

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SABİT VE GÜNEŞ TAKİPLİ FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN
PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMALI ANALİZİ

ESRA AYDIN GÖRÜCÜ

KOCAELİ 2025

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SABİT VE GÜNEŞ TAKİPLİ FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN
PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMALI ANALİZİ

ESRA AYDIN GÖRÜCÜ

Prof. Dr. Şule ÖZDEMİR
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Dr. Öğr. Üyesi Serkan SEZEN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet UÇAR
Jüri Üyesi, Düzce Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 24.01.2025

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin 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 Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☒ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Esra AYDIN GÖRÜCÜ

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- ☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Esra AYDIN GÖRÜCÜ

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez, sabit ve güneş takipli fotovoltaik sistemler üzerine yapılan detaylı araştırmaları içermektedir. Çalışmada, ilgili literatür taranarak güncel gelişmeler değerlendirilmiş, teknik analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen bulgular ışığında özgün sonuçlar ortaya konmuştur. Çalışmanın, bu alandaki literatüre katkı sağlaması ve ilerleyen araştırmalara ışık tutması hedeflenmiştir.

Bu süreç, yalnızca akademik anlamda değil, aynı zamanda analitik düşünme, problem çözme ve disiplinli çalışma açısından da benim için önemli bir gelişim süreci olmuştur. Enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik alanlarına olan ilgim, bu çalışma sayesinde daha da pekişmiş ve gelecekte bu alandaki katkılarımı artırma yönünde bana büyük bir motivasyon sağlamıştır.

Bu noktada, tezin hazırlanmasında emeği geçen ve desteklerini esirgemeyen herkese içten teşekkürlerimi sunmak isterim. Öncelikle, sürecin her aşamasında değerli rehberliği ve kıymetli yönlendirmeleriyle bana ışık tutan danışman hocam Prof. Dr. Şule Özdemir'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Akademik bakış açımı geliştirmemde ve bu çalışmayı şekillendirmemde bana kazandırdığı perspektif, bu sürecin en değerli katkılarından biri olmuştur.

Ayrıca, güneş enerjisi konusundaki uzmanlığıyla çalışmalarına önemli katkılar sağlayan, her soruma sabırla yanıt veren Sayın Emre Akarsu'ya teşekkür ederim. Paylaştığı bilgi ve deneyimler, bu çalışmanın bilimsel derinliğini artırmada büyük rol oynamıştır.

Ve en büyük teşekkür, hayatımın her anında yanımda olan, sevgisi ve desteğiyle bana güç veren canım eşime... Yorulduğumda beni motive eden, en zor anlarımda yanımda olup sabrı ve sevgisiyle ilham kaynağım olan eşime sonsuz minnettarım. Bu süreçte yalnızca bir destekçi değil, aynı zamanda en büyük dayanağım oldun.

Elbette, en derin teşekkürlerimi aileme sunuyorum. Bugüne kadar beni koşulsuz sevgiyle destekleyen, hayallerimin peşinden gitmem için cesaretlendiren, her başarımında benimle birlikte sevinen canım ailem... Varlığınız, hayatımdaki en büyük şans ve en kıymetli motivasyon kaynağım oldu.

Bu tez, yalnızca akademik bir çalışmanın ürünü değil; sevgi, sabır ve emeğin birleşimiyle ortaya çıkmış bir başarıdır. Emeği geçen herkese en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ocak-2025

Esra AYDIN GÖRÜCÜ

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GÜNEŞ ENERJİSİ	9
2.1. Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli.....	10
2.2. Türkiye'de Güneş Enerjisi Kullanımı	11
3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER VE ÖZELLİKLERİ	14
3.1. Fotovoltaik Sistemlerin Tanımı ve Tarihsel Gelişimi	14
3.2. Fotovoltaik Hücrelerin Yapısı	15
3.2.1. Kristal Silisyum Fotovoltaik Hücreler.....	16
3.2.2. İnce Film Fotovoltaik Hücreler	18
3.3. Fotovoltaik Sistem Bileşenleri	19
3.3.1. Alüminyum Çerçevesiz ve Camlı Paneller	20
3.3.2. Çerçevesiz Paneller	20
3.3.3. Metal Tabanlı Paneller.....	21
3.4. Bataryalar.....	21
3.5. Eviriciler	22
3.6. Şarj Kontrol Cihazı.....	23
3.7. Bağlantı Şekillerine Göre Fotovoltaik Sistemler	24
3.7.1. Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Sistemler	24
3.7.2. Şebekeden Bağımsız Fotovoltaik Sistemler	24
3.8. Güneş Takip Sistemleri	26
3.8.1. Tek Eksenli Güneş Takip Sistemleri	26
3.8.2. Çift Eksenli Güneş Takip Sistemleri	27
3.9. Fotovoltaik Sistemlerin Tasarımları ve Simülasyonu İçin Kullanılan Analiz Programları	28
3.9.1. PVSYSYST	28
3.9.2. PvSOL	29
3.9.3. HELIOS 3D Solarparkplanung.....	29
3.9.4. EasySolar	29
3.9.5. PVscout 2.0 Premium	29
3.9.6. Polysun	30
3.9.7. Solarpro	30
3.9.8. PLAN4SOLAR PV	30
3.9.9. Solaryus-PV FreeUPP S	30
3.9.10. PV F-CHART	30
3.9.11. HOMER.....	30
3.9.12. PV-DESİGN-PRO	31
3.9.13. PV Designer Solmetric	31

3.9.14. Archelios PRO	31
3.9.15. HELIOSCOPE	31
3.9.16. Solergo Electro	31
3.9.17. BlueSol	31
3.9.18. Skelion	32
3.9.19. Simscape™ Power Systems™	32
3.9.20. Management Software Platform	32
3.9.21. Energy Storage Toolbox	33
3.9.22. SIMES	33
3.9.23. EnergyPlus Simulation Software	33
4. SABİT VE GÜNEŞ TAKİPLİ FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN SİMÜLASYONU	35
4.1. Sabit ve Güneş takipli Sistem Tasarımı	35
4.1.1. Coğrafi Konum ve Meteorolojik Verilerin Belirlenmesi	35
4.1.2. Fotovoltaik Panel Seçimi ve Standartları	40
4.1.3. Evirici Seçimi ve Standartları	42
4.1.4. Fotovoltaik Sistem ve MGNİ Algoritmaları	46
4.1.5. Fotovoltaik Panelin Eğim Açısı ve Azimut Açısının Belirlenmesi	49
4.1.6. PVsyst Programı Kullanılarak Sistem Modellemesi	50
5. SABİT VE GÜNEŞ TAKİPLİ FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMALI ANALİZİ	67
5.1. İl Karşılaştırması	67
5.2. Sabit ve Güneş Takipli Sistemlerin Karşılaştırılması	73
6. SONUÇLAR	87
KAYNAKLAR	89
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	94
ÖZGEÇMİŞ	95

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Avrupa güneş enerjisi potansiyel atlası	10
Şekil 2.2.	Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası.....	11
Şekil 2.3.	Dünya’da ısıtma amaçlı kollektör kullanımı, 2019	12
Şekil 2.4.	2023 yılı kurulu gücün birincil enerji kaynaklara göre dağılımı	12
Şekil 2.5.	2023 yılı türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı	13
Şekil 3.1.	Fotovoltaik hücre yapısı katmanları	16
Şekil 3.2.	Kristal silisyum FV hücre üretim aşamaları	17
Şekil 3.3.	Fotovoltaik hücre çeşitleri	18
Şekil 3.4.	Fotovoltaik sistem bileşenleri	19
Şekil 3.5.	Fotovoltaik hücre, panel ve diziler	20
Şekil 3.6.	Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem.....	24
Şekil 3.7.	Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistem.....	25
şekil 3.8.	Güneşin mevsimlere göre değişen yörüngeleri.....	27
Şekil 3.9.	Tek eksenli güneş takip sistemi yerleşim şeması.	27
Şekil 3.10.	Çift eksenli güneş takip sistemi yerleşim şeması.	28
Şekil 4.1.	Türkiye güneş potansiyeli haritası.	35
Şekil 4.2.	Türkiye global radyasyon değerleri.	36
Şekil 4.3.	Denizli ili haritası	36
Şekil 4.4.	Çameli güneş enerji potansiyeli atlası	37
Şekil 4.5.	Çameli ilçesi global radyasyon değerleri.....	37
Şekil 4.6.	Van ili haritası.....	38
Şekil 4.7.	Özalp güneş enerji potansiyeli atlası	39
Şekil 4.8.	Özalp ilçesi global radyasyon değerleri.....	39
Şekil 4.9.	Panelin akım-gerilim ve güç-gerilim grafiği	41
Şekil 4.10.	Evirici verim grafiği	44
Şekil 4.11.	Evirici devre blok şeması.....	45
Şekil 4.12.	Fotovoltaik panel karakteristiği	47
Şekil 4.13.	Maksimum güç noktasının güç, gerilim veya akım eksenlerine iz düşümleri	47
Şekil 4.14.	MGNİ blok diyagramı	48
Şekil 4.15.	PVsyst programı giriş arayüzü	52
Şekil 4.16.	PVsyst programı tasarım arayüzü	52
Şekil 4.17.	Kurulum yapılacak bölge seçimi	53
Şekil 4.18.	PVsyst programı meteonorm verileri.....	53
Şekil 4.19.	Sabit sistem eğim açısı ve azimut açısı belirleme	54
Şekil 4.20.	Güneş takipli sistem eğim açısı ve azimut açısı belirleme	55
Şekil 4.21.	Fotovoltaik panel ve evirici seçimi.....	58
Şekil 4.22.	Fotovoltaik panel termal kayıpların hesaplanması	60
Şekil 4.23.	Fotovoltaik panel omik kayıplarının hesaplanması	61
Şekil 4.24.	Fotovoltaik panel geliş açısı değiştiricisi (Incidence Angle Modifier-IAM) grafiğ	62
Şekil 4.25.	Modül kalitesi ve uyumsuzluk kayıpları	63
Şekil 4.26.	Fotovoltaik modül yaşlanma kayıpları	65
Şekil 4.27.	Fotovoltaik sistem kurulumu özet bölümü	66
Şekil 5.1.	Denizli ili Çameli ilçesi proje özeti	67

Şekil 5.2.	Van ili Özalp ilçesi proje özeti	67
Şekil 5.3.	Sabit sistem proje özeti	68
Şekil 5.4.	Güneş takipli sistem proje özeti.....	68
Şekil 5.5.	Güneş enerjisi kollektör alanının özellikleri	68
Şekil 5.6.	Denizli ili Çameli ilçesi gölgelenme analizi (Sabit Sistem)	69
Şekil 5.7.	Van ili Özalp ilçesi gölgelenme analizi (Sabit Sistem)	69
Şekil 5.8.	Denizli ili Çameli ilçesi gölgelenme analizi (Güneş Takipli Sistem)	71
Şekil 5.9.	Van ili Özalp ilçesi gölgelenme analizi (Güneş Takipli Sistem).....	72
Şekil 5.10.	Denizli ili Çameli ilçesi kWp başına kollektör kaybı, sistem kaybı, üretilen faydalı enerji ve performans oranı (Sabit Sistem)	74
Şekil 5.11.	Van ili Özalp ilçesi kWp başına kollektör kaybı, sistem kaybı, üretilen faydalı enerji ve performans oranı (Sabit Sistem).....	75
Şekil 5.12.	Denizli ili Çameli ilçesi kWp başına kollektör kaybı, sistem kaybı, üretilen faydalı enerji ve performans oranı (Güneş Takipli Sistem)	75
Şekil 5. 13.	Van ili Özalp ilçesi kWp başına kollektör kaybı, sistem kaybı, üretilen faydalı enerji ve performans oranı (Güneş Takipli Sistem)	76

TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. Evirici tiplerinin verimlilikleri ve piyasa dağılımları	23
Tablo 3.2. Simülasyon programlarının kullanım amaçlarına göre sınıflandırılması	34
Tablo 4.1. Panelin katalog bilgisi	40
Tablo 4.2. Panelin teknik özellikleri	41
Tablo 4.3. Evirici katalog bilgisi.....	43
Tablo 4.4. Eviricinin teknik özellikleri	45
Tablo 4.5. Evirici güç ve gerilim değerleri	49
Tablo 5.1. Yatırım miktarları	73
Tablo 5.2. Denizli ili Çameli ilçesi sabit sistem performans analizi.....	77
Tablo 5.3. Van ili Özalp ilçesi sabit sistem performans analizi.....	79
Tablo 5.4. Denizli ili Çameli ilçesi güneş takipli sistem performans analizi.....	80
Tablo 5.5. Özalp ili Çameli ilçesi güneş takipli sistem performans analizi.....	82
Tablo 5.6. Sabit fotovoltaik sistemlerin performans karşılaştırması	83
Tablo 5.7. Güneş takipli fotovoltaik sistemlerin performans karşılaştırması	84
Tablo 5.8. Sabit ve güneş takipli fotovoltaik sistemlerin amortisman süresi karşılaştırması	85

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

%	: Yüzde
~	: Yaklaşık
°	: Derece
°C	: Santigrat Derece
3D	: Üç Boyutlu
GWh	: Gigawatt Saat
I	: Akım
I _{sc}	: Kısa Devre Akımı
kW	: Kilowatt
kW _{ac}	: Alternatif Akımda Kilowatt
kWh	: Kilowatt Saat
kW _p	: Kilowatt Peak
m	: Metre
m ²	: Metre Kare
MW	: Mega Watt
MWh	: Megawatt Saat
P	: Güç
P _{nom}	: Nominal Güç
V	: Volt-Gerilim
V _{mp}	: Maksimum Güç Gerilimi
V _{oc}	: Açık Devre Gerilimi
W	: Watt
W _p	: Watt Peak

Kısaltmalar

AA	: Alternatif Akım
AG	: Alçak Gerilim
a-Si	: Amorf Silikon
CAD	: Computer Aided Design / Bilgisayar Destekli Tasarım
CdTe	: Kadmiyum Tellür
CE	: Conformité Européenne / Avrupa'ya Uyum
CO ₂	: Karbondioksit
CuInSe ₂	: Bakır İridyum Diselenid
DA	: Doğru Akım
DIN	: Deutsches Institut für Normung / Alman Standartlar Enstitüsü
FV	: Fotovoltaik
GEPA	: Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası
GPS	: Global Positioning System
IEA	: International Energy Agency / Uluslararası Enerji Ajansı
IEC	: International Electrotechnical Commission / Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
IoT	: Internet of Things / Nesnelerin İnterneti
iOS	: iPhone Operating System
LCOE	: Levelized Cost of Electricity / Seviyelendirilmiş Elektrik Maliyeti
Li-on	: Lityum İyon

MGNİ	: Maksimum Güç Noktası İzleyicisi
MPP	: Maksimum Güç Noktası (MGN)
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
PET	: Polietilen tereftalat
PM	: Partikül Madde
PR	: Performans Oranı
PWM	: Pulse-Width Modulation / Darbe Genişlik Modülasyonu
STC	: Standart Test Koşulları
vb.	: Ve benzeri
YEGM	: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü



SABİT VE GÜNEŞ TAKİPLİ FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMALI ANALİZİ

ÖZET

Son yıllarda sanayileşme, teknolojinin hızlı gelişimi ve artan nüfusun etkisiyle enerjiye olan talep hızla artmaktadır. Günümüzde bu talep, büyük ölçüde fosil yakıtlarla karşılanmakta olup, bu kaynakların azalması ve çevresel etkilerinden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim kaçınılmaz hale gelmiştir. Güneş enerjisi, tükenmeyen, bol ve çevre dostu bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak ön plana çıkmaktadır. Bu nedenle, güneş enerjisinin elektrik üretimi ve diğer uygulamalardaki rolü giderek daha önemli hale gelmiştir.

Bu çalışmada, Denizli'nin Çameli ilçesi ile Van'ın Özalp ilçesinde, hem sabit hem de güneş takipli fotovoltaik sistemlerin tasarımları yapılmış ve performansları karşılaştırılmıştır. Sistem tasarımları için PVSyst yazılımı kullanılmıştır. Çalışma sonuçları, güneş takipli sistemlerin sabit sistemlere kıyasla belirli koşullarda daha yüksek enerji verimliliği sağladığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, coğrafi konum, güneşlenme süresi ve sistem maliyetleri gibi faktörler dikkate alınarak, tasarımcıların uygun sistem tercihi yapmaları hedeflenmiştir. Bu çalışma, fotovoltaik sistem tasarımında doğru kararların alınmasına rehberlik etmeyi amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Güneş Takipli Fotovoltaik Sistem, PVSyst, Sabit Fotovoltaik Sistem.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF FIXED AND SOLAR TRACKING PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

ABSTRACT

In recent years, the demand for energy has rapidly increased due to industrialization, technological advancements, and growing population. Currently, this demand is largely met by fossil fuels, but their depletion and environmental impacts have made the shift toward renewable energy sources inevitable. Solar energy stands out as an inexhaustible, abundant, and environmentally friendly renewable energy source, making it increasingly significant in electricity production and other applications.

This study involves the design and performance comparison of fixed and solar-tracking photovoltaic systems in Denizli's Çameli district and Van's Özalp district. The PVSyst software was utilized for system design. The findings reveal that solar-tracking systems provide higher energy efficiency than fixed systems under certain conditions. However, factors such as geographic location, sunlight duration, and system costs are critical in determining the appropriate system. This study aims to guide designers in making informed decisions to maximize the performance of photovoltaic systems.

Keywords: Solar-Tracking Photovoltaic System, PVSyst, Fixed Photovoltaic System.

1. GİRİŞ

Enerji, hem insanların günlük yaşamını sürdürebilmesi hem de ülkelerin ekonomik ve teknolojik olarak gelişebilmesi için vazgeçilmez bir unsurdur. Gelişen teknoloji ve artan nüfus, enerjiye olan talebin her geçen gün artmasına neden olmaktadır. Enerji kaynaklarının kullanımı, ülkelerin kalkınma politikalarında kritik bir yere sahiptir. Bu bağlamda, devletler vatandaşlarına en ucuz, en temiz, güvenilir ve kesintisiz enerji sağlama hedefi doğrultusunda enerji politikalarını sürekli olarak gözden geçirmekte ve güncellemektedir.

Enerji üretiminde, kullanım amacına göre çeşitli yöntemler uygulanmakla birlikte, her sistem bir enerji kaynağına ihtiyaç duyar. Bu kaynaklar genel olarak geleneksel ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Geleneksel enerji kaynakları arasında petrol, doğalgaz, kömür gibi fosil yakıtlar ve nükleer enerji yer alır. Fosil yakıtlar, doğada uzun yıllar süren bir süreç sonucunda oluşmuş, yüksek karbon içeriğine sahip maddelerdir. Bu kaynakların yanması sırasında atmosfere yayılan karbon dioksit (CO₂), küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi çevresel sorunların başlıca nedenleri arasında yer almaktadır. Ayrıca, fosil yakıtların sınırlı rezervlere sahip olması, yakın gelecekte tükenme riskini beraberinde getirmektedir.

Diğer yandan, yenilenebilir enerji kaynakları, çevre dostu olmaları ve sürdürülebilirlikleri sayesinde geleneksel enerji kaynaklarına önemli bir alternatif sunmaktadır. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle, jeotermal ve dalga enerjisi gibi kaynaklar, doğanın kendini yenileme kapasitesi sayesinde tükenme riski taşımamaktadır. Bu kaynaklar, aynı zamanda enerji çeşitliliğini artırarak, birincil kaynaklara olan bağımlılığı azaltma potansiyeline sahiptir. Özellikle son yıllarda yenilenebilir enerji teknolojilerinde yaşanan gelişmeler, bu kaynakların daha geniş bir ölçekte kullanımını mümkün kılmıştır.

Tarihi gelişimine bakıldığında, yenilenebilir enerji teknolojileri üç nesil olarak incelenebilir. İlk nesil teknolojiler, hidroelektrik, biyokütle ve ısıtma amaçlı jeotermal enerji gibi geleneksel yöntemleri içerirken, ikinci nesil teknolojiler güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi ve fotovoltaik hücreler gibi daha modern çözümleri kapsamaktadır. Üçüncü nesil ise halen geliştirilmekte olan yoğunlaştırılmış güneş enerjisi, okyanus enerjisi ve gelişmiş

jeotermal sistemleri içermektedir. Gelişen bu teknolojiler, enerji üretiminde sürdürülebilirliği artırarak, fosil yakıtlara olan talebin azalmasında kilit rol oynamaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları, hem çevresel hem de ekonomik açıdan büyük avantajlar sunmaktadır. Bu durum, ülkelerin yenilenebilir enerjiye yönelik yatırımlarını hızlandırmalarını ve bu kaynakların kullanımını artırmalarını teşvik etmektedir. Artan enerji ihtiyacı karşısında yenilenebilir enerji kaynaklarının sağladığı çözümler, geleceğin enerji politikalarının merkezinde yer alacaktır.

1973 yılında yaşanan petrol krizi, enerji güvenliği ve sürekliliği konularında küresel kaygıların artmasına neden olmuş ve bu durum, alternatif enerji kaynaklarına yönelik araştırma ve yatırımların hızlanmasını sağlamıştır. Bu bağlamda, fotovoltaik (FV) sistemler, son dönemlerde teknolojik anlamda en büyük ilerlemeyi gösteren ve stratejik açıdan önemi artan enerji üretim yöntemlerinden biri olarak öne çıkmıştır. Fotovoltaik cihazlar, güneş ışınımını kullanarak elektrik enerjisi üreten sistemlerdir. Bu enerji dönüşümü, yarı iletken malzemelerden oluşan ve ışık enerjisini soğurarak elektrik akımı üretebilen aygıtlar (fotovoltaik hücreler) ile gerçekleştirilmektedir.

Fotovoltaik olay, ilk olarak 1839 yılında Edmont Becquerel tarafından gözlemlenmiştir. Becquerel, bir elektrot üzerine ışık düştüğünde elektrotlar arasında bir potansiyel fark oluştuğunu keşfetmiştir. Ancak, modern anlamda ilk fotovoltaik hücre, 1954 yılında Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Bell Laboratuvarları'nda %6'lık verimle geliştirilmiştir. Bu teknolojinin ilk uygulamaları, uzay araçları için enerji teminine yönelik olmuş, ancak 1970'li yıllarda yaşanan enerji krizi, fotovoltaik sistemlerin ticari kullanımının yaygınlaşmasına olanak sağlamıştır.

Fotovoltaik teknolojiler dışında, yenilenebilir enerji alanında önemli diğer çalışmalar da gerçekleşmiştir. Rüzgâr enerjisi, modern rüzgâr türbinlerinin geliştirilmesi ile birlikte elektrik üretiminde önemli bir paya sahip olmuş, dünyanın çeşitli bölgelerinde büyük çapta rüzgâr tarlaları kurulmuştur. Benzer şekilde, hidroelektrik enerji, nehir ve barajlardan elde edilen sürekli enerji akışı ile dünyanın en eski ve en yaygın kullanılan yenilenebilir enerji kaynağı olma özelliğini korumaktadır.

Bunun yanı sıra, Japonya’da Kyoto Protokolü kapsamında geliştirilen enerji etkinlik projeleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırmayı ve sera gazı emisyonlarını azaltmayı hedeflemiştir. Güneş enerjisi ile çalışan tırmanıcı robotlardan, elektrikli aracın şarj için Güneş enerjisini kullandığı sistemlere kadar farklı uygulama alanlarında bu teknolojiler aktif olarak denenmektedir.

Son yıllarda, yenilenebilir enerji kapasitesi hızlı bir artış göstermektedir. IEA’nın 2024 raporuna göre, küresel yenilenebilir enerji kapasitesi 2020 yılında yaklaşık 2.800 GW iken, bu kapasitenin 2024 yılı itibarıyla 4.500 GW’a ulaşması beklenmektedir. Bu artışın büyük bir kısmı fotovoltaik sistemler ve rüzgâr enerjisi projelerinden kaynaklanmaktadır.

Özellikle, güneş enerjisi kapasitesinin yıllık büyüme oranının %20 seviyelerine ulaşması, bu teknolojinin enerji dönüşümündeki kritik rolünü vurgulamaktadır. Rapor, 2030 yılına kadar dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam enerji üretimindeki payının %50’ye yaklaşacağını öngörmektedir. Bu durum, enerji sektörünün karbon net sıfır hedeflerine ulaşmasında büyük bir adım olarak değerlendirilmektedir (URL-1).

Sonuç olarak, fotovoltaik sistemler başta olmak üzere yenilenebilir enerji kaynakları, gelecekte enerji talebini karşılamada önemli bir rol oynayacaktır. Teknolojideki ilerlemeler ve yenilikçi uygulamalar sayesinde bu kaynakların daha yaygın ve ekonomik hale gelmesi beklenmektedir.

Güneş enerjisini kullanılabilir hale getirmek için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler arasında en yaygın olanı, fotovoltaik hücre teknolojisidir. Fotovoltaik sistemler, Güneş ışınlarından elde edilen enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme prensibiyle çalışır. Çevre dostu olmaları ve enerji kaynağının sınırsız erişilebilirliği, bu teknolojiyi uzun vadede avantajlı kılmaktadır. Ancak, düşük verimlilik oranları ve yüksek yatırım ile işletme maliyetleri, bu sistemlerin en belirgin dezavantajları arasında yer almaktadır.

Geliştirilen simülasyon yazılımları, gerçeğe yakın sistem tasarımları oluşturmayı, detaylı analizler yapmayı ve maliyet hesaplamalarını gerçekleştirmeyi mümkün kılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, Denizli ili Çameli ilçesi ve Van ili Özalp ilçesinde sabit ve güneş takipli fotovoltaik sistemlerin tasarımı ve karşılaştırmalı performans analizi yapılmıştır.

Çalışma kapsamında, her iki bölgede iklimsel ve coğrafi faktörler göz önünde bulundurularak sistemlerin enerji üretim kapasiteleri değerlendirilmiş, sabit sistemler ile güneş takipli sistemlerin verimlilik farkları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Güneş takipli sistemlerin, enerji üretiminde sağladığı avantajlar ile sabit sistemlerin düşük maliyet ve basit tasarım gibi avantajları karşılaştırılarak her iki seçeneğin avantajları ve dezavantajları tartışılmıştır.

Bu çalışmada, sistem tasarımlarının gerçekleştirilmesi için PVsyst yazılım programı kullanılmıştır.

Bu çalışma, bölgesel özelliklere uygun fotovoltaik sistem tasarımı yaparken, enerji üretiminde maksimum verimliliği sağlamak için dikkate alınması gereken kriterleri ortaya koymayı amaçlamaktadır. Çalışmanın sonuçları, benzer coğrafi ve iklim koşullarına sahip diğer bölgelerde uygulanabilir model sistemlerin geliştirilmesi açısından da yol gösterici olmayı hedeflemektedir.

Bu tez çalışmasında PVsyst simülasyon programı kullanılarak hem sabit hem de güneş takipli iki farklı sistem tasarlanmış ve güneşlenme potansiyelleri benzerlik gösteren iki farklı bölgede yer alan alanlarda yükseltinin ve çevresel koşulların etkilerini incelemek amacıyla iki farklı bölgede hem sabit hem de güneş takipli sistem kurulumu tasarlanmıştır.

Bu bölümde, PVsyst simülasyon programı ve benzer simülasyon programları kullanılarak yapılan sistem tasarımları, sabit ve güneş takipli fotovoltaik sistemlerin karşılaştırma çalışmaları ve performans değerlendirmelerini kapsayan literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu çalışmada tasarlanan fotovoltaik sistem yapısına benzer dünya genelinde tasarlanmış olan çalışmalar incelenmektedir.

(Ponce-Jara ve diğ., 2015), yaptığı çalışmada, Ekvador'un kıyı bölgesindeki Manta şehrinde sabit fotovoltaik (FV) sistemler ile çift eksenli güneş takip sistemleri karşılaştırmıştır. Güneş enerjisi sistemlerinin, özellikle kristal silikon bazlı fotovoltaik (FV) panellerin, günümüzde %26.1'e ulaşan yüksek verimlilik seviyelerine sahip olduğu belirtilmiştir. Ancak enerji üretimini artırmak için sabit sistemler yerine güneşi takip eden dinamik sistemlerin kullanılması önerilmektedir. Araştırmada, çift eksenli takip

sistemlerinin enerji üretimindeki potansiyel artışı belirlemek için IoT (Nesnelerin İnterneti) tabanlı bir izleme altyapısı geliştirilmiştir. Ulaşılan bulgular, çift eksenli güneş takip sisteminin, sabit FV sistemine kıyasla ortalama %19.62 daha fazla enerji ürettiğini göstermiştir. Ayrıca, bu sonuçlar, benzer ekvatorial bölgelerde tek eksenli güneş takip sistemi kullanılarak yapılan önceki çalışmalara kıyasla %8.62 daha yüksek bir enerji artışı sağlamıştır. Çalışma, güneş takip sistemlerinin özellikle yüksek güneş radyasyonu alan bölgelerde enerji üretimini optimize etmek için etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

(Moradi ve diğ., 2017), yaptıkları çalışmada, güneş enerjisi sistemlerinin geleceğin temiz enerji ihtiyaçlarını karşılamada nasıl bir çözüm sunduğunu ve özellikle Amerika Birleşik Devletleri'nde fotovoltaik teknolojilerinin gelişimini açıklamaktadır. Verimli fotovoltaik sistemler ile yeryüzünün küçük bir kısmını kaplayarak dünya enerji ihtiyacının iki katı kadar enerji sağlayabileceği vurgulanmaktadır.

Güneş takip sistemlerinin güneş enerjisinden daha fazla fayda sağlamada önemli bir rol oynadığı belirtilmektedir. Bu sistemler, yüzeyleri güneşi takip edecek şekilde hareket ettirerek enerji verimini artırır. Tek eksenli ve çift eksenli gibi farklı tiplerde izleme sistemleri, pasif veya aktif kontrol mekanizmaları ile çalışabilir. Elektronik kontrollü izleme sistemlerinin, güneşin konumunu astronomik verilerle veya sensörlerle algılayarak daha hassas hareket sağladığı ifade edilmektedir. Güneş takip sistemleri, panel boyutunu ve kWh başına maliyeti azaltarak FV sistemlerin verimliliğini artırmaktadır.

(Baouche ve diğ., 2022), yaptıkları çalışmada, güneş paneli sistemlerinde, güneşin gün boyunca değişen konumu nedeniyle ortaya çıkan yönlendirme problemini ele almaktadır. Panellerin maksimum güneş ışınlamını yakalayabilmesi için pozisyonlarının güneşi takip edecek şekilde ayarlanması gerektiği belirtilmiştir. Çalışma, belirli bir konumda (36.261° enlemi) tek eksenli bir güneş takip sisteminin tasarımı ve simülasyonunu göstermektedir. Bu tasarımda, düşük maliyetli ve düşük hassasiyetli ancak yüksek kullanılabilirliğe sahip bir güneş takip mekanizması uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, bu tür bir sistemin sabit bir panele kıyasla enerji verimliliğini artırdığını ve ticari sistemlere göre daha ekonomik bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Özellikle 36° civarındaki enlemler için bu sistemin

uygunluğu vurgulanmıştır. Çalışma, mühendislik araştırmacıları ve öğrenciler için güneş takip sistemi tasarım teorisini öğrenmek adına iyi bir temel sunmaktadır.

(Shukla ve diğ., 2016), yaptıkları çalışmada, belirli bir konumda güneş enerjisiyle çalışan fotovoltaiik (PV) bir sistemin fizibilitesini değerlendirmek için yapılan bir çalışmayı özetlemektedir. Çalışma, Hindistan'da Bhopal'daki bir yurt binasının çatısına 110 kWp'lik şebekeye bağlı bir güneş enerjisi sisteminin uygulanabilirliğini incelemiştir. Araştırma kapsamında Solargis FV Planner yazılımı kullanılmış ve bu araç sayesinde sistemin performansı analiz edilmiştir. Ayrıca, farklı FV teknolojilerinin enerji üretimi ve performans oranlarına göre karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, Solargis yazılımının güneş enerjisi sistemleri simülasyonu için hızlı, doğru ve güvenilir bir araç olduğu belirtilmiştir.

(Jang ve Lee, 2020), yaptıkları çalışmada, bifacial (çift yüzeyle) fotovoltaiik (FV) modüllerin performansını etkileyen faktörleri inceleyen bir çalışmayı özetlemektedir. Çift yüzeyle modüller, arka yüzeyle gelen ışınımı da kullanarak tek yüzeyle FV modüllere göre daha fazla enerji üretebilir. Ancak bu performans, arka yüzeyle ulaşan ışınım ve kurulum koşullarına bağlıdır. Araştırmada, üç test düzeneği kullanılarak yansıtıcı malzeme boyutunun artırılması, modüllerin dikey kurulumu, sıcaklık farkları ve partikül madde (PM) yoğunluğu gibi faktörler incelenmiştir. Sonuçlar, yansıtıcı malzeme boyutunun iki katına çıkarılmasıyla spesifik enerji veriminin %1.6 arttığını göstermiştir. Modüllerin dikey montajında gölge etkisi nedeniyle kısa devre akımına kıyasla maksimum akımın %14.3 daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, sıralı dizilimde modüllerin yüzeyle sıcaklık farkının pozisyona bağlı olarak maksimum 2.19 °C olduğu belirlenmiştir. Temiz hava koşullarında PM 10 konsantrasyonu 100 µg/m³ arttığında bifacial kazanç %4 artarken, bulutlu koşullarda aynı değişim bifacial kazancı %0.9 azaltmıştır. Bu çalışma, çift yüzeyle FV modüllerin kurulum tasarımına ve çevresel koşullara duyarlılığını vurgulamaktadır.

