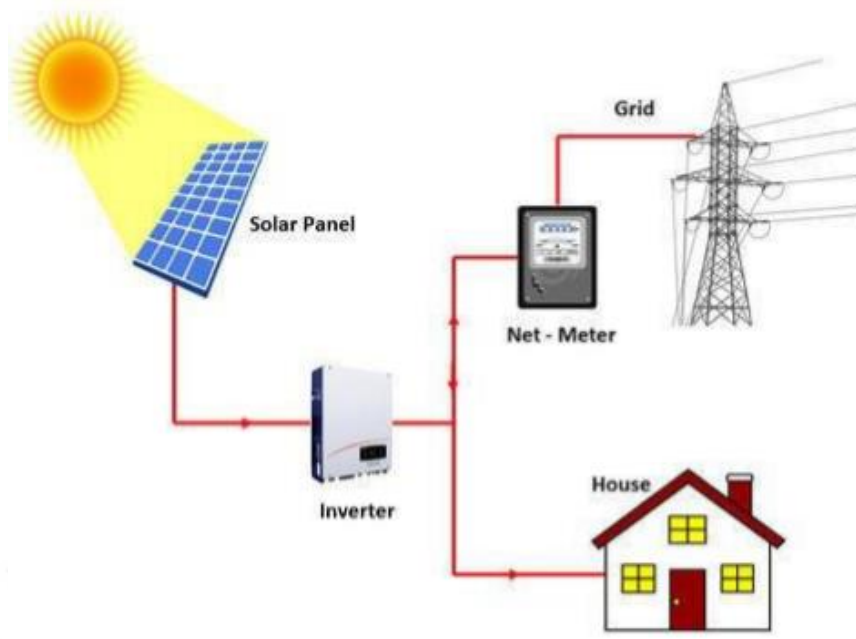


Şekil 4.6. İnce film panel (Kaynak: Güneş, 2021)

4.2. Fotovoltaik Enerji Sistemi Çeşitleri

4.2.1. Şebekeye bağlı (on-grid) PV sistemler

On-grid güneş enerji santrallerinde, güneş enerjisi PV paneller aracılığıyla toplanır ve doğru akıma çevrilir. Elde edilen bu doğru akım, daha sonra alternatif tek faz veya alternatif üç faz elektrik enerjisine dönüştürülerek elektrik şebekesine verilir. Bu sistemlerde güneş enerjisinin depolanması gerekmeyp, üretilen elektrik hemen şebekeye iletilir. Bu nedenle, bu tür sistemlerde batarya kullanımına ihtiyaç duyulmaz. On-grid sistemlerin kurulum maliyetleri, off-grid sistemlere kıyasla genellikle daha düşüktür. Ayrıca, bu sistemler kısa sürede kendini amorti edebilir. Ancak, güneşin olmadığı durumlarda elektrik üretimi mümkün değildir (Gür, 2023).

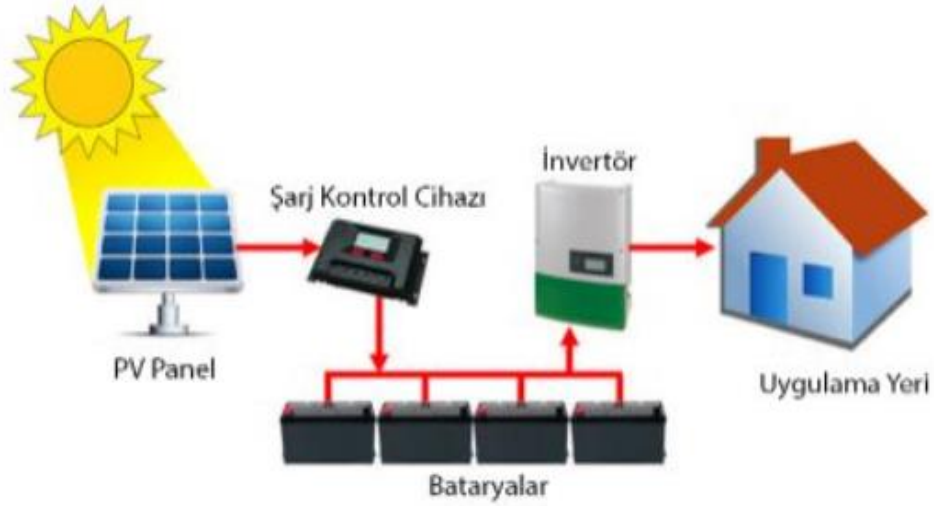


Şekil 4.7. Şebekeye bağlı (on-grid) sistem (Kaynak: Gür, 2023)

4.2.2. Şebekeden bağımsız (off-grid) PV sistemler

Şebeke elektriğine erişimin bulunmadığı bölgelerde elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak amacıyla off-grid güneş enerji sistemleri kullanılır. Bu sistemlerde güneş panelleri tarafından üretilen doğru akım (DC), akülerde depolanır. Depolanan bu enerji, doğru akımla çalışan cihazları beslemek için veya bir inverter yardımıyla alternatif akıma (AC) dönüştürülerek 220 V'lık şebeke elektriği ile çalışan cihazları çalıştırmak için kullanılabilir (Yılmaz, 2013).

Güneş panelleri tarafından üretilen doğru akım (DC) elektrik, voltaj seviyesi güneş ışınımına bağlı olarak sürekli değiştiği için doğrudan bataryalara bağlanamaz. Bu nedenle, güneş şarj kontrol sistemleri kullanılır. Bu sistemler, MPPT (Maksimum Güç Noktası Takibi) algoritması sayesinde güneş panelinden elde edilen gücü sürekli olarak takip eder ve bataryanın şarj seviyesine uygun hale getirerek bataryaya gönderir. Bu sayede bataryanın ömrü uzar ve maksimum verim elde edilir. MPPT özelliği sayesinde batarya, aşırı şarj olmaktan korunur ve böylece hasar görme riski minimuma indirilir (Gür, 2023).



Şekil 4.8. Şebekeden bağımsız (off-grid) sistem (Kaynak: Doğan, 2019)

4.3. Fotovoltaik Sistem Elemanları

4.3.1. Inverter

Güneş panelleri tarafından üretilen doğrudan doğru akım (DC) elektriği, evlerimizde kullandığımız alternatif akıma (AC) dönüştüren kritik bir ekipman olan inverterler, güneş enerji sistemlerinin olmazsa olmaz parçalarındandır. Bu dönüşüm işlemi, güneş enerjisi sisteminin elektrik şebekesiyle uyumlu bir şekilde çalışmasını sağlar.

Sistemin ana kontrol merkezi olarak görev yapan inverterler, hem DC tarafında akım ve voltajı sürekli takip eder hem de AC tarafında şebeke voltajını, frekansını ve sistemin verdiği AC akımını denetleyerek optimum performans için çalışır. Böylece, güneş enerjisi sisteminin verimliliği en üst düzeye çıkarılır ve şebeke ile sorunsuz bir entegrasyon sağlanır (Sağlam, 2018).

Tam sinüs inverterler; elektrik şebekesinde bulunan akıma en yakın dalga formu olan sinüs dalgasını üreten dönüştürücülerdir. Bu inverterler, çıkışta hem voltajı hem de frekansı şebeke elektriği ile aynı olacak şekilde, yani 50 veya 60 Hz'de tam bir sinüs dalgası olarak verirler. Bu sayede, tıpkı evlerimizdeki prizlerden aldığımız elektrik gibi, elektronik cihazların sorunsuz çalışmasını sağlarlar. Tam sinüs inverterlerin verimlilik oranları genellikle %89 ile %94 arasında değişir. Bu da giriş enerjisinin büyük bir kısmının çıkışa aktarıldığı anlamına gelir. Tam sinüs inverterler, özellikle hassas elektronik cihazların kullanıldığı ortamlarda tercih edilir.

Modifiye sinüs inverterler; adından da anlaşılacağı üzere, tam bir sinüs dalgası yerine daha çok bir kare dalga veya merdiven basamağı şeklinde bir çıkış gerilimi üretirler. Bu inverterler, genellikle daha düşük maliyetli olmaları ve basit yapıları nedeniyle tercih edilirler. Modifiye sinüs inverterler, güneş enerji sistemlerinde sıklıkla kullanılan Maksimum güç noktası takibi (MPPT) algoritmasına sahiptir. Bu algoritma, güneş panelinden elde edilen maksimum gücü sürekli olarak takip ederek sistemin verimliliğini artırmayı amaçlar. Modifiye sinüs inverterlerin ürettiği basamaklı dalga formu, özellikle motorlu cihazlar (buzdolabı, çamaşır makinesi gibi) ve hassas elektronik cihazlar (bilgisayar, televizyon gibi) için zararlı olabilir. Bu cihazların motorları ve elektronik devreleri, saf sinüs dalgası için tasarlandığından, basamaklı dalga formu nedeniyle daha hızlı aşınabilir ve bozulabilir (Çayır, 2022).

Fotovoltaik sistemlerde kullanılan inverterler, temel olarak şebeke bağlantısına göre iki ana kategoriye ayrılır:

- Şebeke Bağlantısız (Off-grid) İnverterler: Bu tür inverterler, elektrik şebekesine bağlı olmayan sistemlerde kullanılır. Ürettikleri elektriği doğrudan tüketirler ve genellikle akü sistemleriyle birlikte çalışırlar. Aküler, güneş panellerinden elde edilen fazla enerjiyi depolayarak, gece veya güneşsiz havalarda enerji ihtiyacını karşılar. Bu nedenle, off-grid inverterler, şebeke erişiminin sınırlı olduğu veya hiç olmadığı bölgelerde yaygın olarak tercih edilir.
- Şebeke Bağlantılı (On-grid) İnverterler: Bu inverterler, elektrik şebekesine bağlı sistemlerde kullanılır. Ürettikleri elektriği öncelikle kendi tüketimi için kullanır, fazlasını ise şebekeye verir. Şebeke bağlantılı sistemlerde genellikle akü sistemi bulunmaz, çünkü şebeke sürekli bir enerji kaynağı olarak kabul edilir. Ancak, son yıllarda enerji depolama teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde, şebeke bağlantılı inverterlerin de akü entegrasyonuna olanak tanıyan modelleri ortaya çıkmaktadır. Bu sayede, enerji tasarrufu sağlanır ve şebekedeki yük dengelemeye katkı sunulur.

Şebeke bağlantılı (On-grid) güneş enerji sistemlerinde, enerjiyi dönüştürmek için mikro, dizi ve merkezi olmak üzere farklı türde inverterler kullanılır.

4.3.2. Aküler

Güneş enerjisi sistemleri, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürerek temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağı sunar. Ancak güneş ışınımı sürekli olmadığı için, üretilen

elektriğin depolanması gerekmektedir. İşte bu noktada devreye giren aküler, elektrik enerjisini kimyasal enerjiye dönüştüren ve gerektiğinde bu kimyasal enerjiyi tekrar elektrik enerjisine çeviren depolama elemanlarıdır. Özellikle şebeke bağlantısı olmayan (off-grid) güneş enerji sistemlerinde kullanılırlar. Güneş panelleri tarafından üretilen elektrik enerjisi, güneşli havalarda akülere depolanır ve güneş ışınlarının olmadığı zamanlarda (gece, bulutlu günler) buradan çekilir. Bu sayede, sistem sürekli bir enerji kaynağına sahip olur (Çınaroğlu, 2023).

4.3.2.1. Jel aküler

Geleneksel kurşun-asit akülerin yerini giderek daha fazla alan jel aküler, içerisinde sıvı yerine jel kıvamında bir elektrolit bulunduran, kuru akü tipinde bir bataryadır. Bu jel kıvamı, sülfürik asit ve silika jelinin homojen bir karışımıyla elde edilir. Jel aküler, özellikle denizcilik, rüzgâr enerjisi ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarında sıklıkla tercih edilir. Bunun başlıca nedeni, bu akülerin yüksek sıcaklıklara ve titreşimlere karşı gösterdiği dayanıklılıktır. Bu sayede zorlu çalışma koşullarında bile güvenilir bir performans sergilerler. Jel akülerin en büyük avantajlarından biri, derin deşarj özelliğidir. Diğer akü türlerinin aksine, jel aküler sık sık ve derinlemesine deşarj edilse bile kimyasal yapılarında önemli bir bozulma yaşamaz. Bu özellik, akünün ömrünü uzatarak daha uzun süre verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar (Küçükaydın, 2023).

