



**T.C.
AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FOTOVOLTAİK BİR TESİSİN ÜRETİM DEĞERLERİNİN
BENZETİM YAZILIMLARI SONUÇLARIYLA
KARŞILAŞTIRILMASI: ERBAA BELEDİYESİ GÜNEŞ ENERJİ
SANTRALİ ÖRNEĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİLGEHAN EGEMEN

HAZİRAN

BİLGEHAN EGEMEN

**YENİLENEBİLİR ENERJİ VE
UYGULAMALARI ANABİLİM DALI**

HAZİRAN 2023

**FOTOVOLTAİK BİR TESİSİN ÜRETİM DEĞERLERİNİN BENZETİM
YAZILIMLARI SONUÇLARIYLA KARŞILAŞTIRILMASI: ERBAA
BELEDİYESİ GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİ ÖRNEĞİ**

Bilgehan EGEMEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
YENİLENEBİLİR ENERJİ VE UYGULAMALARI ANABİLİM DALI**

Danışman

Prof. Dr. Ünal KURT

**AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2023

Yüksek Lisans Tezi Kabul ve Onay Sayfası

Bilgehan EGEMEN tarafından hazırlanan “Fotovoltaik Bir Tesisin Üretim Değerlerinin Benzetim Yazılımları Sonuçlarıyla Karşılaştırılması: Erbaa Belediyesi Güneş Enerji Santrali Örneği” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yenilenebilir Enerji Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ünal KURT

Elektrik Makineleri Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Başkan : Prof. Dr. Okan ÖZGÖNENEL

Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı, Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet EKİCİ

Elektrik Makineleri Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 09/06/2023

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ümit YILDIRIM

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Bilgehan EGEMEN

09/06/2023

FOTOVOLTAİK BİR TESİSİN ÜRETİM DEĞERLERİNİN BENZETİM
YAZILIMLARI SONUÇLARIYLA KARŞILAŞTIRILMASI: ERBAA BELEDİYESİ
GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİ ÖRNEĞİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Bilgehan EGEMEN

AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2023

ÖZET

Bu çalışmada Tokat ili Erbaa ilçesinde kurulu olan Erbaa Belediyesi 990 kWp Güneş Enerji Santrali'nin bir yıllık enerji üretim verileri elde edilmiştir. Güneş enerji santrallerinin fizibilite çalışmalarında kullanılan PV*SOL ve PVSyst yazılımlarının deneme sürümleri kullanılarak santralin tasarımı ve benzetimi gerçekleştirilmiştir. Benzetimlerde santralin meteorolojik parametreleri meteonorm veri tabanından elde edilmiştir. Benzetimlerde kullanılan modüller ve eviriciler santralde kullanılan modüllerin ve eviricilerin marka ve modelinde seçilmiştir. Albedo, modül eğim açısı, azimut açısı parametrelerinin verileri ile kablolar ve uyumsuzluklara bağlı kayıplara ait veriler gerçeğe uygun olarak girilmiştir. Tüm parametrelerin her iki benzetim yazılımında da sabit tutulması koşulu ile eğimli yüzeylere düşen toplam ışıının hesaplanmasında kullanılan Hay-Davies ve Perez modelleri ile ikişer tane olmak üzere toplam dört benzetim gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonuçları gerçek üretim verileri ile grafikler ve şekiller kullanılarak karşılaştırılmıştır. Aylık benzetim sonuçlarının PV*SOL yazılımında gerçek verilere daha yakın olduğu, yıllık benzetim sonuçlarının ise PVSyst yazılımında kullanılan Perez eğimli yüzeyler üzerine düşen toplam ışıının modeli ile gerçekleştirilen benzetimin gerçek verilere daha yakın olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Sayfa Adedi	: 59
Anahtar Kelimeler	: FV, Benzetim, Hay ve Davies Modeli, Perez Modeli
Danışman	: Prof. Dr. Ünal KURT