(Kljajić ve diğ., 2022), yaptıkları çalışmada, sabit bir FV sistemi ile iki eksenli güneş takipli FV sistemi arasındaki farkları karşılaştırmaktadır. İki eksenli takip sistemi, daha pahalı olmasına rağmen, özellikle sistem kurulumunda gereken alanın daha verimli kullanılmasını sağlar ve bu sayede daha yüksek enerji üretimi elde edilir. Makale, 6,4 kW gücünde küçük bir sistem örneği üzerinden sabit ve iki eksenli sistemleri, üretilen enerji,

gelir ve geri ödeme süresi açısından karşılaştırmaktadır. Bu karşılaştırma, iki eksenli takip sisteminin çevresel faydalarını ve alan verimliliğini vurgulamaktadır.

(Pujol, 2019), yaptığı çalışmada, Cabrera de Mar'da bulunan 10 MW gücünde, şebekeye bağlı iki farklı güneş paneli teknolojisini (monokristalin ve polikristalin güneş hücreleri) tasarlamak ve karşılaştırmalı bir analiz yapmaktadır. Karşılaştırma, enerji üretimi, gelir ve geri ödeme süresi açısından yapılan LCOE (Levelized Cost of Energy) ve yatırım geri dönüşü analizleriyle gerçekleştirilmiştir. Tez üç ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm, fotovoltaik uygulamaların mevcut durumunu, güneş enerjisinin elektriğe dönüşümünü ve farklı güneş hücresi teknolojilerini tanıtmaktadır. İkinci bölüm, Avrupa ve İspanya'daki yasal gereklilikleri ve İspanyol elektrik piyasasını açıklamaktadır. Üçüncü bölümde ise farklı sistemlerin boyutlandırılması, seçilen lokasyonun coğrafi ve meteorolojik verileri, bileşen seçimi ve simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon, PVsyst yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar, polikristalin FV sisteminin daha maliyet etkin olduğunu ve yatırımların daha kısa sürede geri ödendiğini göstermektedir.

(Patel ve diğ., 2020), yaptıkları bu çalışmada, bifacial (çift yüzeyli) güneş panelleri ve tek eksenli takip sistemlerinin enerji verimliliği üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Önceki çalışmalar, bağımsız bifacial FV modüllerinin tek eksenli takip sistemi ile %12 civarında enerji artışı sağladığını göstermiştir, ancak bifacial güneş enerji santralleri için bu artış oranı henüz belirlenmemiştir. Çalışmada, tek eksenli takip sistemine sahip bifacial FV çiftliklerinin modellemesi ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Özellikle, FV panellerinin sıralar arasındaki gölgeleme etkisi dikkate alınmıştır. Sonuçlar, tek eksenli takipli bifacial FV santrallerinin, sabit mono veya bifacial sistemlere göre daha yüksek doğrudan ışık oranına sahip bölgelerde ve zaman dilimlerinde daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Dünya çapında yapılan haritalar, yıllık enerji kazancının 40° enlemden itibaren %10-20 arasında değiştiğini göstermektedir. Bu bulgular, tek eksenli takipli bifacial FV santrallerinin enerji verimini maksimize etme ve LCOE (Levelized Cost of Energy)'yi minimize etme açısından büyük bir potansiyele sahip olduğunu vurgulamaktadır.

(Aksangör, 2019), yaptığı çalışmada, Ankara ilindeki bir üniversite kampüsündeki binaların elektrik ihtiyacının fotovoltaik bir sistemle karşılanması durumu modellemiştir. Çalışma, PVsyst V6.7.8 simülasyon programı kullanılarak yapılmış ve sanal ortamda,

kurulan fotovoltaik sistemin üretilbileceği enerji miktarı ile sistem performansı ölçülmüştür. Sistem performans oranı %84,1 olarak belirlenmiştir. Çalışmasında, fotovoltaik sistem tasarımı yaparken coğrafi konum, güneşlenme verileri, kullanılan panel ve evirici bileşenlerinin özelliklerinin dikkate alınması gerektiğine vurgu yapılmış ve simülasyon programlarının gelişimiyle sistem modellemenin kolaylaştığı gösterilmiştir.

(Akcan ve diğ., 2020), yaptıkları çalışmada, 2020 yılında yaptıkları araştırmada, PVsyst simülasyonunu kullanarak Batmanda güneş enerjisinin elektrik üretimi potansiyelini hidroelektrik enerjiye alternatif olarak incelemişlerdir. Bu çalışma kapsamında, Batman ilindeki bir okulun çatısına kurulması planlanan fotovoltaik santralin konumu PVsyst programında belirlenmiş ve şehrin iklim verileri, simülasyon aracıyla Meteonorm 7.2 veri tabanından yapay ortamda üretilmiştir. Sentetik meteorolojik veriler ile YEGM'den elde edilen gerçek veriler arasında önemli bir fark bulunmamıştır. Ayrıca, sistemin beklenenden daha fazla enerji üretmesi sonucu yıllık 35,31 MWh enerji elde edilmiş ve bu enerjinin bölge şebekesine satılması durumunda okul için ek gelir sağlanabileceği tespit edilmiştir. Araştırma, Batman için fotovoltaik sistemin hidroelektrik enerjisine kıyasla daha uygun bir seçenek olduğunu göstermiştir.

(Nann, 1998), yaptığı çalışmada, güneş takip sistemlerinin performansını analiz etmek amacıyla 40° sabit açıyla çalışan bir sistemin maliyet ve ısıma verilerini incelemiştir. Sonuçlarına göre, çift eksenli ve tek eksenli güneş takip sistemlerinin ısıma oranları sırasıyla sabit sisteme göre %38 ve %34 daha yüksek bulunmuştur. Bunun yanı sıra, takip sistemlerinin maliyetinin sabit sisteme göre %20 daha pahalı olduğu ortaya çıkmıştır. Çift eksenli takip sistemi ile tek eksenli sistem arasında çok az bir fark olduğu gözlemlenirken, tek eksenli sistemin maliyetinin iki eksenli sisteme göre yaklaşık iki kat daha ucuz olduğu belirtilmiştir.

2. GÜNEŞ ENERJİSİ

Güneş, yaşamın temel kaynağı olmasının yanı sıra doğal sistem enerjisinin büyük bir kısmını sağlar. Güneş ışığından faydalanmak amacıyla çeşitli teknolojiler geliştirilmiştir. Bu teknolojilerden bazıları Güneş enerjisini doğrudan ışık veya ısı olarak kullanırken, diğerleri ise elektrik üretimi için Güneş enerjisinden yararlanır. Güneş enerjili su ısıtma sistemleri, Güneş ışınlarını kullanarak suyu ısıtır. Bu sistemler, evlerde sıcak su sağlamak, mekanları ısıtmak veya çoğunlukla havuzların ısıtılması amacıyla kullanılmaktadır. Genellikle bu sistemler, bir termal güneş paneli ve bir depolama ünitesinden oluşmaktadır.

Bu teknolojilerden bir tanesi de ısıtma amaçlı güneş enerjisi teknolojileridir. Isıtma amaçlı olarak kullanılan güneş enerjisi, güneş havuzları, düzlemsel güneş kolektörleri, vakumlu güneş kolektörleri gibi teknolojiler ile güneş enerjisinden ısı enerjisi elde edilmesidir. Isıtma amaçlı güneş enerji dönüşümlerinde farklı teknolojik alt yapılar olsa da, en yaygın kullanılan ısıtma amaçlı güneş teknolojisi güneş kolektörleridir.

Güneş kolektörleri, evsel sıcak su ısıtma başta olmak üzere, çeşitli ısıtma uygulamalarında uzun yıllardır yaygın bir şekilde kullanılmaktadır ve bu alandaki talep hızla artmaktadır. Güneş enerjisinin ısı enerjisine dönüştürülmesi sayesinde, su ısıtma, mekan ısıtma, yüzme havuzu ısıtma ve endüstriyel süreçler gibi birçok farklı kullanım alanı bulunmaktadır.

Güneş kolektörlerinin temel avantajları arasında düşük maliyet, sera gazı emisyonlarının azaltılması, basit tasarımı ve dayanıklılığı yer almaktadır. İki ana tip güneş kolektörü bulunmakla birlikte, bunlar düzlemsel (flat plate) kolektörler ve vakum tüplü (evacuated tube) kolektörlerdir (Rahaman, 2020).

Güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için iki temel teknoloji kullanılmaktadır: yoğunlaştırıcı sistemler ve fotovoltaik sistemler. Yoğunlaştırıcı sistemlerde, güneş ışınları bir akışkan üzerine odaklanarak yüksek sıcaklıkta buhar elde edilir ve bu buhar, türbinlerin döndürülmesiyle elektrik üretimini sağlar. Bu sistemlerde güneş ışınlarını odaklama görevi, oluk tipi aynalar, çanaklar ya da parabolik kolektörler gibi alıcılar

tarafından gerçekleştirilir. Her iki teknoloji de yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimini destekleyen önemli bir rol üstlenmektedir (Aksangör, 2019).

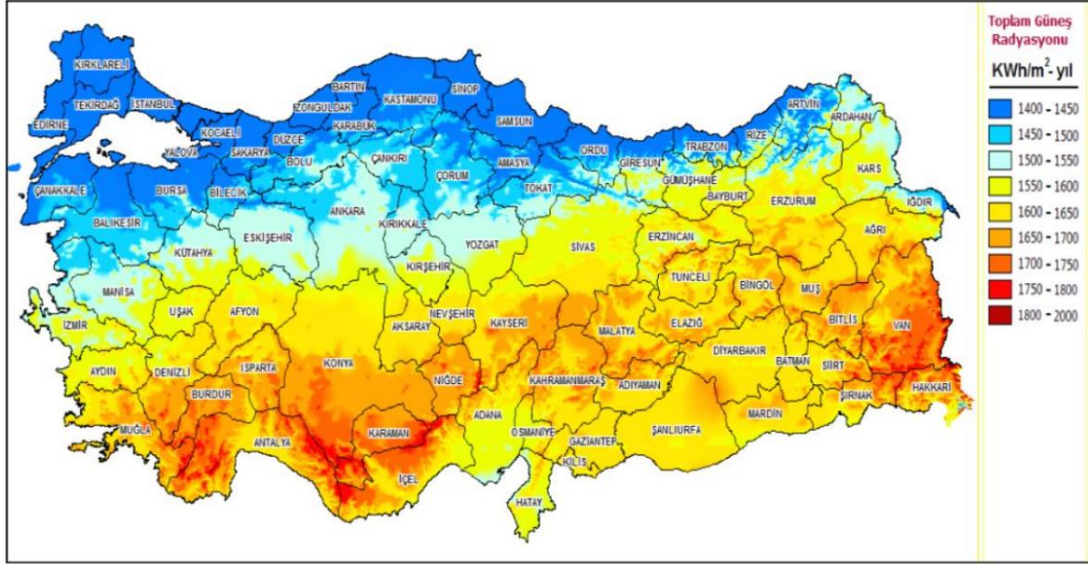
2.1. Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli

Türkiye, 36° ile 42° kuzey enlemleri ve 26° ile 45° doğu boylamları arasında yer almakta olup güneş kuşağı içinde bulunması nedeniyle yüksek bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Şekil 2.1'de yer alan Avrupa güneş enerjisi potansiyel atlası incelendiğinde, Türkiye'nin güneşlenme süresinin ve enerji potansiyelinin birçok Avrupa ülkesine kıyasla oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarını değerlendirme açısından önemli bir avantaja sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 2.1. Avrupa güneş enerjisi potansiyel atlası (Castillo ve diğ., 2015)

Türkiye, günlük ortalama 7,5 saatlik güneşlenme süresi ve 4,18 kWh/m²'lik ortalama günlük ışınlam şiddetiyle güneş enerjisi açısından oldukça elverişli bir coğrafyaya sahiptir. Türkiye'nin farklı bölgelerine göre yıllık ışınlam miktarlarını görselleştiren güneş enerjisi potansiyel atlası, Şekil 2.2'de sunulmuştur. Bu veriler, ülkemizin yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesinde önemli bir avantaj sunduğunu ve güneş enerjisinden etkin bir şekilde faydalanma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



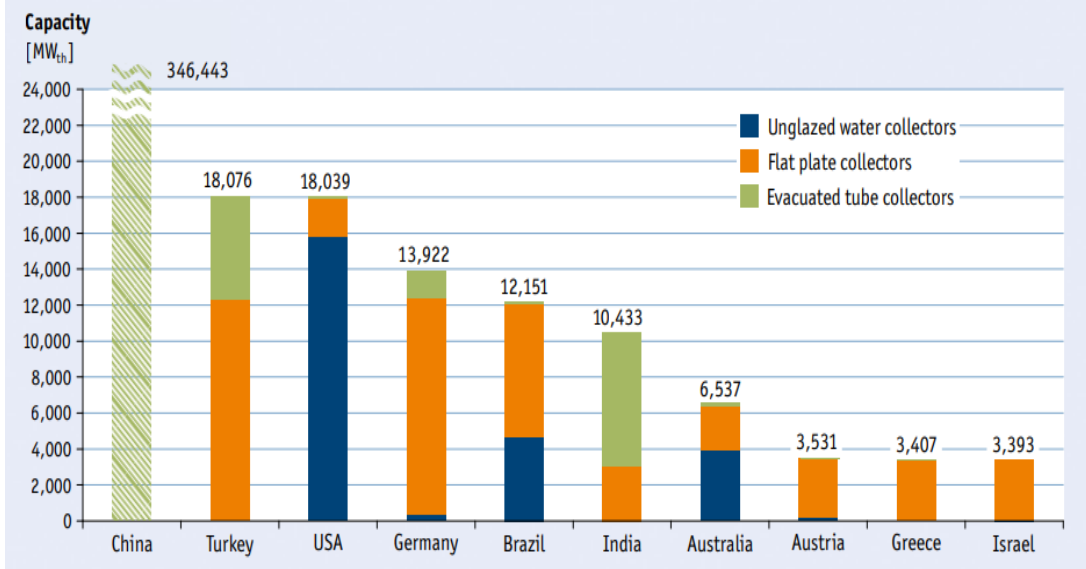
Şekil 2.2. Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası (URL-2)

2.2. Türkiye'de Güneş Enerjisi Kullanımı

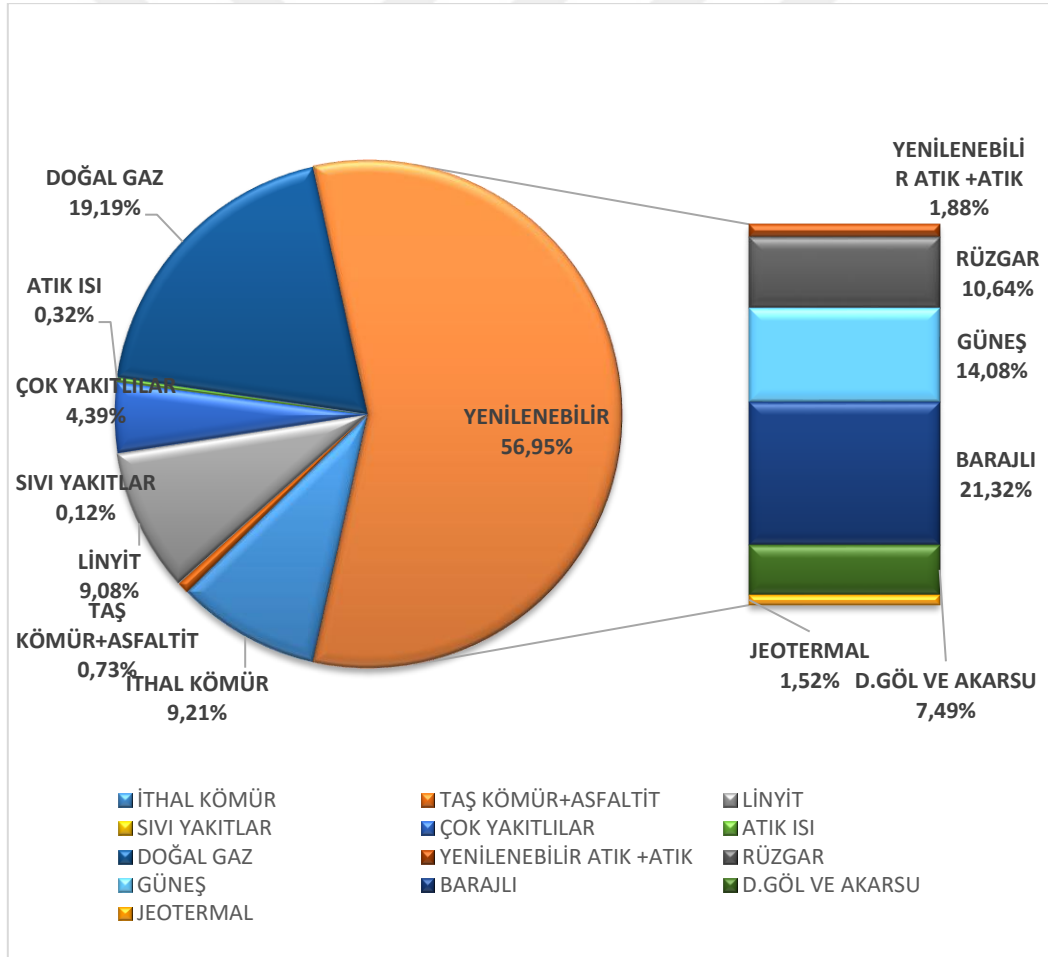
Güneş kolektörleri, güneş ışınlarıyla taşınan enerjiyi toplayarak bir akışkana ısı olarak aktaran farklı tip ve yapıdaki cihazlardır. Bu kolektörler, özellikle sıcak su ısıtma gibi ısıtma amaçlı güneş enerjisi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Güneş enerjisinin verimli bir şekilde kullanılabilmesi için, bu kolektörler çeşitli tasarımlarla enerji dönüşümünü optimize etmeyi amaçlar.

Şekil 2.3'te görüldüğü üzere Türkiye 18.076 MW kurulu gücüyle Dünya'da ısıtma amaçlı kolektör kullanımında ikinci sırada yer almaktadır.

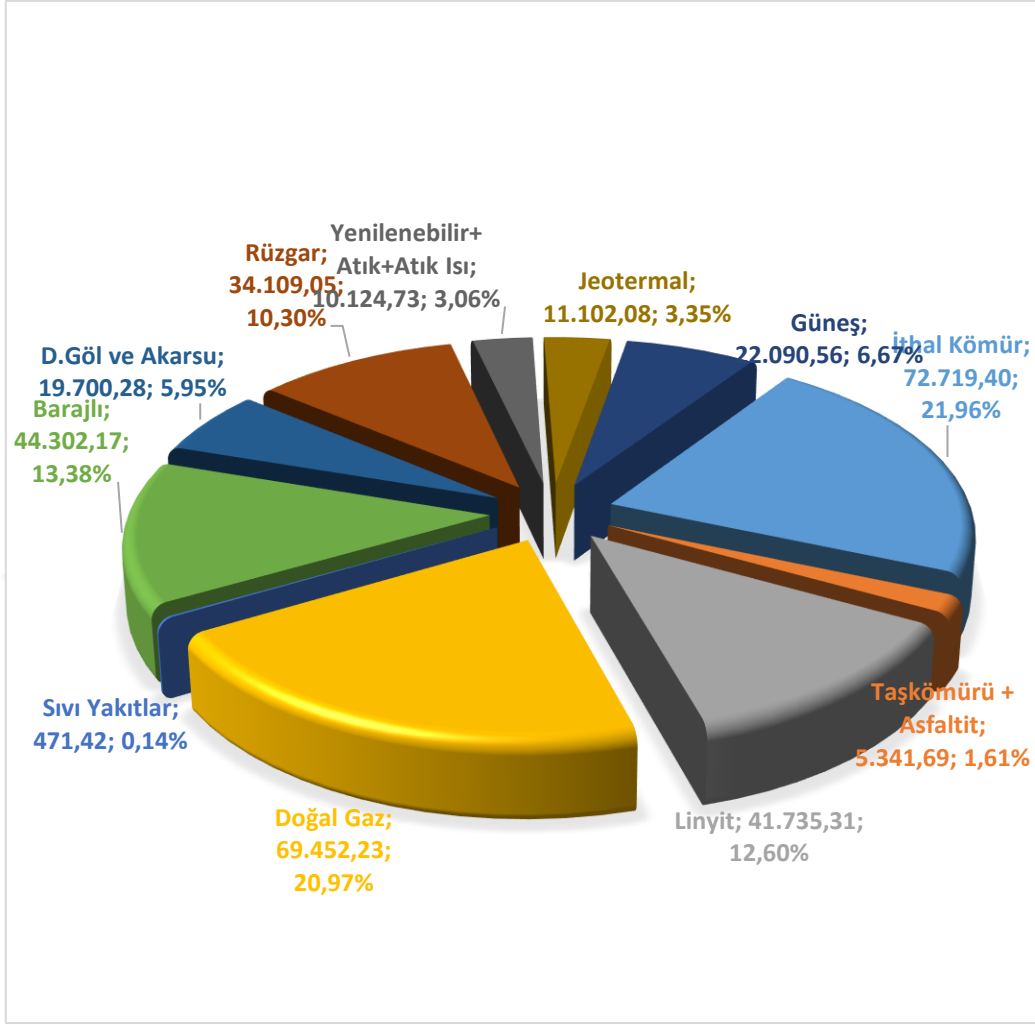
Şekil 2.4'te ise 2023 yılı kurulu gücün birincil enerji kaynaklara göre dağılımı görülmektedir.



Şekil 2.3. Dünya’da ısıtma amaçlı kollektör kullanımı, 2019 (Weiss ve diğ., 2021)



Şekil 2.4. 2023 yılı kurulu gücün birincil enerji kaynaklara göre dağılımı (URL-3)



Şekil 2.5. 2023 yılı Türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı (URL-3)

Şekil 2.5'te 2023 yılı Türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı görülmektedir. 2023 yılı sonu itibariyle Türkiye'nin toplam elektrik enerjisi üretim miktarı 331.148,90 GWh'tir. Bunun 22.090,56 GWh'i güneş enerjisinden sağlanmaktadır. Bu değer toplam elektrik enerjisi üretimin %6,67'sine denk gelmektedir.

3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER VE ÖZELLİKLERİ

Fotovoltaik sistemlerin tasarımı sırasında, sistemin kurulacağı yerin coğrafi özellikleri, güneşlenme değerleri, kullanılacak fotovoltaik panel ve eviricinin teknik özellikleri gibi birçok unsurun dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir. Fotovoltaik sistemlerin verimliliğinin artırılması ve maliyetlerin düşürülmesi, bu teknolojilerin daha yaygın hale gelmesi açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca, sistem kurulmadan önce yapılan modelleme çalışmalarıyla, çevresel koşullara göre maksimum enerji üretiminin hangi şartlarda sağlanabileceğinin belirlenmesi büyük bir ön hazırlık süreci olarak önem taşımaktadır (Keskin, 2012).

Bu tez çalışmasının ana konusu olan fotovoltaik sistemlerin detaylarına bu bölümde yer verilecektir. Öncelikle fotovoltaik sistemlerin tanımı yapılacak ve tarihi gelişim süreci özetlenecektir. Daha sonra, fotovoltaik panellerin yapısı ve çalışma prensipleri ele alınacak, sistem bileşenleri ile bağlantı düzenlerine göre farklı fotovoltaik sistem türleri ayrıntılı bir şekilde açıklanacaktır. Bu kapsamda, fotovoltaik sistemlerin temel özellikleri ve uygulama alanlarına yönelik bilgiler de sunulacaktır.

3.1. Fotovoltaik Sistemlerin Tanımı ve Tarihsel Gelişimi

Fotovoltaik kelimesinin kökeni, ışık anlamına gelen “photo” ve elektrik ya da gerilim üretimini ifade eden “voltaic” kelimelerinin birleşiminden türetilmiştir. Anlam olarak, ışıktan elektrik üretimini ifade eden fotovoltaik etki, güneş ışınımının yarı iletken malzemelerden oluşan fotovoltaik hücreler aracılığıyla doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesi prensibine dayanmaktadır. Bu süreç, yenilenebilir enerji üretiminde önemli bir yere sahiptir ve temiz enerji kaynağı olarak çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Fotovoltaik pillerin çalışma prensibi olan fotovoltaik etki, 1839 yılında Fransız fizikçi Alexandre-Edmond Becquerel tarafından keşfedilmiştir. Günümüzde bilinen formuyla fotovoltaik piller ise 1954 yılında geliştirilmiş ve ilk olarak uzaya gönderilen uydularına elektrik enerjisi sağlamak amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Teknolojik ilerlemeler ve artan enerji ihtiyaçları doğrultusunda, fotovoltaik sistemler saat ve hesap makinelerinden sokak aydınlatmalarına, bina entegre sistemlerinden açık alanlarda

kurulan güneş enerji santrallerine kadar geniş bir yelpazede elektrik üretimi için kullanılmaya başlanmıştır. Bu süreç, yenilenebilir enerji teknolojilerinin çeşitlenmesi ve günlük yaşamdaki uygulamalarının artması açısından önemli bir dönüm noktası olmuştur (Çelebi, 2002).

Geçmişte, geleneksel elektrik üretim yöntemlerine kıyasla daha pahalı olan fotovoltaik enerji sistemleri, teknoloji ve üretim süreçlerindeki gelişmeler sayesinde maliyetlerinin zamanla azalmaya başlamasıyla, gelecekte enerji üretimine önemli katkılar sağlayabilecek sistemler olarak değerlendirilmeye başlanmıştır. Bu ilerlemeler, fotovoltaik enerjinin daha geniş çapta kullanılabilir ve ekonomik hale gelmesini sağlamış, böylece yenilenebilir enerji kaynakları arasındaki rolünü güçlendirmiştir.

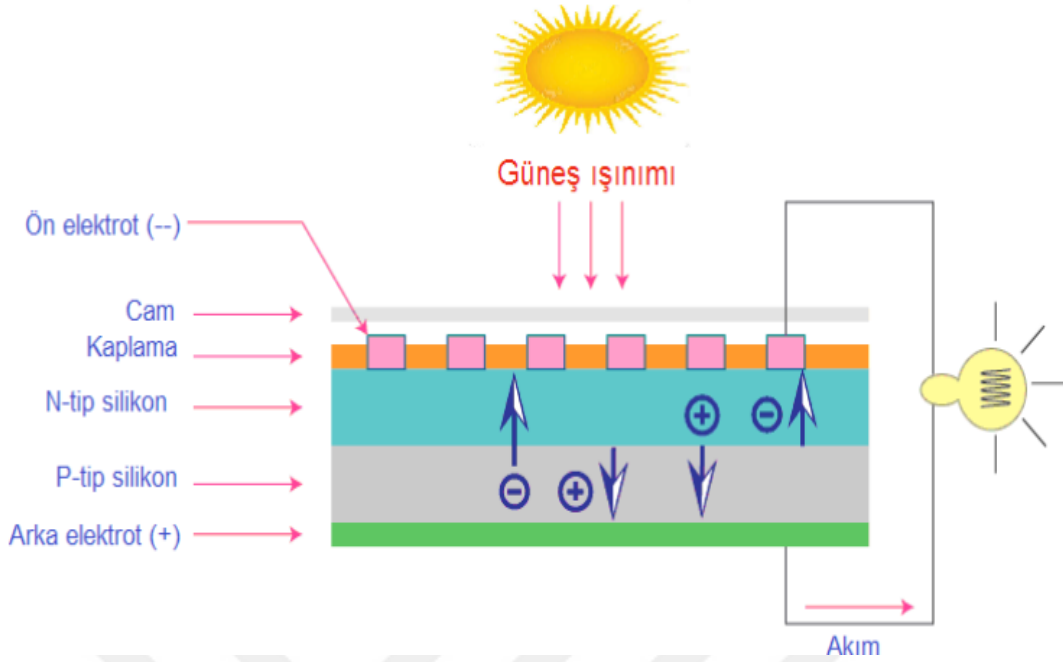
3.2. Fotovoltaik Hücrelerin Yapısı

Hücrelerin çalışması, fotosensitif özelliklere sahip yarı iletken malzemelerin güneş radyasyonundan etkilenmesiyle başlar. Bu malzemeler, fotonları emer ve serbest elektronlar yayar. Fotovoltaik etki ile bu serbest elektronlar elektrik akımı oluşturur ve bu akım elektrik enerjisi olarak kullanılabilir. Üretim süreci, yarı iletken malzemelerin katmanlar halinde yapılandırılmasını içerir (Molina Boza, 2009).

Şekil 3.1’de örnek bir fotovoltaik hücre yapısı katmanları paylaşılmaktadır. Fotovoltaik hücreler, genellikle yarı iletken malzemelerden yapılmış, birbirine zıt kutuplara sahip iki katmandan oluşur. Bu katmanlar, fotovoltaik hücrelerin temel işlevini yerine getirmesini sağlayan yapısal elemanlardır. Üretim sürecinde kullanılan yarı iletken malzemeler arasında silisyum, kadmiyum tellür ve galyum arsenit gibi maddeler bulunur. Fotovoltaik hücreler, kullanılan yarı iletken malzeme türüne ve üretim yöntemlerine bağlı olarak farklı çeşitlerde üretilir. Bu çeşitlenme, hücrelerin verimliliğini ve uygulama alanlarını etkileyen önemli bir faktördür.

Fotovoltaik hücreler üretiminde kullanılan malzemeye ve yapısal özelliklerine gruplandırılır. Bunlar;

1. Kristal Silisyum Fotovoltaik Hücreler,
2. İnce Film Fotovoltaik Hücrelerdir.



Şekil 3.1. Fotovoltaik hücre yapısı katmanları (Öztürk, 2017)

3.2.1. Kristal Silisyum Fotovoltaik Hücreler

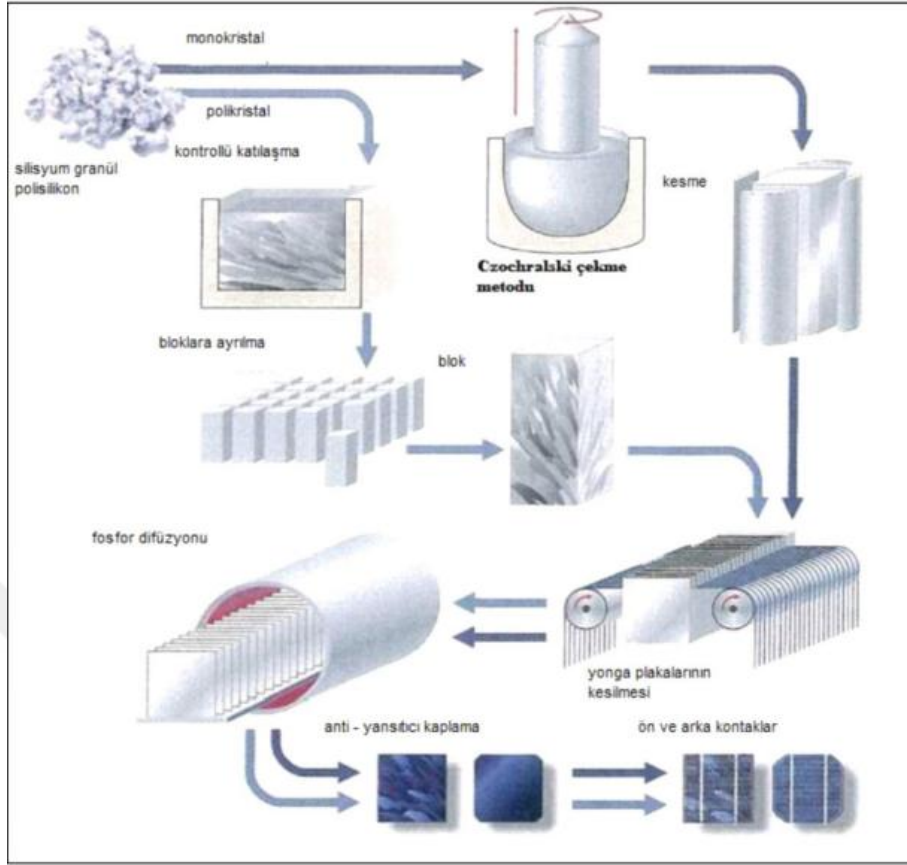
Silisyum, doğada bol miktarda bulunan bir element olup yarı iletken özellikleri sayesinde fotovoltaik hücre üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, silisyum doğada saf formda bulunmaz ve çeşitli arıtma süreçlerinden geçirilerek fotovoltaik hücre üretimine uygun hale getirilir. Bu arıtma süreçleri, enerji yoğunluğu ve karmaşıklığı nedeniyle üretim maliyetlerini artırabilir.

Şekil 3.2'de kristal silisyum fotovoltaik hücrelerin üretim aşamaları gösterilmektedir. Üretim yöntemlerindeki farklılıklara bağlı olarak, kristal silisyum güneş hücreleri monokristal ve polikristal olmak üzere iki gruba ayrılır;

Monokristal hücreler, tek bir kristal yapıdan oluştuğu için daha yüksek verimlilik sunar ancak üretim maliyetleri daha yüksektir.

Polikristal hücreler, birden fazla kristal yapı içerir ve daha düşük maliyetli olmakla birlikte verimlilikleri biraz daha düşüktür.

Düşük maliyetli üretim avantajı sunması nedeniyle polikristal hücreler, monokristal hücrelere oranla uygulama esnasında daha çok tercih edilmektedir. Günümüzde yaygın kullanım alanı bulunmaktadır.



Şekil 3.2. Kristal silisyum FV hücre üretim aşamaları (Uçar, 2018)

Monokristalin silisyum fotovoltaik hücreler, homojen bir malzeme yapısına sahip olmaları sayesinde uzun süre boyunca performanslarını koruyabilirler. Bu hücreler yüksek verimlilik sunar, çünkü tek kristal yapısı elektronların hareketini daha verimli hale getirir. Ancak, üretim süreçlerinin karmaşıklığı ve maliyetli olması nedeniyle ekonomik açıdan daha pahalı bir seçenektir. Bu özellikleriyle monokristalin silisyum hücreler, özellikle yüksek verimlilik ve dayanıklılık gerektiren uygulamalar için tercih edilmektedir (Sekuçoğlu, 2012). Laboratuvar ortamında %26'ya kadar verimlilik sağlayabilen bu hücrelerin ticari versiyonları, genellikle %18'in üzerinde verimlilik göstermektedir. Bu hücrelerin üretiminde, monokristalin silisyum bloklar büyük kristaller halinde büyütülür ve ardından yaklaşık 200 mikron kalınlığında ince tabakalar halinde kesilerek işlenir. Bu üretim yöntemi, hücrelerin verimli enerji dönüşümünü destekleyen homojen ve pürüzsüz bir yapı sunar (Kılıç, 2018).