4.3.2.2. AGM aküler

AGM aküler, geleneksel akülere kıyasla daha gelişmiş bir teknolojiye sahip, yüksek performanslı ve güvenilir enerji depolama çözümleridir. "Absorbed Glass Mat" (Emdirilmiş Cam Elyaf) kısaltmasıyla bilinen bu aküler, sıvı elektrolit yerine, özel bir jel elektrolit içerir. Bu jel elektrolit, cam elyaf matlar arasına emdirilerek hem akünün içinde güvenle tutulur hem de sızıntı riskini neredeyse sıfıra indirir. AGM akülerin bu yapısı, onları derin deşarj döngülerine karşı daha dayanıklı hale getirir ve uzun ömürlü kullanım sağlar. Ayrıca, yüksek deşarj akımlarına olan ihtiyaçları karşılayabilecek şekilde tasarlandıklarından, sık sık çalıştırma-durdurma döngülerine maruz kalan modern araçlarda sıklıkla tercih edilirler.

4.3.3. Kablolar

Fotovoltaik (PV) sistemler, sürekli güneş ışınına maruz kaldığından, sistemdeki tüm bileşenler, özellikle kablolar, yüksek sıcaklık ve UV radyasyonuna karşı dayanıklı olmalıdır. Bu sistemlerin uzun ömürlü olması beklendiği için, kullanılan kabloların da uzun yıllar boyunca performansını koruması gerekmektedir. Ancak uzun süreli kullanım, kablolarda

yıpranma ve performans kaybına yol açabilir. Bu nedenle, kablo üreticileri, PV sistemler için özel olarak tasarlanmış, yüksek sıcaklık ve UV radyasyonuna karşı dayanıklı PV1-F kodlu solar kablolar üretmektedir. Bu kablolar, özel yapısı sayesinde minimum kablo kaybı ile uzun ömürlü kullanım sağlar.

Fotovoltaik (PV) sistemlerde, güneş panellerinden üretilen doğru akım (DC), solar kablolar vasıtasıyla invertere iletilir. Solar kablolar, genellikle -40°C ile $+90^{\circ}\text{C}$ arasındaki geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. Panellerin seri ve paralel bağlantıları için kullanılan bu kablolar, DC gerilimi güvenli bir şekilde taşır. Inverterde DC akım, alternatif akıma (AC) dönüştürülerek, AC kablolar vasıtasıyla sisteme dağıtılır. AC kablo seçimi, sistemin ihtiyaçlarına, yük akımına ve gerilim düşümüne göre belirlenir. Bu kabloların iletken malzemesi olarak genellikle bakır veya alüminyum kullanılırken, yalıtım malzemesi olarak PVC veya XLPE tercih edilir (Akar, 2016).

4.3.4. Solar toplama panoları

Solar toplama panoları; Ana toplama panosu, DC toplama panosu ve AC toplama panosu olmak üzere üçe ayrılırlar. Ana toplama panoları ve AC toplama panoları, dizi tipi inverterler tercih edilmiş GES santrallerinde kullanılırken; DC toplama panoları ise merkezi tip inverter tercih edilmiş GES santrallerinde kullanılırlar.

AC toplama panolarından alınan enerji, güç kabloları ile ana toplama panolarına aktararak güvenliği sağlanır ve kontrol altına alınır. Ana toplama panoları, enerji kalitesi ölçümü, sistem güvenliği ve iç ihtiyaç için gerekli ekipmanlarla donatılmaktadır. Ana toplama panosunda (solar toplama panosu) toplanan elektrik enerjisi, gerilim değerinin yükseltilmesi için yüksek akım limitlerinde çalışabilen AG şalter ile transformatöre yönlendirilir. Dizi inverter kullanılması durumunda, AC hat kablo bağlantılarının yapılması için kullanılan lokal panolardır. Bu panolarda toplanan enerji tek bir kablo ile ana toplama panosuna taşınır. Ara bağlantı, ilave güvenlik ve anahtarlama mekanizmaları içermektedir. Bu panolar cam elyaf takviyeli ve metal olmak üzere iki tipte üretilmektedir. Merkezi inverter kullanılan sistemlerde; panellerde üretilen DC elektrik DC toplama panolarında toplanır. Her dizi için birer DC toplama panosu oluşturulur. Enerji DC toplama panolarından merkezi inverter sistemine ana DC hat ile taşınır. DC toplama panolarında gerekli güvenlik ve anahtarlama ekipmanları kullanılır (Güneş, 2021).

4.3.5. Konnektörler

Konnektörler, elektrik devrelerindeki farklı bileşenler arasında elektriksel bağlantı sağlayan mekanik elemanlardır. Genellikle erkek ve dişi olmak üzere iki kısımdan oluşan konnektörler, güvenli ve etkili bir bağlantı kurarak sinyal transferini mümkün kılar. Elektronik cihazların vazgeçilmez bir parçası olan konnektörler, hassas tasarımları sayesinde elektriksel sinyallerin doğru ve güvenilir bir şekilde iletilmesini sağlar. Endüstriyel uygulamalarda, çevresel koşullara dayanıklı ve uzun ömürlü olması gereken konnektörler, yüksek kaliteli malzemelerden üretilir. Farklı elektriksel ve fiziksel özelliklere sahip çok çeşitli konnektör tipi bulunması, her türlü uygulama için uygun çözümler sunar (Çayır, 2022).



Şekil 4.9. Konnektör

4.3.6. Trafo

Trafo, elektrik enerjisi sistemlerinin vazgeçilmez bir parçasıdır. Alternatif akımın gerilim ve akım değerlerini değiştirerek, elektrik enerjisinin güvenli ve verimli bir şekilde üretilmesi, iletimi ve dağıtımını sağlar. Manyetik indüksiyon prensibine dayanan trafo, birincil ve ikincil bobinlerin birbirine etkileşimi sayesinde çalışır. Birincil bobine uygulanan alternatif akım, manyetik çekirdek içinde bir manyetik alan oluşturur ve bu alan, ikincil bobinde gerilim indüklemesine neden olur. İndüklenen gerilimin büyüklüğü, bobin sargı sayıları oranına göre belirlenir. Trafolar, genellikle prefabrik beton veya galvanizli çelikten imal edilen ve köşk olarak adlandırılan kapalı yapılarda konumlandırılır. Bu köşkler, trafonun dış etkenlerden korunmasını sağlayarak güvenli ve uzun ömürlü çalışmasını destekler. Piyasada yağlı tip ve kuru tip olmak üzere iki farklı çeşit trafo mevcuttur.



Şekil 4.10. *Trafo köşkü*



Şekil 4.11. *Yağlı tip hermetik trafo*

5. MATERİYAL VE METOT

Bu bölümde incelemiş olduğumuz güneş enerjisi santralının teknik özellikleri ve üretim verilerine yer verilmiştir. Aynı zamanda santralin bulunduğu konum için belirlenen optimum eğim açısı hesaplamalarında kullanılan formüller ve üretim verilerinin hesaplanmasında kullanılan simülasyon programı ile ilgili bilgiler yer almaktadır.

5.1. Materyal

5.1.1. Elmadağ'da Bulunan 3,6 MWp Kapasiteli Güneş Enerjisi Santrali Teknik

Verileri

Santralimiz Ankara'nın Elmadağ ilçesinde 39,9° Kuzey ve 33,2° Güney koordinatlarında bulunmaktadır. Rakım 1101 metredir. Santrale ait teknik bilgiler Tablo 5.1'de gösterilmektedir.

Tablo 5.1. Santrale ait teknik bilgiler

<u>Santral</u>	
Sistem Kapasitesi	3604 kWp
Montaj Açısı	30°
<u>Modüller</u>	
Üretici Firma	Hanwha Solar
Tipi	Polikristal
Maksimum Modül Gücü	265 Wp
Boyutları	1670 x 1000 x 32 mm
Toplam Modül Sayısı	13600 adet
İzin Verilen Çalışma Sıcaklığı	-40 (°C) – (+85°C)
<u>Inverterler (Eviriciler)</u>	
Üretici Firma	Fronius Symo
Tipi	20.0-3-M
Toplam Evirici Sayısı	180
Çıkış Gücü (AC)	20 kW
Evirici Giriş Gerilimi	1000 V (DC)

Santralimiz 3,6 MWp gücünde olup kullanılan ekipmanlar bu değer göz önüne alınarak seçilmiştir. Proje için çıkış gücü 265 W olan panellerden yaklaşık 3,6 MW elde etmek için 13600 adet PV panel kullanılmıştır. 13600 adet güneş paneli gücü 3604 kWp güce eşdeğerdir. PV panellerden gelen DC (Doğru Akımı) şebekeye verebilmek amacıyla hat bağlantısını gerçekleştirecek olan transformatörün giriş bağlantısını gerçekleştirmek için önce AC (Alternatif Akıma) çevrilmesi gerekir. Bu işi evirici (İnverter) yapar. Bu santralde her biri 20 kW çıkış gücüne sahip 180 adet evirici kullanılmıştır.



Şekil 5.1. 3,6 MWp kapasiteli güneş enerjisi santrali

5.1.2. Santral Üretim Verileri

3,6 MWp gücündeki santralin 2018-2024 yılları arasındaki aylık üretim verileri Tablo 5.2’de gösterilmiştir.

Tablo 5.2. Santralin 2018-2024 yılları arasındaki elektrik üretim miktarı

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
	Üretim Miktarı (kWh)	Üretim Miktarı (kWh)	Üretim Miktarı (kWh)	Üretim Miktarı (kWh)	Üretim Miktarı (kWh)	Üretim Miktarı (kWh)	Üretim Miktarı (kWh)
OCAK	203.000	155.000	293.000	195.000	210.000	302.000	196.000
ŞUBAT	286.000	312.000	267.000	401.000	285.000	297.000	326.000
MART	377.000	545.000	463.000	402.000	396.000	327.000	388.000
NİSAN	621.000	451.000	530.000	438.000	487.000	402.000	444.000
MAYIS	526.000	532.000	552.000	611.000	497.000	448.000	471.000
HAZİRAN	587.000	572.000	565.000	497.000	468.000	468.000	623.000
TEMMUZ	572.000	600.000	666.000	613.000	606.000	588.000	546.000
AĞUSTOS	646.000	543.000	633.000	598.000	559.000	585.000	558.000
EYLÜL	492.000	532.000	543.000	517.000	535.000	468.000	441.000
EKİM	466.000	473.000	466.000	470.000	415.000	430.000	457.627
KASIM	312.000	352.000	388.000	334.000	323.000	223.000	235.000
ARALIK	124.000	188.000	236.000	193.000	201.000	232.000	158.000
TOPLAM	5.212.000	5.255.000	5.602.000	5.269.000	4.982.000	4.770.000	4.843.627

5.2. Metot

5.2.1. Optimum Eğim Açısı (β) ve Güneş Geliş Açısının (θ) Hesaplanması

Bu çalışmada, Elmadag bölgesi için fotovoltaik (PV) panellerin elektrik üretim verimliliğini artırmaya yönelik olarak optimum eğim açılarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, günlük, aylık ve mevsimsel zaman dilimleri için en uygun panel eğim açıları MATLAB yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır.