COMPARISON OF THE PRODUCTION VALUES OF A PHOTOVOLTAIC POWER
PLANT WITH THE RESULTS OF SIMULATION SOFTWARE: THE EXAMPLE OF A
SOLAR POWER PLANT IN THE MUNICIPALITY OF ERBAA

(M. Sc. Thesis)

Bilgehan EGEMEN

AMASYA UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2023

ABSTRACT

In this study, annual energy production data of the Erbaa Municipality 990 kWp Solar Power Plant, which is located in Erbaa district of Tokat province, were obtained. The design and simulation of the power plant was carried out by using the trial versions of PV*SOL and PVsyst softwares used in the feasibility studies of solar power plants. In the simulations, the meteorological parameters of the power plant were obtained from the meteonorm database. The modules and inverters used in the simulations were selected according to the brand and the model of the modules and the inverters used in the power plant. The data of albedo, module tilt angle, azimuth angle parameters and data of losses due to cables and mismatches were entered in accordance with reality. A total of four simulations, two each, were performed using the Hay-Davies and Perez models used to calculate the total irradiance on a tilted surface, provided that all parameters are kept constant in both simulation software. The simulation results were compared with the real production data by using graphs and figures. It has been concluded that the monthly simulation results are closer to the actual data in the PV*SOL software, while the annual simulation results are closer to the actual data of the simulation implemented by the total radiation model falling on Perez inclined surfaces used in the PVsyst software.

Number of pages : 59
Keywords : PV, Simulation, Hay and Davies Model, Perez Model
Supervisor : Prof. Dr. Ünal KURT

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bana zaman ayıran, yardımcı olan ve tecrübelerini benimle paylaşan tez danışmanım Prof. Dr. Ünal KURT'a teşekkürü borç bilirim.

Çalışmada kullandığım GES üretim verilerini benimle paylaşan Erbaa Belediyesi ve Erbaa GES çalışanlarına şükranlarımı sunarım.

Çalışmamın başından itibaren yanımda bulunan ve manevi desteğini hiç esirgemeyen kıymetli eşim Mihriban Tuğba EGEMEN'e, birlikte vakit geçirebilmek için sabırla çalışmamı bitirmemi bekleyen oğlum Yavuzhan ve kızım Zeynep'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli	7
1.2. Güneş Enerjisinin Türkiye'de Kullanımı	10
2. LİTERATÜR TARAMASI	11
3. MATERYAL VE METOT	15
3.1. Güneş Enerjisi ve Teknolojileri.....	15
3.1.1. Fotovoltaik etki.....	16
3.1.2. Fotovoltaik hücreler ve güneş pilleri	16
3.1.3. Fotovoltaik sistem çeşitleri	21
3.1.4. Güneş enerji sistemlerinde yaygın olarak kullanılan benzetim yazılımları.....	22
4. BULGULAR.....	24
4.1. Erbaa Belediyesi 990 kWp Güneş Enerji Santrali	24
4.1.1. Santralde kullanılan eviriciler ve teknik özellikleri.....	24
4.1.2. Santralde kullanılan güneş pilleri ve özellikleri	26
4.1.3. Evirici ve güneş pili bağlantıları.....	27
4.1.4. Güneş enerji santrali panosu.....	29

Sayfa

4.1.5. Santralin yıllık üretim verileri	30
4.2. Güneş Enerji Santralının PV*SOL ve PVsyst Yazılımları ile Benzetimleri.....	30
4.2.1. Güneş enerji santralının PV*SOL yazılımı benzetimi	34
4.2.2. Güneş enerji santralının PVsyst yazılımı benzetimi.....	40
4.3. Benzetim sonuçlarının gerçek üretim verileri ile karşılaştırılması.....	48
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	53
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ.....	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. 2020 yılında dünyada kaynağa göre elektrik üretim miktarları (IEA, 2023). ...2	
Çizelge 1.2. 2009-2021 yılları arasında yenilenebilir kaynaklı kurulu gücün Türkiye toplam kurulu gücü içindeki payının yıllar itibariyle gelişimi (TEİAŞ, 2021). 6	
Çizelge 3.1. Güneş pillerinin tarihsel gelişimine göre sınıflandırılması (Ceylan, 2018).....19	
Çizelge 4.1. Farklı yüzeylerin albedo değerleri 32	
Çizelge 4.2. Sonuçların karşılaştırması.....49	
Çizelge 5.1. Amasya Üniversitesi GES enerji üretimi (2016-2020).....51	