Polikristalin silisyum fotovoltaik hücreler, birden fazla kristal yapısından oluşan malzeme yapısına sahiptir, bu nedenle monokristalin hücrelere göre daha heterojen bir yapı

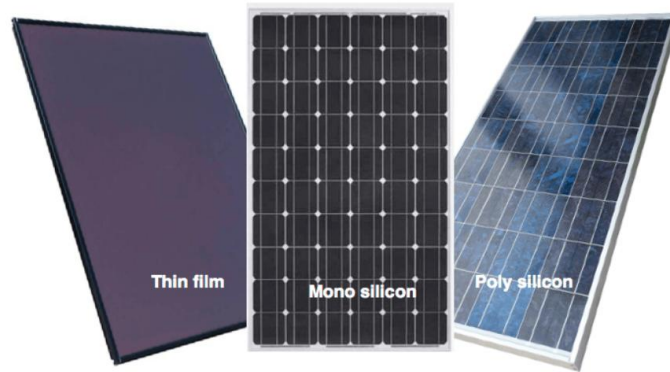
sergilerler. Bu hücrelerin enerji dönüşüm verimliliği genellikle %16 civarındadır ve monokristalin hücrelere kıyasla daha düşüktür. Ancak üretim süreçleri daha basit ve maliyet açısından daha avantajlıdır. Polikristalin hücreler, düşük maliyetleri ve yeterli enerji üretim kapasitesi ile maliyet-verim dengesi açısından ideal bir seçenek olduğu için en yaygın üretilen fotovoltaik hücre türlerinden biridir.

3.2.2. İnce Film Fotovoltaik Hücreler

İnce film fotovoltaik hücreler, düşük maliyetli üretim yöntemleri sayesinde geniş yüzeylere yarı iletken malzemelerin kaplanmasıyla üretilmektedir. Yüksek verimlilik potansiyeline rağmen, uzun süreli kararlılık sorunları üreticiler için bir engel oluşturmaktadır. Bu teknolojiler, maliyet avantajı ve çeşitli uygulama alanlarıyla gelecek vadederken, iyileştirme çalışmaları devam etmektedir.

Başlıca 3 ana teknoloji öne çıkmaktadır. Bunlar;

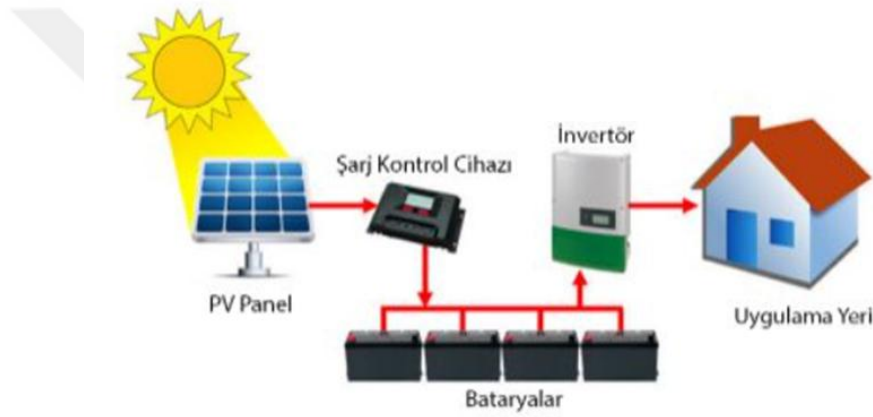
- Amorf Silikon (a-Si): %10 civarında laboratuvar verimliliği mevcut olup, ticari modüllerde ise %5-7 arasında bir performans göstermektedir.
- Kadmiyum Tellür (CdTe): Çok kristalli yapıda bir malzemedir. Düşük maliyetli güneş pili üretimine olanak sağlamaktadır. Küçük hücrelerde %16 verimliliği mevcut olup, ticari modüllerde %7 civarı verim sunmaktadır.
- Bakır İridyum Diselenid (CuInSe_2): Laboratuvar koşullarında %18 verimlilik elde edilebilirken, daha büyük yüzey alanlarına sahip modüllerde bu oran %15'e kadar düşmektedir (Kantaroglu, 2010).



Şekil 3.3. Fotovoltaik hücre çeşitleri (Svarc, 2014)

3.3. Fotovoltaik Sistem Bileşenleri

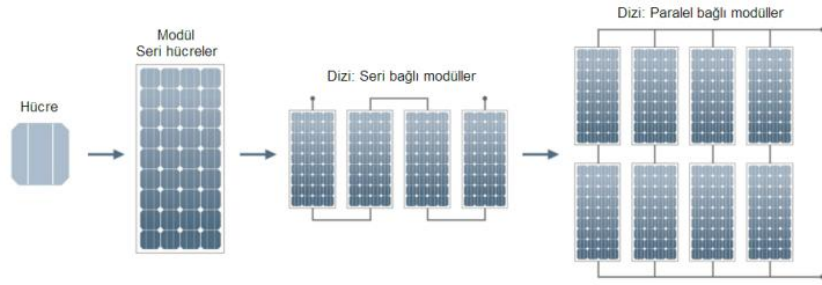
Fotovoltaik sistemler, belirli bir kullanım amacına yönelik olarak farklı tasarımlar ile bir araya getirilmiş çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır. Bu sistemde yer alan temel bileşenler, fotovoltaik paneller, akü, evirici, şarj kontrol cihazı ve üretilen enerjiyi kullanan tüketici cihazlardan oluşur. Her bir bileşen, sistemin verimli ve güvenli çalışabilmesi için belirli bir role sahiptir ve farklı tasarım kriterlerine göre entegrasyonu sağlanır. Şekil 3.4'te güneşten gelen enerjinin fotovoltaik sistem bileşenleri aracılığıyla kullanım noktasındaki enerjiye dönüşme süreci gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Fotovoltaik sistem bileşenleri (Doğan, 2019)

Fotovoltaik sistemler, enerji üretiminde verimli ve sürdürülebilir çözümler sunar. Bu sistemler, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik hücrelerden oluşur ve çeşitli uygulama alanlarında kullanılabilirler. Fotovoltaik hücreler, genellikle silisyum gibi yarı iletken malzemelerden yapılır. Hücrelerin doğru akıma dönüştürdüğü enerji, panellerde birleşerek daha büyük enerji üretim sistemleri oluşturur. Bu paneller, genellikle konutlar, endüstriyel tesisler ve açık alanlarda kullanılan güneş enerji santrallerine entegre edilir. Verimlilik, kullanılan malzemelere, üretim yöntemlerine ve tasarıma göre değişiklik gösterir. Örneğin, monokristalin hücreler daha yüksek verim sağlarken, polikristalin hücreler maliyet açısından daha uygun olabilir. Üretilen en yüksek verimle çalışan fotovoltaik panelden laboratuvar ortamında %43,5 verim elde edilmiştir (Kıyanççek, 2013).

Paneller, birçok fotovoltaiik modülden oluşur. Bu modüller, sistemin en önemli parçasıdır. Fotovoltaiik hücreler, genellikle ince yarı iletken malzemelerden yapılır ve kalınlıkları mikron seviyesindedir. Hücrelerin boyutları genellikle kare, dikdörtgen veya dairesel şekillerde olup, alanları genellikle 100 cm² civarındadır. Ancak, tek bir fotovoltaiik hücreden elde edilen enerji çok düşük olduğu için, hücreler seri veya paralel bağlanarak daha büyük enerji üretim kapasitesine sahip modülleri oluştururlar. Birçok modülün birleştirilmesiyle ise fotovoltaiik paneller elde edilir. Büyük  l ekli enerji üretimi için, paneller de birbirine bağlanarak geniş fotovoltaiik diziler oluşturulur. Bu diziler, güneş enerjisi sistemlerinin verimli bir şekilde enerji üretmesini sağlar (Sayın ve İlhan, 2011). şekil 3.5'te hücre, modül, panel ve dizilerin nasıl oluştuğu gösterilmiştir.



şekil 3.5. Fotovoltaiik hücre, panel ve diziler ( zt rk, 2017)

3.3.1. Alüminyum  er eveli ve Camlı Paneller

Fotovoltaiik paneller arasında en yaygın olanı alüminyum çerçeveli ve camlı panellerdir. Alüminyum  er eve, panellere yapısal destek sağlarken dayanıklılıklarını artırır. Hücrelerin  evresel etkilere karşı korunması için modül üzerindeki cam tabaka, özel bir filmle kaplanır. Bu paneller, geniş kullanım alanları ve sağlam yapılarıyla sektörde en çok tercih edilen türler arasındadır (Yücel, 2016).

3.3.2. Çerçevesiz Paneller

Çerçevesiz paneller, monokristal silikon fotovoltaiik hücrelerden üretilmiş olup, yüksek verimlilikleri ile dikkat çeker. Bu tür panellerin yüzeyi çift katmanlı optik filmlerle kaplanmıştır. Arka kısmında PET filmi, orta kısmında fotovoltaiik hücreler ve  n kısmında PET film veya cam bulunur. şebeke bağlantısı gerekmeyen trafik ikaz ışıkları ve hibrit sistemler gibi uygulamalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır (Yücel, 2016).

3.3.3. Metal Tabanlı Paneller

Metal tabanlı paneller, mono kristal silikon güneş hücrelerinden üretilmiş olup, ince optik filmlerle kaplanmıştır. Bu paneller paslanmaz çelik, metal veya alüminyum alaşımlardan yapılmış dayanıklı bir taban üzerine özel yapıştırıcı ve yalıtıcı kaplama ile monte edilir. Yapısı, alt kısımda PET film, orta kısımda fotovoltaiik hücreler ve üstte PET film veya camdan oluşur (Yücel, 2016).

3.4. Bataryalar

Bataryalar, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren ve bu enerjiyi depolayan cihazlardır. Çalışma prensipleri, pozitif (katot) ve negatif (anot) elektrotlar arasındaki kimyasal reaksiyonlara dayanır. Modern bataryalar, enerji depolamada yüksek verimlilik, uzun ömür ve mobil uygulamalarda taşınabilirlik gibi avantajlar sunmaktadır. Fotovoltaiik sistemlerde ada tipi sistemlerde enerji depolama ihtiyacı, genellikle akü gruplarıyla karşılanmaktadır. Güneş ışınımının olduğu zamanlarda üretilen enerji, ışınımın bulunmadığı zamanlarda kullanılmak üzere depolanır. Bu sistemlerde, özellikle kurşun-asit aküler tercih edilmektedir, çünkü bu tür aküler hem ekonomik hem de performans açısından verimlidir.

Kurşun-asit aküler iki ana gruba ayrılır: açık tip ve kapalı tip. Açık tip aküler, kimyasal reaksiyonlar nedeniyle su kaybı yaşayabilir, bu yüzden düzenli bakım ve su seviyesi kontrolü gerektirir. Uygun kullanıldığında uzun ömürlü olabilirler. Kapalı tip aküler ise sıvı dolumu gerektirmez ve bu özelliklerinden ötürü genelde bakım ihtiyacı daha azdır.

Fotovoltaiik sistemlerde kullanılacak akülerin seçiminde dikkate alınması gereken faktörler şunlardır:

- Yüksek maliyet/performans oranı,
- Düşük bakım ihtiyacı,
- Makul kullanım ömrü,
- Düşük öz deşarj oranı ve yüksek enerji verimliliği,
- Düşük şarj akımlarıyla çalışabilme özelliği,
- Fiziksel darbelere dayanıklılık,
- Çevre dostu ve insan sağlığına zararsız materyallerden üretilmiş olması.

Bu hususlara dikkat edilmesi, fotovoltaik sistemlerin etkinliğini ve uzun ömürlülüğünü artıracaktır. (Turmuş, 2018).

3.5. Eviriciler

Eviriciler, güneş panellerinden elde edilen doğru akımı (DA), elektrik şebekesinde veya cihazlarda kullanılmak üzere alternatif akıma (AA) çeviren temel cihazlardır. Güneş enerjisi sistemlerinin kilit taşlarından biridir. Genellikle entegre yazılımları sayesinde maksimum güç noktası izlemi (MGNI) gerçekleştirerek sistem verimliliğini artırır. Ayrıca, enerji üretim verilerini kaydedip uzaktan erişimle izleme imkanı sunarlar. Hem DA hem de AA tarafında aşırı akım ve gerilim durumlarına karşı koruma sağlayarak sistemin güvenliğini artırır. Eviriciler, fotovoltaik dizilerde meydana gelebilecek arızalara karşı koruma işlevi görerek uzun ömürlü ve güvenilir bir operasyon sağlar (Tekkale, 2018).

Eviriciler, kullanım alanlarına bağlı olarak şebekeye bağlı (On-grid) veya şebekeden bağımsız (Off-grid) sistemler için farklı iki türü bulunmaktadır.

Eviriciler, fotovoltaik sistemlerde elektrik üretimini verimli bir şekilde yönlendiren önemli bileşenlerdir. Sistemlerin doğru çalışabilmesi için, fotovoltaik panellerin dizilimi birbirine uygun olmalıdır. Bu dizilimde yerleşim açıları, gölgelenme etkisi, kirlenme durumu ve sıcaklık gibi faktörlerin uyumlu olması gerekmektedir. Eviriciler, genellikle iki ana tipe ayrılır: merkezi eviriciler ve dizi eviriciler.

Merkezi eviriciler yüksek verimlilik sunarken, bakım maliyetleri daha düşüktür. Ancak, merkezi eviriciler arızalandığında tüm sistemin çalışmaması gibi bir risk doğurur. Bu, sürdürülebilirlik açısından bir zorluk yaratabilir. Bu nedenle, bazı merkezi eviriciler, sistem arızalarının tüm sisteme etki etmemesi için içlerinde birden fazla alt sisteme ayrılabilir özelliklere sahiptir. Merkezi eviriciler, genellikle büyük ticari projelerde tercih edilmektedir ve piyasa payı %54 civarındadır.

Dizi eviriciler, fotovoltaik panelleri daha küçük gruplar halinde birleştirerek çalışır. Her bir panel grubu, özel olarak tasarlanmış bir MGNI (Maksimum Güç Noktası İzleyicisi) aracılığıyla enerji üretimini yönlendirir. Dizi eviriciler, küçük ölçekli ticari projelerde daha yaygın bir şekilde kullanılır ve piyasadaki kullanım oranı %42 civarındadır. Bu tür

eviricilerde diyot kayıpları bulunmaz, bu da verimliliği artıran bir faktördür. Ayrıca, kablo uzunluklarının optimizasyonu sayesinde DA taşıyan kabloların daha kısa olması, AA taşıyan kabloların ise daha uzun olması, enerji kayıplarını azaltmaya yardımcı olur.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, eviricilerin verimlilik oranları %98 seviyelerine çıkmıştır. Dizi eviriciler, küçük ve orta ölçekli projelerde daha sık tercih edilmesine rağmen, merkezi eviricilerin verimlilik avantajları nedeniyle büyük projelerde hâlâ yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu iki tip eviricinin birbirinden farklı avantajları ve kullanım alanları, fotovoltaik sistemlerin genel verimliliğini etkileyen kritik faktörlerdir. Piyasanın geri kalanını mikro eviriciler ve diğerleri tutmaktadır. Tablo 3.1’de ise evirici tiplerinin verimlilikleri ve piyasa dağılımları detaylı şekilde verilmiştir.

Tablo 3. 1. Evirici tiplerinin verimlilikleri ve piyasa dağılımları (Tekkale, 2018)

Evirici	Verimlilik (~ %)	Piyasa (~ %)
Dizi Evirici 100 kW'a kadar	98	42
Merkezi Evirici 100 kWp'dan büyük	98,5	54
Mikro Evirici (Modül Gücüne bağlı)	90-95	1
DA/DA Konvertör (Güç Optimizatörü)	98,8	3

3.6. Şarj Kontrol Cihazı

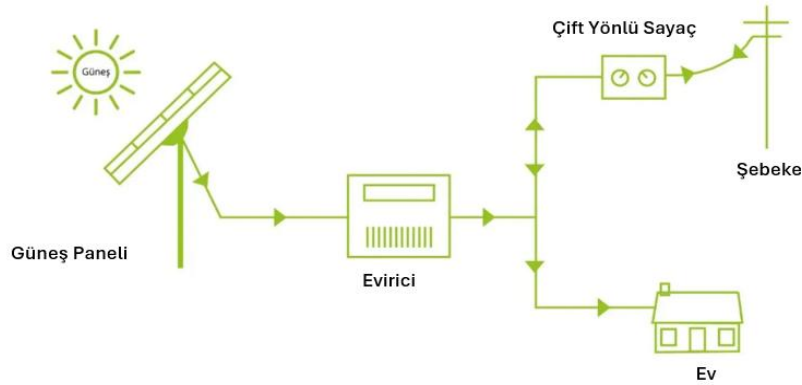
Şarj kontrol cihazları, fotovoltaik sistemlerde güneş panellerinden üretilen doğru akım (DA) enerjisini düzenler. Bu cihazlar, akülerin doğru bir şekilde şarj olabilmesi için sabit bir DA akımı ve gerilimi sağlar. Fotovoltaik panellerden çıkan gerilim ve akım sürekli olarak değiştiği için, şarj kontrol cihazları bu değişimleri denetleyerek, akülerin doğru şekilde şarj edilmesini güvence altına alır. Ayrıca, şarj kontrol cihazları, aküden panellere doğru ters akımın oluşmasını engelleyerek, sistemin verimli çalışmasını sağlar. Akü tamamen dolduğunda, şarj kontrol cihazları güneş panellerinden gelen elektriği keserek, aşırı şarjı önler. Şarj kontrol cihazları genellikle iki ana tipe ayrılır: PWM (Pulse-width Modulation) ve MGNİ (Maximum Power Point Tracking).

3.7. Bağlantı Şekillerine Göre Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik sistemler, bağlantı şekillerine göre şebeke bağlantılı (On-grid) ve şebekeden bağımsız (Off-grid) olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Şebeke bağlantılı sistemler, üretilen enerjiyi doğrudan şebekeye aktarırken, şebekeden bağımsız sistemler, enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla depolama üniteleri kullanarak tamamen özerk çalışır. Bu iki tür sistem, kullanıcı ihtiyaçlarına ve coğrafi koşullara göre farklı avantajlar sunar.

3.7.1. Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Sistemler

Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler, merkezi elektrik şebekesi ile entegrasyon sağlayarak çalışan sistemlerdir. Bu tür sistemlerde üretilen elektrik, doğrudan şebekeye iletilir ve genellikle enerji depolama ünitelerine gerek duyulmaz. Enerji üretimi sırasında, eviriciler aracılığıyla doğru akım, alternatif akıma dönüştürülür. Eğer üretilen enerji talebi aşarsa, fazladan elektrik şebekeye aktarılır; buna karşın, çevresel koşullar veya sistem yetersizliği durumunda, şebekeden enerji sağlanabilir. Çift yönlü sayaç kullanılarak tüketim ve arz dengesi sağlanır, böylece şebeke ile enerji akışı kontrol edilir. Şekil 3.6'da şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem örneği gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem

3.7.2. Şebekeden Bağımsız Fotovoltaik Sistemler

Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemler, elektrik şebekesinin bulunmadığı veya erişiminin zor olduğu bölgelerde, ya da şebekeden alınan enerjinin kalitesiz olduğu

Şebekeden bağımsız sistemler, özellikle uzak bölgelerdeki evler, küçük işletmeler veya tarımsal alanlar gibi şebeke altyapısının bulunmadığı yerlerde kullanılır. Bunun yanı sıra, bazı durumlarda şebeke bağlantısının sağlanabildiği yerlerde de enerji faturalarını düşürmek veya kullanıcıların tüm enerji ihtiyaçlarını kendi sistemlerinden karşılamasını sağlamak için kullanılabilir. Bu tür sistemlerde, enerji sadece yerel olarak üretildiği ve tükendiği için, şebekeye enerji aktarımı yapılmaz ve bu nedenle şebekeden bağımsız olarak tanımlanır.

The diagram illustrates a solar power system setup. On the left, a group of solar panels (1) is connected to a DC distribution box (2). From box 2, a blue line (DC connection) leads to a charge controller (3). From box 3, a blue line leads to a battery bank (4). A red line (AC connection) also originates from box 3 and leads to a house (7). A blue line (DC connection) also originates from box 3 and leads to a building (5). A legend at the bottom right identifies the components and connection types:

- 1 FV Modül
- 2 DC Bağlantı Kutusu
- 3 Şarj Kontrol Devresi
- 4 Depolama Sistemi (Akü)
- 5 DC Yüklér
- 6 Evirici
- 7 AC Yüklér
- DC Bağlantılı
- AC Bağlantılı

25

3.8. Güneş Takip Sistemleri

Güneş takip sistemi, güneş panellerinin güneşin hareketine göre otomatik olarak konumlandırılmasını sağlayan bir mekanizmadır. Bu sistemler, güneş panellerini güneşin gökyüzündeki hareketine uygun olarak otomatik olarak ayarlar. Bu, sabit panellere kıyasla daha fazla güneş enerjisi toplamalarını ve böylece enerji üretim kapasitelerini önemli ölçüde artırmalarını sağlar.

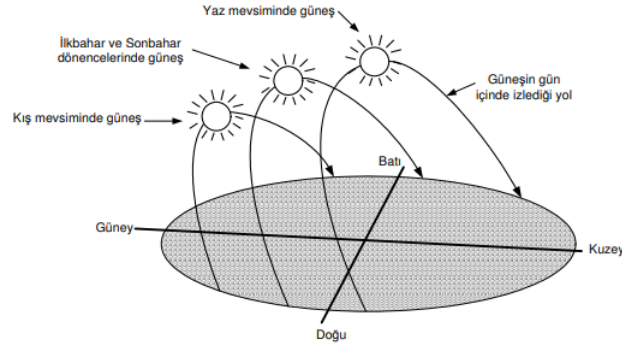
Güneş takip sistemleri takip eksenlerine göre; tek eksenli veya çift eksenli olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Tek eksenli güneş takip sistemleri genellikle güneşin doğu-batı yönündeki hareketini takip ederken, çift eksenli güneş takip sistemleri güneşin yükseklik açısındaki değişiklikleri de dikkate almaktadır. Güneş takip sistemleri, güneş enerjisinden elde edilen verimin artırılmasında oyun değiştirici bir rol oynayarak, güneş panellerinin enerji üretim potansiyelini tam anlamıyla kullanmalarını sağlar (Kayri, 2023).

Güneş takip sistemi, güneş enerjisinin verimli bir şekilde kullanılmasında kritik bir rol oynar. Bu sistemler, günün farklı saatlerinde güneş ışığının açısını optimize ederek güneş panellerinin güneş ışınlarını en verimli şekilde yakalamasını sağlar. Bu, aynı güneş paneli kurulumundan daha fazla enerji üretilmesini sağlar (Price, 2010).

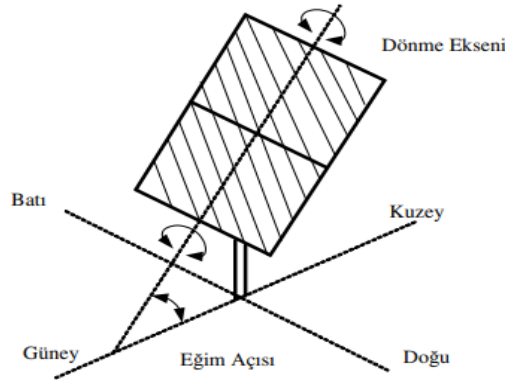
3.8.1. Tek Eksenli Güneş Takip Sistemleri

Tek eksenli takip sistemleri, güneş enerjisi sistemlerinde güneş panellerini veya dizilerini güneşe doğru yönlendirmek için kullanılan bir cihazdır. Sabit güneş panellerinin aksine, tek eksenli takip sistemleri, güneşin yolunu takip etmek için tek bir eksen boyunca dönebilen sistemlerdir.

Bu izleme yeteneği, güneş panellerinin daha fazla güneş ışığını yakalamasını sağlar ve sabit kurulumlara kıyasla enerji üretimini artırır. Tek eksenli takip sistemleri genellikle güneş panellerinin pozisyonunu güneşin gökyüzündeki konumuna bağlı olarak ayarlayan motorlar ve kontrol cihazları ile donatılmıştır. Güneş panelinin güneş ışığına maruz kalma süresini maksimize ederek, tek eksenli takip sistemleri güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini ve çıktısını artırabilir, bu da büyük ölçekli güneş kurulumları için ekonomik olarak daha uygun hale getirebilir.



Şekil 3.8. Güneşin mevsimlere göre değişen yörüngeleri (Demirtaş, 2008)



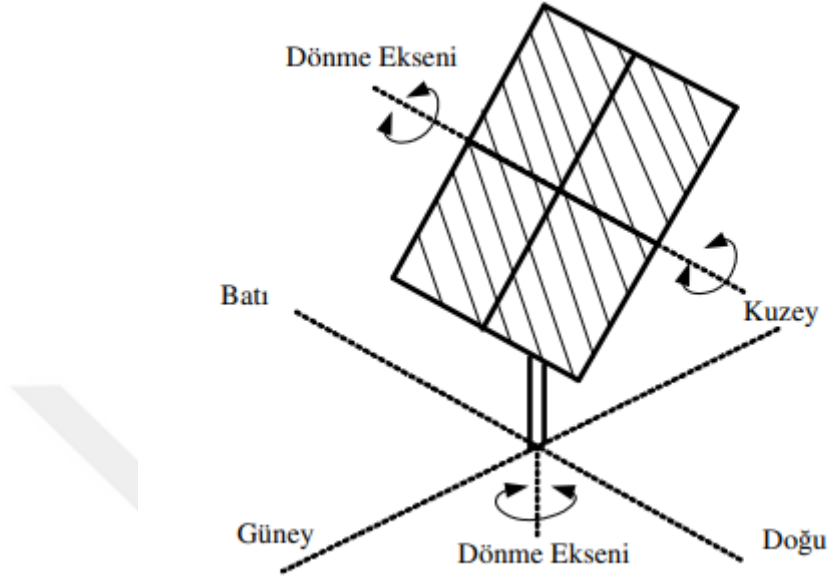
Şekil 3.9. Tek eksenli güneş takip sistemi yerleşim şeması (Demirtaş, 2008)

3.8.2. Çift Eksenli Güneş Takip Sistemleri

Şekil 3.8’de gösterildiği üzere güneş ışıını, yılın belirli dönemlerine, aylara, coğrafi bölgelere ve güneşin konumuna göre değişkenlik göstermektedir. Çift eksenli güneş takip sistemleri, kuzey-güney ve doğu-batı olmak üzere iki farklı eksenle güneş ışıını takip edebilir. Bu sistemler, güneş panellerini en üst düzeyde güneş ışığına maruz bırakarak en yüksek verimliliği sağlar. Ancak, bu sistemlerin diğer izleme sistemlerine kıyasla daha karmaşık bir tasarımı vardır ve daha fazla hareketli parça içerir. Bu nedenle, kurulum maliyetleri ve bakım gereksinimleri genellikle daha yüksektir.

İzleme sistemlerini kontrol etmek için, kapalı döngü ve açık döngü kontrol sistemleri kullanılabilir. Kapalı döngü kontrol sistemleri, konumu belirleyen foto sensörleri kullanır. Açık döngü kontrol sistemleri havanın bulutlu olma durumuna karşılık güneşin konumunu matematiksel bir alitmadan alır ve güneş panelini konumlandırır. Bulutlu

havalarda kapalı döngü sistemler fazla hareket edeceği için aşırı enerji tüketimine sebep olur. Bu sorunu gidermek için hibrit sistemler kullanılır (Sağlam ve diğ., 2024).



Şekil 3.10. Çift eksenli güneş takip sistemi yerleşim şeması (Demirtaş, 2008)

3.9. Fotovoltaik Sistemlerin Tasarımları ve Simülasyonu İçin Kullanılan Analiz Programları

Birden fazla tasarım, analiz ve raporlama programı bulunmaktadır. Bu programlar sayesinde fotovoltaik panel enerji çıkışını doğru bir şekilde değerlendirmek mümkündür.

3.9.1. PVSYST

Cenevre Üniversitesi tarafından geliştirilen en eski fotovoltaik yazılımlardan biridir. PVSYST mimarlar, mühendisler ve araştırmacılar tarafından kullanılmak üzere tasarlanmıştır ve çok kullanışlı bir eğitsel araçtır. FV paneller, eviriciler ve meteorolojik veriler eksiksiz bir veritabanı ile karakterize edilir ve PVGIS ve NASA veritabanlarından ışınlama verilerini içe aktarabilir. PVsyst detaylı mühendislik analizleri ve hassas enerji üretim simülasyonları için tercih edilir. PVsyst, sistem bileşenlerinin ayrıntılı teknik analizini yaparak, panel ve evirici seçimleri, sıcaklık kayıpları, kablo dirençleri ve sistem verimliliği gibi parametreleri değerlendirir. Gerçek hava verilerini kullanarak yıllık enerji üretim tahminleri yapar ve yatırım geri dönüş süresi gibi ekonomik analizleri destekler.

3.9.2. PvSOL

Pv*SOL, güneş enerjisi sistemlerinin tasarımı, simülasyonu ve analizini yapmak için kullanılan profesyonel bir yazılımdır. Çatı, arazi veya bina üstü fotovoltaik (PV) sistemlerin detaylı modellemesini sağlayarak, panel yerleşimi ve evirici seçimi konusunda optimizasyon sunar. 3D modelleme ile gölgeleme analizleri yaparak sistemin verimliliğini artırmaya yardımcı olur. Seçilen lokasyona göre güneş ışınımı verilerini kullanarak enerji üretim tahminleri gerçekleştirir ve ekonomik fizibilite çalışmaları yaparak yatırım geri dönüş süresini hesaplar. Ayrıca, profesyonel raporlar ve grafikler oluşturarak mühendisler, danışmanlık firmaları ve akademik çalışmalar için detaylı analiz imkânı sunar.

3.9.3. HELIOS 3D Solarparkplanung

Bu program FV sistemin herhangi bir coğrafi konumda ve herhangi bir tarih veya saatte dijital bir araziye gölgesiz yerleştirilmesini sağlar.

İş akışı proje sürecinin tüm aşamalarını destekler:

- Proje geliştirme: arazinin analizi ve değerlendirilmesi, verim oranı.
- Proje düzeni: arazinin yapılandırılması, FV panellerin konumlandırılması, maksimum verim için konumlandırmanın optimize edilmesi
- Proje mühendisliği: elektrik düzeni, malzeme listesi, GPS koordinatları listesi, kablo listeleri.

3.9.4. EasySolar

EasySolar, ofiste veya sahada kullanımı kolay, iOS veya Android için gelişmiş EasySolar mobil uygulamalarıyla uyumlu tamamen işlevsel bir çevrimiçi platformdur. Bu yazılım ayrıntılı fiyat teklifi bölümü ve finansal analiz sağlar.

3.9.5. PVscout 2.0 Premium

PVscout, üreticiden bağımsız olarak şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerin planlanması ve hesaplanması için bir FV boyutlandırma yazılımıdır. Aynı zamanda ekonomik verimlilik hesaplamaları sağlar.

3.9.6. Polysun

SPF-Velasolaris tarafından oluşturulan, güneş fotovoltaik sistemlerinin profesyonel bir boyutlandırma ve simülasyon yazılımıdır.

3.9.7. Solarpro

Yazılım, üretilen elektrik miktarını, kurulum sahasının enlemlerine, boylamlarına ve hava koşullarına göre hesaplar. Binaları ve nesneleri çevreleyen gölge etkisini içeren simülasyon, kullanıcıların sistemden önce en uygun ayarları ve modül tasarımlarını kontrol etmesini sağlar. Yazılım ayrıca her bir üreticinin ürününün elektriksel özelliklerine dayanarak güneş modüllerinin I-V eğrisini doğru ve hızlı bir şekilde hesaplar.

3.9.8. PLAN4SOLAR PV

Bu yazılım, kapsamlı bir montaj ve bağlantı planı ile evirici tasarımı, gelir tahmini ve karlılık hesaplamaları gibi kişisel hesaplamaları ve DIN 1055'e göre rüzgar ve kar yükü hesaplamalarına dayalı en uygun montaj sistemini belirleyen ilgili hesaplamaları sağlar.

3.9.9. Solarius-PV FreeUPP S

Solarius-PV FreeUPP, güneş fotovoltaik (şebekeye bağlı) tasarımı ve güneş FV sistemi verimlilik hesaplaması için bir yazılımdır. Bu FV hesap makinesi CAD'den grafiksel bir giriş ve solar FV sistemi verimlilik oranının hesaplanmasını sağlar.

3.9.10. PV F-CHART

PV F-CHART kapsamlı bir fotovoltaik sistem analizi ve tasarım programıdır. Hesaplamalar Wisconsin Üniversitesi'nde geliştirilen yöntemlere dayanmaktadır.

3.9.11. HOMER

HOMER, uzaktan, bağımsız ve dağıtılmış üretim uygulamaları için hem şebekeden bağımsız hem de şebekeye bağlı güç sistemleri için tasarım seçeneklerini değerlendirme görevini basitleştiren bir bilgisayar modelidir. HOMER'in optimizasyon ve duyarlılık analizi algoritmaları, kullanıcının çok sayıda teknoloji seçeneğinin ekonomik ve teknik

fizibilitesini değerlendirmesine ve teknoloji maliyetleri, enerji kaynağı kullanılabilirliği ve diğer değişkenlerdeki belirsizliği hesaba katmasına olanak tanır.