Paneller güney yönüne bakacak şekilde yerleştirildiği için azimut açısı $Z_s=0^\circ$ olarak alınmıştır. Ayrıca, güneş ışınımının en dik geldiği ve verimliliğin en yüksek olduğu öğle saatinde hesaplamaların yapılması nedeniyle saat açısı $h=0^\circ$ olarak belirlenmiştir. Bu sabit parametreler doğrultusunda, her gün için güneşten maksimum düzeyde yararlanılmasını sağlayacak optimum eğim açısı (β) aşağıda verilen denklem yardımıyla elde edilmiştir. Optimum eğim açısının belirlenmesinde kullanılan bu yöntem, panel yüzeyine gelen güneş ışınımının yüzeye dik gelmesini (geliş açısı; $\theta=0^\circ$) sağlayacak şekilde optimum eğim açısını hesaplamaya dayanır. Elde edilen sonuçlar, yıl boyunca PV panellerin farklı zaman dilimlerinde en verimli şekilde konumlandırılmasına yönelik önemli bilgiler sunmaktadır. Böylece, Elmadag gibi belirli bir

coğrafi konuma sahip yerleşim alanlarında güneş enerjisinden daha etkin faydalanmak mümkün hale gelmektedir.

$$\cos(\theta) = \sin(L - \beta) \sin(\delta) + \cos(L - \beta) \cos(\delta) \cos(h) \quad (5.1)$$

Elmadağ bölgesi için fotovoltaik (PV) panellerin yüzeyine gelen güneş ışınlarının geliş açısı (θ), günlük, aylık ve mevsimsel zaman dilimlerinde hesaplanmıştır. Hesaplamalar MATLAB yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Paneller güney yönüne bakacak şekilde konumlandırıldığı için azimut açısı $Z_s=0^\circ$ olarak alınmıştır. Ayrıca, değerlendirmeler güneş ışınımının maksimum olduğu öğle saatine göre yapıldığı için saat açısı da $h=0^\circ$ olarak kabul edilmiştir. Bu varsayımlar altında, her gün için güneş ışınlarının panel yüzeyine geliş açısı (θ) aşağıda verilen matematiksel denklem kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen güneş geliş açısı değerleri, PV panellerin belirli bir zaman diliminde güneşten maksimum düzeyde faydalanacak şekilde konumlandırılmasına olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, çalışma Elmadağ bölgesine özgü olarak güneş enerjisinden daha verimli yararlanılmasına katkı sağlamaktadır.

$$\theta = \cos^{-1}[\sin(L - \beta) \sin(\delta) + \cos(L - \beta) \cos(\delta) \cos(h)] \quad (5.2)$$

5.2.2. PVGIS Çevrimiçi Programı

PVGIS'in çevrimiçi platformu, coğrafi konum verilerine dayanarak, kullanıcılarına güneş enerjisi sistemlerinin tasarım ve değerlendirmesi için kritik öneme sahip detaylı bir veri seti sunar. Bu veriler arasında güneş radyasyonu, hava sıcaklığı, farklı açı ve eğimlerde radyasyon değerleri ile gölgelenme analizleri yer alır. Bu sayede kullanıcılar, fotovoltaik sistemlerinin potansiyel verimini daha doğru bir şekilde tahmin edebilir ve sistemlerin performanslarını optimize edebilmek için gerekli bilgileri elde edebilirler.

Şebekeye bağlı 3,6 MW sistem için PVGIS çevrimiçi platformu ile tasarım yapılarak alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 5.2'de PVGIS programı giriş parametreleri ekranı görülmektedir.

Cursor:
Selected: 39.900, 33.200
Elevation (m): 1152
PVGIS ver. 5.3

Use terrain shadows:
☒ Calculated horizon
☐ Upload horizon file
[Switch to version 5.2](#)

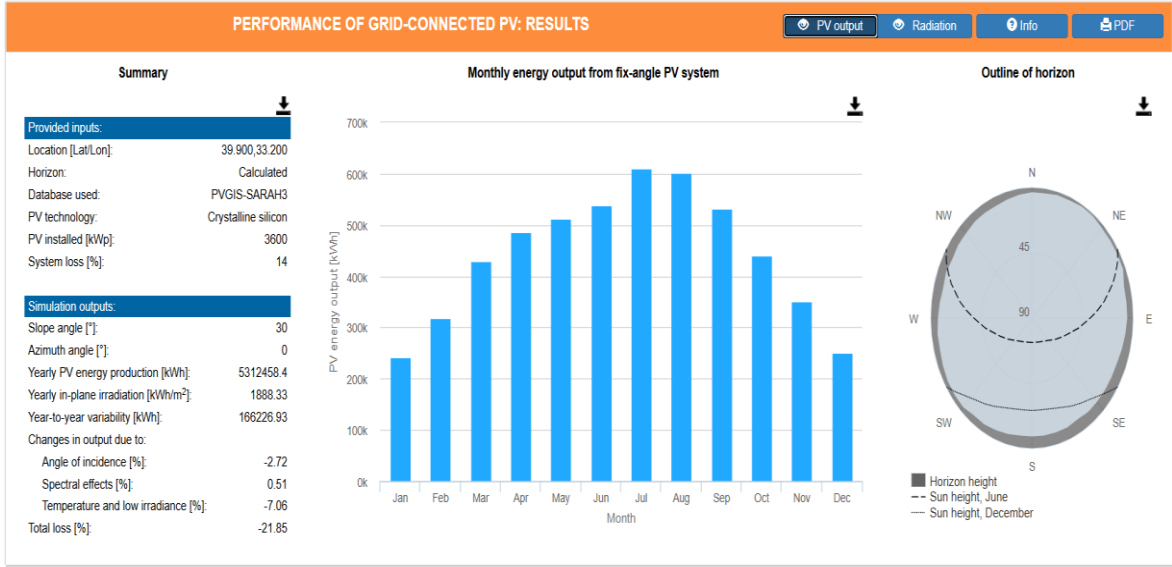
[csv](#) [json](#)
Dosya Seç Dosya seçilmedi

GRID CONNECTED
TRACKING PV
OFF-GRID
MONTHLY DATA
DAILY DATA
HOURLY DATA
TMY

PERFORMANCE OF GRID-CONNECTED PV
Solar radiation database* PVGIS-SARAH3
PV technology* Crystalline silicon
Installed peak PV power [kWp]* 3600
System loss [%]* 14
Fixed mounting options
Mounting position* Free-standing
Slope [°]* 30
Azimuth [°]* 0
☐ Optimize slope
☐ Optimize slope and azimuth
☐ PV electricity price
PV system cost (your currency)
Interest [%/year]
Lifetime [years]

Şekil 5.2. PVGIS parametre giriş ekranı

Fotovoltaik (PV) sistemlerin beklenen enerji üretimini ve verimliliğini gösteren çıktı bölümüne "PV output" denir. PVGIS gibi yazılımlar aracılığıyla sunulan bu rapor, kullanıcıların belirli bir lokasyon için PV sistemlerinin olası performansını öngörmelerine imkân tanır. PV output bölümü, güneşlenme bilgileri, hava sıcaklığı, rüzgâr hızı ve diğer çevresel faktörleri hesaba katarak PV sisteminin yıllık, aylık veya saatlik enerji üretimini tahmin eder. Bu tahminler, PV sistem tasarımının iyileştirilmesinde, performans değerlendirmesinde ve enerji yönetiminde kritik bir öneme sahiptir. Şekil 5.3'de aylık enerji üretim grafiği ve ilgili çıktıların bulunduğu bir ekran görüntüsü sunulmaktadır.



Şekil 5.3. PVGIS PV output çıktı ekranı

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu bölümde; incelenen güneş enerjisi santrali için belirlenen optimum panel eğim açısının aylık ve mevsimlik değerleri incelenmiştir. Panel eğim açılarına göre güneş ışınımının geliş açılarının yıl içerisindeki değişimi sabit eğim açısı ve optimum eğim açılarına göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bununla birlikte, incelenen güneş enerjisi santralinin üretim verileri ve simülasyon sonucu elde edilen veriler karşılaştırılmış, ekonomik olarak analiz edilmiştir.

6.1. Elmadağ için PV Panel Optimum Eğim Açısının (β) Belirlenmesi

Hesaplamalar sonucunda yıl boyunca günlük $16,12^\circ$ ile $62,66^\circ$ arasında değişen eğim açıları elde edilmiştir. Tüm yıl boyunca güney yönlü paneller için yıllık optimum eğim açısı 0° azimut açısında $39,56^\circ$ olarak bulunmuştur. Sonuçlara göre optimum eğim açısı ilkbaharda $41,64^\circ$, yazın $19,93^\circ$, sonbaharda $48,54^\circ$ ve kışın $58,66^\circ$ olarak hesaplanmıştır. Yaz aylarında güneş ışınlarının daha dik gelmesi nedeniyle panel eğim açısının küçük, kış aylarında güneş ışınlarının daha eğik gelmesi nedeniyle panel eğim açısının daha büyük olduğu görülmektedir.

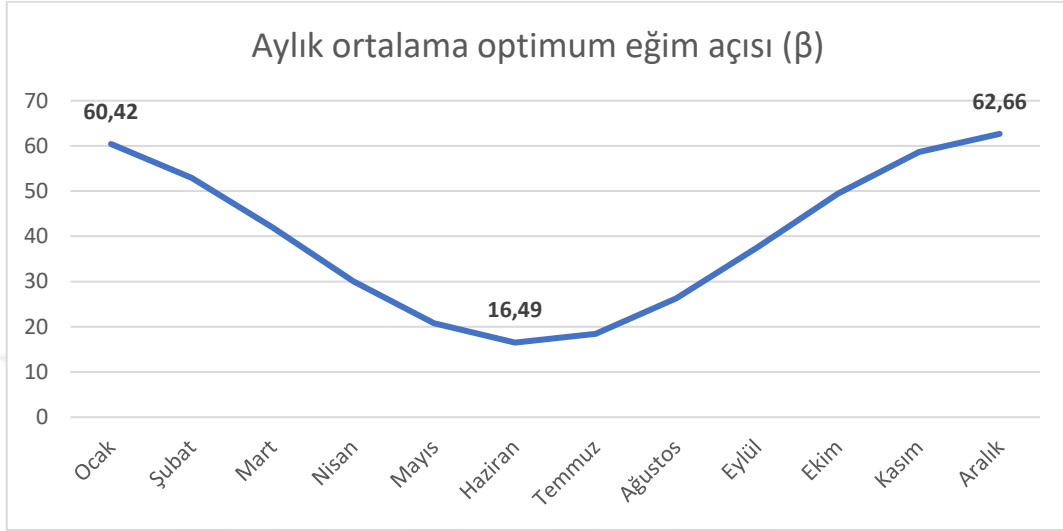
Elde edilen aylık ortalama optimum eğim açıları Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1. Aylık ortalama optimum eğim açısı (β)

Aylar	Optimum eğim açısı (β)
Ocak	60,42
Şubat	52,89
Mart	41,96
Nisan	30,08
Mayıs	20,76
Haziran	16,49
Temmuz	18,47
Ağustos	26,28
Eylül	37,58
Ekim	49,42
Kasım	58,62
Aralık	62,66

Şekil 6.1’deki aylık optimum eğim açısı grafiğinden ve Şekil 6.2’deki mevsimlik optimum eğim açısı grafiğinden de görüldüğü üzere güneş panellerinin yatayla yaptığı açı

yıl içerisinde değişmekte, özellikle kış aylarından yaz aylarına doğru azalmaktadır. Güneş paneli eğim açısının yıl içerisinde değiştirilmesinin temel amacı, yıl boyunca panel yüzeyine gelen güneş ışınlarını mümkün olduğunca dik açıyla gelmesini sağlamaktır.



Şekil 6.1. Ortalama optimum eğim açısının aylara göre değişimi



Şekil 6.2. Ortalama optimum eğim açısının mevsimlere göre değişimi

6.2. Elmadağ için PV Panel Güneş Geliş Açısının (θ) Belirlenmesi

Hesaplamalar sonucunda ($\beta=30^\circ$) ve ($\beta=\text{aylık ortalama}=\text{opt.}$) olmak üzere iki farklı eğim açısı durumunda aylık ortalama güneş geliş açısı (θ) değerleri hesaplanmıştır. Yıl boyunca eğim açısının 30° ($\beta=30^\circ$) olduğu durumda $0,0294^\circ$ ile $33,0198^\circ$ arasında değişen;

eğim açısının optimum olduğu durumda $0,0065^\circ$ ile $6,8637^\circ$ arasında değişen güneş geliş açıları elde edilmiştir. Elde edilen aylık güneş geliş açıları Tablo 6.2’de görülmektedir.