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjinin yıllara göre dağılımı	3
Şekil 1.2 2020 yılı kaynaklara göre yenilenebilir enerji dağılımı.....	3
Şekil 1.3. 2019 yılı yenilenebilir kaynaklardan ülkeler bazında toplam üretim	4
Şekil 1.4. 2021 yılı Türkiye’de kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı	5
Şekil 1.5. 2021 yılında Türkiye’de yenilenebilir enerji üretim dağılımı	6
Şekil 1.6. 2000-2030 yılları sürdürülebilir kalkınma senaryosunda yenilenebilir enerji üretimi	7
Şekil 1.7. Avrupa solar ışıınım yoğunluğu haritası (Meteonorm, 2015)	8
Şekil 1.8. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (ETKB, 2022).....	9
Şekil 1.9. Türkiye’de güneş enerjisi kurulu gücünün yıllara göre değişimi	9
Şekil 3.1. FV hücrenin eşdeğer devresi	17
Şekil 3.2. FV hücrenin akım gerilim eğrisi ve maksimum güç noktası	18
Şekil 3.3. Monokristal ve polikristal güneş pilleri	19
Şekil 3.4. 2. Nesil güneş pilleri	20
Şekil 3.5. 3. Nesil güneş pilleri	21
Şekil 3.6. Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemlerin blok şeması	21
Şekil 3.7. Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerin blok şeması	22
Şekil 4.1. Erbaa güneşlenme süreleri	24
Şekil 4.2 Eviricilerin teknik özellikleri (Huawei, 2023).....	25
Şekil 4.3. Huawei Sun2000-185KTL-H1	25
Şekil 4.4. Güneş pili mekanik bileşenleri, sıcaklık katsayıları ve maksimum çalışma şartları (Odulsolar, 2023)	26
Şekil 4.5. Güneş pilinin elektriksel verileri (Odulsolar, 2023)	27

Şekil	Sayfa
Şekil 4.6. 1,2,3,4 ve 5 numaralı eviricilerin bağlantı şeması	28
Şekil 4.7. 6 numaralı eviricinin bağlantı şeması	29
Şekil 4.8. GES panosu devre şeması.....	30
Şekil 4.9. Enspire power system yazılımı arayüzü	31
Şekil 4.10. GES üretim verileri.....	31
Şekil 4.11. System Type, Climate and Grid sekmesinin görünümü	35
Şekil 4.12. PV Modules sekmesinin görünümü.....	36
Şekil 4.13. Inverters sekmesinde 6 numaralı eviricinin dizi-modül sayıları.....	36
Şekil 4.14. Cables sekmesinin görünümü	37
Şekil 4.15. Devre şeması.....	38
Şekil 4.16. PV*SOL benzetim sonuçları (Hay ve Davies modeli).....	39
Şekil 4.17. PV*SOL benzetim sonuçları (Perez modeli).....	39
Şekil 4.18. PVsyst'te Hoş Geldiniz penceresi	40
Şekil 4.19. Yeni FV modül tanımlama	41
Şekil 4.20. Konum penceresi	42
Şekil 4.21. Proje bilgileri	42
Şekil 4.22. Yönlendirme penceresi	43
Şekil 4.23. Sistem penceresi	44
Şekil 4.24. Ufuk çizgisi.....	45
Şekil 4.25. Proje Ayarları.....	45
Şekil 4.26. Varyant penceresi	46
Şekil 4.27. PVsyst benzetim sonuçları (Hay ve Davies modeli)	47
Şekil 4.28. PVsyst benzetim sonuçları (Perez modeli)	48
Şekil 4.29. Benzetim sonuçlarının aylık karşılaştırma grafiği	49