3.9.12. PV-DESİGN-PRO

PV-DesignPro v6.0, kullanıcının seçtiği iklim ve sistem tasarımına bağlı olarak bir yıl boyunca saatlik olarak fotovoltaiik enerji sistemi çalışmasını simüle etmek için tasarlanmış Windows uyumlu bir yazılımdır.

3.9.13. PV Designer Solmetric

Bu araç, dünya çapında geniş modül, evirici ve hava durumu veritabanlarını içerir. Yazılım, konut ve küçük ticari sistemler için tasarlanmıştır.

3.9.14. Archelios PRO

Bu yazılım üretilen FV enerjisini ve karlılığını hesaplamaya izin verir.

3.9.15. HELIOSCOPE

Bu fotovoltaiik boyutlandırma yazılımı, 5MW'a kadar şebekeye bağlı sistemleri yönetir. 45.000 bileşenli bir kütüphane ve meteorolojik verileri FV güneş enerjisi hesaplamasına entegre etme imkanı sağlar.

3.9.16. Solergo Electro

Graphics Srl tarafından geliştirilen bu yazılım, şebekeye bağlı bir güneş fotovoltaiik sisteminin güneş FV çıkışını hesaplar. Solergo, kirletici emisyonların değerlendirilmesi ve ayrıca ekonomik rapor ve geri ödeme hesaplaması gibi ilginç özellikler sunar.

3.9.17. BlueSol

BlueSol, dünyanın her ülkesinde fotovoltaiik sistemlerin tasarımı için bir yazılımdır. BlueSol kullanımı kolay, standart bir Microsoft arayüzü ile yapılmış bir üründür.

3.9.18. Skelion

Skelion, bir yüzeye güneş fotovoltaikleri ve termal bileşenler eklemek için kullanılan bir çizim eklentisidir. Skelion kendi modelinizi eklemenizi sağlar.

3.9.19. Simscape™ Power Systems™

MathWorks'ün ürünlerinden biri, elektrik güç sistemlerinin modellenmesi ve simülasyonu için bileşen kitaplıkları ve analiz araçları sağlayan Simscape™ Power Systems™'dir. Bu kütüphaneler ve MATLAB sayesinde bir mikro şebekeyi simüle etmek de mümkündür. MathWorks, web sitelerinde [<http://ch.mathworks.com>] zaten Küçük Ölçekli Mikro-Şebeke için basitleştirilmiş bir model örneği sunmaktadır. Bu örnek, tipik bir günde 24 saat boyunca küçük ölçekli bir mikro şebekenin basitleştirilmiş bir modelinin davranışını gösterir. Mikro şebeke, tek fazlı AA'nın bir güç ağı olarak ifade edilir. Güç kaynakları güç sistemi, güneş enerjisi üretimi ve bir bataryadır.

3.9.20. Management Software Platform

Management Software Platform, E-sims tarafından geliştirilmiştir. E-sims'e göre, üreticiler bu platformla kullanımlarını optimize ederken kurulumlarını (FV + depolama) çalıştırabilirler. Bunu başarmak için, yazılım platformu bir depolama modeli ve bir optimizasyon işlevi çözücü kullanır. Platform, depolama yönetimini planlar, denetler ve optimize eder. İşletme için gerekli bakım ve faturalama hizmetlerini sunar; elektrikli ekipman, bilgi sistemleri ve harici hizmetler (FV tahmini) arasındaki uyumluluğu ele alır. Tesisatın elektrik mimarisi ve satış sözleşmesi ve uygulama koşulları, her site için yapılandırılabilir.

Platform, her kullanıcının özelliklerine uyum sağlayabilmesi için bir Eklenti Depolama ve Bir Bağlı Depolama Yöneticisi ile donatılmıştır.

Plug-in Storage bir batarya depolama sistemi sürücüsüdür. Lityum, kurşun ve ZEBRA gibi tüm batarya entegre teknolojileri için kullanılabilir. Kısa süreli dinamiği bir zamanlama yazılımı olan Connected Storage Manager'ı kullanarak yönetir.

Connected Storage Manager, harici olaylara (üretim ve tüketim varyasyonu, elektrik tarifi, vb.) dayalı olarak depolama sisteminin dinamik kontrolünü optimize eder.

3.9.21. Energy Storage Toolbox

Almanya merkezli bir şirket olan dSPACE;-bataryaları, süper kapasitörleri ve diğer enerji depolama cihazlarını tasarım ve soğutma sistemlerine göre simüle etmeyi ve test etmeyi sağlar. Mühendisler çok çeşitli yapılandırma seçenekleri sunar. Örneğin lityum iyon bataryalar söz konusu olduğunda, bu seçenekler arasında batarya teknolojisi ve şekli, depolama hücrelerinin sayısı ve düzeni, kablo topolojileri ve soğutma sistemleri bulunur.

Bu yapılandırmalar hem hücre düzeyinde hem de sistem düzeyinde simüle edilmiş bir bataryanın termal ve elektriksel tepkisini hesaplamak için kullanılır. Termal etkileri yerel çözünürlükle simüle ederek geliştiricilerin farklı soğutma stratejilerini analiz etmelerine ve belirli bir tasarımdaki potansiyel sıcak noktaları belirlemelerine olanak tanır.

3.9.22. SIMES

SIMES, hibrit elektrik enerji depolama sistemleri için C++ kullanılarak uygulanan bir simulatördür. Bu yazılım, çeşitli depolama elemanlarının, güç dönüştürücülerin, şarj transfer ara bağlantı şemalarının vb. temel özelliklerini açıklar. SIMES, Lityum-iyon (Li-ion) bataryalar, kurşun-asit bataryalar veya büyük kapasitelerden oluşan süper kapasitörler gibi sistemler için simülasyon gerçekleştirir. SIMES bir ev uygulaması çalışmasında uygulanmıştır. Bu uygulamada SIMES, şebekeye bağlı bir sisteminin verimliliğini belirlemek için karlılığını belirlemek amacıyla kullanılmıştır.

3.9.23. EnergyPlus Simulation Software

EnergyPlus, mühendislerin ve araştırmacıların hem ısıtma, soğutma, havalandırma, aydınlatma ve proses yükleri için enerji tüketimini ve binalarda su kullanımını modellemek için kullandıkları bina enerji simülasyon programıdır.

EnergyPlus'ın özelliklerinden bazıları şunlardır:

- Termal bölge koşullarının ve havalandırma sistemlerinin, sistem yanıtının entegre, eşzamanlı çözümü.
- Yüzey sıcaklıkları, termal konfor ve yoğuşma hesapları üreten radyant ve konvektif etkilerin ısı dengesi temelli çözümü.
- Bölgeler arasındaki hava hareketini açıklayan kombine ısı ve kütle aktarım modeli.

- Kontrol edilebilir pencere panjurları, elektrokromik camlar ve pencere camları tarafından emilen güneş enerjisini hesaplayan katman katman ısı dengeleri içeren gelişmiş fenestrasyon modelleri.
- Görsel konfor ve sürüş aydınlatma kontrollerini bildirmek için parlaklık ve parlama hesapları.
- Hem standart hem de yeni sistem yapılandırmalarını destekleyen bileşen tabanlı havalandırma sistemleri.
- Summary standart özet ve ayrıntılı çıktı raporlarının yanı sıra, yıllık enerji kaynağı çarpanları ile yılıktan altı saate kadar seçilebilir zaman çözünürlüğüne sahip kullanıcı tanımlı raporlar.

Tablo 3.2. Simülasyon programlarının kullanım amaçlarına göre sınıflandırılması (Niederhäuser ve Rouge, 2017).

Serbest Araçlar		Standart Ticari Sistem Simülatörleri		
RETScreen	byt.	Simplorer (APL)		
HOMER	sim./byt.	PowerSim	arş.	
Hybrid2	sim./byt.	MATLAB/Simulink	arş.	
Vipor*	tas.	Dymola	arş.	
Jpèlec*	tas.	PowerFactory	arş.	
Ticari Araçlar		Dahili Araçlar		
Off Grid Pro	byt.	Off Grid Sizer	byt.	Conergy
PVSyst	sim./byt.	Sunny Island Design	byt.	SMA
Pv*SOL	sim./byt.	PVS	sim./byt.	ISE
Solar Pro	sim.	TALCO	arş.	ISE
		Dymola	arş.	ISE
		MATLAB/Simulink/PVToolbox	arş.	Canmet
		MATLAB/Simulink Hysis	arş.	CIEMAT
		MATLAB/Simulink N.N.	arş.	ISET
		PowerFactory Tool Box	arş.	ISET

(byt: Boyutlandırma Aracı, tas: Küçük Ölçekli Şebeke Tasarım Aracı, sim: Simülasyon Aracı, arş: Araştırma Aracı)

4.SABİT VE GÜNEŞ TAKİPLİ FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN SİMÜLASYONU

Bu tezde hem sabit hem de güneş takipli 4 farklı sistem tasarımı ve karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Bu sistemlerden sabit ve güneş takipli olmak üzere 2 tanesi Denizli ili Çameli ilçesinde, diğer 2 tanesi ise Van ili Özalp ilçesinde kurulumu tasarlanmıştır.

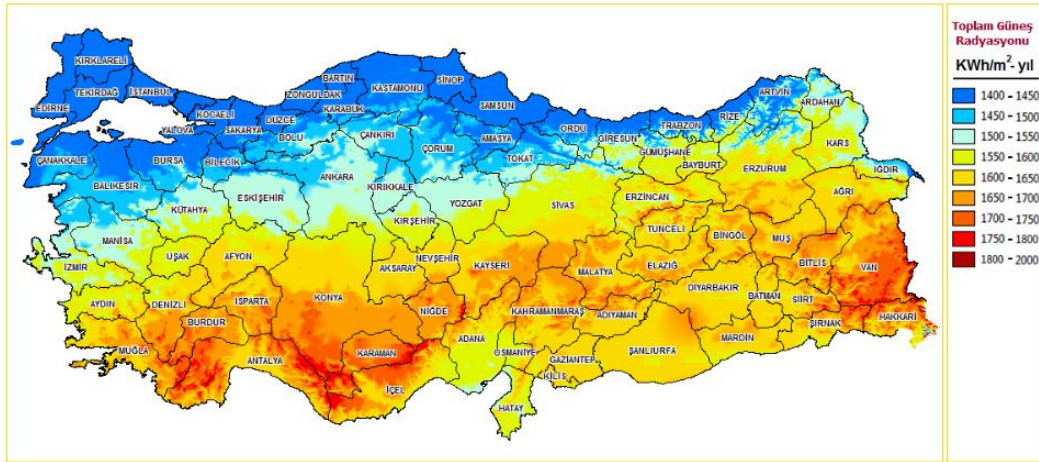
Çalışmanın bir amacı sabit ve güneş takipli sistemlerin karşılaştırılması iken bir diğer amacı ise hem sabit hem de güneş takipli sistemlerin benzer güneşlenme potansiyeline sahip iki ilçede kurulumu tasarlanarak, yükselti ve bölgenin faydalı enerji üretimi ve sistem verimi açısından karşılaştırılmasını sağlamaktır.

4.1. Sabit ve Güneş takipli Sistem Tasarımı

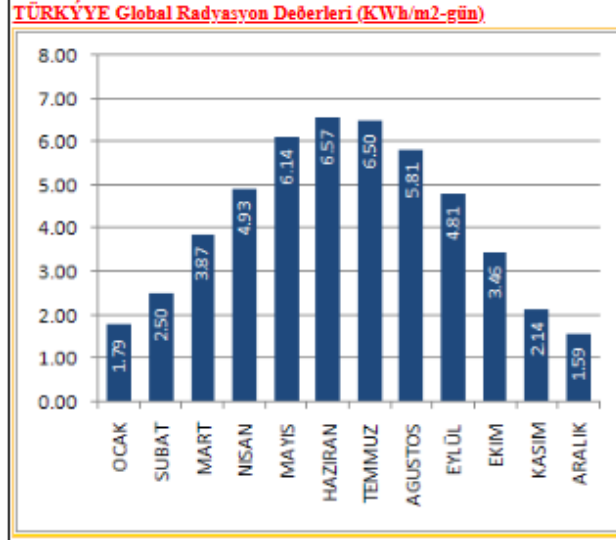
Bu çalışmada iki sabit fotovoltaik sistem, iki güneş takipli sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir.

4.1.1. Coğrafi Konum ve Meteorolojik Verilerin Belirlenmesi

Fotovoltaik sistem tasarımı yapılmadan önce hangi illerde kurulum yapılacağına karar verilmesi gerekmektedir. Çalışmanın amacına uygun iki il belirlemek için Güneş Enerji Potansiyeli Atlası (GEPA) kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Türkiye güneş potansiyeli haritası (URL-2)



Şekil 4.2. Türkiye global radyasyon değerleri (URL-2)

Şekil 4.1’de yer alan Türkiye Güneş Potansiyeli Haritası kullanılarak güneş radyasyonu yüksek, güneş enerjisi potansiyeli yüksek iki il seçimi gerçekleştirilmiştir.

İki ilin de güneş enerji potansiyeli yüksek ve birbirine yakın olmalı aynı zamanda yükselti ve bölge farkı göz önünde bulundurularak bir karşılaştırma yapılacağı için de farklı yükselti ve farklı bölgede yer alması gerekmektedir.

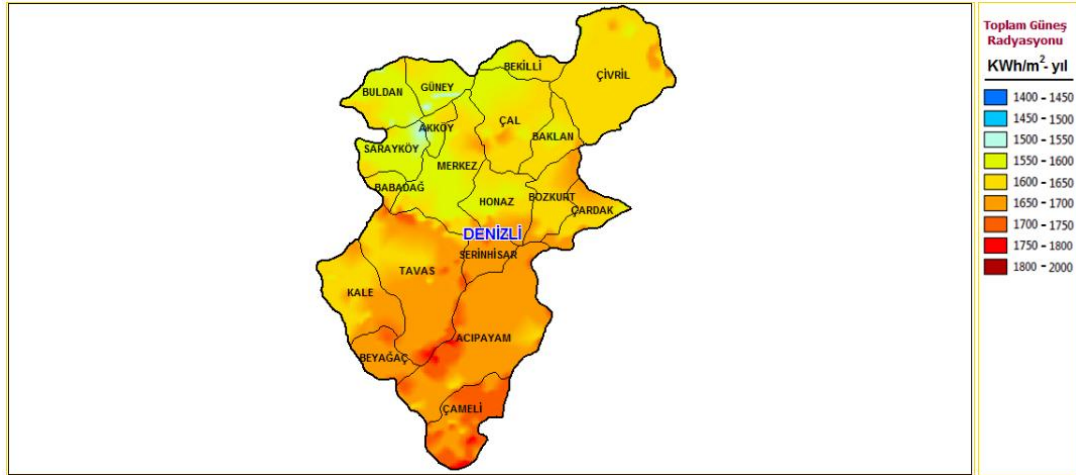
Bu nedenle ilk il olarak Denizli ili Çameli ilçesi seçilmiştir.



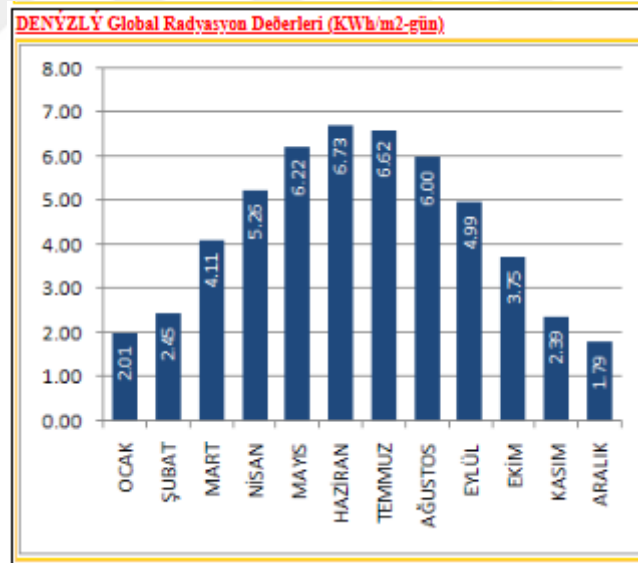
Şekil 4.3. Denizli ili haritası (URL-4)

Şekil 4.3'te paylaşıldığı üzere Çameli ilçesi, Denizli ilinin en güneyinde yer alan 7°3'52.17" K enlemi ve 29°20'50.02" D boylamına sahip, 1325 m rakıma sahip ilçesidir.

Çameli ilçesine ait güneş enerji potansiyeline bakmak için ise Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) kullanılarak ikinci il seçimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.4. Çameli güneş enerji potansiyeli atlası (URL-5)



Şekil 4.5. Çameli ilçesi global radyasyon değerleri (URL-5)

Şekil 4.5'te Çameli ilçesi güneşlenme potansiyeli ay bazında ortalama kWh/m²-gün olarak paylaşılmıştır. Bu değerler Çameli ilçesinin Türkiye'nin ortalama güneşlenme potansiyelinden yüksek bir güneşlenme potansiyeli olduğunu göstermektedir.

İkinci il seçimi yapılırken Çameli ilçesinin özellikleri göz önünde bulundurulmuştur. Çameli ilçesinin güneşlenme potansiyeli kadar yüksek, ancak aynı bölgede ve aynı yükseltide olmayan bir başka il seçimi gerçekleştirilmiştir.

Tüm bu kriterler göz önünde bulundurularak ikinci il olarak Van ili Özalp ilçesi seçilmiştir.



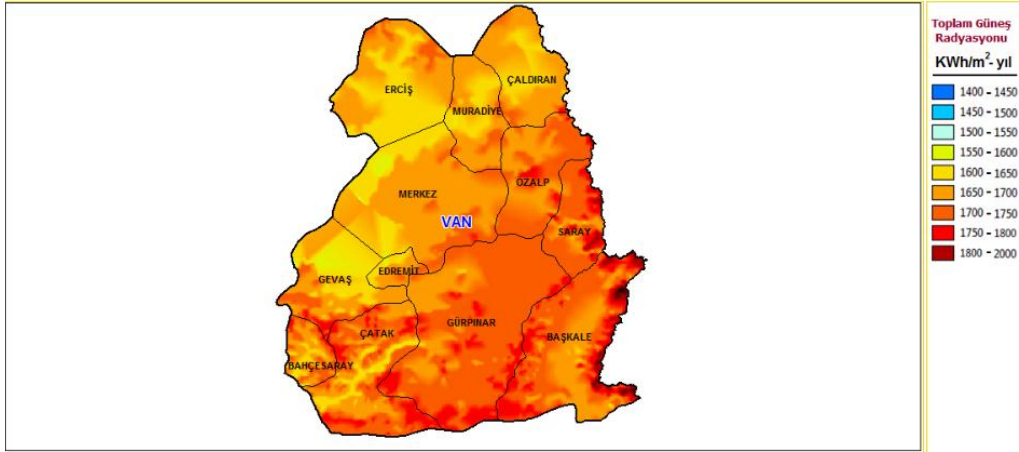
Şekil 4.6. Van ili haritası (URL-6)

Şekil 4.6’da paylaşıldığı üzere Özalp ilçesi, Van ilinin doğu ilçeleri arasında yer alan, 38.658299” K enlemi ve 43.989296” D boylamına sahip, 2100 m rakıma sahip ilçesidir.

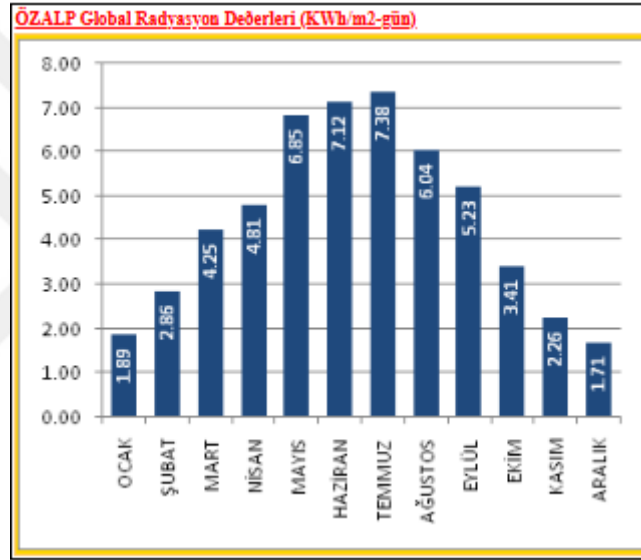
Özalp ilçesine ait güneş enerji potansiyeline bakmak için Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) kullanılmıştır.

Şekil 4.7’de Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA)’dan alınmış Özalp ilçesine ait güneş enerji potansiyeli haritası yer almaktadır.

Şekil 4.4 ve Şekil 4.7 karşılaştırıldığında, bu tez çalışması için her iki ilde de güneş enerji potansiyeli birbirine en yakın ilçeler tercih edildiği gözlemlenmektedir.



Şekil 4.7. Özalp güneş enerji potansiyeli atlası (URL-7)



Şekil 4.8. Özalp ilçesi global radyasyon değerleri (URL-7)

Şekil 4.8’de Özalp ilçesi güneşlenme potansiyeli ay bazında ortalama kWh/m²-gün olarak paylaşılmıştır. Bu değerler Özalp ilçesinin Türkiye’nin ortalama güneşlenme potansiyelinden yüksek bir güneşlenme potansiyeli olduğunu göstermektedir

Hem sabit hem de güneş takipli sistemlerin kurulacağı iki il ve kurulum tasarımının gerçekleştirileceği ilçelerin seçimi bu şekilde tamamlanmıştır.

PVsyst programı kullanılarak bu ilçelerde, sabit ve güneş takipli sistem tasarımı yapılmıştır. İlçelerin koordinatları kullanılarak PVsyst programından bu ilçelere ait meteorolojik veriler seçilmiştir.

PVsyst programı meteorolojik verilerine 20'den fazla farklı veritabanı kullanarak erişim sağlamaktadır. Bu çalışmada meteorolojik veriler için PVsyst programının kendi arayüzünde yer alan Meteonorm kullanılmıştır.

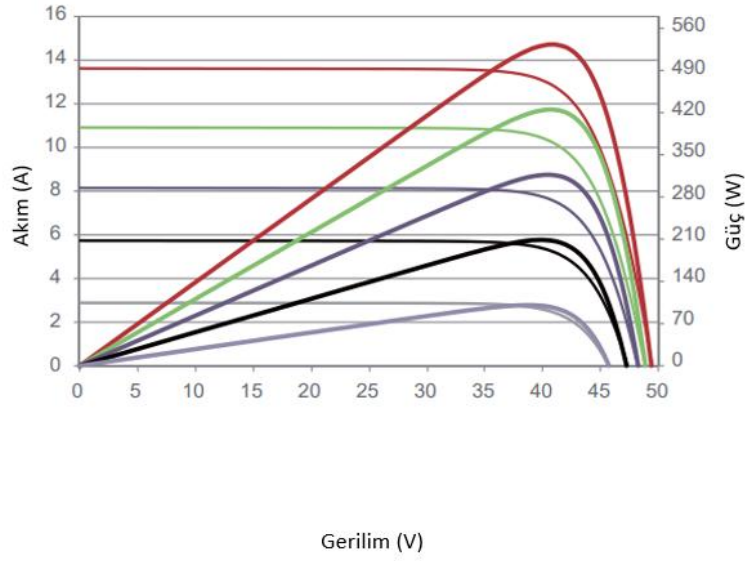
4.1.2. Fotovoltaik Panel Seçimi ve Standartları

Bu çalışmada, 1116 kWp güç üretebilecek şekilde güneş enerji santrali kurulumu analizi gerçekleştirilmiştir. Sistemde 2048 adet 545 Wp birim gücünde Jinkosolar marka JKM545M-72HL4-TV model güneş paneli kullanılmaktadır.

Tablo 4.1'de tasarımda kullanılan panelin katalog bilgisi ve PVsyst programından alınan sistem özellikleri verilmektedir.

Tablo 4.1. Panelin katalog bilgisi (URL-8)

Özellik	Standart Test Koşullarında (STC)	Nominal Çalışma Hücre Sıcaklığında (NOCT)
Maksimum Güç (P _{max})	545 Wp	405 Wp
Maksimum Güç Voltajı (V _{mp})	41.87 V	38.18 V
Maksimum Güç Akımı (I _{mp})	13.27 A	10.62 A
Açık Devre Voltajı (V _{oc})	49.65 V	46.86 V
Kısa Devre Akımı (I _{sc})	13.94 A	11.26 A
Modül Verimliliği (STC, %)	21.13%	
Çalışma Sıcaklığı (°C)	-40°C ile +85°C arası	
Maksimum Sistem Voltajı	1500VDC (IEC)	
Maksimum Seri Sigorta Akımı	30 A	
Güç Toleransı	0~+3%	
P _{max} Sıcaklık Katsayısı	-0.35%/°C	
V _{oc} Sıcaklık Katsayısı	-0.28%/°C	
I _{sc} Sıcaklık Katsayısı	0.048%/°C	
Nominal Çalışma Hücre Sıcaklığı (NOCT)	45±2°C	
Bifacial Faktör (Çift Yüzlü Panel Faktörü)	70±5%	
Bifacial (Çift Yüzlü) Panel Katkısı (%)	Maksimum Güç (P_{max}, Wp)	Modül Verimliliği (STC, %)
5%	572 Wp	22.19%
15%	623 Wp	24.30%
25%	681 Wp	26.42%



Şekil 4.9. Panelin akım-gerilim ve güç-gerilim grafiği (URL-8)

Şekil 4.9'da fotovoltaik panelin akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristikleri gösterilmektedir. Bu tür grafiklerde panelin ürettiği akım (I) ve güç (P), gerilim (V) ile olan ilişkisine göre analiz edilmektedir.

Şekil 4.9'da yer alan grafiğe göre akım ilk etapta sabit kalırken, gerilim artmakta ve belirli bir noktaya kadar yükselmektedir. Bu noktadan sonra hem akım hem de gerilim hızla düşmeye başlamaktadır. Akım ve gerilimin kesiştiği en yüksek güç noktasına "Maksimum Güç Noktası" (MGN) denir.

Tablo 4.2. Panelin teknik özellikleri

PV modül	
Üretici	Jinkosolar
Model	JKM-545M-72HL4-TV
(Orijinal PVsyst veritabanı)	
Birim gücü	545 Wp
PV modül sayısı	2048 adet
Nominal (STC)	1116 kWp
Modül	128 Zincir x 16 Seri
İşletme şartlarında (50°C)	
Pmpp	1018 kWp
U mpp	599 V
I mpp	1700 A
Total PV gücü	
Nominal (STC)	1116 kWp
Toplam	2048 modül
Panel yüzeyi	5281 m ²

Lisanssız enerji üretimi gerçekleştirecek güneş enerjisi santralleri için “Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği” bulunmaktadır (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2024).

PVsyst programı kullanılarak gerçekleştirecek olan sistem tasarımlarından gerçekçi bir sonuç elde etmek için ilgili yönetmelik dikkate alınarak panel seçimi yapılmıştır. Tercih edilen panel, kolay ulaşılabilir olması nedeniyle santral uygulamalarında oldukça yaygın kullanılmaktadır. Tablo 4.2’de panelin teknik özellikleri verilmektedir.

İlgili yönetmelik kapsamında, lisanssız santral kurulumunda kullanılacak panellerin IEC 61730-61215 sertifika belgelerine ve CE sertifikasına sahip olması gerekmektedir. Tercih ettiğimiz paneller bu şartları sağlamaktadır.

Panellerin sahip olması gereken standartlar aşağıdaki gibidir;

- IEC 61730 –Modüllerin güvenlik yeterliliği standardı.
- IEC 61215- Kristal yapılı modüllerde tasarım yeterliliğini ve tip onayı standardı.

4.1.3. Evirici Seçimi ve Standartları

Bu çalışmada, 1116 kWp güç üretebilecek şekilde hem sabit hem de güneş takipli güneş enerji santrali kurulumu analizi gerçekleştirilmiştir. Her iki fotovoltaiik sistem tasarımı da 8 adet 125 kW_{ac} birim gücünde Huawei Technologies marka evirici kullanılmaktadır.

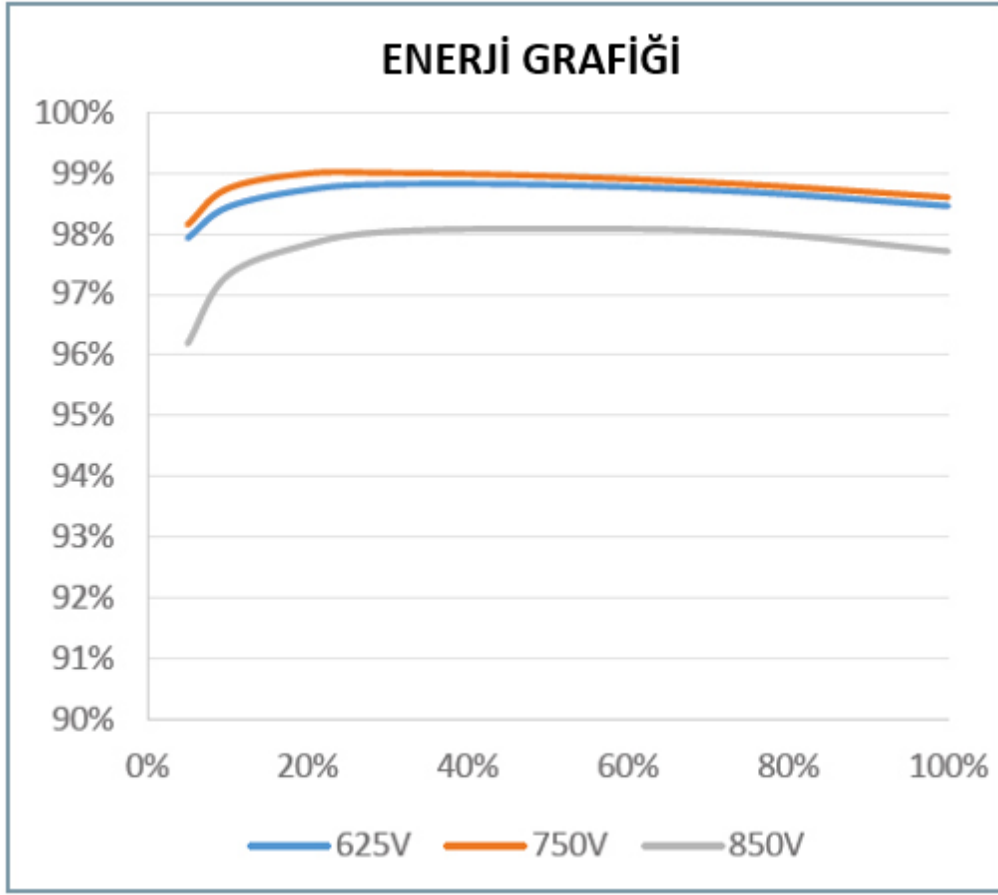
Santralden faydalı enerji üretebilmek için kullanılan eviricilerin sistem ile uyumlu olması gerekmektedir. Uyum belirli kriterlere göre değerlendirilmektedir.

Eviricinin elektromanyetik uyumluluğunun olması, şebekeye sinüs şeklinde alternatif akım göndermesi ve bu akımın harmonikler bakımından yönetmeliklerde belirtilen belli sınırlar içerisinde olması olarak sayabiliriz. Çalışırken şebekedeki frekans ve gerilim değerlerine göre kendi evirici frekans ve gerilim değerlerini ayarlaması gerekir. Eviricilerin en önemli emniyet kriteri adalanma özelliğidir. Şebekede enerji kesilmesi durumunda evirici kendini kapatır ve elektrik çarpma riskini ortadan kaldırır (Etçi, 2022).

Tablo 4.3’de tasarımda kullanılan eviricinin katalog bilgisi ve PVsyst programından alınan sistem özellikleri verilmektedir.