Tablo 6.2. $\beta = 30^\circ$ ve $\beta = \text{opt.}$ durumlarında aylık güneş geliş açıları (θ)

Aylar	Geliş açısı θ ($\beta = 30^\circ$ olduğu durumda)	Geliş açısı θ ($\beta = \text{opt.}$ olduğu durumda)
Ocak	30,42	1,44
Şubat	22,89	2,42
Mart	11,96	3,17
Nisan	2,75	2,75
Mayıs	9,24	1,86
Haziran	13,51	0,49
Temmuz	11,53	1,29
Ağustos	3,96	2,55
Eylül	7,58	3,02
Ekim	19,42	2,84
Kasım	28,62	1,81
Aralık	32,67	0,70

Sonuçlar incelendiğinde; küçük geliş açıları (θ) panellerin iyi konumlandırıldığını ve güneş ışığının panele daha dik geldiğini dolayısıyla daha verimli enerji üretildiğini göstermektedir.

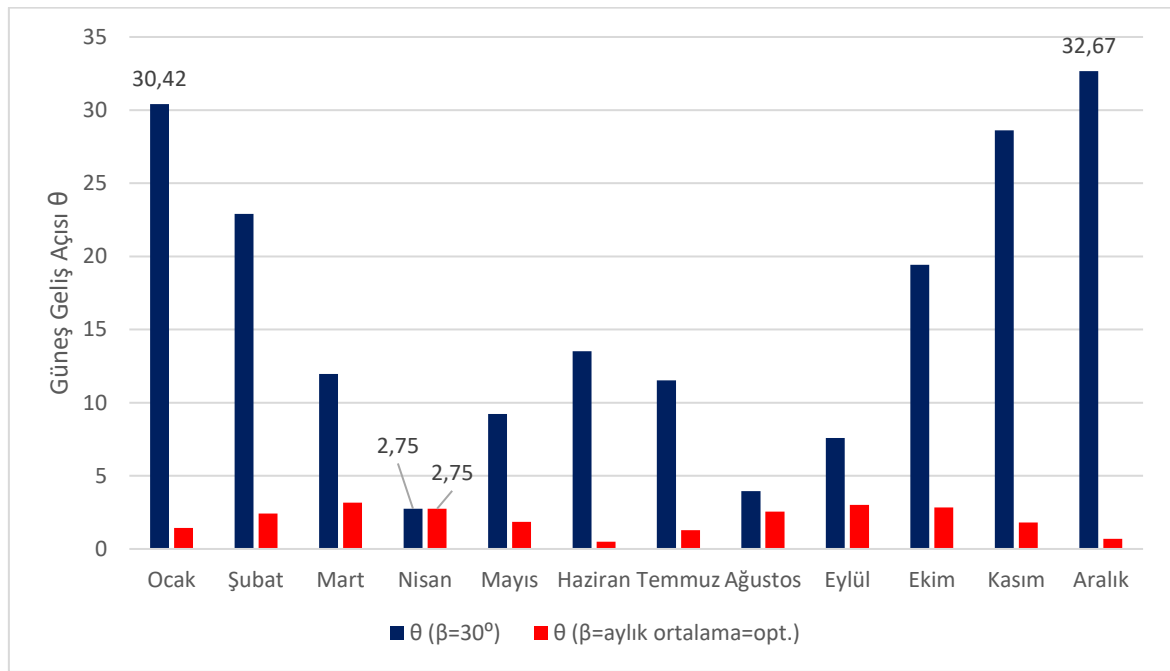
Sabit eğimde ($\beta = 30^\circ$); Nisan ($2,75^\circ$), Ağustos ($3,96^\circ$), Eylül ($7,58^\circ$) gibi aylarda geliş açısı oldukça düşüktür. Bu aylarda ($\beta = 30^\circ$) sabit eğim, güneş ışınlarını oldukça verimli bir şekilde almaktadır.

Optimum eğimde ($\beta = \text{aylık ortalama} = \text{opt.}$), geliş açısı değerleri genel olarak oldukça düşüktür (aylık maksimum $3,17^\circ$). Bu durum her ay panel eğiminin güneş ışınlarına en uygun şekilde ayarlandığını göstermektedir. Özellikle Nisan ayında sabit ve ayarlanabilir eğim sonuçları neredeyse aynıdır ($\theta = 2,75^\circ$). Çünkü Nisan ayında optimum eğim ($\beta = 30,08^\circ$) zaten 30° ’ye çok yakındır.

Şekil 6.3’teki grafikten görüldüğü üzere; sabit eğimde ($\beta = 30^\circ$) güneş geliş açısında yıl boyunca büyük dalgalanmalar yaşanmaktadır. Özellikle kış aylarında (Aralık, Ocak) geliş açısı çok yüksektir. Bu da panelin güneş ışığını eğik aldığını ve verimin düştüğünü göstermektedir.

Optimum eğimde (β =aylık ortalama=opt.) ise güneş geliş açıları oldukça düşük ve dengeli olup her ay güneş ışınları neredeyse dike yakın gelmektedir. Bu durum da maksimum verimliliği yansıtmaktadır.

Bu grafikler, ayarlanabilir panel eğiminin her ay optimum performansı sağladığını net biçimde ortaya koymaktadır. Sabit eğimli sistemler, yatırım ve bakım açısından avantajlı olabilir ama yıl boyunca verim dalgalanır. Ayarlanabilir eğimli sistem her ay en iyi verimi sağlar fakat mekanik sistemler ve bakımlar maliyetleri artırmaktadır.



Şekil 6.3. ($\beta=30^\circ$) ve (β =aylık ortalama=opt.) durumlarında güneş geliş açılarının aylık değişimi

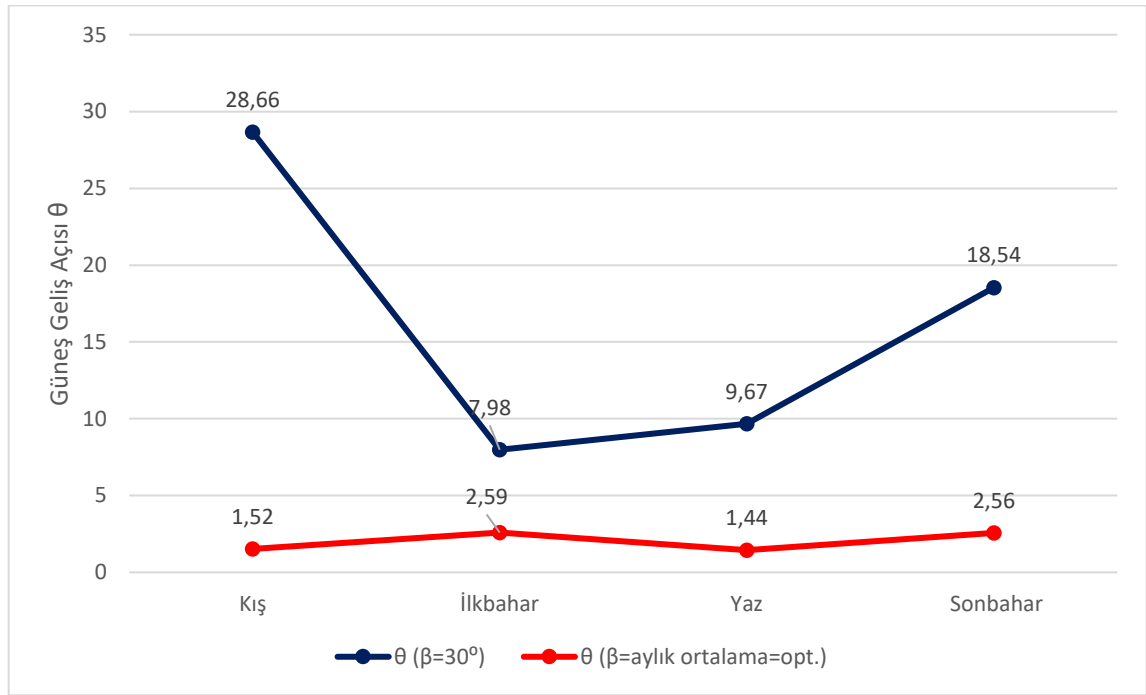
Sabit eğim ($\beta=30^\circ$) ve optimum eğim (β =aylık ortalama=opt.) durumlarında mevsimlik ortalama güneş geliş açıları (θ) Tablo 6.3'te gösterilmektedir.

Tablo 6.3. $\beta=30^\circ$ ve $\beta=opt.$ durumlarında mevsimsel güneş geliş açıları (θ)

Aylar	Geliş açısı θ ($\beta=30^\circ$ olduğu durumda)	Geliş açısı θ (β =aylık ortalama olduğu durumda)
Kış	28,66	1,52
İlkbahar	7,98	2,59
Yaz	9,67	1,44
Sonbahar	18,54	2,56

Güneş geliş açılarına mevsimsel olarak bakıldığında; sabit eğimde ($\beta=30^\circ$) sonbahar ve kış mevsimlerinde en yüksek geliş açıları elde edilmiştir ve Şekil 6.4'teki grafikte gösterilmiştir. Çünkü güneş ışınları yüzeye eğik gelmektedir ve verim düşüktür. Sabit eğim ($\beta=30^\circ$) ilkbahar ve yaz aylarında daha iyi sonuç vermektedir.

Optimum eğimde (β =aylık ortalama=opt.) her mevsimde güneş geliş açıları oldukça düşük olup optimum açıyla güneş ışığı alır; bu da daha yüksek verim anlamına gelmektedir.



Şekil 6.4. ($\beta=30^\circ$) ve (β =aylık ortalama=opt.) durumlarında güneş geliş açılarının mevsimsel değişimi

6.3. Üretim Verilerinin Aylık Olarak Karşılaştırılması

Ankara ili Elmadağ ilçesinde bulunan güneş enerjisi santraline ait 2018-2024 yılları arasındaki gerçek elektrik üretim verileri ($\beta=30^\circ$), PVGIS çevrimiçi simülasyon programı kullanılarak elde edilen aylık üretim tahminleriyle karşılaştırılmıştır. Simülasyonlar hem 30° sabit eğim açısı ($\beta=30^\circ$) hem de sistemin maksimum üretim sağlayacağı şekilde belirlenen optimum eğim açısı (β =opt.) için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca santralin eğimli yüzeyine düşen ortalama güneş ışınlama miktarları ve aylık ortalama verimler hem sabit eğim açısı ($\beta=30^\circ$) hem de optimum eğim açısı (β =opt.) için belirlenmiştir. Söz konusu veriler Tablo 6.4'te sunulmuştur.