Şekil	Sayfa
Şekil 4.30. Benzetim sonuçlarının yıllık karşılaştırma grafiği.....	50
Şekil 5.1. Amasya Üniversitesi GES MATLAB elektrik devre şeması	52



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, yanda açıklamaları verilmek üzere aşağıda listelenmiştir

Simgeler	Açıklama
A	Anizotropi indeksi
A	Fotovoltaik hücre alanı
CO_2	Karbondioksit
D	Diyot
FF	Dolum faktörü
G	Işık şiddeti
I_0	Doyma akımı
I_{bn}	Doğrudan ışıma
I_d	Diyot üzerinden geçen akım
I_h	Küresel güneş ışıınımı
I_{hd}	Solar difüzyon ışıınımı
I_{on}	Doğrudan dünya dışı ışıma
I_{ph}	Fotovoltaik akım
I_{sc}	Kısa devre akımı
I_{sh}	Sönt direnç üzerinden geçen akım
I_t	Çıkış akımı
I_T	Toplam ışıma
I_{Tdq}	Yüzeylerden yansiyarak gelen ışıınım
m	Diyot idealite faktörü
m^2	Metrekare

mm²	Milimetrekare
P_{in}	Gelen ışık gücü
P_{max}	En fazla güç
R_b	Değişken geometrik faktör
R_{ser}	Seri bağlı direnç
R_{sh}	Şönt direnç
V	Gerilim
V_{oc}	Açık devre gerilimi
V_t	Çıkış gerilimi
β	Ufuk çizgisine göre yüzey eğim açısı
η	Verimlik
ρ	Zemin yansıması

Kısaltmalar

Açıklama

A	Amper
AC	Alternatif akım
DC	Doğru akım
DSSC	Boya duyarlı güneş pilleri
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
EVA	Etil vinil asetat
FV	Fotovoltaik
GEPA	Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası
GES	Güneş enerji santrali
GWh	Cigawatt saat

IEA	Uluslararası Enerji Alansı
IRENA	International Renewable Energy Agency
kWh	Kilowatt saat
kWp	Kilowatt peak
MPPT	Maksimum güç noktası izleyici
MTEP	Milyon ton eşdeğer petrol
MWh	Megawatt saat
MWp	Megawatt peak
off grid	Şebekeden bağımsız
on grid	Şebekeye bağlı
STC	Standart test koşullarında
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TEP	Ton eşdeğer petrol
TMŞ	Termik manyetik şartel
TÜBA	Türkiye Bilimler Akademisi
V	Volt
W	Watt
Wh	Watt saat
WWF	World Wide Fund for Nature

1. GİRİŞ

Bilim ve teknolojiadaki gelişmeler, buna bağlı olarak bireysel, toplumsal ve sosyal ihtiyaçların artması ve dünya nüfusundaki hızlı artış yaşadığımız çağda enerjiye olan ihtiyacı önceki yüzyıllara göre arttırmıştır. Enerji üretimi ve tüketimi küresel bir problem haline gelmiştir.

Günümüzde elektrik enerjisi, fosil yakıtlardan, yenilenebilir enerji kaynaklarından ve nükleer enerji santrallerinden elde edilmektedir. Fosil yakıtlar; kömür, petrol ve doğal gaz olarak sınıflanmaktadır. Çizelge 1.1.' de görüldüğü gibi Uluslararası Enerji Alansı (IEA) 2023 verilerine göre 2020 yılında dünya genelinde üretilen 26.832.645 GWh elektrik enerjisinin 9.452.492 GWh' i kömürden, 667.949 GWh' i petrolden ve 6.334.959 GWh' i doğal gazdan üretilmektedir. Bu veriler üretilen toplam enerjinin yaklaşık olarak %63'ünün kaynağının fosil yakıtlar olduğunu göstermektedir (IEA, 2023). Fosil yakıtlar dünyanın belirli bölgelerinde bulunmaktadır, diğer ülkeler fosil yakıtları ithal etmektedir. Bu durum, rezervi olmayan ülkeleri dışa bağımlı hale getirmektedir. Ayrıca fosil yakıt kullanımı sonucunda atmosfere salınan karbondioksit gibi gazlar sera etkisi oluşturarak dünyanın ortalama sıcaklığını arttırmakta, sonuç olarak iklim değişikliği ortaya çıkmaktadır (Akın, 2006). 4 Kasım 2016 tarihinde yürürlüğe giren Paris Anlaşmasında; fosil yakıt kaynaklı sera gazlarının emisyonu azaltılarak bu gazların sebep olduğu küresel sıcaklık artışının 2°C'nin altında olması hedeflenmektedir.