Tablo 4.3. Evirici katalog bilgisi (URL-9)

Teknik Özellikler	SUN2000-125KTL-M0
Maks. Yeterlik	99,00%
Çin Verimliliği	98,30%
Giriş	
Maks. Giriş Gerilimi	1100V
Maks. MPPT Başına Akım	26A
Maks. MPPT Başına Kısa Devre Akımı	40A
Başlatma Voltajı	750V
MPPT Çalışma Voltajı Aralığı	200V-1000V
Nominal Giriş Voltajı	1080V
Giriş Sayısı	20
MPPT İzleyici Sayısı	10
Çıkış	
Nominal AC Aktif Güç	125.000W
Maks. AC Görünür Güç	137.500VA
Maks. AC Aktif Güç	137.500W
Nominal Çıkış Voltajı	3×288V/500V, 3W+PE
Nominal AC Şebeke Frekansı	50 Hz
Nominal Çıkış Akımı	144.4A
Maks. Çıkış Akımı	160.4A
Ayarlanabilir Güç Faktörü Aralığı	0,8 önde ... 0,8 geride
Maks. Toplam Harmonik Bozulma	3%
Korumalar	
Giriş Tarafı Bağlantı Kesme Cihazı	Evet
Adalanmaya Karşı Koruma	Evet
AC Aşırı Akım Koruması	Evet
DC Ters Polarite Koruması	Evet
PV Dizisi Dizi Arıza İzleme	Evet
DC Parafudr	Tip II
AC Parafudr	Tip II
DC İzolasyon Direnci Tespiti	Evet
Kaçak Akım İzleme Ünitesi	Evet
İletişim	
Görüntüleme	LED Göstergeler, Bluetooth + APP
USB	Evet
RS485	Evet
Güç Hattı İletişimi (PLC)	Evet
Genel Veri	
Boyutlar (G × Y × D) (montaj plakası dahil)	1035×700×385 mm
Ağırlık (montaj plakasıyla birlikte)	85 kilo
Çalışma Sıcaklığı Aralığı	-25 ~ +60 °C (-13 °F ~ 140 °F)
Soğutma	Doğal konveksiyon
Çalışma Yüksekliği	5.000 m (~4.000M güç kaybı)
Bağıl Çalışma Nemi	%0 bağıl nem ~ %100 bağıl nem
Giriş Terminali	Amfenol HH4
Çıkış Terminali	Uzatma Terminali
Koruma Derecesi	IP66



Şekil 4.10. Evirici verim grafiği (URL-9)

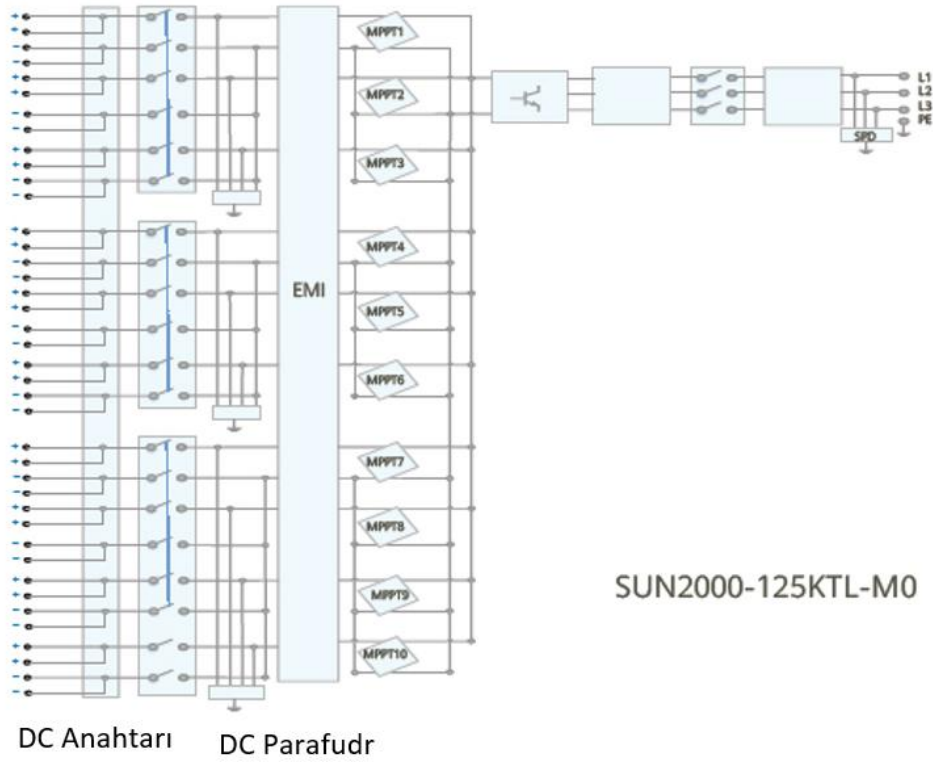
Şekil 4.10'da 625V, 750V ve 850V giriş gerilimlerine göre sistemin verimliliği gösterilmektedir. Grafikte farklı gerilim değerlerinde verim değişimleri şu şekilde özetlenebilir:

- 625V ve 750V: Her iki gerilimde de verim %98-99 seviyesindedir, bu da oldukça yüksek bir verim oranına işaret etmektedir. 750V, 625V'den biraz daha yüksek verim sağlamakta, ancak ikisi de benzer verimlilik seviyelerine sahiptir.
- 850V: Bu gerilimde verim %97-98 seviyelerine düşmektedir. Daha yüksek gerilimde verimlilik biraz azalmakta, ancak yine de oldukça iyi bir seviyede kalmaktadır.

Genel olarak, farklı gerilim aralıklarında sistemin yüksek verimlilik sağladığı, özellikle 625V ve 750V seviyelerinde en verimli performansın elde edildiği söylenebilir.

Şekil 4.11'de eviriciye ait blok devre şeması gösterilmektedir.

Devre Blok Şeması



Şekil 4.11. Evirici devre blok şeması (URL-9)

Tablo 4.4. Eviricinin teknik özellikleri

İnvertör

Üretici	Huawei Technologies
Model	SUN2000-125KTL-M0
(Orijinal PVsyst veritabanı)	
Birim gücü	125 kWac
İnvertör sayısı	8 adet
Toplam güç	1000 kWac
Çalışma gerilimi	200-1000 V
Maks güç ($\Rightarrow 30^{\circ}\text{C}$)	138 kWac
Nom. güç oranı (DC:AC)	1.12

İnvertör toplam gücü

Toplam güç	1000 kWac
İnvertör sayısı	8 adet
Nom. güç oranı	1.12

Sistem tasarımı gerçekleştirilirken evirici yüklenme oranı 1.12 olarak seçilmiştir. Evirici bu yüklenme oranına izin verecek şekilde tercih edilmiş olup, PVsyst programı çıktıları bu yüklenme oranının tasarlanan 1116 kWp güç üretecek fotovoltaik sistem için uygun olduğunu göstermektedir.

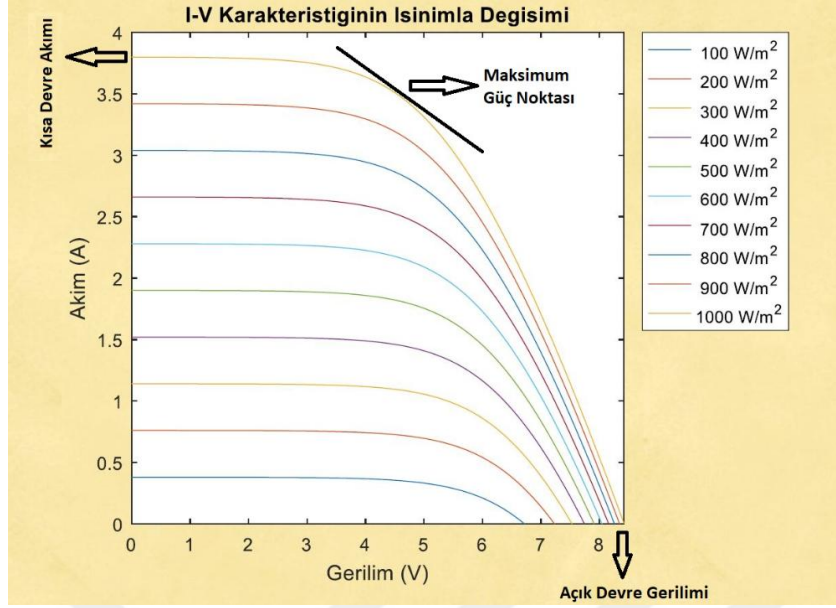
Eviricilerin sahip olması gereken uluslararası standartlar aşağıdaki gibidir;

- IEC 62109-1-IEC 62109-2: Bu standart eviricilerin güvenlik gereksinimlerini karşılaması ile ilgilidir.
- IEC 61000-6-1- IEC 61000-6-2- IEC 61000-6-3- IEC 61000-6-4: Eviricilerin elektromanyetik uyumluluk ilgili standartlardır.
- IEC 61000-3-2: Faz akımı 16 A'den küçük olan cihazlar için bağlantı kurallarını harmonik standartlarını kapsar.
- IEC 61000-3-12: Faz akımı 16 A'den büyük cihazlar için bağlantı kurallarını harmonik standartlarını kapsar.
- IEC 61727: Şebekeye AG seviyesinden bağlı cihazlar için şebekeye bağlantı gereksinimlerini karşılamasını kapsar.
- EN 50438 (EN 50549-2019): AG seviyesinden bağlı cihazların şebekeyle paralel çalışma için kuralları içerir.

4.1.4. Fotovoltaik Sistem ve MGNİ Algoritmaları

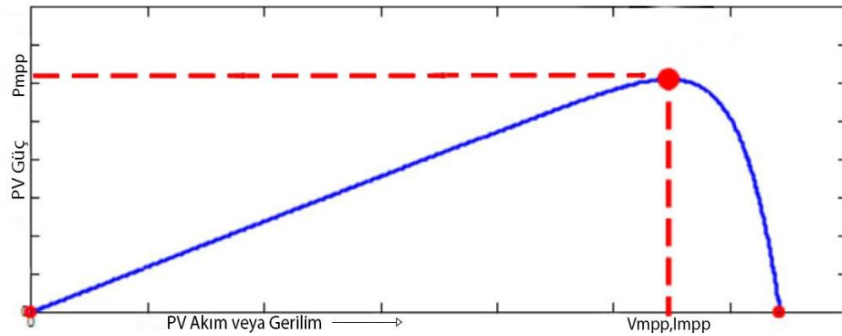
Güneş panelleri fotovoltatik sistemde temel enerji dönüşüm elemanıdır. Fotovoltaik sistemin enerji verimliliği, güneş ışığını alma seviyesi, paneli oluşturan hücrelerin gövde sıcaklığı ve yüklenme durumu gibi faktörlere bağlıdır.

Şekil 4.12'de görüldüğü gibi fotovoltaik panel karakteristiği I-V karakteristiği olarak tanımlanmıştır. Güneş ışığı şiddeti Watt/m^2 olarak ifade edilmektedir. Karakteristik üzerindeki önemli noktalar; birinci nokta kısa devre akımı I_{SC} ve ikinci nokta açık devre gerilimi V_{OC} 'dir. Bu iki noktada FV panel gücü sıfırdır. Sistemin maksimum güç noktası, I-V karakteristik eğrisinde eğimin sıfır olduğu noktadır. Bu noktadaki akım ve gerilim değerleri maksimum güç değerini oluşturmaktadır.



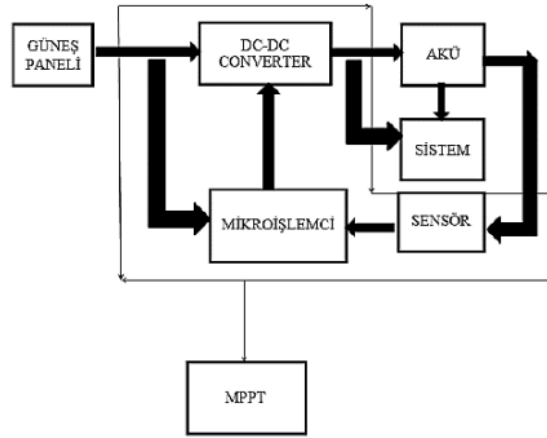
Şekil 4.12. Fotovoltaik panel karakteristiği

Maksimum güç noktası izleme (MGNI) tekniği, fiziksel hareket sağlayan donanım veya mekanik yapı olmayıp, fotovoltaik sistemin gerilim ve akım değerlerini izleyen ve bir algoritma yapısı ile çıkış gerilimini kontrol eden elektronik bir donanımdır. Günümüzde yarı iletken üreticileri elektronik donanımsal MGNI kontrolü sağlayan dijital ve analog yapıdan oluşan tüm devre yapılar üretmeye başlamıştır. Şekil 4.13'te gösterilen FV karakteristik eğrisi eğiminin sıfır olduğu $dP/dV=0$ veya $dP/dI=0$ noktaları maksimum güç noktası (MGN) olarak tanımlanır. Maksimum güç noktasının güç, gerilim veya akım eksenlerine iz düşümleri, $P_{MPP(MGN)}$, $V_{MPP(MGN)}$ ve $I_{MPP(MGN)}$ değerlerini ifade eder.



Şekil 4.13. Maksimum güç noktasının güç, gerilim veya akım eksenlerine iz düşümleri

MGNI güneş panellerinden elde edilen güçten maksimum düzeyde faydalanmak için kullanılan bir elektronik devre yapısıdır. MGNI'nin blok diyagramı Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



Şekil 4.14. MGNİ blok diyagramı

FV sistem için seçilecek olan eviriciler şebeke parametrelerini baz alarak panellerde üretilen enerjiyi yüksek verimde çevrimini gerçekleştirip uzun süreler çalışmaya uygun olmalıdır. Eviricinin sahip olduğu MGNİ özelliği ile panelin değişken gerilim-akım çarpımı sürekli maksimum düzeyde tutarak, güç çıkışını maksimize edecektir. Bu noktada FV sistemler için uygun evirici seçimi oldukça önem kazanmaktadır.

Güneş enerjisi sistemlerinde kullanılan evirici çeşitleri, şebeke bağlantılı ve şebekeden bağımsız olarak ikiye ayrılabilir. Şebeke bağlantılı eviriciler şebekenin gerilim seviyesi ve frekansına göre enerji beslemesini enterkonnekte sisteme vermektedir. Şebekeden bağımsız eviriciler ise akü grupları ile tüketici arasında güç çevrimini gerçekleştirmektedir. Şebeke bağlantılı eviriciler uygulama alanlarına göre dizi ve merkezi olarak sınıflandırılabilirler.

Evirici seçiminde 3 temel seçim kriteri ön plana çıkmaktadır;

- 1) Kurulacak fotovoltaik sistemin gücü
- 2) Kurulum gerçekleştirilecek alanın durumu
- 3) Fotovoltaik sistemin hangi bölgede kurulacağı

Bu kriterlere bağlı olarak aşağıda güç ve gerilim aralıkları verilen dizi ve merkezi eviriciler seçilmektedir.

Tablo 4.5'te verilen evirici güç ve gerilim değerleri çok özet olup sistem gereksinimlerine uygun farklı güçlerde birçok evirici üretilmektedir (Bakıcı).

Tablo 4.5. Evirici güç ve gerilim değerleri

	Dizi Evirici	Merkezi Evirici
Güç Aralıkları	2-33 kW	100-2000 kW
AA Gerilim Aralıkları	230-400V	350-400-690 V

4.1.5. Fotovoltaik Panelin Eğim Açısı ve Azimut Açısının Belirlenmesi

Eğim açısı ve azimut açısı, fotovoltaik (FV) sistemlerin verimliliğini etkileyen temel faktörlerden biridir. Bu açıların doğru belirlenmesi, sistemin maksimum enerji üretimini sağlaması açısından kritiktir.

Eğim açısı, FV panellerinin yatay düzleme göre olan eğim açısını ifade eder. Bu açının doğru belirlenmesi, güneş ışınlarının panele maksimum derecede dik açıyla gelmesini sağlar, böylece enerji üretimi artar.

- Coğrafi Koşulların Etkisi: Eğim açısı, bulunduğunuz bölgenin enlemine göre değişir. Genel bir kural olarak, FV panelleri için en uygun eğim açısı, bulunduğunuz yerin enlemine eşittir. Örneğin, 40° enleminde bulunan bir şehirde, panelin eğim açısı da yaklaşık 40° olabilir.
- Sezonluk Ayarlamalar: Bazı durumlarda eğim açısı yılın farklı zamanlarında değiştirilebilir. Kış aylarında güneş ışınları daha yatay geldiği için panel eğim açısını artırmak, yaz aylarında ise daha düşürmek üretimi optimize edebilir.

Sezonluk ayarlamalar sabit sistemler için mümkün olmadığı için, sabit sistemler için yıl boyunca optimum performans sağlayacak bir ortalama eğim açısı seçmek mantıklıdır. Güneş takipli sistemlerde bu açı, sistemin motorlu yapısıyla sürekli ayarlanabilir olduğundan, statik bir açı seçmeye gerek yoktur. Ancak maliyet ve mekanik karmaşıklıklar göz önüne alınmalıdır.

Bu çalışmada hem sabit hem de güneş takipli sistem tasarımı yapıldığı için PVsyst programı kullanarak her ikisi için de optimum olan eğim açısı seçilmiştir.

Azimut açısı, FV panelinin yatay düzlemde kuzeye göre olan yönünü ifade eder. Azimut açısı, panelin hangi yöne bakacağını belirler ve genellikle güneşin en fazla görüldüğü yön seçilir.

- Kuzey Yarımküre: Kuzey yarımkürede azimut açısı genellikle güneye doğru ayarlanır (180° azimut açısı). Çünkü güneş, kuzey yarımkürede güneyden yükselir ve batar.
- Doğu-Batı Farklılıkları: Eğer sistem sabah saatlerinde daha fazla enerji üretmesini isteniyorsa doğuya yönlendirme (azimut açısı doğuya kaydırılır), akşam saatlerinde ise batıya yönlendirme yapılabilir. Ancak bu yönlendirmeler, toplam enerji üretimini azaltabilir çünkü güneş ışınları daha az doğrudan gelir.

Eğim ve Azimut Açılarını Belirlemede İzlenecek Adımlar:

1. Coğrafi Bilgilerin Kullanılması: Projelendirme yapılan şehirlerin enlem ve boylam değerleri ile eğim ve azimut açısı alınabilir.
2. Yıl Boyunca Performans Simülasyonu: Farklı eğim ve azimut açılarında sistemin yıllık enerji üretim performansı simüle edilip, optimum açılar belirlenebilir.
3. Gölgeleme ve Yerel Koşullar: Binalar, ağaçlar ve diğer engeller dikkate alınarak eğim ve azimut açısında düzeltmeler yapılabilir. Gölgeleme, enerji üretimini ciddi şekilde etkileyebilir.
4. İklim Verileri: Güneşlenme süreleri, bölgenin iklim koşulları (bulutluluk, sıcaklık) eğim açısının ve azimut açısının belirlenmesinde önemli faktörlerdir.

Bu çalışmada PVsyst programı kullanılarak hem sabit sistem için hem de güneş takipli sistem için optimum azimut açısı baz alınarak hesaplama gerçekleştirilmiştir.

4.1.6. PVsyst Programı Kullanılarak Sistem Modellemesi

Bu çalışmada PVsyst 7.2. programı kullanılarak hem sabit hem de güneş takipli sistem tasarımı iki farklı şehirde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak Denizli ili Çameli ilçesinde hem sabit hem de güneş takipli fotovoltaik sistem tasarımı yapılmış, ardından Van ili Özalp ilçesinde hem sabit hem de güneş takipli fotovoltaik sistem tasarımı yapılmıştır.

PVsyst 7.2, güneş enerjisi sistemlerinin tasarımı, modellemesi ve simülasyonu için kullanılan güçlü bir yazılımdır. Araştırmacılar, mühendisler ve danışmanlar tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Program, fotovoltaik (FV) sistemlerinin performansını analiz etme, boyutlandırma ve optimizasyon süreçlerinde önemli bir rol oynar.

Gelişmiş modelleme yetenekleri sayesinde, sistem konfigürasyonlarının oluşturulmasına ve farklı koşullarda performanslarının analiz edilmesine olanak tanır. PVsyst dünya genelinde birçok konum için güneşlenme ve iklim verilerine erişim sağlar. Kullanıcılar bu verileri kullanarak, sistemlerini belirli bir coğrafi konumda nasıl çalışacaklarını simüle edebilirler. Bu sayede, iklim değişkenleri ve coğrafi faktörler göz önünde bulundurularak sistemin enerji üretimi optimize edilir.

PVsyst, kullanıcıların fotovoltaik sistemlerinin yıllık enerji üretim tahminlerini yapmasına olanak tanır. Program, sistem kayıplarını (örn. gölge kayıpları, sıcaklık etkileri, kablolama kayıpları vb.) hesaba katarak gerçekçi üretim senaryoları oluşturur. Bu simülasyonlar, yatırımcıların ve mühendislerin proje maliyetlerini ve geri dönüş sürelerini tahmin etmelerine yardımcı olur.

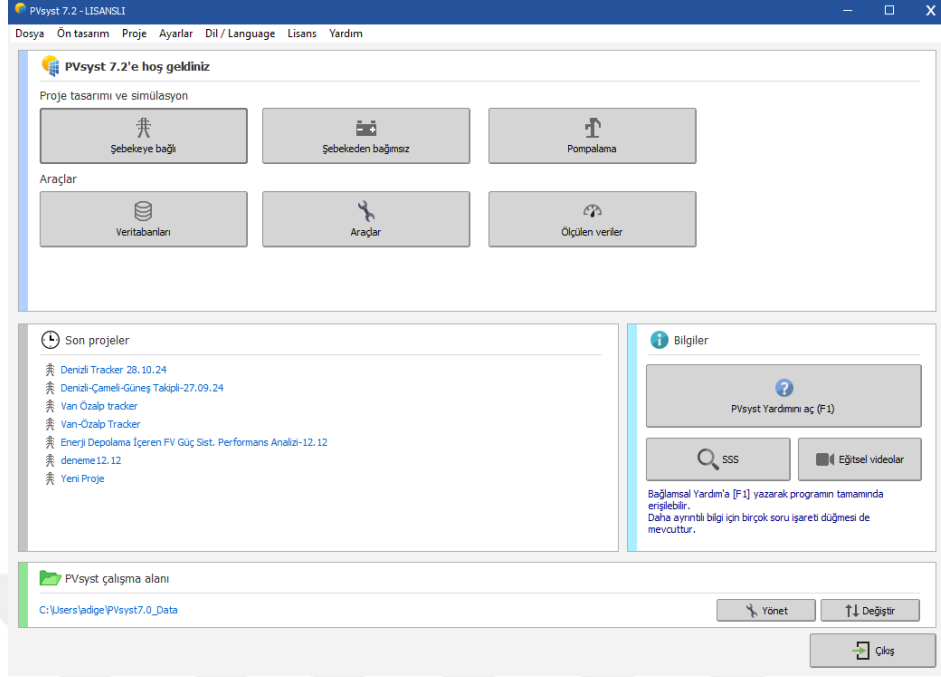
PVsyst, geniş bir bileşen veri tabanı sunar. Bu veri tabanı, güneş panelleri, eviriciler, depolama sistemleri ve diğer donanım bileşenlerinin bilgilerini içerir. Kullanıcılar bu veritabanındaki bileşenleri projelerine entegre ederek, sistemlerini gerçeğe en yakın şekilde modelleyebilirler.

PVsyst, sistem kayıplarını ayrıntılı bir şekilde analiz eder. Gölgeleme, tozlanma, panel sıcaklıkları, panel yerleşim açısı gibi birçok faktör dikkate alınarak sistemin verimliliği hesaplanır. Bu analizler, sistemin performansını optimize etmek için önemli bilgiler sunar.

Program, kullanıcıların simülasyon sonuçlarını detaylı raporlar halinde sunmalarına imkan tanır. Bu raporlar, sistem performansına dair genel bir bakış, enerji üretim tahminleri ve yatırım geri dönüşü gibi bilgileri içerir. Yatırımcılar ve proje geliştiriciler bu raporları kullanarak projelerini değerlendirebilir.

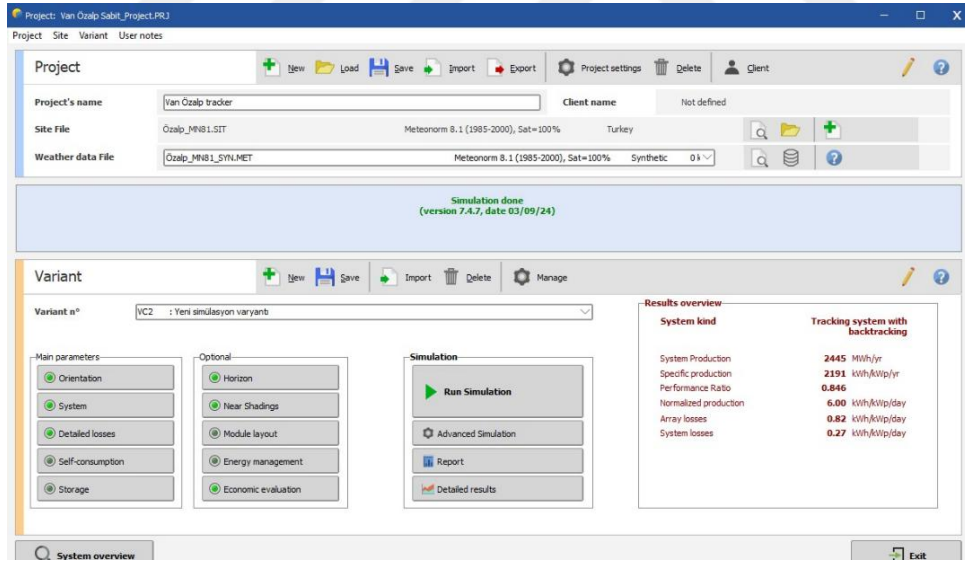
PVsyst, hem şebeke bağlantılı hem de bağımsız sistemler için doğru boyutlandırma sağlar. Sistem bileşenleri, yüklere göre optimize edilir ve ideal çalışma koşulları sağlanır. Bu sayede, enerji üretimi ve tüketimi dengelenir.

Şekil 4.15'te programa ait arayüz verilmektedir.



Şekil 4.15. PVsyst programı giriş arayüzü

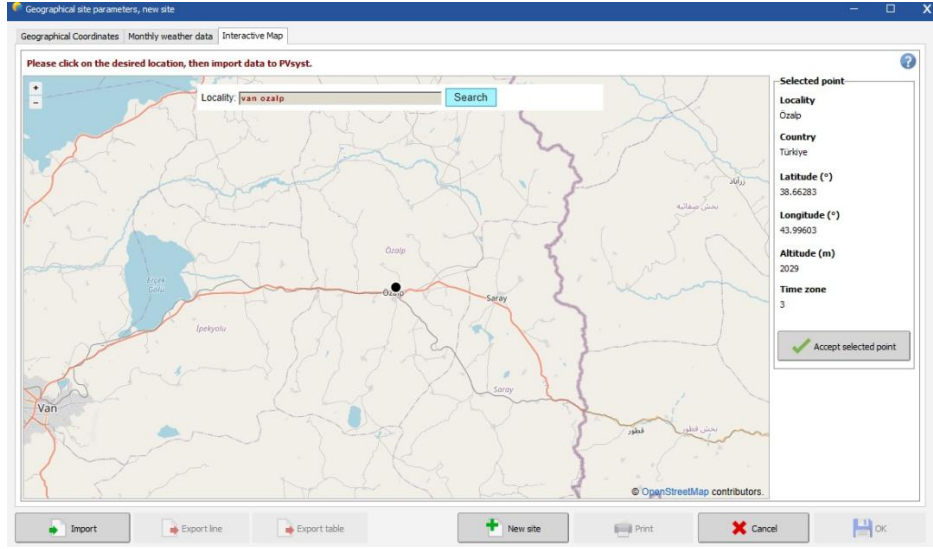
Bu tez çalışmasında tasarımı yapılan dört sistemde şebeke bağlantılı olarak tasarlanmıştır.



Şekil 4.16. PVsyst programı tasarım arayüzü

Şekil 4.16'da tasarım sayfasının arayüzü paylaşılmaktadır. Proje bölümünde projenin adı ve meteorolojik veri dosyası yer almaktadır.

PVsyst programının meteorolojik verilerine ulaşabilmesi için konum bilgisinin paylaşılması gerekmektedir.



Şekil 4.17. Kurulum yapılacak bölge seçimi

Güneş enerjisi santrali kurulumu tasarlanacak bölgenin meteorolojik bilgileri, kurulum yapılacak bölge Şekil 4.17’de gösterildiği üzere haritadan aratılarak seçilir.

	Global yatay ışınlama kWh/m ² /ay	Yatay difüz ışınlama kWh/m ² /ay	Sıcaklık °C	Rüzgar hızı m/s	Linke bulanklığı [.]	Bağıl nem %
Ocak	78.2	25.9	0.8	1.59	2.555	76.9
Şubat	89.5	36.5	2.4	1.70	2.875	73.0
Mart	136.1	50.1	5.9	1.90	3.363	65.2
Nisan	178.6	58.9	9.8	1.79	3.789	61.0
Mayıs	219.4	66.8	14.8	1.61	3.532	56.3
Haziran	235.8	62.2	19.6	1.70	3.060	51.7
Temmuz	243.4	60.2	24.2	1.80	3.049	41.6
Ağustos	217.6	49.5	24.1	1.69	3.165	41.7
Eylül	166.9	49.4	18.6	1.60	2.956	50.1
Ekim	121.2	43.8	12.6	1.39	2.949	60.9
Kasım	87.8	31.5	6.8	1.30	2.716	70.4
Aralık	72.9	28.1	2.5	1.49	2.574	74.3
Yıl	1847.4	562.9	11.8	1.6	3.049	60.3

Global yatay ışınlama yıldan yıla değişkenlik 5.1%

Şekil 4.18. PVsyst programı meteonorm verileri

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen 4 analizde de Meteonorm 8.0 verisi kullanılmıştır.

Meteonorm, küresel ölçekte meteorolojik veri sağlayan bir yazılım aracıdır. Bu araç, yenilenebilir enerji projeleri (özellikle güneş enerjisi projeleri) ve diğer iklimle ilgili çalışmalar için kullanılan, yüksek kaliteli hava durumu ve güneş radyasyonu verilerini sunar.

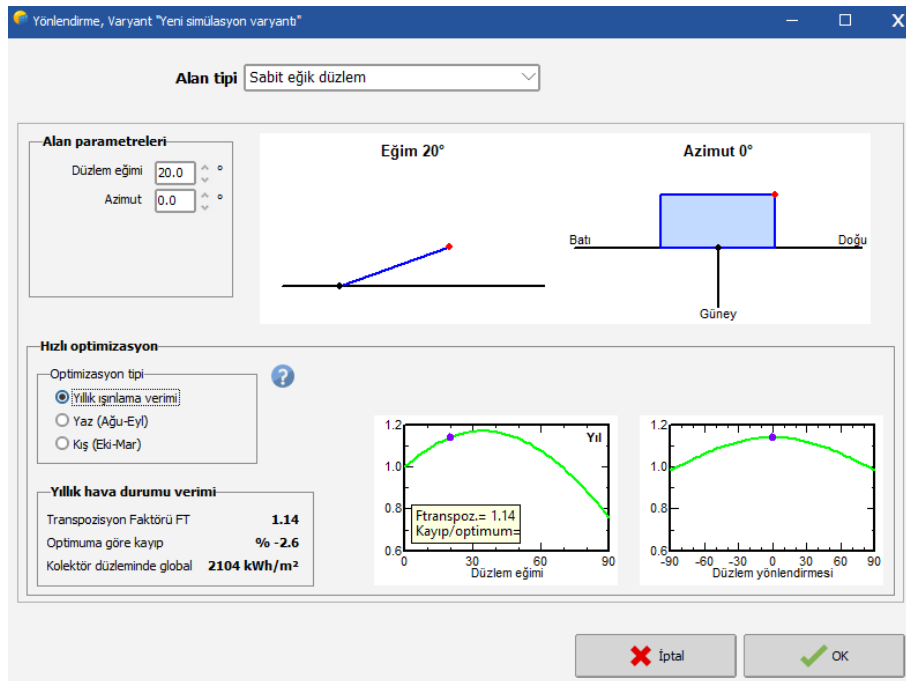
PVsyst gibi yazılımlarla entegre edilerek güneş enerjisi projelerinin simülasyonunda kullanılır. Örneğin, belirli bir bölgedeki güneş radyasyonu verileri kullanılarak, fotovoltaik sistemlerin enerji üretim kapasitesi tahmin edilebilir.

Meteonorm, dünya çapında 8.000'den fazla meteorolojik istasyondan toplanan verileri içerir. Bu veriler, güneş radyasyonu, sıcaklık, rüzgar hızı, nem, yağış gibi birçok iklim değişkenini kapsar.

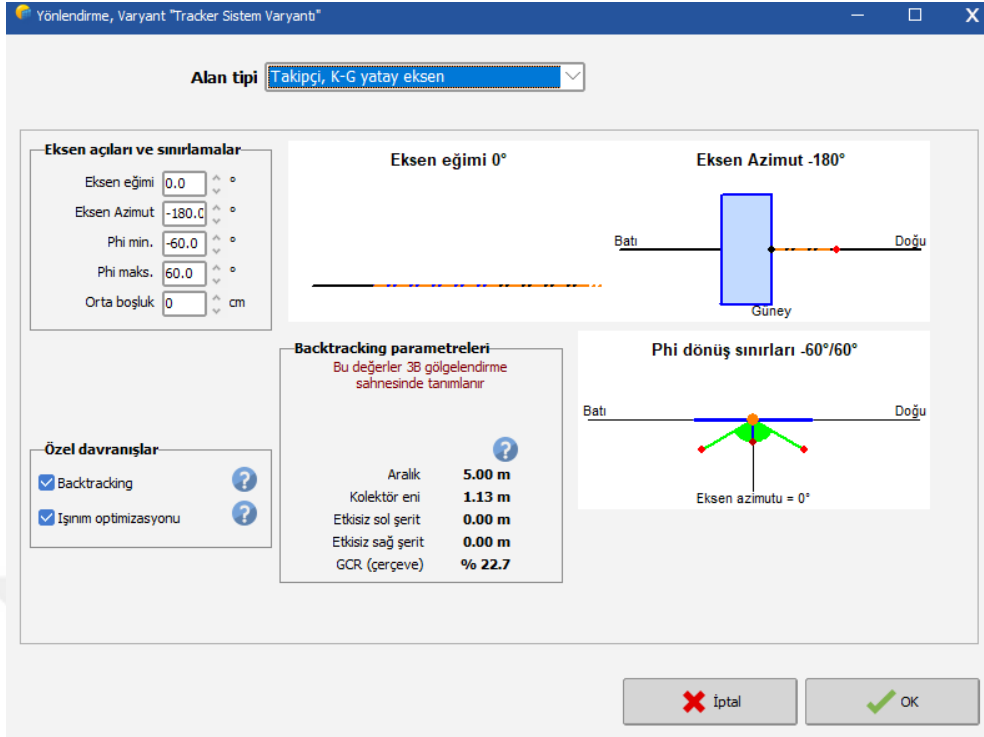
Meteorolojik veri setinin seçilmesinin ardından, sistemin performansını maksimize etmek için panel yerleşimi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, seçilen bölgenin güneşlenme süresi, radyasyon değerleri ve diğer çevresel faktörler dikkate alınarak, panellerin eğim ve azimut açıları optimize edilmiştir.

Panellerin uygun şekilde yerleştirilmesi, hem enerji üretimini artırmak hem de olası gölgeleme etkilerini minimize etmek açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, bölgenin coğrafi ve iklimsel özelliklerine göre en uygun yerleşim stratejileri belirlenmiş ve simülasyonlar bu yerleşim düzenine göre yapılmıştır.

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de panellerin eğim ve azimut açılarının optimizasyonu gösterilmektedir.