Tablo 6.4. 2018-2024 yılları arasındaki aylık ortalama elektrik üretim miktarları, eğik yüzeye gelen güneş ışınlamaları ve aylık ortalama verimler

	Santralin Ortalama Aylık Elektrik Üretim Miktarı (2018-2024) (kWh/m ²)			Eğik Yüzeye Gelen Ortalama Güneş Işınımı (2018-2024) (kWh/m ²)		Ortalama Verim (2018-2024)		
	Gerçek ($\beta=30^\circ$)	PVGIS ($\beta=30^\circ$)	PVGIS ($\beta=opt$)	($\beta=30^\circ$)	($\beta=opt$)	Gerçek ($\beta=30^\circ$)	PVGIS ($\beta=30^\circ$)	PVGIS ($\beta=opt$)
OCAK	9,92	10,78	12,01	91,14	103,28	0,109	0,118	0,116
ŞUBAT	13,88	14,18	15,09	107,38	114,55	0,129	0,132	0,132
MART	18,50	19,18	19,41	147,92	149,86	0,125	0,130	0,129
NİSAN	21,53	21,74	21,74	173,86	173,85	0,124	0,125	0,125
MAYIS	23,22	22,89	23,46	188,98	193,32	0,123	0,121	0,121
HAZİRAN	24,13	24,09	25,27	194,01	202,81	0,124	0,124	0,125
TEMMUZ	26,75	27,27	28,31	226,56	234,88	0,118	0,120	0,121
AĞUSTOS	26,31	26,86	27,00	224,07	225,08	0,117	0,120	0,120
EYLÜL	22,52	23,79	23,93	194,43	195,87	0,116	0,122	0,122
EKİM	20,28	19,73	20,85	163,98	174,36	0,124	0,120	0,120
KASIM	13,83	15,67	17,74	122,30	139,24	0,113	0,128	0,127
ARALIK	8,50	11,17	12,86	82,12	94,73	0,104	0,136	0,136
YIL ORT.	19,11	19,78	20,64	159,73	166,82	0,119	0,125	0,124

Fotovoltaik sistemlerde panel verimliliğini ve performansını daha net değerlendirebilmek için mutlak üretim değerleri yerine birim alan başına üretim miktarı (kWh/m²) kullanılır. Bu kullanım; farklı sistemler, sahalar ya da simülasyon senaryoları arasında karşılaştırma yapılmasına olanak tanımaktadır. Tablo 6.4’te, 2018–2024 yılları arasında ölçülen ve simüle edilen metrekare başına aylık ortalama üretim değerleri üç farklı senaryoya göre verilmiştir:

1. Gerçek Üretim ($\beta=30^\circ$),
 - Mevcut sabit eğimli sistemin yedi yıllık ortalamasıdır.
 - Değerler doğrudan sahadan ölçülmüş üretim verilerine dayanmaktadır.
2. PVGIS Tahmini Üretim ($\beta=30^\circ$),
 - Aynı eğim açısıyla (30°) PVGIS simülasyonlarıyla elde edilen teorik üretimdir.
3. PVGIS Tahmini Üretim ($\beta=optimum$),
 - PVGIS tarafından her ay için optimum eğim açısına göre hesaplanan teorik üretimdir.

- Güneşin yıllık konum değişimlerine göre maksimum ışıınımı almak üzere hesaplanmıştır.

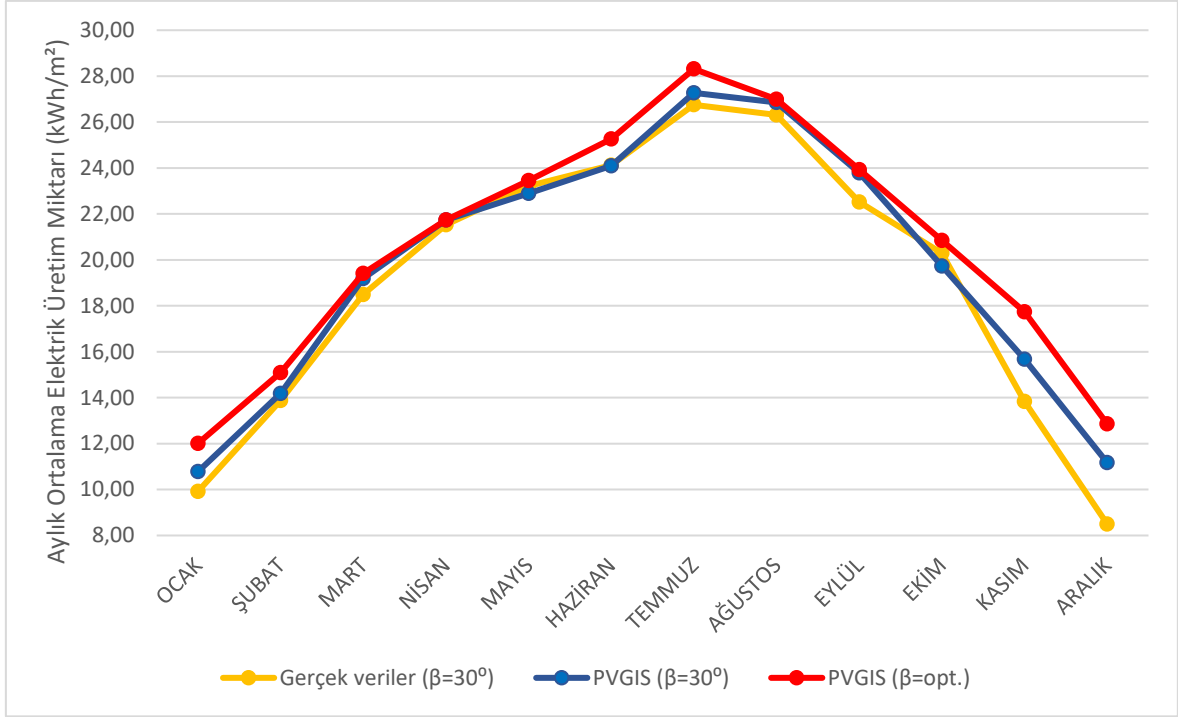
Tablodaki üretim miktarları incelendiğinde; bazı aylarda 30° eğim açısıyla yapılan simülasyonların gerçek üretim değerlerine oldukça yakın olduğu, bazı aylarda ise bu değerlerin altında veya üstünde kaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 6.5). Ancak yıllık bazda değerlendirildiğinde, PVGIS simülasyon sonuçlarının gerçek üretim miktarından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, simülasyonların ideal koşulları varsayması nedeniyle; gerçek hayatta karşılaşılan olumsuz hava koşulları, panel yüzeyindeki kirlenmeler, gölgeleme etkileri, bakım eksiklikleri, sistem arızaları veya ekipman verim kayıpları gibi etkenlerin üretimi olumsuz yönde etkilemesinden kaynaklanabilmektedir.

Optimum eğim açısıyla yapılan simülasyonlarda ise beklendiği üzere daha yüksek üretim miktarlarına ulaşılmıştır. Bu durum, panellerin yıl boyunca güneş ışınlarını daha dik açıyla alacak şekilde konumlandırılmasının üretim miktarını artırdığını göstermektedir.

Gerçek saha verilerine göre sistemin yıllık ortalama aylık üretim miktarı 19,11 kWh/m² olarak gerçekleşmiştir. Aynı sistem için PVGIS simülasyonları sabit 30° eğimde 19,78 kWh/m², optimum eğim açılarınd ise 20,64 kWh/m² olarak tahmin etmiştir. Bu veriler, mevcut sabit sistemin potansiyel üretimin yaklaşık %8 altında kaldığını ortaya koymaktadır.

En yüksek üretim Temmuz ayında (26,75 kWh/m²) gerçekleşmiş, bu da güneşlenme süresinin ve ışıınım yoğunluğunun en fazla olduğu dönemi işaret etmektedir. En düşük üretim ise Aralık ayında (8,5 kWh/m²) gözlemlenmiştir. Bu dönemlerde güneş ışıınımı az, gün uzunlukları kısadır. Özellikle kış ve geçiş aylarında (ör. Ocak, Şubat, Mart, Kasım, Aralık) üretim farkları daha da belirgindir. Bunun nedeni, güneşin konumundaki değişime sabit eğimin yeterli düzeyde uyum sağlayamamasıdır.

PVGIS'in optimum eğimle tahmini üretimi, gerçek üretime göre her ay daha yüksektir. Aralık ayında bu fark yaklaşık %51, yıl ortalamasında ise %8 civarındadır. Bu sonuç, eğim açısının mevsimsel ayarlanabilir olması durumunda elde edilebilecek önemli bir performans artışını göstermektedir.

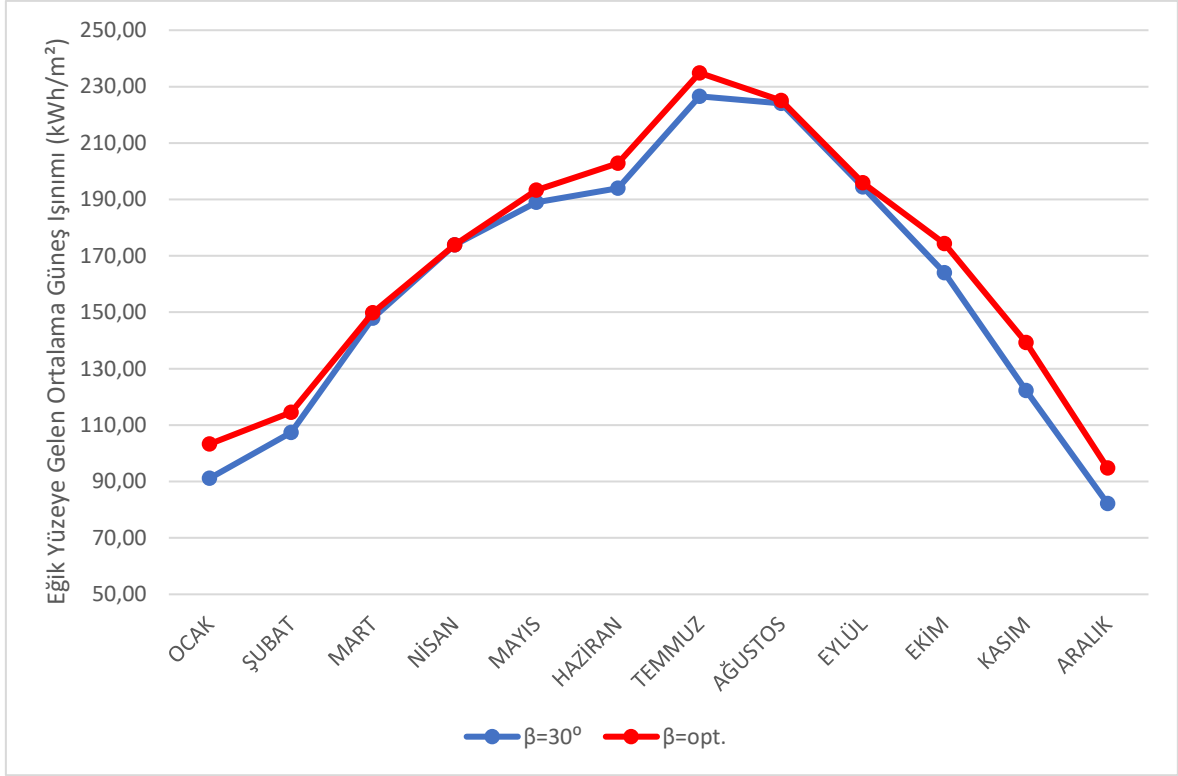


Şekil 6.5. Santralin 2018-2024 yılları arasındaki gerçek üretimi ile PVGIS tarafından tahmin edilen üretim miktarlarının karşılaştırılması

Panel yüzeyine gelen güneş ışınlamı, sistemin enerji üretimini doğrudan etkileyen en önemli parametredir. Eğik düzleme düşen ışınlam, panel eğimi ve yönelimi ile birlikte, konum ve mevsimsel değişikliklerden etkilenmektedir. Tablo 6.4'teki ışınlam değerleri sabit eğim ($\beta=30^\circ$) ve optimum eğim ($\beta=opt.$) olmak üzere iki farklı eğim senaryosu için sunulmuştur.

Yıl ortalaması bazında, 30° eğimde $159,73 \text{ kWh/m}^2$ ışınlam alınırken, optimum eğimde bu değer $166,82 \text{ kWh/m}^2$ 'ye çıkmaktadır. Bu da yıllık toplamda yaklaşık %4,4 daha fazla ışınlam anlamına gelmektedir.