Şekil 4.19. Sabit sistem eğim açısı ve azimut açısı belirleme



Şekil 4.20. Güneş takipli sistem eğim açısı ve azimut açısı belirleme

Eğim açısı, FV panellerinin yatay düzleme göre olan eğim açısını ifade eder. Bu açının doğru belirlenmesi, güneş ışınlarının panele maksimum derecede dik açıyla gelmesini sağlar, böylece enerji üretimi artar.

Azimut açısı, FV panelinin yatay düzlemde kuzeye göre olan yönünü ifade eder. Azimut açısı, panelin hangi yöne bakacağını belirler ve genellikle güneşin en fazla görüldüğü yön seçilir.

Bu çalışmada hem sabit hem de güneş takipli sistem tasarımı yapıldığı için PVsyst programı kullanarak her ikisi için de yıllık ışınlam verileri kullanılarak optimum olan eğim açısı ve azimut açısı seçilmiştir.

Şekil 4.19’da sabit sistemin eğim açısı ve azimut açısının belirlenmesi gösterilmektedir.

Alan tipi: “Sabit Eğik Düzlem” olarak seçilmiştir. Bu seçenek, fotovoltaik panellerin kurulum şeklinin sabit bir eğime sahip olduğunu ifade eder. Bu ayarda paneller belirli bir eğim açısı ile bir yüzeye monte edilmektedir.

Şekil 4.19 incelendiğinde düzlem eğimini 20 derece ve azimutu 0 derece olduğu görülmektedir, Türkiye gibi kuzey yarımkürede bulunan bölgelerde güneş ışınlarından maksimum verimi almak için uygun bir pozisyonudur. Bu eğim, yıllık ışıınım verimi için optimuma en yakın derecedir. Yine de bunu teyit etmek amacıyla analiz gerçekleştirilirken 35 dereceden başlayarak 35-30-28-25-20 derece açılar sırasıyla denenmiş ancak en optimum sonuç 20 derece eğim verildiğinde oluşmaktadır.

Hızlı Optimizasyon;

- Yıllık hava durumu verimi: Bu seçenek, sistemin yıllık performansını optimize etmeyi hedefler.
- Transpozisyon Faktörü FT: 1.14 olarak belirtilmiştir. Bu faktör, güneş radyasyonunun panel yüzeyine düşme açısına göre ne kadar etkili olduğunu gösterir.
- Optimuma göre kayıp: %2.6 olarak belirtilmiştir. Bu, sistemin mevcut eğim ve yönlendirme ile optimum performansa kıyasla ne kadar kayıp yaşadığını ifade eder.
- Kolektör düzleminde global: 2104 kWh/m² olarak belirlenmiştir, bu değer panellerin yıllık bazda topladığı toplam enerji miktarını gösterir.

Grafikler;

- Düzlem eğimi (sol grafik): Grafik, panel eğim açısının performans üzerindeki etkisini gösterir. Eğrinin tepe noktası optimum eğim açısını, mor nokta ise mevcut ayarın bulunduğu yeri ifade eder. Burada, mevcut eğim ayarının (20°) optimuma yakın olduğu görülmektedir.
- Düzlem yönlendirmesi (sağ grafik): Grafik, azimut açısının (yönlendirme açısı) performans üzerindeki etkisini gösterir. Bu durumda da mevcut azimut açısı (0°) optimuma oldukça yakındır.

Panellerin eğim ve yönlendirme açıları, sistemin toplam enerji üretimini doğrudan etkilediği için dikkatle ayarlanmalıdır. Şekil 4.19'daki ayarlar, bu sistemin mevcut koşullar altında oldukça verimli bir şekilde çalışacağını göstermektedir.

Şekil 4.20'de ise güneş takipli sistemin eğim ve azimut açısının belirlenmesi gösterilmektedir.

Alan tipi “Takipçi, K-G yatay eksen” seçilmiştir. Bu durum, güneş takipli fotovoltaik sistemde yer alan fotovoltaik panelleri yatay ekseninde (Kuzey-Güney) güneşi takip edecek şekilde tasarlandığını göstermektedir.

Eksen açısı ve sınırlamalar:

Eksen eğimi 0° olarak ayarlanmıştır, bu açı fotovoltaik panelin yatay durduğunu ifade eder.

Eksen Azimut açısı -180° 'dir. Bu durum fotovoltaik panelin Güney yönüne baktığı anlamına gelmektedir.

Phi min ve Phi maks, -60° ve 60° arasında ayarlanmıştır, bu açılar fotovoltaik panelin dönebileceği açısal sınırları ifade eder. Fotovoltaik panel bu açılar arasında hareket edebilir.

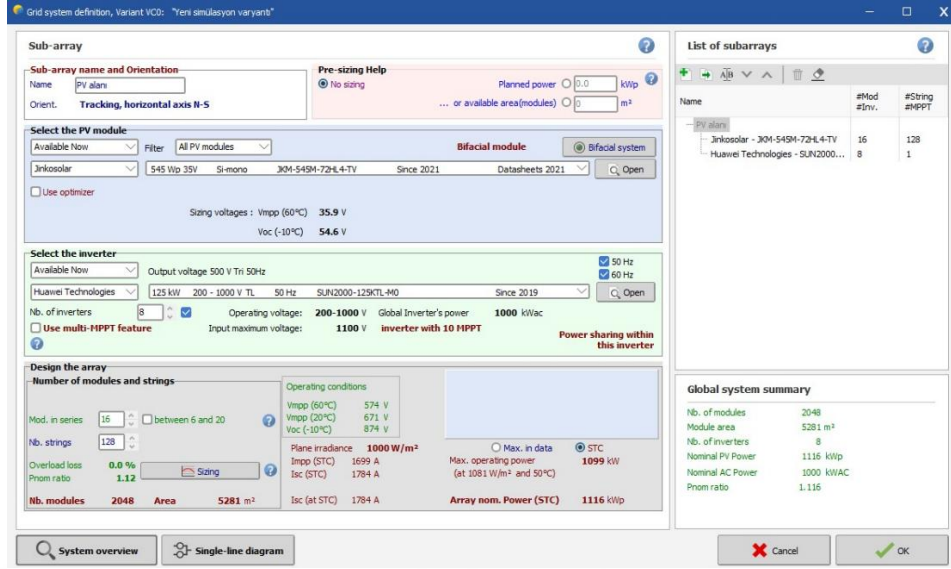
Backtracking özelliğe sahip fotovoltaik panel kullanılmaktadır. Bu nedenle backtracking özelliği etkinleştirilmiş. Backtracking, fotovoltaik panellerin gölgelenmeden olan kaybı azaltmak için belirli açılarla hareket etmesini sağlamaktadır.

Işıma optimizasyonu seçeneği etkin hale getirilerek analiz gerçekleştirilmiştir. Bu seçenek, sistem maksimum güneş ışığını alacak şekilde optimize edildiğini ifade eder.

Bu ayarlar, güneş panellerinin gün boyu güneşi takip ederek maksimum enerji üretimini sağlamak için tasarlanmıştır. Ayrıca, backtracking özelliğiyle gölgeleme etkisini en aza indirerek verimlilik artırılmak amaçlanmıştır.

Panel seçimi, sistemin toplam enerji üretimi kapasitesini ve sahada kaplayacağı alanı belirlerken, evirici seçimi ise üretilen enerjinin verimli bir şekilde şebekeye aktarılmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, hem panellerin teknik özellikleri hem de eviricinin uyumluluğu dikkatle değerlendirilerek en uygun bileşenler seçilmiştir.

Şekil 4.21’de bir önceki adımda açısını belirlemiş olduğumuz, fotovoltaik panellerinin ve eviricilerin yapılandırılması için kullanılan panel ve evirici seçiminin gerçekleştiği ara yüzü göstermektedir.



Şekil 4.21. Fotovoltaik panel ve evirici seçimi

Bu tez çalışması kapsamında Denizli ili Çameli ilçesi ve Van ili Özalp ilçesinde sabit ve güneş takipli olmak üzere toplamda dört farklı fotovoltaik sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Verimlilik karşılaştırmalarının tutarlı bir şekilde yapılabilmesi için tüm tasarımlar aynı koşullar altında analiz edilmiştir. Bu nedenle, panel ve evirici sayıları sabit tutularak, her bir tasarımda aynı marka ve modeldeki paneller ile eviriciler kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada panel olarak JinkoSolar marka 545W'lık 2048 adet Si-Mono fotovoltaik panel kullanılmıştır. Bu panelin tercih edilmesinin nedeni piyasada yaygın kullanıp, panele ulaşımının kolay olmasıdır. Evirici olarak ise Huawei Technologies tarafından üretilen SUN2000-125KTL-M0 modeli seçilmiş. Bu evirici, 1000 kW kapasiteye sahiptir. Eviriciler panele uygun seçilmektedir. Bir eviricinin panellere uygun şekilde seçilmesi, fotovoltaik sistemin verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak için kritik bir adımdır. Evirici seçimi yapılırken şu önemli faktörler göz önünde bulundurulmalıdır.

Eviricinin güç kapasitesi, kurulan güneş panellerinin toplam kapasitesine (kWp) uygun olmalıdır. Eviricinin nominal kapasitesi, genellikle panel gücünün %80-110 aralığında seçilir. Bu, sistemin aşırı yüklenmemesi ve enerjinin verimli şekilde dönüştürülmesi için önemlidir.

Eviricinin giriş gerilim aralığı (MGN voltage range), panel dizilerinin maksimum güç noktası (V_{mp}) ve açık devre gerilimi (V_{oc}) ile uyumlu olmalıdır. Eğer gerilim aralığı,

panellerin ürettiği gerilimin dışında kalırsa evirici doğru çalışmayabilir veya sistemde verim kayıpları yaşanabilir.

Eviricinin maksimum giriş akımı, panel dizilerinin maksimum çıkış akımını aşabilmelidir. Eğer panel dizisinin akımı eviricinin kabul edebileceğinden yüksekse, bu durumda enerji kaybı yaşanabilir veya evirici zarar görebilir. Eviricinin tek fazlı mı yoksa üç fazlı mı olması gerektiği, sistemin bağlantı yapılacağı şebekenin özelliklerine göre belirlenir. Üç fazlı sistemler genellikle büyük ölçekli ticari sistemlerde kullanılırken, tek fazlı eviriciler daha küçük ölçekli ev sistemleri için uygundur.

Eviricinin çevresel koşullara dayanıklılığı da göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle dış mekana kurulacak sistemlerde, eviricinin IP koruma sınıfı ve çalışma sıcaklık aralığı dikkate alınmalıdır.

Tüm bu parametreler dikkate alındığında, sistemin verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla en uygun evirici seçimi yapılmıştır. Eviricinin güç kapasitesi, giriş gerilim aralığı, maksimum giriş akımı, faz uyumluluğu, verimlilik ve çevresel koşullara dayanıklılığı gibi tüm kriterler titizlikle değerlendirilmiş, böylece güneş panelleri ile en uyumlu evirici belirlenmiştir. Bu seçim, sistemin genel performansını optimize etmek ve uzun ömürlü bir işletim sağlamak için stratejik olarak yapılmıştır.

Şekil 4.22’de paylaşıldığı üzere PVsyst programı kullanılarak, FV (fotovoltaik) modüller için termal kayıp faktörleri belirlenmektedir.

Şekil 4.22’nin sol tarafında “Alan Termal Kayıp Faktörü” başlığı altında, termal kayıp faktörlerinin nasıl hesaplanacağı gösterilmektedir. U_c (Constant loss factor) ve U_v (Wind loss factor) olmak üzere iki ana bileşen yer almaktadır;

U_c (Sabit Kayıp Faktörü), modülün sabit ısı kayıp faktörüdür ve W/m^2K birimiyle ifade edilir. Bu değer, modüllerin monte edilme şekline göre değişmektedir.

U_v (Rüzgar Kayıp Faktörü), rüzgar hızıyla ilişkili olarak değişen ısı kayıp faktörüdür ve $W/m^2K/(m/s)$ birimiyle ifade edilir. Burada rüzgar hızının termal kayıpları nasıl etkilediği değerlendirilmektedir.

PV alan kayıpları için parametreler

Termal parametre | Omik kayıplar | Modüllerin kalitesi - LID - Uyumsuzluk | Kirlenme kaybı | IAM kayıplar | Yardımcılar | Yaşlanma | Kullanılabilirlik | Spektral düzeltme

Alan termal kayıp faktörünü veya standart NOCT katsayısını tanımlayabilirsiniz:
program denklığı verir!

Alan termal kayıp faktörü

Termal kayıp faktörü

Sabit kayıp faktörü U_c W/m²K

Rüzgar kayıp faktörü U_v W/m²K m/s

Yapıya göre varsayılan değer

☐ Hava sirkülasyonlu "Serbest" modüller

☐ Arka hava kanalı yarı entegre

☐ Arka yalıtımlı entegre

NOCT eşdeğer faktörü

NOCT (Çalışan hücrenin nominal sıcaklığı) genellikle modülün kendisi için üreticiler tarafından belirlenir. İşletim dizisine uygulandığında bir anlam ifade etmeyen, U -değeri tanımına alternatif bir bilgidir.

NOCT yaklaşımını kullanmayınız. Diziye uygulandığında karşılık getirir !

[NOCT'u yine de göster](#)

[Kayıp grafiği](#) [İptal](#) [OK](#)

Şekil 4.22. Fotovoltaik panel termal kayıpların hesaplanması

U_c (Sabit Kayıp Faktörü), modülün sabit ısııl kayıp faktörüdür ve W/m²K birimiyle ifade edilir. Bu değer, modüllerin monte edilme şekline göre değişmektedir.

U_v (Rüzgar Kayıp Faktörü), rüzgar hızıyla ilişkili olarak değişen ısııl kayıp faktörüdür ve W/m²K/(m/s) birimiyle ifade edilir. Burada rüzgar hızının termal kayıpları nasıl etkilediği değerlendirilmektedir.

Şekil 4.22’de görüldüğü üzere modüllerin monte edilme şekline göre varsayılan termal kayıp değerleri seçilebilmektedir. Burada farklı montaj seçenekleri bulunmaktadır:

- Hava sirkülasyonlu serbest monteli modüller
- Arkasında hava kanalı bulunan yarı entegre montaj
- Tam yalıtılmış arka kısımla entegrasyon

Bu seçenekler, modülün termal kayıp değerlerini belirlemede önemli rol oynamaktadır. Çünkü modüllerin ısınma durumları montaj şekline göre farklılık göstermektedir.

Şekil 4.23. Fotovoltaik panel omik kayıplarının hesaplanması

Şekil 4.23’de, PVsyst yazılımında “Omik Kayıplar” sekmesine ait bir bölümün detaylarını göstermektedir. Bu bölümde, fotovoltaik (FV) sistemde meydana gelen omik kayıpların hesaplanması ve yapılandırılmasıyla ilgili parametreler yer almaktadır.

Global Kablolama Direnci, 5.832 mΩ olarak belirtilmiştir. Bu, sistemdeki kablolamanın toplam direnç değerini ifade eder.

STC’de Kayıp Oranı olarak kablolama nedeniyle standart test koşullarında (STC) %1.50’lik bir kayıp oranı seçilmiştir. Bu değer varsayılan değerdir.

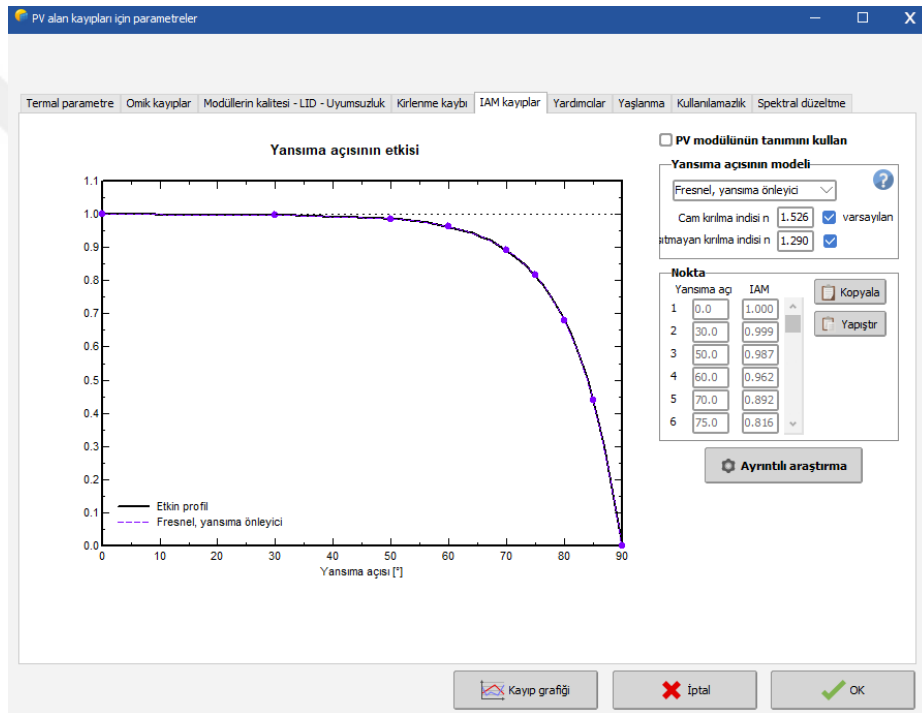
Seri Diyotun Gerilim Düşümü değeri 0.7 V olarak ayarlanmıştır. Varsayılan değerdir.

Bu tez çalışmasında, Denizli ve Van illerinde kurulacak sabit ve güneş takipli iki farklı sistemin performans karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada hem paneller hem de eviriciler aynı seçilmiş olup, karşılaştırmanın etkinliğini artırmak adına bazı sınırlamalar getirilmiştir.

AA kayıplarına ilişkin olarak, bu bölümde kablolama kaynaklı kayıplar değerlendirilmemiştir. Bunun temel nedeni, kablo uzunluklarının ve yerleşim düzenlerinin sahaya özgü olarak değişiklik gösterecek olmasıdır. Denizli ve Van

illerindeki santrallerde eşdeğer kablolama koşullarının sağlanması mümkün olmadığından, performans karşılaştırmasının sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi adına AA kayıplar analize dahil edilmemiştir. Bu nedenle, evirici sonrası AA kayıpları etken bir parametre olarak değerlendirilmemiştir.

Bu ayarlar, fotovoltaik sistemde meydana gelebilecek enerji kayıplarını en aza indirmek için dikkatli bir şekilde yapılandırılmıştır. Kablolama, transformatör kayıpları ve diğer bileşenlerin omik kayıpları hesaba katılarak, sistemin verimliliği optimize edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 4. 24. Fotovoltaik panel geliş açısı değiştiricisi (Incidence Angle Modifier-IAM) grafiği

Güneş ışınlarının fotovoltaik panellere farklı açılarla gelmesi, performansı etkileyen bir faktördür. Grafik, güneş ışınlarının farklı açılarla FV modül yüzeyine geldiğinde nasıl bir kayıp yaşandığını ifade ediyor.

Yatay eksen (Incidence Angle - °), güneş ışığının FV modül yüzeyine çarpma açısını göstermektedir. 0° açısı, ışığın modüle dik geldiği durumu temsil ederken, 90° açısı ışığın yüzeye paralel geldiği durumu ifade eder.

Dikey eksen (IAM), ışığın modül yüzeyine ulaştığında ne kadar verimli kullanıldığını (yani kaybın ne kadar olduğunu) göstermektedir. 1 değeri, ışığın tamamen verimli kullanıldığını anlamına gelirken, daha düşük değerler kaybın başladığını gösterir.

Şekil 4.24 incelendiğinde; 0° ve 30° açılarda IAM değeri 1'e yakın görünmektedir ve bu da ışığın modüle neredeyse tamamen verimli ulaştığını gösterir, 60°'den itibaren IAM değeri azalmaya başlamakta, bu durum ışığın büyük bir kısmı modül tarafından emilememeye başladığını göstermekte, 75° ve 90°'de ise kayıp daha da artıyor, bu da güneş ışınlarının modül tarafından neredeyse hiç kullanılmadığını ifade etmektedir.

Bu tür grafikler, özellikle sabit ve güneş takipli sistemlerin karşılaştırılmasında önemli bir role sahiptir. Güneş takipli sistemlerde güneş ışınları sürekli dik açılarla modüle ulaşacağı için bu tür kayıplar daha az olabilir, sabit sistemlerde ise günün belirli saatlerinde açısal kayıplar daha fazla olacaktır. Bir sonraki bölüm olan sonuçların karşılaştırılmasında bu durum ele alınmıştır.

Şekil 4.25 PVsyst yazılımındaki fotovoltaik hücrelere ait kayıpların detaylandırıldığı bölümdür. Bu bölüm, modül kalitesinden kaynaklanan kayıplar ve sistemdeki uyumsuzluklardan (mismatch) kaynaklanan kayıplar gibi çeşitli faktörleri göstermektedir.

PV alan kayıpları için parametreler

Termal parametre | Omik kayıplar | Modüllerin kalitesi - LID - Uyumsuzluk | Kirişme kaybı | IAM kayıpları | Yardımcılar | Yaşlanma | Kullanılacak | Spektral düzeltme

Modüllerin kalitesi varsayılan ?

Modül verim kaybı: 0.8 % ☒

Modül etkin verimliliğinin üreticinin belirttiği özelliklere göre sapması.

(negatif değer aşırı performans gösterir)

Modül uyumsuzluk kaybı varsayılan ?

Mpp'deki güç kaybı: 2.0 % ☒

Sabit gerilim işlem kayıpları: 2.5 % ☒

MPPT işlemi sırasında kullanılmıyor

Detaylı hesaplama

LID - "light induced degradation" varsayılan ?

LID kayıp faktörü: 2.0 % ☒

Kristalin silikon modüllerinin ilk çalışma saatlerinde STC imalat flaş testi değerlerine göre degradasyonu

Zincir gerilim uyumsuzluğu Varsayılan ?

Mpp'deki güç kaybı: 0.1 % ☒

Ayrıntılı araştırma

Kayıp grafiği İptal OK

Şekil 4.25. Modül kalitesi ve uyumsuzluk kayıpları

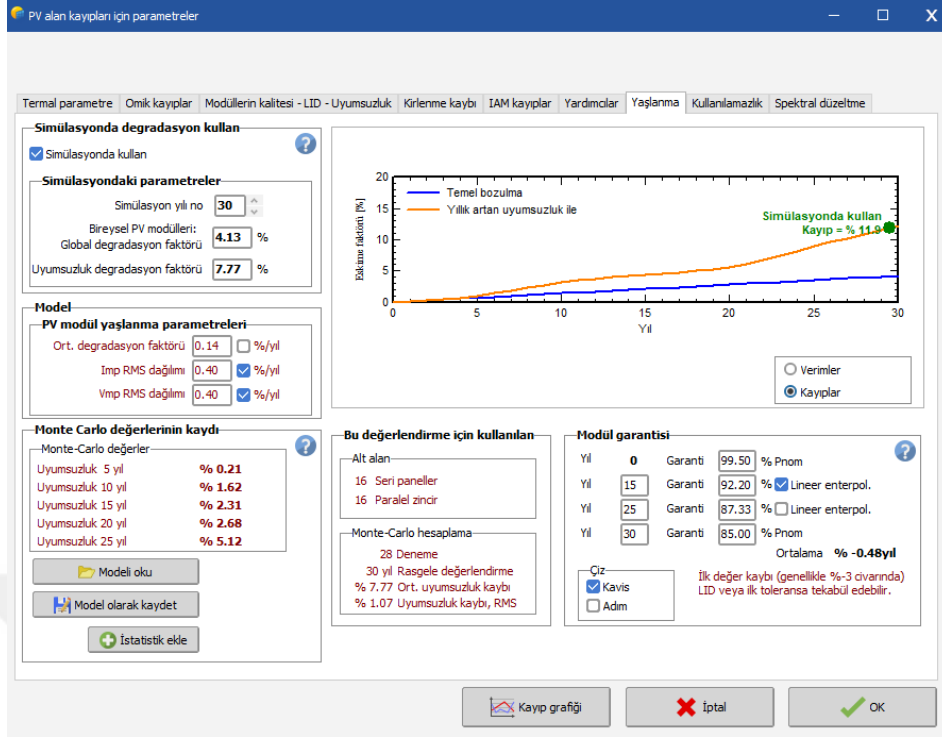
Kayıp faktörleri;

- **Modüllerin Kalitesi:** Modül Verim Kaybı (-0.8%), modül verimliliğinde belirtilen kaybı göstermektedir. Bu kayıp, modülün gerçek verimliliğinin üretici tarafından belirtilen değerlerden sapmasını ifade eder. Buradaki negatif değer (-0.8%), modülün beklenenden daha iyi performans gösterdiğini, yani tahmin edilenden daha az enerji kaybı olduğunu gösterir. Bu tez çalışmasında panel üreticisinin, panel için vermiş olduğu varsayılan değer kabul edilmiştir.
- **Modül Uyumsuzluk Kaybı:** MGN'deki Güç Kayıpları (2.00%), maksimum güç noktasında oluşan uyumsuzluk kayıplarını temsil eder. Bu kayıplar, dizideki farklı modüllerin birbirine tam olarak uymaması (örneğin, her modülün aynı çıkış gücüne sahip olmaması) sonucu ortaya çıkmaktadır. Buradaki %2, sistemin toplam gücünden bu oranda bir kayıp olduğunu ifade eder. Bu tez çalışmasında panel üreticisinin, panel için vermiş olduğu varsayılan değer kabul edilmiştir.
- **LID - Light Induced Degradation (Işıklı İndüklenen Bozulma):** LID Kayıp Faktörü (2.0%), modüllerin ilk çalışma saatlerinde maruz kaldığı bir bozulma türüdür. Bu, özellikle kristal silikon modüllerde meydana gelmektedir. Genellikle ilk birkaç çalışma saatinde görülür ve modül verimliliğini azaltır.
- **String Gerilim Uyumsuzluğu:** MGN'deki Güç Kayıpları (0.1%), dizilerdeki gerilim uyumsuzluklarından kaynaklanan güç kaybını temsil eder. Farklı modüllerin farklı gerilim değerlerine sahip olması, dizideki genel performansı etkiler.

Bu tez çalışmasında, sisteme girilen bilgiler ışığında hesaplanmış olan varsayılan değer üzerinden analiz gerçekleştirilmiştir. Bu değer %0.1'dir. Çok düşük bir uyumsuzluk olduğunu ve bu kaybın ihmal edilebilir olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.26'da zaman içinde fotovoltaik modüllerin performansının nasıl değiştiğini ve bozulduğunu (degradation) gösteren çeşitli senaryolar ve parametreler yer almaktadır.

Simülasyonda sistemin ömrü 30 yıl olarak belirlenmiştir. Bu nedenle 30 yıllık bir performans tahmini yapılmaktadır. Sağ üst bölümde yer alan grafiğin yatay eksenini yılları temsil etmektedir. Modül performansının 0 yıldan 30 yıla kadar nasıl değiştiğini göstermektedir.



Şekil 4.26. Fotovoltaik modül yaşlanma kayıpları

Dikey eksen modülün bozulma (degradation) oranını göstermektedir. Başlangıçtaki performansı (yeni durumu) ifade ederken, zamanla bu değer artmakta ve modül performansı düşmektedir. Mavi çizgi, temel bozulma senaryosunu göstermektedir. Yani modülün normal yaşlanma sürecinde, her yıl bozulma olmaksızın çalışma durumunu göstermektedir. Sarı çizgi, yıllık artan uyumsuzluk kayıplarını da içeren senaryoyu göstermektedir. Bu senaryoda, modüller arasında zamanla artan performans farkları da hesaba katılmaktadır.

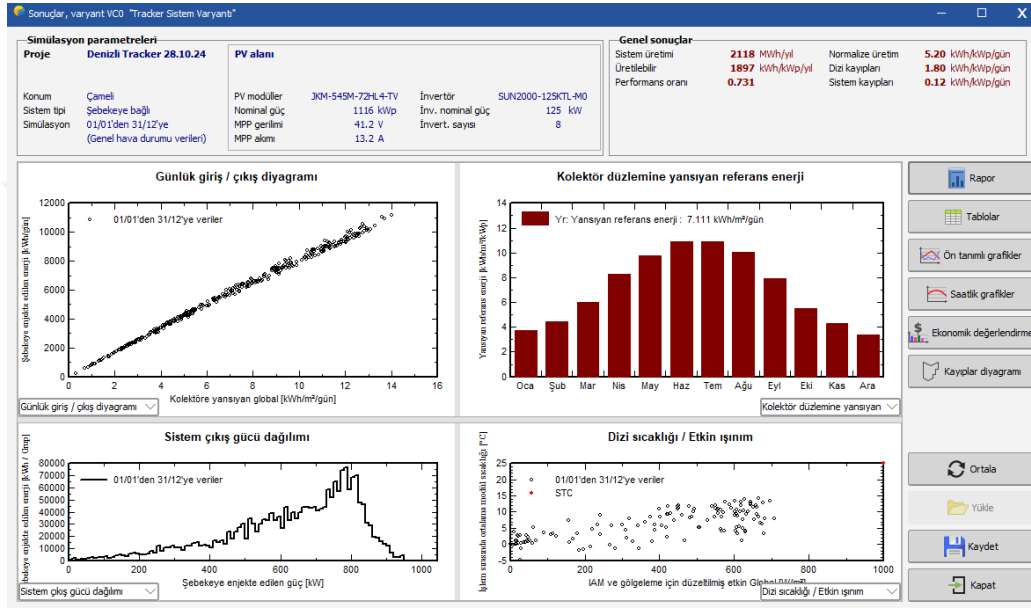
Modüllerin nominal güçlerinin (P_{nom}) yıllar içinde nasıl azaldığı ve garanti kapsamında hangi seviyelere düşeceği belirtilmiştir:

- 0. Yıl: %99.5
- 15. Yıl: %92.2
- 25. Yıl: %87.33
- 30. Yıl: %85.00

Bu, panel üreticisinin garanti ettiği minimum güç çıkışı seviyelerini ifade etmektedir. Her yıl için performans kaybı ortalama %0.48 olarak hesaplanmıştır.

Grafik, yıllar içinde verim ve kayıpların nasıl arttığını göstermektedir. 30 yıl sonunda sistemin toplam simülasyon kaybı %11.9 olarak tahmin edilmiştir.

Şekil 4.24'te yer alan parametreler, sistemin uzun yıllar boyunca performansını ve beklenen kayıplarını tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bu tür detaylı bozulma analizi, FV sistemin ekonomik ömrü boyunca nasıl bir performans sergileyeceğini ve hangi faktörlerden etkilenebileceğini anlamak açısından önemlidir.



Şekil 4.27. Fotovoltaik sistem kurulumu özet bölümü

Şekil 4.27'de paylaşıldığı üzere özet sayfasında projenin adı, sistem tipi, simülasyon dönemi, kullanılan fotovoltaik paneli, evirici, sistemin toplam kapasitesi, yıllık enerji üretimi, performans oranı, dizi kayıpları ve sistem kayıpları görülmektedir.

5. SABİT VE GÜNEŞ TAKİPLİ FOTOVOLTAİK SİSTEMLERİN PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMALI ANALİZİ

Bu tez çalışmasında sabit ve güneş takipli iki farklı sistemin hem Denizli ili Çameli ilçesinde hem de Van ili Özalp ilçesinde olmak üzere dört farklı analiz yapılmıştır. Bu bölümde hem coğrafi farkları hem de sistem türlerinin kendi içlerindeki karşılaştırmasını net bir şekilde sunmak amaçlanmaktadır. Bu sayede hem her iki bölgedeki genel performans farkları, hem de sabit ve güneş takipli sistemlerin her birinin performansları daha iyi anlaşılır olacaktır.

Bu bölümde her iki yaklaşımı dengeli ve akıcı bir şekilde sunmak için, iki başlık altında değerlendirilmektedir.

5.1. İl Karşılaştırması

Bu bölümde aynı güneşlenme potansiyeline sahip iki farklı ilçenin iklim verileri karşılaştırılarak fotovoltaik sistem performansı üzerindeki coğrafi şartların etkisi analiz edilecektir. Panel, evirici ve diğer sistem bileşenleri her iki lokasyonda da sabit tutulmuştur; bu sayede tek değişken olarak coğrafi ve iklimsel koşulların fotovoltaik üretime olan etkisi objektif bir şekilde değerlendirilecektir. Van Özalp ve Denizli Çameli ilçelerinin yükseklik, sıcaklık, rüzgar hızı ve nem oranı gibi iklimsel farkları dikkate alınarak, bu koşulların sabit ve güneş takipli sistemler üzerindeki performansa olan katkısı kıyaslanacaktır. Bu yaklaşım, aynı teknik altyapı ile farklı çevresel koşullar altında enerji üretiminin nasıl değiştiğini göstermeyi amaçlamaktadır.

Proje özeti			
Coğrafi konum	Konum	Proje ayarları	
Çameli Türkiye	Enlem	37.07 °N	Albedo 0.20
	Boylam	29.36 °E	
	Rakım	1246 m	
	Saat dilimi	UTC+3	

Şekil 5.1. Denizli ili Çameli ilçesi proje özeti

Proje özeti			
Coğrafi konum	Konum	Proje ayarları	
Boyalı Turkey	Enlem	38.64 °N	Albedo 0.20
	Boylam	43.97 °E	
	Rakım	2028 m	
	Saat dilimi	UTC+3	

Şekil 5.2. Van ili Özalp ilçesi proje özeti

Proje özeti bölümünde yer aldığı üzere coğrafi konumları farklı ancak albedo etkisi her iki sistem için de aynıdır.