Aralık ayında, 30° eğimli yüzeye düşen ışınlam $82,12 \text{ kWh/m}^2$ iken, optimum eğimde bu değer $94,73 \text{ kWh/m}^2$ 'ye yükselmektedir. Fark %15'in üzerindedir (Şekil 6.6). Bu sonuç, panel eğimi ve yöneliminin yıllık güneş hareketine göre doğru ayarlanmasıyla doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.6. $\beta=30^\circ$ ve $\beta=opt.$ için eğik yüzeye gelen aylık ortalama güneş ışıınım miktarlarının karşılaştırılması

Verimlilik, gelen ışıınının ne kadarının elektrik enerjisine dönüştürülebildiğini gösterir aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\eta = \frac{\text{Üretim (kWh/m}^2\text{)}}{\text{Gelen ışıınım (kWh/m}^2\text{)}} \quad (6.1)$$

Verim; sistemin tasarım kalitesi, panel tipi, sıcaklık katsayısı, inverter kayıpları gibi birçok teknik faktörün birleşimiyle oluşur. Tablo 6.4'te; sabit eğim açısındaki ($\beta=30^\circ$) gerçek sistem verimi, sabit eğim açısındaki ($\beta=30^\circ$) PVGIS verimi ve optimum eğim açısındaki ($\beta=opt.$) PVGIS verimi olmak üzere üç farklı durum incelenmiştir.

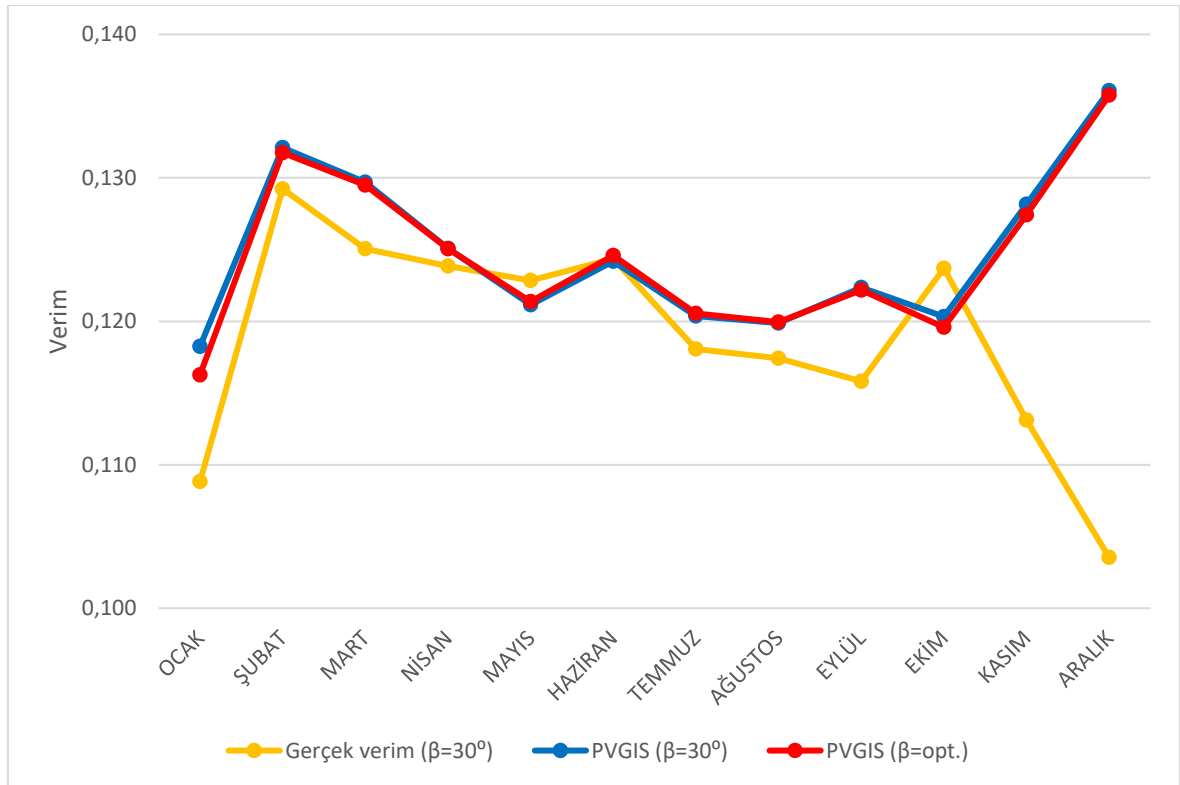
Gerçek sistemin yıllık ortalama verimliliği %11,9 iken, PVGIS simülasyonlarında bu değer %12,5'e kadar çıkmaktadır. Sabit eğim açısı ve optimum eğim açısı için yapılan verim hesaplamalarının yaklaşık aynı olması; üretim artışının verim artışı ile değil panel yüzeyine gelen güneş enerjisinin optimum açı ayarlaması sonucu artmasından kaynaklandığını göstermektedir.

Aralık ayında gerçek sistemin verimi %10,4 ile en düşük düzeydedir. Bu, güneş ışınımının düşük olduğu kış aylarında sistemin daha az verimli çalıştığını göstermektedir.

Şubat ayında %12,9, Mart ayında %12,5 ile en yüksek verimler gözlemlenmiştir.

PVGIS verileriyle gerçek sistem arasında %5–7 oranında bir verim farkı bulunmaktadır. Bu farkın nedenleri arasında:

- Panel yüzey kirliliği
- PV modüllerinin yaşlanma etkisi
- Sistem üzerinde oluşan kısmi gölgelenmeler
- Kayıplar (kablo, inverter, ısı kaybı)



Şekil 6.7. Gerçek ($\beta=30^\circ$), PVGIS ($\beta=30^\circ$), PVGIS ($\beta=opt.$) durumları için verimlerin karşılaştırılması

6.4. Üretim Verilerinin Mevsimsel Olarak Karşılaştırılması

Santralin üretim verileri mevsimsel bazda değerlendirildiğinde; 2018-2024 yılları arasındaki gerçek elektrik üretim verileri ($\beta=30^\circ$), PVGIS çevrimiçi simülasyon programı kullanılarak elde edilen mevsimsel üretim tahminleriyle karşılaştırılmıştır. Simülasyonlar hem 30° sabit eğim açısı ($\beta=30^\circ$) hem de sistemin maksimum üretim sağlayacağı şekilde

belirlenen optimum eğim açısı ($\beta=\text{opt.}$) için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca santralin eğimli yüzeyine düşen ortalama güneş ışınlamı miktarları ve mevsimsel ortalama verimler hem sabit eğim açısı ($\beta=30^\circ$) hem de optimum eğim açısı ($\beta=\text{opt.}$) için belirlenerek mevsimlere göre gruplanmış halde Tablo 6.5'te sunulmuştur.

Tablo 6.5. 2018-2024 yılları arasındaki mevsimsel ortalama elektrik üretim miktarları, eğik yüzeye gelen güneş ışınlamaları ve mevsimsel ortalama verimler

	Santralin Ortalama Mevsimsel Elektrik Üretim Miktarı (2018-2024) (kWh/m ²)			Eğik Yüzeye Gelen Ortalama Güneş Işınımı (2018-2024) (kWh/m ²)		Ortalama Verim (2018-2024)		
	Gerçek ($\beta=30^\circ$)	PVGIS ($\beta=30^\circ$)	PVGIS ($\beta=\text{opt}$)	($\beta=30^\circ$)	($\beta=\text{opt}$)	Gerçek ($\beta=30^\circ$)	PVGIS ($\beta=30^\circ$)	PVGIS ($\beta=\text{opt}$)
KIŞ	10,77	12,05	13,32	93,55	104,19	0,114	0,129	0,128
İLKBAHAR	21,08	21,27	21,54	170,26	172,34	0,124	0,125	0,125
YAZ	25,73	26,07	26,86	214,88	220,92	0,120	0,121	0,122
SONBAHAR	18,88	19,73	20,84	160,24	169,82	0,118	0,124	0,123

Bu analiz kapsamında, farklı eğim açılarıyla yapılan simülasyonların, gerçek üretim değerleriyle mevsimsel düzeyde nasıl bir uyum gösterdiği değerlendirilmiş ve sistem performansının mevsimsel değişkenliği üzerine etkileri ortaya konmuştur.

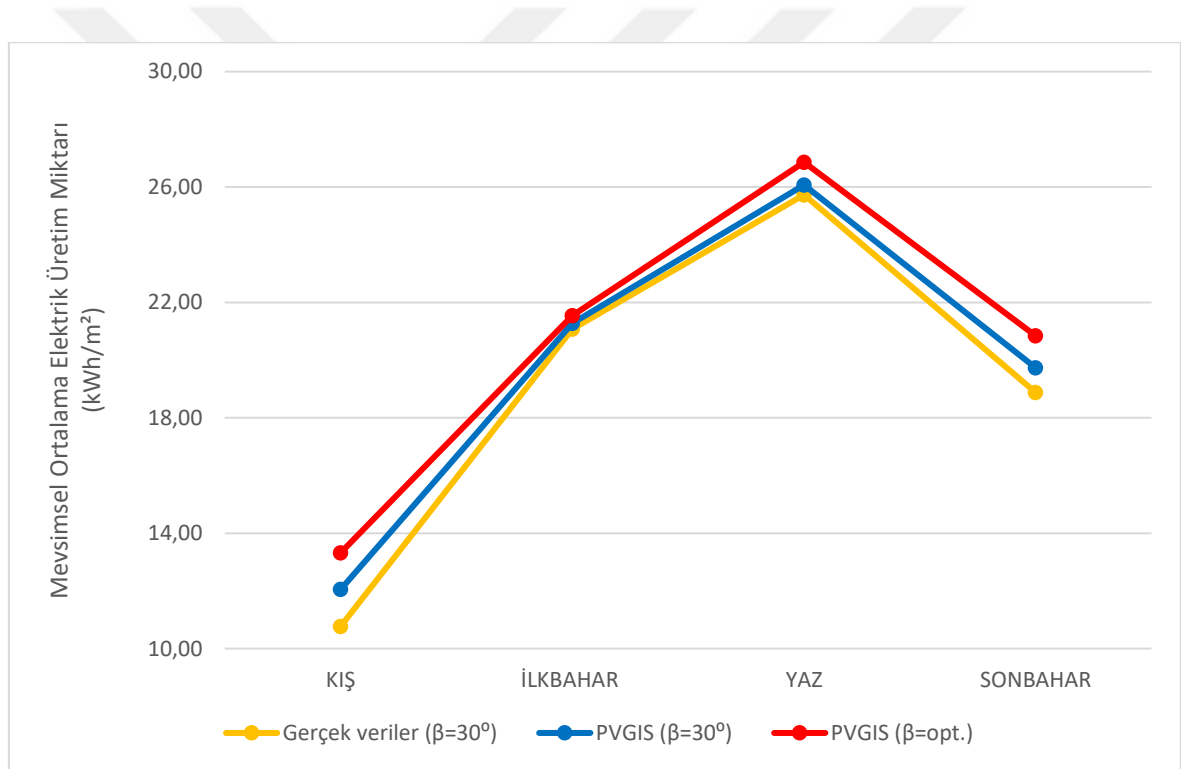
Santralin gerçek üretim değerleri ile simülasyon sonuçları, Şekil 6.8'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Gerçek üretim verileri incelendiğinde, en yüksek elektrik üretiminin yaz aylarında, en düşük üretimin ise kış aylarında gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, yaz aylarında güneşlenme süresinin daha uzun olması ve güneş ışınlamının daha yoğun gerçekleşmesiyle açıklanabilir. İlkbahar ve sonbahar aylarında ise üretim değerleri yaz ve kış aylarına kıyasla orta düzeydedir.

Gerçek üretim ile PVGIS ($\beta=\text{optimum}$) üretim değerleri arasında mevsimsel bazda ortalama %10-24 arasında değişen farklar gözlemlenmiştir. En büyük fark kış aylarındadır. Gerçek üretim 10,77 kWh/m² iken, optimum eğimle bu değer 13,32 kWh/m²'ye yükselmektedir. İlkbahar ve yaz aylarında üretim farkları daha azdır, çünkü 30° eğim yazın güneşin yüksek konumuyla daha iyi hizalanır. Sonbaharda da kış aylarına benzer şekilde eğim açısına bağlı üretim farkı belirginleşmektedir.

PVGIS simülasyon sonuçları, hem sabit 30° eğim açısı ($\beta=30^\circ$) hem de optimize edilmiş eğim açısı ($\beta=\text{opt.}$) için, gerçek üretim değerlerine kıyasla daha yüksek üretim

potansiyeli ortaya koymaktadır. Bu fark, simülasyonların çoğunlukla ideal atmosfer koşullarını varsayması, yani tozlanma, bulutluluk, sıcaklık artışı, sistem bileşenlerindeki verim kayıpları ve bakım eksiklikleri gibi gerçek saha koşullarını tam olarak hesaba katmamasından kaynaklanabilmektedir.

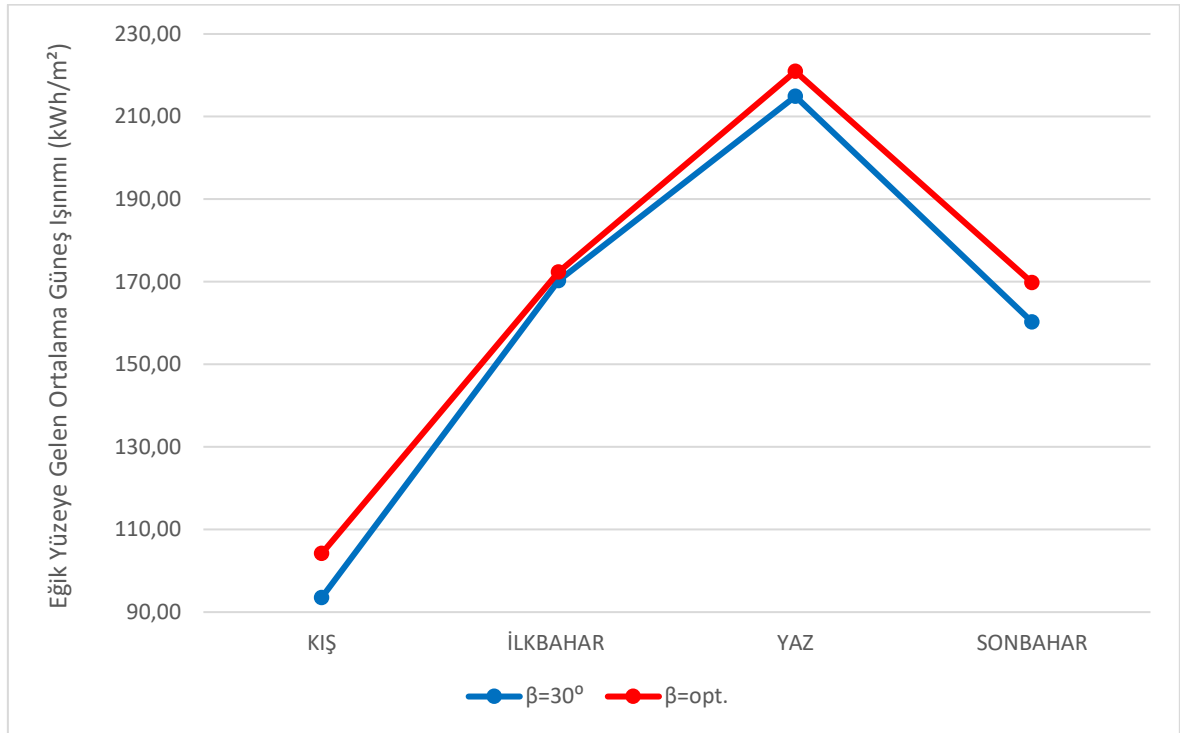
Sonuçlar, eğim açısının fotovoltaik sistemlerin üretim miktarı üzerinde belirleyici bir faktör olduğunu açık bir şekilde ortaya koymaktadır. Yapılan simülasyonlar, optimum eğim açısıyla elde edilen üretim değerlerinin, sabit 30° eğim açısıyla yapılan simülasyonlara kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, güneş enerjisi sistemlerinin tasarımı ve kurulumu aşamasında eğim açısının dikkatli bir şekilde optimize edilmesinin ne denli önemli olduğunu vurgulamaktadır.



Şekil 6.8. Santralin 2018-2024 yılları arasındaki gerçek üretimi ile PVGIS tarafından tahmin edilen üretim miktarlarının mevsimsel karşılaştırılması

Panel yüzeyine gelen güneş ışınlamı, sistemin enerji üretimini doğrudan etkileyen en önemli parametredir. Eğik düzleme düşen ışınlam, panel eğimi ve yönelimi ile birlikte, konum ve mevsimsel değişikliklerden etkilenmektedir. Tablo 6.5'teki ışınlam değerleri sabit eğim ($\beta=30^\circ$) ve optimum eğim ($\beta=opt.$) olmak üzere iki farklı eğim senaryosu için sunulmuştur.

Kışın optimum eğimle %11,3 oranında daha fazla ışıınım yüzeye ulaşmıştır. İlkbahar ve yaz aylarında ise ışıınım farkı sınırlıdır (yaklaşık %1-3) çünkü bu mevsimlerde 30° eğim zaten yüksek ışıınım alma potansiyeline sahiptir. Sonbaharda ışıınım farkı %6'ya yakındır. Güneş ışıınımının eğik yüzeye düşme oranı mevsimsel olarak değişmektedir (Şekil 6.9). Özellikle güneşin eğik açıyla geldiği kış ve sonbahar aylarında, sabit eğim büyük bir ışıınım kaybına neden olmaktadır. Bu kayıplar, sadece toplam üretimi değil, modül sıcaklığı, enerji dönüşüm süresi ve inverter yüklenme dengesini de etkilemektedir.

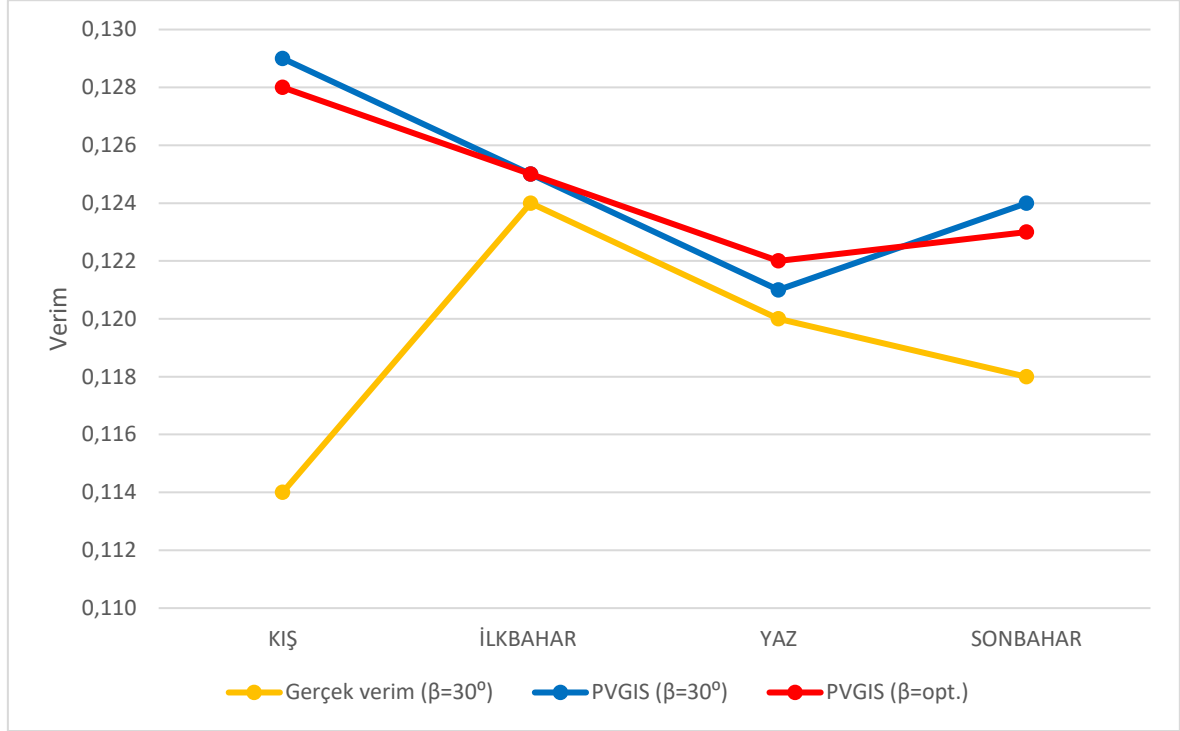


Şekil 6.9. $\beta=30^\circ$ ve $\beta=opt.$ için eğik yüzeye gelen mevsimsel ortalama güneş ışıınım miktarlarının karşılaştırılması

Tablo 6.5'te; sabit eğim açısındaki ($\beta=30^\circ$) gerçek sistem verimi, sabit eğim açısındaki ($\beta=30^\circ$) PVGIS verimi ve optimum eğim açısındaki ($\beta=opt.$) PVGIS verimi olmak üzere üç farklı durum incelenmiştir.

Gerçek sistem verimi her mevsimde teorik verimlerin yaklaşık %0,5 ila %1,1 altında kalmıştır (Şekil 6.10). Kış aylarında verim farkı daha belirgindir, ilkbahar ve yaz aylarında verim farkı oldukça küçüktür. Bu sonuç, sistemin bu dönemlerde daha etkin çalıştığını göstermektedir.

Sabit eğimle çalışan sistemin verimliliği, özellikle düşük ışıyım seviyelerinde ve düşük güneş yüksekliklerinde belirgin şekilde düşmektedir. Simülasyon değerlerine yakın sonuçlar, sistemin genel olarak uygun çalıştığını, ancak bakım, temizlik, sıcaklık yönetimi ve kablo-inverter kayıplarının azaltılması durumunda daha yüksek verim elde edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 6.10. Gerçek ($\beta=30^\circ$), PVGIS ($\beta=30^\circ$), PVGIS ($\beta=opt.$) durumları için mevsimsel verimlerin karşılaştırılması

6.5. Üretim Verilerinin Ekonomik Analizi

Santralde üretilen elektriğin satış fiyatı, kilovat-saat (kWh) başına 0,133 dolardır. 2022, 2023, 2024 yıllarına ait ve PVGIS simülasyonu ($\beta=optimum$ eğim açısı) ile elde edilen üretim değerlerine dayalı olarak hesaplanan aylık gelirler, Tablo 6.6’da sunulmuştur.

Tablo 6.6. 2022, 2023 ve 2024 yılları ve PVGIS simülasyon ($\beta=opt.$) koşullarında üretilen elektriğin satışından elde edilen aylık gelirler

Santralde Üretilen Elektriğin Satışından Elde Edilen Gelirler (\$)				
	2022	2023	2024	$\beta=optimum$ (PVGIS simülasyon)
OCAK	27.930	40.166	26.068	35.743
ŞUBAT	37.905	39.501	43.358	44.917
MART	52.668	43.491	51.604	57.763
NİSAN	64.771	53.466	59.052	64.718
MAYIS	66.101	59.584	62.643	69.834
HAZİRAN	62.244	62.244	82.859	75.215
TEMMUZ	80.598	78.204	72.618	84.273
AĞUSTOS	74.347	77.805	74.214	80.365
EYLÜL	71.155	62.244	58.653	71.236
EKİM	55.195	57.190	60.864	62.064
KASIM	42.959	29.659	31.255	52.815
ARALIK	26.733	30.856	21.014	38.279
TOPLAM	662.606	634.410	644.202	737.222

Tablonun incelenmesi sonucunda, 2022 yılının son üç yıl içindeki en yüksek toplam üretime ve dolayısıyla en yüksek toplam gelire sahip yıl olduğu görülmektedir. 2023 yılında, 2022'ye kıyasla hem üretim miktarında hem de gelirden yaklaşık %4,3 oranında bir azalma yaşanmıştır. 2024 yılında ise, 2022 yılına göre yaklaşık %2,77 oranında bir düşüş olmasına rağmen, 2023 yılına kıyasla yaklaşık %1,55 oranında bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, sistem performansının yıllar içerisinde dalgalı bir seyir izlediğini ortaya koymaktadır.