Sistem özeti			
Şebekeye bağlı sistem	Zeminde dizi	Kullanıcı ihtiyaçları	
Kolektör düzleminin yönlendirmesi	Yakın gölgelermeler	Sınırsız yükleme (şebeke)	
Sabit düzlem	Lineer gölgelermeler		
Eğim/Azimet	20 / 0 °		
Sistem bilgisi		İnvertör	
PV alanı		Öge sayısı	8 adet
Panel sayısı	2048 adet	Toplam nom. güç	1000 kWac
Toplam nom. güç	1116 kWp	Nom. güç oranı	1.116

Şekil 5.3. Sabit sistem proje özeti

Sistem özeti			
Şebekeye bağlı sistem	Backtracking'li tek sıra takipçi	Yakın gölgelermeler	
Simülasyon yılı no 30		Lineer gölgelermeler	
Kolektör düzleminin yönlendirmesi	Takip algoritması		
Yönlendirme	İşinim optimizasyonu		
Takipçi düzlemi, K-G yatay eksen	Backtracking etkin		
Eksen Azimet	-180 °		
Sistem bilgisi		İnvertör	
PV alanı		Öge sayısı	8 adet
Panel sayısı	2048 adet	Toplam nom. güç	1000 kWac
Toplam nom. güç	1116 kWp	Nom. güç oranı	1.116
Kullanıcı ihtiyaçları		Sınırsız yükleme (şebeke)	

Şekil 5.4. Güneş takipli sistem proje özeti

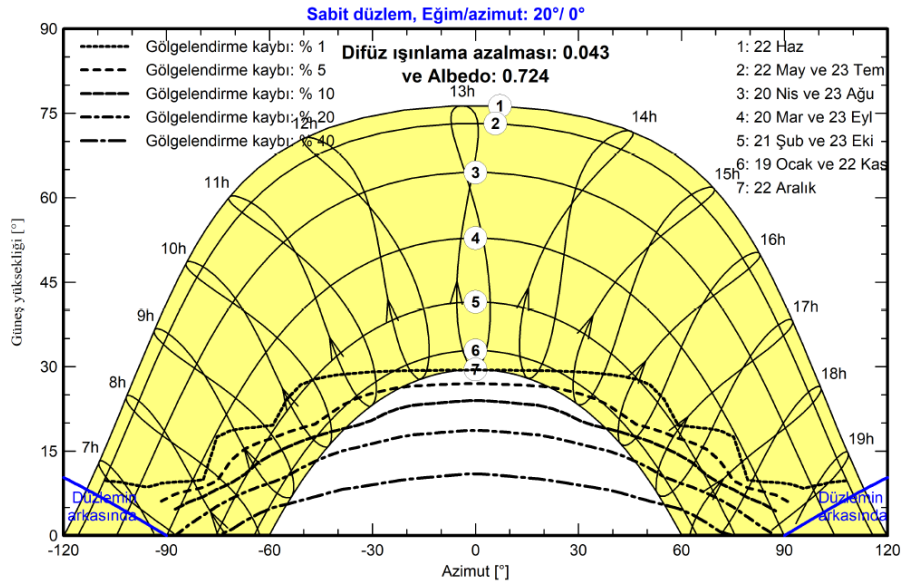
Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te gösterildiği üzere hem Denizli Çameli hem de Van Özalp ilçelerinde sabit ve güneş takipli sistemlerin her biri için 2048 adet aynı panel kullanılarak, 1116 kWp nominal güce sahip sistem tasarlanmıştır. Bu sistemlerin tasarımında 8 adet 1.116 yüklenme oranına sahip 1000 kWac nominal güce sahip evirici kullanılmaktadır.

Kolektör alanının özellikleri			
PV modül		İnvertör	
Üretici	Jinkosolar	Üretici	Huawei Technologies
Model	JKM-545M-72HL4-TV	Model	SUN2000-125KTL-M0
(Orijinal PVsyst veritabanı)		(Orijinal PVsyst veritabanı)	
Birim gücü	545 Wp	Birim gücü	125 kWac
PV modül sayısı	2048 adet	İnvertör sayısı	8 adet
Nominal (STC)	1116 kWp	Toplam güç	1000 kWac
Modül	128 Zincir x 16 Seri	Çalışma gerilimi	200-1000 V
İşletme şartlarında (50°C)		Maks güç (=>30°C)	138 kWac
Pmpp	1018 kWp	Nom. güç oranı (DC:AC)	1.12
U mpp	599 V		
I mpp	1700 A		
Total PV gücü		İnvertör toplam gücü	
Nominal (STC)	1116 kWp	Toplam güç	1000 kWac
Toplam	2048 modül	İnvertör sayısı	8 adet
Panel yüzeyi	5281 m²	Nom. güç oranı	1.12

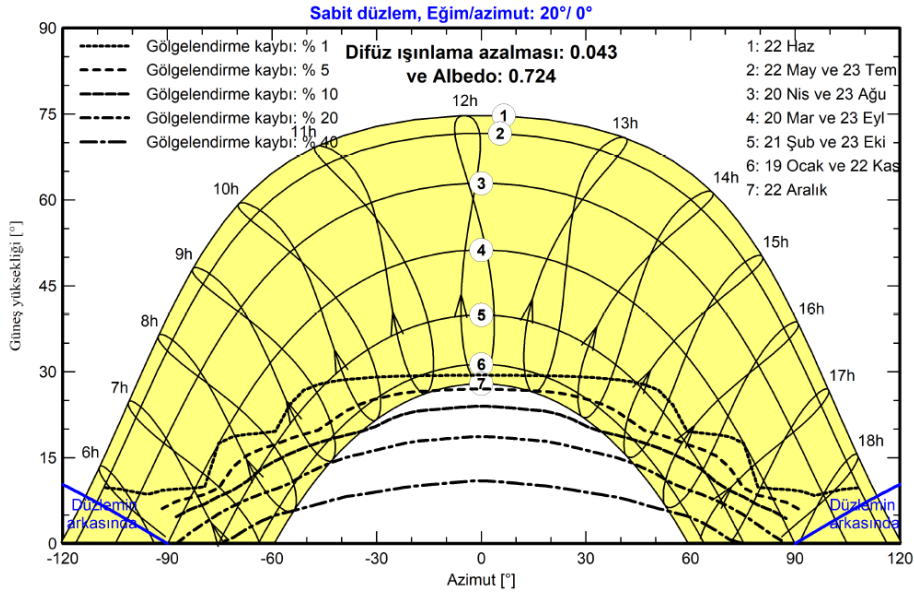
Şekil 5.5. Güneş enerjisi kolektör alanının özellikleri

Şekil 5.5'te fotovoltaik sistemin bileşenlerine dair teknik detaylar yer almaktadır. Sağ tarafında panele ait detaylar verilirken sol tarafında ise kullanılan eviriciye ait detaylar paylaşılmaktadır.

Tasarlanan dört farklı sistemde de Jinkosolar marka JKM-545M-72HL4-TV model 545 Wp kapasitede 2048 adet panel ile Huawei Technologies marka SUN2000-125KTL-M0 model 125 kWac birim güce sahip evirici kullanılmaktadır.



Şekil 5.6. Denizli ili Çameli ilçesi gölgelenme analizi (Sabit Sistem) (Aydın Görücü, ve Özdemir, 2024)



Şekil 5.7. Van ili Özalp ilçesi gölgelenme analizi (Sabit Sistem)

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de İzo Gölgeleme Diyagramı olarak adlandırılan görsel paylaşılmıştır. Güneş enerjisi sistemlerinde gölgelenme etkilerinin analiz edilmesi ve bu gölgelenme ile kaybedilen enerjinin hesaplanmasına yönelik bir araçtır. Bu diyagram, bir güneş paneli veya sistemin yıl boyunca karşılaşılabileceği gölgeleme koşullarını göstermektedir.

Güneş Yüksekliği ve Azimut Açıları, dikey eksen, güneşin gökyüzündeki yüksekliğini ($^{\circ}$) temsil ederken, yatay eksen güneşin azimut açısını ($^{\circ}$) göstermektedir. Azimut açısı, güneşin yatay düzlemde hangi yönde olduğunu ifade etmektedir.

Örneğin, 0° azimut açısı güneşin tam güneyde olduğunu, -120° ve 120° ise doğu ve batı yönlerini temsil eder.

Gölgeleme Kaybı Yüzdeleri, farklı çizgi türleri (noktalı, kesikli vb.), farklı gölgeleme kayıplarını temsil etmektedir.

%1, %5, %10, %20 ve %40 gölgeleme kaybı yüzdeleri, gölgelenmenin hangi derecelerde enerji üretimini etkilediğini gösterir. Örneğin, daha yoğun gölgelenme çizgileri (daha üstteki çizgiler) daha fazla enerji kaybını ifade eder.

Saat ve Tarih, grafiğin içindeki eğriler güneşin belirli saatlerdeki ve tarihlerdeki konumunu göstermektedir. Örneğin, grafikte belirtilen 13h eğrisi güneşin 13:00'teki konumunu gösterir.

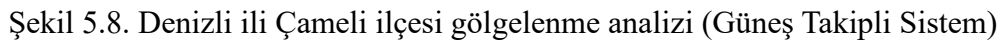
1'den 7'ye kadar numaralandırılmış tarihler ise yılın farklı zamanlarındaki güneşin konumunu işaret eder. Örneğin, 1 numara 22 Haziran'ı, 7 numara ise 22 Aralık'ı temsil eder. Sol üst bölümde diğer numaralarla ilgili detaylar yer almaktadır.

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de görüldüğü üzere tasarlanan her iki fotovoltaik sistemin Difüz Işınlanma ve Albedo analizi sonucunda, Difüz Işınlanma Azalması: 0.043 ve Albedo: 0.724 olarak belirtilmiştir. Bu, yüzeye çarpan yansıyan ışığın ne kadarının geri döndüğünü (Albedo) ve difüz ışınlanmanın gölgelenmeden dolayı ne kadar azaldığını göstermektedir.

Gölgelenmenin Etkisi, analiz sonucuna göre gölgeleme kaybının %1-%40 arası değişmekte olduğu gözlemlenmiştir. Gölgelendirme etkisi özellikle sabah ve akşam

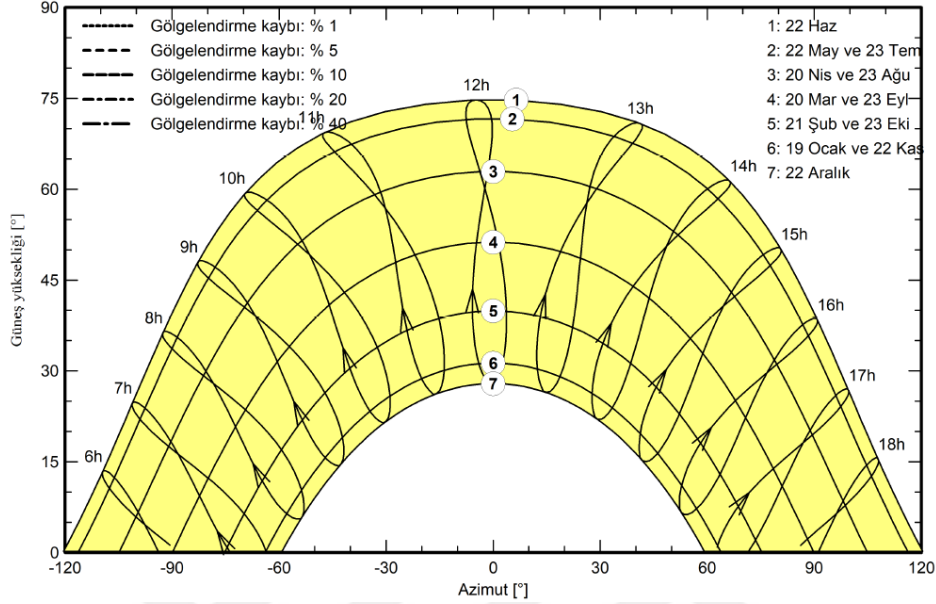
Panel Yönlendirmesi, grafik üst kısmında panelin eğim ve azimut açısı belirtilmiştir: Eğim/Azimut: 20° / 0° . Bu, panelin güney yönüne (0° azimut) ve 20° eğimle yerleştirildiğini göstermektedir. Genel olarak bu diyagram sistemde gölgelemenin hangi saatlerde ve tarihlerde enerji kaybına neden olacağını ve gölgelenmenin enerji üretimi üzerindeki etkilerini belirlemek için kullanılmaktadır.

Bu durum, panellerin gün boyunca yeterli miktarda ışık aldığını ancak güneş doğmadan önce ve battıktan sonra gölgeleme etkilerinin daha belirgin olduğunu ifade etmektedir.



71

Şekil 5.9’da ise Van ili Özalp ilçesinde kurulması planlanan güneş takipli fotovoltaik sisteme ait gölgelenme analizi sonuçları paylaşılmaktadır.



Şekil 5.9. Van ili Özalp ilçesi gölgelenme analizi (Güneş Takipli Sistem)

Şekil 5.8 ve 5.9 incelendiğinde hem Çameli ilçesinde hem de Özalp ilçesinde güneş takipli sistemlerde gölgelenme kaybının olmadığı görülmektedir.

Güneş takipli sistemler, gün boyunca güneşin hareketini izleyerek panellerin sürekli olarak güneşe dik açıyla bakmasını sağlamaktadır. Bu sayede, sabit sistemlerde görülen sabah ve akşam saatlerinde yaşanan gölgeleme sorunları minimuma iner. Güneş takipli sistemler, güneşi sürekli takip ettiği için, güneş ışınlarının gölgeleme kaynaklı enerji kaybı yaşama olasılığı çok daha düşüktür. Özellikle panellerin yönü, sabit sistemlerde olduğu gibi sabit bir açıda kalmadığından, güneşe optimal açıyla bakmaya devam eder ve gölgelenme etkisi daha az gözlemlenir.

Güneş takipli sistemlerde albedo, yüzeyin güneş ışığını yansıtma kapasitesini ifade etmektedir. Güneş takipli sistemlerde paneller, günün büyük bölümünde güneş ışınlarını daha doğrudan almaktadır, bu da yüzeyden yansıyan ışığın (albedo etkisi) daha az önem kazanmasına neden olmaktadır. Sabit sistemlerde, güneş ışığı belirli açılarla gelir ve bu açılar yansımayı artırabilir. Ancak takipli sistemler güneşi dik açıyla aldıkları için, yüzeyden gelen yansımaların etkisi daha sınırlıdır.

Güneş takipli sistemlerde difüz ışınlama, bulutlar, atmosferdeki parçacıklar veya yüzeylerden gelen yansıyan ışınlar gibi çeşitli kaynaklardan gelen, doğrudan olmayan güneş ışığını ifade etmektedir. Sabit sistemlerde, paneller sabit bir açıda olduğu için bu difüz ışıklardan gelen enerji kayıpları yaşanabilir. Ancak güneş takipli sistemlerde paneller sürekli hareket ederek güneşin dik açıyla gelmesini sağladığından, difüz ışınlama azalma etkisi daha az olmaktadır. Bu sistemler, daha fazla direkt ışın aldıkları için difüz ışınlamanın etkisi sistem performansı üzerinde çok daha az etkili olmaktadır.

5.2. Sabit ve Güneş Takipli Sistemlerin Karşılaştırılması

Bu bölümde, sabit ve güneş takipli fotovoltaik sistemler arasındaki performans ve ekonomik farklar değerlendirilmiştir. Sabit sistemler daha düşük ilk yatırım maliyetine sahip olsa da, güneş takipli sistemlerin daha yüksek enerji üretimi sağladığı bilinmektedir. Bu karşılaştırmada, iki sistemin yatırım maliyetleri, yıllık enerji üretimleri ve sistem kayıpları analiz edilerek hangisinin daha verimli ve ekonomik olduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca, enerji üretim miktarlarındaki farkların, bu sistemlerin uzun vadede sağladığı geri dönüşlere nasıl yansıdığı paylaşılmıştır.

Sabit iki sistem ve güneş takipli iki sistem için, iki farklı yatırım miktarı vardır.

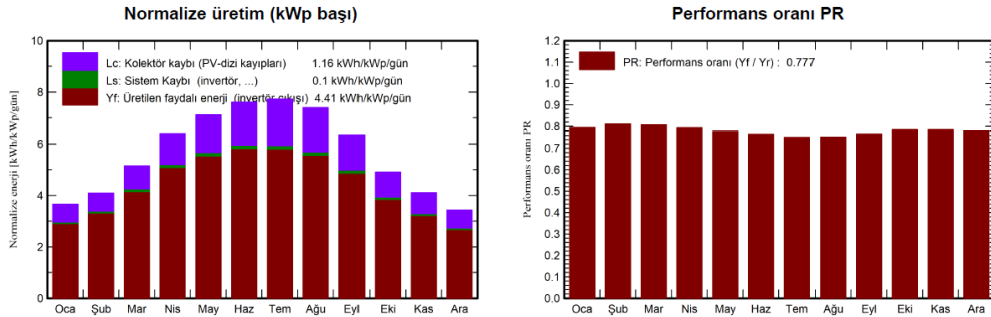
2048 adet 545 Wp birim güce sahip Jinkosolar marka JKM-545M-72HL4-TV model panel, 8 adet Huawei Technologies marka SUN2000-125KTL-M0 model evirici, ek olarak kablolama maliyetleri, sabit konstrüksiyon maliyeti ve kurulum masrafları dahil olmak üzere sabit sistem için 837.120 dolar yatırım gerekmektedir.

2048 adet 545 Wp birim güce sahip Jinkosolar marka JKM-545M-72HL4-TV model panel, 8 adet Huawei Technologies marka SUN2000-125KTL-M0 model evirici, ek olarak kablolama maliyetleri, güneş takipli sistem için gerekli konstrüksiyon maliyeti, kurulum masrafları dahil olmak üzere sabit sistem için 924.039 dolar yatırım gerekmektedir.

Tablo 5.1. Yatırım Miktarları

Sistem Tarzı	Yatırım Miktarı-USD
Sabit Sistem	837.120
Güneş Takipli Sistem	924.039

Yapılan bu yatırımların karşılığında, sistemlerin enerji üretim performansları ve sistem kayıplarının yıllık enerji üretimi üzerindeki etkileri kritik bir değerlendirme gerektirmektedir. Bu doğrultuda, sabit ve güneş takipli sistemlerin yıllık enerji üretimleri ayrı ayrı analiz edilmiş ve her bir sistemin sağladığı enerji miktarları arasındaki farklar değerlendirilmiştir. Ayrıca, bu farkların, sistemlerin ekonomik geri dönüş sürelerine olan etkileri detaylı bir şekilde ele alınmıştır.



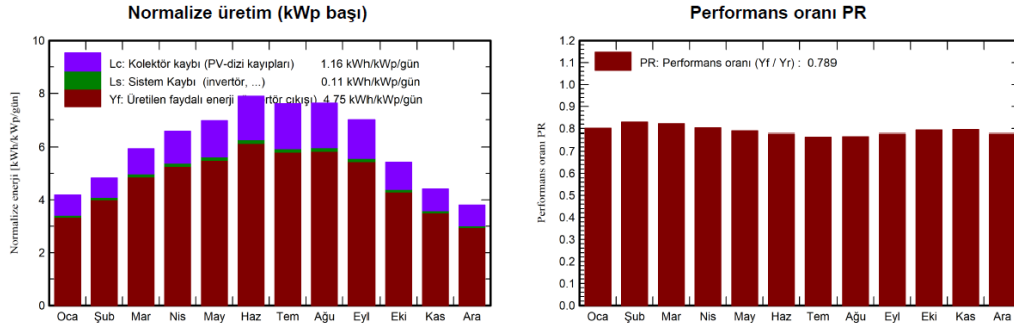
Şekil 5.10. Denizli ili Çameli ilçesi kWp başına kollektör kaybı, sistem kaybı, üretilen faydalı enerji ve performans oranı (Sabit Sistem)

Şekil 5.10'da Çamelinde yer alan sabit fotovoltaik sistemin ay bazında enerji üretimini, sistem kayıplarını, üretilen faydalı enerjiyi ve sistemin performans oranını göstermektedir. Yf, Üretilen Faydalı Enerjiyi ifade eder. Şekil incelendiğinde; en yüksek faydalı enerji üretimi yaz aylarında, özellikle Haziran ve Temmuz aylarında gerçekleştiği görülmektedir. Lc, Kolektör Kaybını ifade eder. Fotovoltaik dizi kayıpları, tüm aylarda sabit bir seviyede seyretmektedir. Ancak üretim arttıkça bu kayıpların etkisi oran olarak azalmış gibi görünmektedir. Ls, Sistem Kaybını ifade eder. Evirici veya kablolama gibi sistem kaynaklı kayıplar sabit bir seviyede seyretmektedir.

Şekil 5.10 incelendiğinde fotovoltaik sistemin yaz aylarında daha verimli çalıştığı, kış aylarında güneş ışıınının düşük olması nedeniyle enerji üretiminin azaldığı görülmektedir. Ancak sistem kayıpları ve kolektör kayıpları sabittir, bu durum sistem performansın tahmin edilebilir bir yapıda olduğunu gösterir.

Performans oranı (PR), sistemin tasarlanan kapasitesine kıyasla ne kadar verimli çalıştığını ifade eder. PR değerleri grafik boyunca PR değeri 0.77 civarında sabit bir seviyededir. Bu, sistemin yıl boyunca istikrarlı bir performans sergilediğini gösterir. Mevsimsel farklar göze alınarak incelendiğinde; PR, özellikle yaz aylarında (Haziran ve

Temmuz) bir miktar azalmıştır. Bu durum, yaz aylarında artan sıcaklık nedeniyle fotovoltaik panellerin performans kaybına uğramasından kaynaklanabilir. 0.77 gibi bir PR değeri, sistemin tasarlandığı verimlilik seviyesine yakın çalıştığını ve çevresel faktörlerin etkilerinin (örn. sıcaklık) kontrol edilebilir seviyede olduğunu göstermektedir.

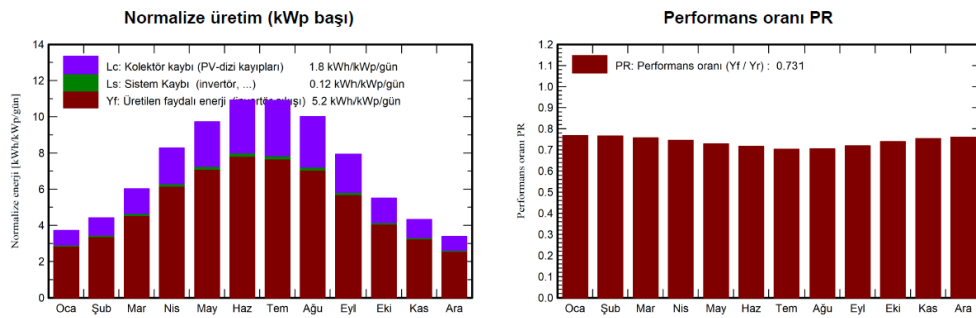


Şekil 5.11. Van ili Özalp ilçesi kWp başına kolektör kaybı, sistem kaybı, üretilen faydalı enerji ve performans oranı (Sabit Sistem)

Şekil 5.11 incelendiğinde fotovoltaik sistemin Haziran ayında daha verimli çalıştığı, kış aylarında ise güneş ışınımının düşük olması nedeniyle enerji üretiminin azaldığı görülmektedir. Ancak sistem kayıpları ve kolektör kayıpları sabittir, bu durum sistem performansın tahmin edilebilir bir yapıda olduğunu gösterir.

Mevsimsel farklar göze alınarak incelendiğinde; PR, özellikle yaz aylarında (Temmuz ve Ağustos) bir miktar azalmıştır. Bu durum, yaz aylarında artan sıcaklık nedeniyle fotovoltaik panellerin performans kaybına uğramasından kaynaklanabilir.

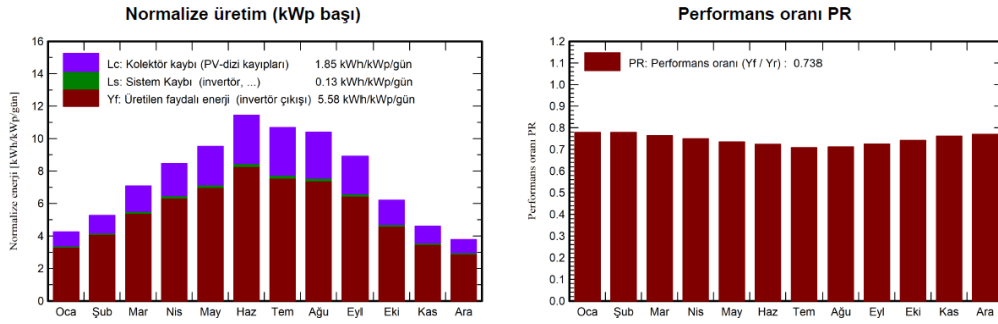
Genel olarak değerlendirildiğinde, 0.789 gibi bir PR değeri, sistemin tasarlandığı verimlilik seviyesine yakın çalıştığını ve çevresel faktörlerin etkilerinin (örn. sıcaklık) kontrol edilebilir seviyede olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.12. Denizli ili Çameli ilçesi kWp başına kolektör kaybı, sistem kaybı, üretilen faydalı enerji ve performans oranı (Güneş Takipli Sistem)

Şekil 5.12 incelendiğinde enerji üretimi yaz aylarında maksimum seviyelerine ulaşmaktadır. Kış aylarında ise güneş ışınımının azalmasıyla üretimin azaldığı görülmektedir. Kollektör kayıpları toplam üretim üzerinde önemli derecede etkiye sahiptir.

PR oranı, sistemin teorik maksimum verimine kıyasla gerçek çalışma verimliliğini ölçmektedir. Grafikte aylık PR değerleri verilmiş ve sistemin yıllık ortalama PR değeri 0.731 olarak belirtilmiştir. Performans oranı aylık bazda oldukça stabil ve %73.1 civarında seyretmektedir. Bu, sistemin verimli bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Yaz aylarında küçük düşüşler, yüksek sıcaklık nedeniyle yaşanan ısınma kaynaklı olabilmektedir.



Şekil 5. 13. Van İli Özalp İlçesi kWp Başına Kollektör Kaybı, Sistem Kaybı, Üretilen Faydalı Enerji ve Performans Oranı (Güneş Takipli Sistem)

Şekil 5.13 incelendiğinde, Şekil 5.12 ile benzer şekilde enerji üretimi yaz aylarında en yüksek seviyelerine ulaşmaktadır. Kış aylarında ise güneş ışınımının azalmasıyla üretimin azaldığı görülmektedir. Kollektör kayıpları toplam üretim üzerinde önemli derecede etkiye sahiptir.

PR oranı, sistemin teorik maksimum verimine kıyasla gerçek çalışma verimliliğini ölçmektedir. Grafikte aylık PR değerleri verilmiş ve sistemin yıllık ortalama PR değeri 0.738 olarak belirtilmiştir. Performans oranı aylık bazda oldukça stabil ve %73.8 civarında seyretmektedir. Bu, sistemin verimli bir şekilde çalıştığını ifade etmektedir. Yaz aylarında küçük düşüşler, yüksek sıcaklık nedeniyle yaşanan ısınma kaynaklı olabilmektedir.

Tablo 5.2’de Çameli ilçesinde tasarımı yapılan sabit fotovoltaik sisteme ait enerji üretimi ve performans verilerini aylar bazında detaylandıran bir performans analiz tablosu yer almaktadır.

Tablo 5. 2. Denizli ili Çameli ilçesi sabit sistem performans analizi

Ay	GlobHor (kWh/m ²)	DiffHor (kWh/m ²)	T_Amb (°C)	GlobInc (kWh/m ²)	GlobEff (kWh/m ²)	EArray (MWh)	E_Grid (MWh)	PR (oran)
Ocak	78,2	25,9	0,78	113,5	105,3	102,9	100,7	0,795
Şubat	89,5	36,49	2,36	114,6	109,4	106,2	103,8	0,811
Mart	136,1	50,11	5,92	159,8	154,1	147,3	143,9	0,807
Nisan	178,6	58,86	9,84	192,2	185,3	174,3	170,3	0,794
Mayıs	219,4	66,78	14,84	220,7	212,9	196,3	191,8	0,779
Haziran	235,8	62,17	19,64	228,3	220,5	199,6	195,1	0,765
Temmuz	243,4	60,19	24,21	239,6	231,4	205,7	201	0,751
Ağustos	217,6	49,46	24,08	229,3	221,8	197,1	192,6	0,753
Eylül	166,9	49,41	18,64	190,7	183,9	167,1	163,3	0,767
Ekim	121,2	43,84	12,61	152,2	146	136,5	133,4	0,786
Kasım	87,8	31,45	6,78	123,3	115,2	110,5	108	0,785
Aralık	72,9	28,12	2,49	106,4	97,3	94,8	92,6	0,78
Yıl	1847,3	562,78	11,91	2070,7	1983,1	1838,1	1796,6	0,777

Tablo 5.2’de Çameli ilçesinde tasarımı yapılan sabit fotovoltaik sisteme ait enerji üretimi ve performans verilerini aylar bazında detaylandıran bir performans analiz tablosudur. Her sütun, farklı bir parametreyi temsil eder ve bunlar sistemin verimliliğini, üretim kapasitesini ve performans oranını (PR) değerlendirmek için kullanılmaktadır.

- GlobHor (kWh/m²): Yatay yüzeye düşen toplam güneş radyasyonunun enerjisini ifade etmektedir. Çameli ilçesi sabit fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam 1847.3 kWh/m²'dir. Ocak ve Aralık gibi kış aylarında düşük (72.9–78.2 kWh/m²), yaz aylarında (Haziran-Temmuz) yüksek (235.8–243.4 kWh/m²) değerler görülmektedir. Bu, güneş ışınımının mevsimsel değişimini açıkça yansıtmaktadır.

- DiffHor (kWh/m²): Yatay yüzeye düşen difüz (dağılık) güneş radyasyonunu ifade eder. Çameli ilçesi sabit fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam 562.78 kWh/m²'dir. Yatay radyasyonun bir kısmının atmosferde dağılma nedeniyle difüz hale geldiğini

göstermektedir.

- T_{Amb} ($^{\circ}C$): Ortam sıcaklığının aylık ortalamalarını ifade eder. Çameli ilçesi sabit fototvoltaik sistem için bu değer yıllık ortalama sıcaklık $11.91^{\circ}C$ olarak hesaplanmıştır. Yaz aylarında sıcaklık $24^{\circ}C$ seviyelerine çıkarken, kış aylarında düşük değerlere ($0.78^{\circ}C$ - $2.49^{\circ}C$) inmektedir. Bu veriler, güneş panellerinin performansını etkileyen sıcaklık değişimlerini anlamada önemlidir. Yüksek sıcaklıklar panellerin verimliliğini azaltabilir.
- G_{Inc} (kWh/m^2): Panel yüzeyine düşen toplam güneş radyasyonunu ifade etmektedir. Panelin konumlandırılmasına bağlı olarak G_{Hor} değerinden daha yüksek olabilir. Çameli ilçesi sabit fototvoltaik sistem için bu değer Yıllık toplam $2070.7 kWh/m^2$ 'dir. Paneller, özellikle yaz aylarında (Haziran-Temmuz) en fazla radyasyonu almaktadır.
- G_{Eff} (kWh/m^2): Panel yüzeyine gelen etkili radyasyonu temsil eder (verimli bir şekilde kullanılabilir radyasyon). Çameli ilçesi sabit fototvoltaik sistem için bu değerlerin yıllık toplamı $1983.1 kWh/m^2$ 'dir.
- E_{Array} (MWh): FV modüllerinden alınan toplam enerji üretimini ifade eder. Çameli ilçesi sabit fototvoltaik sistem için yıllık toplam enerji üretimi $1838.1 MWh$ olarak hesaplanmıştır. Yaz aylarında (Haziran-Temmuz) en yüksek değerlere ulaşmaktadır.
- E_{Grid} (MWh): Şebekeye aktarılan net enerji miktarını ifade etmektedir. Bu değer, E_{Array} değerinden evirici kayıpları ve diğer sistem kayıpları çıkarılarak hesaplanır. Çameli ilçesi sabit fototvoltaik sistem için yıllık toplam enerji miktarı $1796.6 MWh$ 'dir. Bu, sistemin genel kayıplarının yaklaşık $41.5 MWh$ olduğunu gösterir.
- PR (oran): Performans oranını ifade eder ve sistemin gerçek verimini teorik verime kıyaslayarak hesaplanmaktadır. Çameli ilçesi sabit fototvoltaik sistem için yıllık ortalama PR değeri 0.777 (77.7%)'dir. PR , özellikle yaz aylarında (Haziran-Temmuz) azalmaktadır (0.765 - 0.753). Bunun nedeni, yüksek sıcaklıkların güneş panellerinin performansını olumsuz etkilemesidir.

Tablo 5.2'yi genel olarak değerlendirirsek, Güneş ışıınımı (G_{Hor} , G_{Inc}) ve enerji üretimi (E_{Array} , E_{Grid}), yaz aylarında artarken kış aylarında azalmaktadır. Bu, mevsimsel radyasyon değişimlerini ve enerji üretimini yansıtmaktadır. Performans oranı (PR) genel olarak iyi bir seviyede (77.7%). Ancak yaz aylarında düşüş, sistemin sıcaklıkla ilişkili kayıplar yaşadığını ifade edebilir. Sistem, yıllık olarak verimli çalışıyor sonucuna

ulaşılmaktadır. Ancak şebekeye aktarılan enerji (E_Grid) ile modül üretimi (E_Array) arasındaki fark, kayıpların azaltılması için iyileştirme yapılabilir.