Bu dalgalanmanın yalnızca meteorolojik faktörlerle açıklanamayacağı açıktır. Yıllık üretim değişimleri, sistemin bakım planlaması, inverter arızaları, panel temizlik sıklığı ve diğer operasyonel süreçlerden de önemli ölçüde etkilenmiş olabilmektedir. Bu nedenle, üretim performansının sürdürülebilir şekilde artırılması için operasyonel verimliliğin iyileştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

PVGIS simülasyon verilerine göre, panellerin optimum eğim açısıyla kurulmuş olması halinde sistemin yıllık gelirinde önemli artışlar sağlanabileceği görülmektedir. Simülasyon verileriyle yapılan karşılaştırmalarda, 2022 yılına göre yaklaşık 74.616 \$, 2023 yılına göre

102.812 \$ ve 2024 yılına göre 93.020 \$ daha fazla gelir elde edilebileceği hesaplanmıştır. Bu farklar, sistemin mevcut kurulum ve işletme koşullarının potansiyel performansın gerisinde kaldığını açıkça göstermektedir.

Oransal olarak değerlendirildiğinde, sistemin optimum eğim açısıyla ($\beta=opt.$) kurulması ve ideal koşullarda bakımının gerçekleştirilmiş olması durumunda; 2022 yılına göre yaklaşık %11,3, 2023 yılına göre %16,2 ve 2024 yılına göre %14,5 oranında daha fazla gelir elde edilebilirdi. Bu bulgular, sistem tasarımı ve işletmesinde eğim açısı optimizasyonunun yanı sıra bakım ve performans yönetimi süreçlerinin iyileştirilmesinin ekonomik getiriler açısından ne denli kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

Özellikle 2024 yılında gözlemlenen üretim ve gelir artışı olumlu bir gelişme olarak değerlendirilse de bu artış 2022 seviyesini yakalayamamıştır. Ayrıca simülasyonla öngörülen potansiyelin halen gerisinde kalınması, sistemde iyileştirmeye açık alanların bulunduğunu ve daha yüksek performans için optimizasyon çalışmalarının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

7. ÖNERİLER

Bu çalışmada, 2022, 2023 ve 2024 yıllarında bir güneş enerjisi santralinde elde edilen gerçek üretim verileri ile PVGIS simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, sistemin mevcut üretim performansının potansiyel performansın gerisinde kaldığını açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle simülasyon sonuçlarının, gerçek verilere kıyasla yıllık bazda %11–%16 daha yüksek gelir öngörmesi, sistemdeki iyileştirme gerekliliğini desteklemektedir.

Bu kapsamda aşağıdaki öneriler geliştirilebilir:

- **Panel Eğim Açılarının Aylık ve Mevsimsel Olarak Optimize Edilmesi:** Sabit sistemlerde panel eğim açılarının aylık ve mevsimsel bazda optimize edilmesi, yıllık bazda toplam güneşlenme süresinden daha etkin faydalanılmasına katkı sağlayabilir. Bu nedenle, aylık ve mevsimsel açı ayarlarının manuel ya da yarı otomatik mekanizmalarla gerçekleştirilmesine olanak sağlayan sistem tasarımlarının teşvik edilmesi önerilmektedir.
- **Yerel İklim Verilerine Dayalı Sistem Tasarımı:** Sistemin üretim performansının artırılması için, kurulum yapılacak bölgenin aylık ve mevsimsel güneşlenme süreleri, bulutluluk oranı ve sıcaklık profili gibi yerel iklimsel veriler dikkate alınarak sistem tasarımının yapılması büyük önem taşımaktadır.
- **Düzenli Bakım ve İşletme Stratejilerinin Geliştirilmesi ile Temizlik Programları:** Panel yüzeyinde oluşabilecek kirlenme, gölgelenme veya fiziksel hasarlar üretim kaybına yol açmaktadır. Periyodik bakım ve temizlik çalışmaları ile bu kayıplar minimize edilmelidir. Bu nedenle, sistem ömrü boyunca düzenli bakım programları oluşturulmalı ve olası arıza durumlarına karşı hızlı müdahale stratejileri geliştirilmelidir.
- **Performans İzleme Sistemleri:** Sistem performansının anlık ve geçmiş verilerle takip edilmesi, arıza tespiti ve optimizasyon süreçlerinin hızlandırılması açısından kritik öneme sahiptir.
- **Yıllık Performans Denetimleri:** Yıllık bazda sistem performansının, PVGIS veya benzeri simülasyon verileriyle karşılaştırılması, üretim hedeflerinin belirlenmesi ve performansın değerlendirilmesi açısından faydalı olacaktır.

KAYNAKÇA

- Abdelaal, A. K., & El-Fergany, A. (2023). "Estimation of optimal tilt angles for photovoltaic panels in Egypt with experimental verifications". Scientific Reports 2023 13:1, 13(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30375-8>
- Akar, A. (2016). Bir Güneş Enerji Santralinin Kurulumu ve Performansının Analizi. Yüksek Lisans Tezi. Elazığ: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Aksoy, M. H., İspir, M., & Yeşil, E. (2023). "Impact of Tilt Angle on The Performance of The Photovoltaic Systems for Different Row Spacing. Journal of Polytechnic," 26(4), 1573-1585. <https://doi.org/10.2339/POLITEKNIK.1260228>
- Alak, A. O. (2023). Tek ve Çift Eksenli Güneş Takip Sistemlerinin Standart Sistemle Karşılaştırılarak Verim Analizinin Yapılması. Yüksek Lisans Tezi. Kocaeli: Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Arslan, M. (2023). Fotovoltaik Sistemlerde Optimum Eğim ve Yönlendirme Açılarının Belirlenmesi. Doktora Tezi. Konya: Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Aydin, M. (2020). Türkiye Koşullarında Güneş Panelleri İçin Optimum Sabit ve Ayarlanabilir Eğim Açılarının Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi. Bursa: Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Aydoğdu, N. (2019). Güneş Enerjisi Takip Sistemi Tasarımı, İmalatı ve Verimlilik Karşılaştırması. Yüksek Lisans Tezi. Isparta: Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Bilgili, M. E., & Dağtekin, M. (2017). "Fotovoltaik Piller İle Elektrik Üretiminde Uygun Eğim Açısının ve Yıllık Oluşan Enerji Farkının Belirlenmesi." Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 6(Özel Sayı (BSM 2017)), 156-167. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gbad/issue/33361/350319>
- Bükün, N. (2017). Siirt Yöresi İçin Tek Eksenli Güneş Takip Sistemli Güneş Panellerinin Enerji Verimliliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Siirt: Siirt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çayır, G. (2022). Fotovoltaik Güneş Enerji Sistemlerinin Uygulama Alanları Verimliliği ve Maliyet Analizi. Yüksek Lisans Tezi. Adıyaman: Adıyaman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Çınaroğlu, H. (2023). Bağımsız bir fotovoltaik sistemin PVsyst yazılımı kullanılarak tasarımı ve simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Bilecik: Şeyh Edebali Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

- Dal, A. R. (2021). “Yat Limanlarındaki Güneş Enerji Santralleri Panel Eğim Açısı Değişiminin Elektrik Üretimi Açısından İncelenmesi.” Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9(4), 1113-1127.
- Demiröz, H. (2023). İki Eksenli Güneş Takip Sistemlerin Verimliliğinin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi. İzmir: Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Doğan, Y. (2019). Blog: Off-grid sistemler | SB Solar Enerji A.Ş. <https://sbsolar.com.tr/off-grid-sistemler>
- Eltas, İ. (2020). Tek Eksenli Güneş Takip Sistemi Veriminin Erzurum Koşullarında Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Ordu: Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Etcı, A., & Kocalmış Bilhan, A. (2021). “PVSyst ile Konya İlinde Sabit ve Çift Eksenli Güneş Takip Sisteminin Modellenmesi.” European Journal of Science and Technology Special Issue, 32, 142-147.
- ETKB, (2024). Güneş. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes> [Erişim tarihi: 23.09.2024]
- ETKB, (2025). Elektrik. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> [Erişim tarihi: 21.05.2025]
- GEPA, (2025). GEPA. <https://gepa.enerji.gov.tr/> [Erişim tarihi: 15.04.2025]
- Gezgin, Ç. D. (2023). Güneş Panellerinde, Güneş Takip Sistemlerinin ve Panel Kirliliğinin Panel Verimliliğine Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Edirne: Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Gökçe, İ. (2020). Fotovoltaik (PV) Hücreler Yardımıyla Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi ve Performansını Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Adana: Çukurova Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Güneş, C. (2021). Fotovoltaik Güneş Enerjisi Santrallerinin Tasarımı, Bakımı, Onarımı ve İşletilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Adıyaman: Adıyaman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Gür, S. (2023). Şebekeden Bağımsız Fotovoltaik Güneş Enerji Sistemlerinin Batarya Otonomu ve Sistemin Ekonomik Analizi. Yüksek Lisans Tezi. Konya: Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Irena. (2025). Irena Data. <https://www.irena.org/Data> [Erişim tarihi: 20.04.2025]
- Kalogirou, S. A. (2009). Solar Energy Engineering: Processes and Systems.

- Keskin, V., Khalejan, S. H. P. R., & Cıkla, R. (2021). "Investigation of the Shading Effect on the Performance of a grid-connected PV Plant in Samsun/Turkey." *Politeknik Dergisi*, 24(2), 553-563.
- Kudelas, D., Taušová, M., Tauš, P., Gabániová, L., & Koščo, J. (2019). "Investigation of Operating Parameters and Degradation of Photovoltaic Panels in a Photovoltaic Power Plant. *Energies*," 12(19). <https://doi.org/10.3390/EN12193631>
- Küçükaydın, B. (2023). Sabit Güneş Panelleri İçin Güneş Takip Sistemi Tasarım ve Prototip İmalatı. Yüksek Lisans Tezi. Samsun: Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Menak, R. (2018). Çift Eksenli Güneş Takip Sistemi Tasarımı ve Modellemesi. Yüksek Lisans Tezi. Siirt: Siirt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Nuhoğlu, S. (2017). Tek Eksen Güneş Takipli Fotovoltaik Sistem Tasarımı ve Konya için Örnek Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi. Konya: Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özlük, S. S. (2023). Diyarbakır İli İçin Güneş Panellerinin Optimum Eğim Açısının Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Elazığ: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Öztürk, H. (2021). Bir Güneş Enerji Santralının Üretim İle Simülasyon Değerlerinin Karşılaştırılması ve Kayıp Analizi: Beştepe Enerji Örneği. Yüksek Lisans Tezi. Gaziantep: Hasan Kalyoncu Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Öztürk, H. H. (2017). Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler. TMMOB EMO Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi.
- Sağlam, E. (2018). Fotovoltaik Santrallerin Kurulum Aşamaları ve İşletimdeki Santrallerin Gerçekleşen Üretim Değerlerinin Simulasyon Sonuçları ile Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi. Enerji Enstitüsü.
- Sharma, G. S., Mahela, O. P., Hussien, M. G., Khan, B., Padmanaban, S., Shafik, M. B., & Elbarbary, Z. M. S. (2022). "Performance Evaluation of a MW-Size Grid-Connected Solar Photovoltaic Plant Considering the Impact of Tilt Angle." *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 1444, 14(3), 1444. <https://doi.org/10.3390/SU14031444>

- Şafak, A. E. (2023). Fotovoltaik panellerin yönünün güç üretimine etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Denizli: Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Türk, S. (2022). Fotovoltaik Panellerde Sıcaklığın Etkisi ve Panel Sıcaklığının Düşürülmesi için Farklı Soğutma Yöntemlerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Edirne: Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yılmaz, M. (2013). Güneş Takip Sistemi ile Güneş Enerjisinden Elektrik Enerjisi Elde Etme Yöntemleri ve Optimum Verimin Belirlenmesi. Doktora Tezi. İstanbul: Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