Tablo 5.3. Van ili Özalp ilçesi sabit sistem performans analizi

Ay	GlobHor (kWh/m ²)	DiffHor (kWh/m ²)	T_Amb (°C)	GlobInc (kWh/m ²)	GlobEff (kWh/m ²)	E_Array (MWh)	E_Grid (MWh)	PR (oran)
Ocak	86,2	26,98	-5,23	129,6	118,4	118,4	116	0,802
Şubat	100,5	32,12	-3,79	135,3	129	128	125,3	0,83
Mart	153,1	51,99	0,90	183,9	177,2	172,5	168,6	0,822
Nisan	182,2	60,27	6,04	196,9	189,5	180,7	176,5	0,803
Mayıs	213,6	69,37	11,00	216	208,1	194,9	190,5	0,79
Haziran	243	60,29	15,98	236,7	228,5	210,4	205,6	0,778
Temmuz	237,9	59,79	19,92	236	227,7	205,8	201	0,763
Ağustos	223,3	48,23	20,01	236,7	228,8	207	202,2	0,766
Eylül	181,1	43,79	15,15	210,1	202,7	186,6	182,4	0,778
Ekim	130,2	38,97	9,35	168,1	161,3	152,3	148,9	0,794
Kasım	91,4	28,51	2,04	132,3	123,3	120,2	117,6	0,796
Aralık	76,4	25,31	-2,99	117,8	105,1	104,4	102,2	0,777
Yıl	1919,1	545,62	7,43	2199,4	2099,7	1981,1	1936,8	0,789

Tablo 5.3'te Özalp ilçesinde tasarımı yapılan sabit fotovoltaik sisteme ait enerji üretimi ve performans verilerini aylar bazında detaylandıran bir performans analiz tablosudur. Her sütun, farklı bir parametreyi temsil eder ve bunlar sistemin verimliliğini, üretim kapasitesini ve performans oranını (PR) değerlendirmek için kullanılmaktadır.

- GlobHor (kWh/m²): Özalp ilçesi sabit fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam: 1919.1 kWh/m²'dir.
- DiffHor (kWh/m²): Özalp ilçesi sabit fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam: 545.62 kWh/m²'dir.
- T_Amb (°C): Özalp ilçesi sabit fototvoltaik sistem için bu değer yıllık ortalama: 7.43°C'dir. Özellikle Ocak, Şubat ve Aralık aylarında sıcaklıkların sıfırın altında olduğu görülüyor. Soğuk hava koşulları, güneş panellerinin verimliliğini artırabilir çünkü paneller sıcaklık düştükçe daha verimli çalışır.

- GlobInc (kWh/m²): Özalp ilçesi sabit fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam: 2199.4 kWh/m²'dir. Panellerin yerleşim ve açılarının iyi bir şekilde optimize edildiğini gösterir.
- GlobEff (kWh/m²): Özalp ilçesi sabit fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam: 2099.7 kWh/m²'dir.
- EArray (MWh): Özalp ilçesi sabit fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam: 1981.1 MWh'dir.
- E_Grid (MWh): Özalp ilçesi sabit fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam: 1936.8 MWh'dir.
- PR (oran): Özalp ilçesi sabit fototvoltaik sistem için bu değer yıllık ortalama PR: 0.789 (78.9%)'dir.

Tablo 5. 4. Denizli ili Çameli ilçesi güneş takipli sistem performans analizi

Ay	GlobHor (kWh/m ²)	DiffHor (kWh/m ²)	T_Amb (°C)	GlobInc (kWh/m ²)	GlobEff (kWh/m ²)	EArray (MWh)	E_Grid (MWh)	PR (oran)
Ocak	78,2	25,9	0,78	115,3	113,3	101	98,8	0,768
Şubat	89,5	36,49	2,36	123,6	120,1	108,1	105,7	0,766
Mart	136,1	50,11	5,92	186,6	182,1	161,2	157,6	0,757
Nisan	178,6	58,86	9,84	248,4	243,5	211,5	206,8	0,746
Mayıs	219,4	66,78	14,84	301,7	295,7	251,2	245,6	0,729
Haziran	235,8	62,17	19,64	327,8	321,7	268,3	262,4	0,717
Temmuz	243,4	60,19	24,21	338,3	332	271,7	265,7	0,704
Ağustos	217,6	49,46	24,08	310,7	305	250,1	244,6	0,705
Eylül	166,9	49,41	18,64	237,8	232,7	195,5	191,2	0,72
Ekim	121,2	43,84	12,61	170,8	166,3	144,2	141	0,74
Kasım	87,8	31,45	6,78	129,7	125,5	111,7	109,2	0,754
Aralık	72,9	28,12	2,49	104,7	100,7	91	89	0,761
Yıl	1847,3	562,78	11,91	2595,5	2536,7	2165,5	2117,6	0,731

Tablo 5.4'te Çameli ilçesinde tasarımı yapılan güneş takipli fotovoltaik sisteme ait enerji üretimi ve performans verilerini aylar bazında detaylandıran bir performans analiz tablosudur. Her sütun, farklı bir parametreyi temsil eder ve bunlar sistemin verimliliğini, üretim kapasitesini ve performans oranını (PR) değerlendirmek için kullanılmaktadır.

- GlobHor (kWh/m²): En yüksek değerler Temmuz (243.4 kWh/m²) ve Haziran (235.8 kWh/m²) aylarında görülmektedir, bu da yaz aylarında güneş ışıınının maksimum seviyede olduğunu gösterir. En düşük değer ise Aralık (72.9 kWh/m²) ayındadır. Çameli ilçesi güneş takipli fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam: 1847.3 kWh/m²'dir. Tüm aylardaki güneş ışıını değeri kış ve yaz mevsimlerine uygun şekilde değişmektedir.
- DiffHor (kWh/m²): En yüksek değer Mayıs (66.78 kWh/m²) ayında, bulutlu havaların yoğun olduğu dönemlerde görülmektedir. Çameli ilçesi güneş takipli fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam: 562.78 kWh/m²'dir.
- T_Amb (°C): En yüksek sıcaklık Temmuz (24.21°C) ayında, en düşük sıcaklık ise Ocak (0.78°C) ayında kaydedilmiştir. Çameli ilçesi güneş takipli fototvoltaik sistem için bu değer yıllık ortalama: 11.91°C'dir. Aylık değeri Denizli ilinin mevsim normallerine uygun seyretmektedir. (örn. Ocak 0.78°C, Temmuz 24.21°C).
- GlobInc (kWh/m²): En yüksek değer Temmuz (338.3 kWh/m²), en düşük değer ise Aralık (104.7 kWh/m²) ayında gözlemlenmiştir. Çameli ilçesi güneş takipli fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam: 2595.5 kWh/m²'dir.
- GlobEff (kWh/m²): Yüksek verimle çalışan aylar Temmuz (332.0 kWh/m²) ve Haziran (321.7 kWh/m²) olarak görülmektedir. Çameli ilçesi güneş takipli fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam: 2536.7 kWh/m²'dir.
- EArray (MWh): En yüksek elektrik üretimi Temmuz (271.7 MWh), en düşük üretim ise Aralık (91.0 MWh) ayında gerçekleşmiştir. Çameli ilçesi güneş takipli fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam: 2165.5 MWh'dir.
- E_Grid (MWh): En yüksek şebekeye enerji aktarımı Temmuz (265.7 MWh) ayında gerçekleşirken, en düşük Aralık (89.0 MWh) ayında kaydedilmiştir. Çameli ilçesi güneş takipli fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam: 2117.6 MWh'dir.
- PR (oran): En yüksek PR oranı Ocak (0.768) ve Şubat (0.766) aylarında, en düşük ise Ağustos (0.705) ve Temmuz (0.704) aylarında görülmektedir. Yüksek ortam sıcaklıkları ve panel ısınması, yaz aylarında verimliliğin düşmesine neden olmuş olabilir. Çameli ilçesi güneş takipli fototvoltaik sistem için bu değer yıllık ortalama PR: 0.731 yani %73,1 performans oranına sahiptir.

Tablo 5.5. Özalp ili Çameli ilçesi güneş takipli sistem performans analizi

Ay	GlobHor (kWh/m ²)	DiffHor (kWh/m ²)	T_Amb (°C)	GlobInc (kWh/m ²)	GlobEff (kWh/m ²)	EArray (MWh)	E_Grid (MWh)	PR (oran)
Ocak	86,2	26,98	-5,23	132,1	127,3	117,3	114,8	0,779
Şubat	100,5	32,12	-3,79	147,9	143,7	131,3	128,5	0,779
Mart	153,1	51,99	0,90	219,6	214,3	191,5	187,2	0,764
Nisan	182,2	60,27	6,04	254	248,8	217,4	212,5	0,75
Mayıs	213,6	69,37	11,00	295	288,9	247,6	242	0,735
Haziran	243	60,29	15,98	343,6	337,3	283,9	277,6	0,724
Temmuz	237,9	59,79	19,92	331,3	325,1	268,3	262,2	0,709
Ağustos	223,3	48,23	20,01	322,3	316,4	262	256,2	0,712
Eylül	181,1	43,79	15,15	267,6	262,1	221,4	216,5	0,725
Ekim	130,2	38,97	9,35	192,6	187,7	163,1	159,6	0,742
Kasım	91,4	28,51	2,04	138	133,5	119,9	117,3	0,761
Aralık	76,4	25,31	-2,99	117,2	112,5	103	100,8	0,77
Yıl	1919,1	545,62	7,43	2761,2	2697,7	2326,5	2275,2	0,738

Tablo 5.5'te Özalp ilçesinde tasarımı yapılan güneş takipli fotovoltaik sisteme ait enerji üretimi ve performans verilerini aylar bazında detaylandıran bir performans analiz tablosudur. Her sütun, farklı bir parametreyi temsil eder ve bunlar sistemin verimliliğini, üretim kapasitesini ve performans oranını (PR) değerlendirmek için kullanılmaktadır.

- GlobHor (kWh/m²): En yüksek değerler Haziran (243.0 kWh/m²) ve Temmuz (237.9 kWh/m²) aylarında görülmektedir, bu da yaz aylarında güneş ışınımının maksimum seviyede olduğunu gösterir. En düşük değer ise Aralık (76.4 kWh/m²) ayındadır. Özalp ilçesi güneş takipli fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam: 1919.1 kWh/m²'dir.
- DiffHor (kWh/m²): En yüksek değer Mayıs (69.37 kWh/m²) ve Haziran (60.29 kWh/m²) aylarında, bulutlu havalarda yoğun olduğu dönemlerde görülmektedir. En düşük değer ise Ocak (26.98 kWh/m²) ve Aralık (25.31 kWh/m²) aylarında yaşanmıştır. Özalp ilçesi güneş fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam: 545.62 kWh/m²'dir.
- T_Amb (°C): En yüksek sıcaklık Ağustos (20.01°C) ayında, en düşük sıcaklık ise Ocak (-5.23°C) ayında kaydedilmiştir. Özalp ilçesi güneş fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam: 7.43 °C'dir.
- GlobInc (kWh/m²): En yüksek değer Haziran (343.6 kWh/m²), en düşük değer ise Aralık

(117.2 kWh/m²) ayında gözlemlenmiştir. Özalp ilçesi güneş fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam: 2761.2 kWh/m²'dir.

- GlobEff (kWh/m²): Yüksek verimle çalışan aylar Haziran (337.3 kWh/m²) ve Temmuz (325.1 kWh/m²) olarak görünmektedir. Özalp ilçesi güneş fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam: 2697.7 kWh/m²'dir.

- EArray (MWh): En yüksek elektrik üretimi Haziran (283.9 MWh), en düşük üretim ise Aralık (103.0 MWh) ayında gerçekleşmiştir. Özalp ilçesi güneş fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam: 2326.5 MWh'dir.

- E_Grid (MWh): En yüksek şebekeye enerji aktarımı Temmuz (277.6 MWh) ayında gerçekleşirken, en düşük Aralık (100.8 MWh) ayında kaydedilmiştir. Özalp ilçesi güneş fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam: 2275.2 MWh'dir.

- PR (Performans Oranı): En yüksek PR oranı Ocak ve Şubat (0.779) aylarında, en düşük ise Temmuz (0.709) ve Ağustos (0.712) aylarında görülmektedir. Yüksek ortam sıcaklıkları ve panel ısınması, yaz aylarında verimliliğin düşmesine neden olmuş olabilir. Özalp ilçesi güneş fototvoltaik sistem için bu değer yıllık toplam: 0.738 (%73,8)'dir.

Tablo 5.6. Sabit fotovoltaik sistemlerin performans karşılaştırması

Parametre	Denizli İli Çameli İlçesi	Van İli Özalp İlçesi	Farklar ve Yorumlar
GlobHor (kWh/m ²)	1847.3	1919.1	Özalp ilçesinde toplam yatay yüzey ısınımı daha yüksek. Daha iyi güneşlenme koşulları olabilir.
DiffHor (kWh/m ²)	562.78	545.62	Özalp ilçesinde difüz ısıtım daha düşük, güneşli günlerin daha fazla olduğu anlamına gelir.
T_Amb (°C)	11.91	7.43	Özalp ilçesinde ortam sıcaklığı daha düşük. Soğuk hava, Fotovoltaik panellerin verimliliğini artırmış olabilir.
GlobInc (kWh/m ²)	2070.7	2199.4	Özalp ilçesinde panellere düşen toplam radyasyon daha yüksek.
GlobEff (kWh/m ²)	1983.1	2099.7	Özalp ilçesinde daha yüksek etkili radyasyon mevcut.
EArray (MWh)	1838.1	1981.1	Özalp ilçesinde fotovoltaik modüllerinden alınan enerji üretimi yaklaşık %7 daha yüksek.
E_Grid (MWh)	1796.6	1936.8	Özalp ilçesinde şebekeye aktarılan enerji miktarı daha fazla, sistem kayıpları daha az.
PR (Performans Oranı)	0.777 (77.7%)	0.789 (78.9%)	Özalp ilçesinde PR değeri daha yüksek. Soğuk hava koşulları ve daha iyi ısıtım etkili olabilir.

Tablo 5.6’da sabit fotovoltaik sistemlerin performans karşılaştırması verilmektedir. Özalp ilçesi, Çameli ilçesine kıyasla daha iyi enerji üretimi ve performans oranı göstermektedir. Bunun nedenleri;

- Daha düşük ortam sıcaklıkları fotovoltaik panellerin verimliliğini artırmış olabilir.
- Daha fazla yatay ve toplam radyasyon alınması olabilir.

Özalp ilçesi, Çameli ilçesine kıyasla üretim artışı göstermektedir. Şebekeye aktarılan enerji yaklaşık 140 MWh daha fazla, bu da kayıpların azaldığını ve sistemin daha iyi optimize edildiğini göstermektedir.

Bu karşılaştırma, güneş enerji santralinin optimizasyon fırsatlarını ve farklı sistem konfigürasyonlarının etkilerini net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Tablo 5.7. Güneş takipli fotovoltaik sistemlerin performans karşılaştırması

Parametre	Denizli İli Çameli İlçesi	Van İli Özalp İlçesi	Farklar ve Yorumlar
GlobHor (kWh/m ²)	1847.3	1919.1	Özalp ilçesinde toplam yatay yüzey ışıınımı daha yüksek. Daha iyi güneşlenme koşulları olabilir.
DiffHor (kWh/m ²)	562.78	545.62	Özalp ilçesinde difüz ışıınım daha düşük, güneşli günlerin daha fazla olduğu anlamına gelir.
T_Amb (°C)	11.91	7.43	Özalp ilçesinde ortam sıcaklığı daha düşük. Soğuk hava, Fotovoltaik panellerin verimliliğini artırmış olabilir.
GlobInc (kWh/m ²)	2595.5	2761.2	Özalp ilçesinde panellere düşen toplam radyasyon daha yüksek.
GlobEff (kWh/m ²)	2536.7	2697.7	Özalp ilçesinde daha yüksek etkili radyasyon mevcut.
EArray (MWh)	2165.5	2326.5	Özalp ilçesinde fotovoltaik modüllerinden alınan enerji üretimi yaklaşık %7 daha yüksek.
E_Grid (MWh)	2117.6	2275.2	Özalp ilçesinde şebekeye aktarılan enerji miktarı daha fazla, sistem kayıpları daha az.
PR (Performans Oranı)	0.731 (73.1%)	0.738 (73.8%)	Özalp ilçesinde PR değeri daha yüksek. Soğuk hava koşulları ve daha iyi ışıınım etkili olabilir.

Tablo 5.7’de güneş takipli fotovoltaik sistemlerin performans karşılaştırması verilmektedir.

Işınım ve Üretim: Özalp ilçesinde tasarlanan santral, daha fazla global ışınlam aldığı için hem enerji üretimi hem de şebekeye aktarılan enerji açısından daha iyi performans göstermiştir.

Sıcaklık Etkisi: Çameli ilçesinde tasarlanan santral, daha yüksek ortam sıcaklıklarına maruz kalmıştır. Bu durum, yaz aylarında panel verimliliğinin düşmesine ve daha düşük performans oranına neden olmuştur.

Difüz Işınım: Çameli ilçesinde tasarlanan santralin difüz ışınlam daha yüksektir, bu da bulutlu hava koşullarının daha fazla olduğu anlamına gelir. Bu durum direkt ışınlamın azalmasına ve toplam enerji üretiminin düşmesine neden olmuştur.

Genel olarak performans değerlendirme sonuçları analiz edildiğinde Özalp ilçesi, Çameli ilçesine kıyasla üretim artışı göstermektedir.

Performans olarak değerlendirdiğimiz bu 4 farklı sistemi bu tez çalışmasında bir de amortisman süresi olarak değerlendirilmektedir. Tablo 5.8’de hem sabit hem de güneş takipli sistemler için amortisman süresi karşılaştırılması paylaşılmaktadır.

Tablo 5.6 ve 5.7’yi karşılaştırdığımızda ise güneş takipli sistemin PR oranının, sabit sisteme göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni; güneş takipli sistemler, panellerin güneşe sürekli dönük olmasını sağladığı için güneş ışınlamını daha fazla alır. Bu durum, panel sıcaklığının artmasına neden olur. Panel sıcaklığındaki artış, fotovoltaik hücrelerin verimini düşürür. Sıcaklık artışı, hücrelerin daha hızlı yaşlanmasına ve degradasyon oranının artmasına neden olur. Ek olarak, güneş takipli sistemlerde kullanılan hareketli mekanizmalar, mekanik strese ve bağlantı noktalarının zarar görmesine yol açabilir. Bu durum, modüllerin performansını uzun vadede azaltabilir.

Tablo 5.8. Sabit ve güneş takipli fotovoltaik sistemlerin amortisman süresi karşılaştırması

İl/İlçe	Denizli İli Çameli İlçesi		Van İli Özalp İlçesi	
Sistem/Parametreler	Sabit	Güneş Takipli	Sabit	Güneş Takipli
Üretim Miktarı (MWh/yıl)	1.797	2.118	1.937	2.275
Yatırım Miktarı (USD)	837.120	942.039	837.120	942.039
Amortisman Süresi (yıl)	6,10	5,80	5,60	5,40

Tablo 5.8'i değerlendirdiğimizde; Denizli ili ameli ilçesi ve Van ili zalp ilçesinde sabit ve güneş takipli sistemlerin karşılaştırılması, güneş takipli sistemlerin daha yüksek yatırım maliyeti (%12,5) gerektirdiğini, ancak bu yatırımın daha kısa amortisman süresi ile (%5) telafi edildiğini göstermektedir.

Her iki bölgede de güneş takipli sistemler, sabit sistemlere kıyasla yaklaşık %17 daha fazla elektrik üretmiş olup, bu durum yatırımın daha kısa sürede geri dönmesini sağlamıştır.

Bölgesel olarak değerlendirildiğinde, Van ili zalp ilçesi daha yüksek enerji üretim kapasitesine sahip olup, sabit ve takipli sistemlerde amortisman süresinin Denizli ili ameli ilçesine göre daha kısa olması, bu bölgeyi yatırım açısından daha avantajlı kılmaktadır.

Bu bulgular, güneş takipli sistemlerin daha yüksek başlangıç maliyetine rağmen, uzun vadede daha krlı bir yatırım olduğunu ortaya koymaktadır.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, sabit ve güneş takipli fotovoltaik (FV) sistemlerin performansları detaylı bir şekilde karşılaştırılmış ve analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, Türkiye'nin farklı iklimsel koşullarını temsil eden Denizli ili Çameli ilçesi ile Van ili Özalp ilçesinde FV sistemler tasarlanmış ve performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, sabit sistemlerle tek eksenli güneş takip sistemleri karşılaştırılmış ve her iki sistemin enerji üretim kapasiteleri, verimlilikleri ve ekonomik getirileri değerlendirilmiştir.

Sabit ve güneş takipli fotovoltaik sistemlerin performans karşılaştırması yapılırken her iki bölge için aynı fotovoltaik panel ve evirici kullanılarak üretim kapasiteleri aynı olacak şekilde tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Van ili Özalp ilçesi ve Denizli ili Çameli ilçesindeki sistemlerin verimlilikleri ve kayıpları incelenmiş, bu iki bölgedeki iklimsel ve topografik farklılıkların fotovoltaik sistemlerin performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Bu karşılaştırmalı analiz sonucunda elde edilen bulgularla, sabit ve güneş takipli fotovoltaik sistemlerin farklı coğrafi bölgelerdeki performanslarına dair önemli çıkarımlar yapılmaktadır.

Analiz sonuçları, güneş takipli sistemlerin sabit sistemlere kıyasla enerji üretim miktarını anlamlı derecede artırdığını göstermiştir. Örneğin, sabit sistemlerle Çameli ilçesinde yıllık 1.797 MWh enerji üretilirken, güneş takipli sistemle bu değer %17,8 oranında artarak 2.118 MWh'ye ulaşmıştır. Benzer şekilde, Özalp ilçesinde sabit sistemde yıllık üretim 1.937 MWh iken, güneş takipli sistem bu üretimi %17,4 artırarak 2.275 MWh'ye çıkarmıştır. Bu sonuçlar, güneş takipli sistemlerin daha yüksek ışıınım koşullarında enerji üretim kapasitesini optimize etme potansiyeline sahip olduğunu kanıtlamaktadır.

Ekonomik analiz sonuçlarına göre, güneş takipli sistemler sabit sistemlere kıyasla daha yüksek bir yatırım maliyeti gerektirse de (942.039 USD'ye karşı 837.120 USD), amortisman süreleri daha kısa olmuştur. Çameli ilçesi için sabit sistemde amortisman süresi 6,1 yıl olarak hesaplanırken, güneş takipli sistemde bu süre 5,8 yıla düşmüştür. Özalp ilçesinde ise sabit sistemde amortisman süresi 5,6 yıl iken, güneş takipli sistemde

5,4 yıl olmuştur. Bu veriler, takipli sistemlerin başlangıç maliyetlerini daha hızlı amorti edebileceğini göstermektedir.

Her iki bölge arasındaki karşılaştırmada, Özalp ilçesinin güneş enerjisi potansiyeli açısından daha avantajlı olduğu görülmüştür. Toplam radyasyon değerlerinin yüksekliği ve ortam sıcaklığının düşük olması, Özalp ilçesindeki enerji üretimini ve performans oranını olumlu etkilemiştir. Bununla birlikte, güneş takipli sistemlerin karmaşıklığı ve bakım gereksinimlerinin sabit sistemlere kıyasla daha fazla olduğu da göz önünde bulundurulmalıdır.

Çalışmanın diğer önemli bir bulgusu, simülasyon sonuçlarının yerel iklim ve güneşlenme verileri ile optimize edilmesinin FV sistemlerin performansını artırabileceğini ortaya koymaktadır. PVsyst yazılımı kullanılarak yapılan detaylı simülasyonlar, her iki lokasyon için de enerji üretim potansiyelinin doğru bir şekilde tahmin edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu simülasyonların sonuçları, gerçek sistem tasarımlarına yönelik önemli ipuçları sunmaktadır ve sahada kurulum öncesi teknik fizibilitenin artırılmasına katkıda bulunmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, Türkiye gibi güneş enerjisi potansiyeli yüksek bir ülkede, FV sistemlerin yaygınlaştırılmasına yönelik stratejik bir yol haritası sunmaktadır. Güneş takip sistemlerinin sunduğu enerji üretim avantajı ve çevresel faydalar, bu teknolojinin sürdürülebilir enerji üretiminde önemli bir role sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, sabit sistemlerin daha düşük kurulum ve işletme maliyetleri, özellikle geniş alanlara sahip bölgelerde ekonomik bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Gelecekte, bu tür sistemlerin ekonomik ve teknolojik açıdan daha erişilebilir hale gelmesi, yenilenebilir enerji hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynayacaktır.

KAYNAKLAR

- Akcan, E., Kuncan, M., & Minaz, M. R. (2020). PVsyst Yazılımı ile 30 kW Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemin Modellenmesi ve Simülasyonu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (18), 248-261.
- Aksangör, N. N. (2019). Ankara Şartlarında Bir Fotovoltaik Sistemin PVsyst Programı Yardımı ile Performans Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 567917.
- Aydın Görücü, E., & Özdemir, Ş. (2024). Sabit ve Güneş Takipli Fotovoltaik Sistemlerin Karşılaştırılması. *Ahi Evran 4. International Congress on Scientific Research* (s. 368-377), Kırşehir, Türkiye, 26-28 Nisan 2024.
- Bakıcı, F., Fotovoltaik Güneş Enerjisi Sistemlerinde Kullanılan Inverterler ve Seçim Kriterleri.
- Baouche, F. Z., Abderezzak, B., Ladmi, A., Arbaoui, K., Suciu, G., Mihaltan, T. C., ... & Turcanu, F. E. (2022). Design and Simulation of a Solar Tracking System For PV. *Applied Sciences, Urban Sustainability and Resilience of the Built Environments*, 12(19), 9682.
- Castillo, C. P., e Silva, F. B., & Lavallo, C. (2016). An Assessment of The Regional Potential for Solar Power Generation in EU-28. *Energy Policy*, 88, 86-99.
- Çelebi, G. (2002). Bina Düşey Kabuğunda Fotovoltaik Panellerin Kullanım İlkeleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17(3).
- Demirtaş, M. (2008). Güneş ve Rüzgâr Enerjisi Kullanılarak Şebeke ile Paralel Çalışabilen Hibrit Enerji Santrali Tasarımı ve Uygulaması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 212792.
- Doğan, Y. (2019). Off-grid Sistemler, SB Solar, <https://sbsolar.com.tr/off-grid-sistemler>, (Ziyaret Tarihi: 24 Ocak 2025)
- Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği (2019). T.C. Resmi Gazete (30772, 12 Mayıs 2019). EPDK (T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu).*
- Etcı, A., (2022). PVsyst Programı ile Modellenen Konya ve Van İllerinde GES Santrallerinin Üretim Verilerinin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nevşehir, 742665.
- Jang, J., & Lee, K. (2020). Practical Performance Analysis of a Bifacial PV Module and System. *Energies*, 13(17), 4389.
- Kantaroğlu, F. (2010). Fotovoltaik Sistemler. *Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi*, 68(1), 28-34.

- Karamanav, M. (2007). *Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 212252.
- Kayrı, İ. (2023). Fotovoltaik Uygulamalar İçin Kararlı Tek Eksenli Bir Güneş Takip Sistemi Tasarımı ve Uygulaması. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(2), 432-450.
- Keskin, E. (2012). Türkiye İklim Koşullarında Fotovoltaik Güç Sistemlerinin Tasarımı ve Maliyet Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 321347.
- Kılıç, U. (2018). Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Enerji Üretim Sistemlerinin Tasarlanması ve Türkiye'de Farklı Coğrafik Bölgelerdeki Performans Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 531224.
- Kıyanççek, E. (2013). Fotovoltaik Sistemlerin Boyutlandırılması İçin Pvs2 Paket Programının Gerçekleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 346463.
- Kljajić, R., Kraus, Z., Tuđan, M., & Marić, P. (2022, October). Comparison of Cost-Effectiveness of Fixed and Two-axis Tracking PV System in Market Conditions. In *2022 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST)* (pp. 27-32). IEEE.
- Kumar, N. M., Kumar, M. R., Rejoice, P. R., & Mathew, M. (2017). Performance Analysis of 100 kWp Grid Connected Si-poly Photovoltaic System Using PVsyst Simulation Tool. *Energy Procedia*, 117, 180-189.
- Molina Boza, O. (2009). Diseño de un Parque Solar Fotovoltaico de 100 kW Proyecto de Inversion/Impacto Ambiental.
- Moradi, H., Abtahi, A., & Messenger, R. (2016). Annual performance Comparison Between Tracking and Fixed Photovoltaic Arrays. In *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* (pp. 3179-3183). IEEE
- Nann, S. (1990). Potentials for Tracking Photovoltaic Systems and V-troughs in Moderate Climates. *Solar Energy*, 45(6), 385-393.
- Niederhäuser, E. L., & Rogue, M. (2017). Technical Report on Best Practices for Energy Storage Including Both Efficiency and Adaptability in Solar Cooling Systems. *SHC Solar*.
- Ovuz, K. (2018). Kırıkkale İklim Şartlarında Sıcaklığın Polikristal Fotovoltaik Panelin Enerji Verimliliği Üzerine Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 513956.

- Öztürk, H.H. (2017). Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler. TMMOB EMO, Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi, İzmir, Türkiye, 18–21 Ekim 2017.
- Patel, M. T., Imran, H., Ahmed, M. S., Butt, N. Z., Alam, M. A., & Khan, M. R. (2020, June). When and Where to Track: A Worldwide Comparison of Single-Axis Tracking vs. Fixed Tilt Bifacial Farms. In *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* (pp. 1735-1737). IEEE.
- Peura, J., & Torssell, J. (2018). Evaluation of Simulation Methods and Optimal Installation Conditions for Bifacial PV Modules: A case Study on Swedish PV Installations.
- Ponce-Jara, M. A., Velásquez-Figueroa, C., Reyes-Mero, M., & Rus-Casas, C. (2022). Performance Comparison Between Fixed and Dual-Axis Sun-Tracking Photovoltaic Panels With an IoT Monitoring System In The Coastal Region of Ecuador. *Sustainability*, 14(3), 1696.
- Price, S. (2010). 2008 Solar Technologies Market Report.
- Rahaman, M. H. (2020). *Design, Analysis and Control of Solar Heating System With Seasonal Thermal Energy Storage*. Doctoral Dissertation, Memorial University of Newfoundland.
- Sağlam, S., & Oy Akkaya, S. (2024). İki Eksenli Güneş Takip Sistemi ile Sabit Eksenli Fotovoltaik (PV) Sistemlerinin Tasarımı ve Uzaktan İzlenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 12(1), 348-364.
- Sastre Pujol, L. (2019). *Design and Simulation of a 10MW Grid-Connected PV System*. Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Sayın, S., & Koç, İ. (2011). Güneş Enerjisinden Aktif Olarak Yararlanmada Kullanılan Fotovoltaik (PV) Sistemler ve Yapılarda Kullanım Biçimleri. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 26(3), 89-106.
- Sekuçoğlu, S. A. (2012). Fotovoltaik (PV), Rüzgâr ve Hibrit Sistemlerin Tasarımı ve Ekonomik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 306777.
- Shukla, A. K., Sudhakar, K., & Baredar, P. (2016). Simulation and Performance Analysis of 110 kWp Grid-Connected Photovoltaic System for Residential Building in India: A comparative Analysis of Various PV Technology. *Energy Reports*, 2, 82-88.
- Svarc, J. (2014). What are Monocrystalline, Polycrystalline And Thin Film Solar Panels?, *Clean Energy Reviews*, <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/pv-panel-technology> (Ziyaret Tarihi: 24 Ocak 2025).

- Tekkale, G. (2018). Türkiye'nin Çeşitli İllerinde Yapılacak Arazi Tipi Lisanssız Güneş Enerjisi Santrali Yatırımlarının Teknik ve Finansal Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul, 511547.
- Tunçer, B. (2022). Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Güç Sistemlerinin Analizi, Benzetimi ve Boyutlandırılması. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 742828.
- Turmuş, A. (2018). Düzlemsel Yansıtma Destekli Düzlemsel Güneş Paneli Tasarımı– Elektrik Üretimi ve Verim Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 492723.
- Uçar, S. (2018). Çatı ve Cephelerde Fotovoltaik Panel Uygulamaları Üzerine Bir Çalışma: Burdur örneği. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Arel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 490220.
- URL-1: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024> (Ziyaret Tarihi: 24 Ocak 2025).
- URL-2: <https://gepa.enerji.gov.tr/Default.aspx> (Ziyaret Tarihi: 24 Ocak 2025).
- URL-3: <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri> (Ziyaret Tarihi: 24 Ocak 2025).
- URL-4: https://tr.wikipedia.org/wiki/Denizli%27nin_il%C3%A7eleri (Ziyaret Tarihi: 24 Ocak 2025).
- URL-5: <https://gepa.enerji.gov.tr/pages/20.aspx> (Ziyaret Tarihi: 24 Ocak 2025).
- URL-6: https://tr.wikipedia.org/wiki/Van%27nC4%B1n_il%C3%A7eleri (Ziyaret Tarihi: 24 Ocak 2025).
- URL-7: <https://gepa.enerji.gov.tr/pages/65.aspx> (Ziyaret Tarihi: 24 Ocak 2025).
- URL-8: <https://www.jinkosolar.com/uploads/JKM525-545M-72HL4-TV-F1-EN.pdf> (Ziyaret Tarihi: 24 Ocak 2025).
- URL-9: <https://www.scribd.com/document/626226618/SUN2000-125KTL-M0> (Ziyaret Tarihi: 24 Ocak 2025).
- Weiss, W., & Spörk-Dür, M. (2021). Solar Heat Worldwide Detailed Market Data 2019. 2021 EDITION, Global Market Development and Trends in 2020. *Supported by the Austrian Ministry*.
- Yücel, Y. (2016). Güneş Enerjisinden Yararlanmak Amacı ile Fotovoltaik Sistemlerin Binalarda Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 454800.

Zarei Zohdi, H., & Sarvi, M. (2023). Optimal and Economic Evaluation of Using a Two-axis Solar Tracking System in Photovoltaic Power Plants, a Case Study of “Tehran”, Iran. *Journal of Solar Energy Research*, 8(1), 1211-1221.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Aydın Görücü, E., & Özdemir, Ş. (2024). Sabit ve Güneş Takipli Fotovoltaik Sistemlerin Karşılaştırılması. *Ahi Evran 4. International Congress on Scientific Research* (s. 368-377), Kırşehir, Türkiye, 26-28 Nisan 2024.



ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Kahramanmaraş'ta tamamladı. Lisans eğitimini Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'nde tamamlayarak 2019 yılında mezun oldu. 2023 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2020 yılından bu yana özel sektörde enerji yönetimi ve sürdürülebilirlik alanında çalışmalarını sürdürmektedir.