Nükleer santrallerin kurulum maliyetlerinin fazlalığı, nükleer atıkların bertaraf edilmesinin zorluğu, olası bir sızıntıda ortaya çıkabilecek çevresel felaketler, yerel halkın kaygıları gibi sorunlar nükleer enerji kullanımını tartışmalı hale getirmektedir. (Dikmenli, Öztürk Demirbaş ve Gafa, 2019). Çizelge 1.1.'de de görüldüğü gibi 2020 yılında dünya enerji üretim verileri, 2.673.939 GWh ile yaklaşık olarak %10,2 enerji üretim payının nükleer enerjide olduğunu göstermektedir.

Çizelge 1.1. 2020 yılında dünyada kaynağa göre elektrik üretim miktarları (IEA, 2023)

Kaynaklar	Üretim (GWh)
Kömür	9.452.492
Petrol	667.949
Doğal gaz	6.334.959
Nükleer	2.673.939
Yenilenebilir Kaynaklar	7.468.058
Diğer kaynaklar	34.178
Toplam üretim	26.832.645

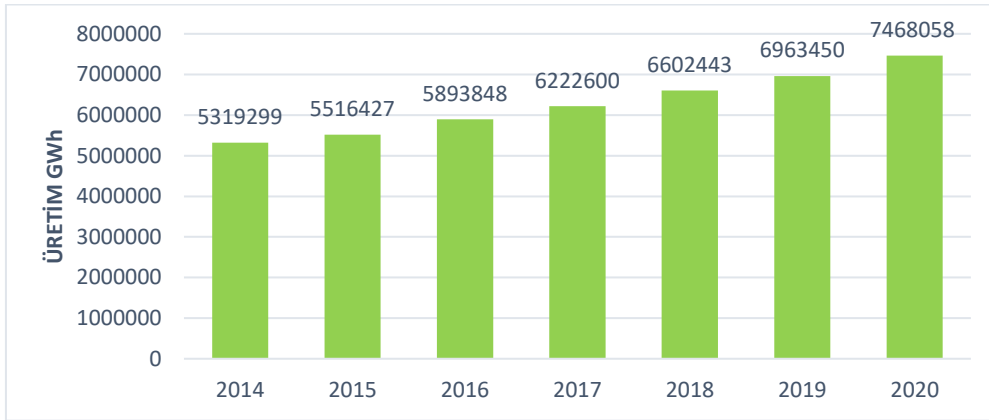
Yenilenebilir enerji kaynakları sınırsız ve belirli bir zaman içerisinde yenilenen enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları yaygın olarak güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, dalga enerjisi, biyo-kütle enerjisi, jeotermal enerji, gelgit enerjisi, hidroelektrik enerjisi ve hidrojen enerjisi olarak sınıflanmaktadır (Üçgül ve Elibüyük, 2015).

Yenilenebilir enerji kaynakları ekonomik, tükenmez, geri dönüştürülebilir, doğal, sürdürülebilir, çevreye, canlılara ve atmosfere zarar vermeyen enerji kaynaklarıdır. Dünya Doğayı Koruma Vakfı (World Wide Fund for Nature; WWF) tarafından yayınlanan “Enerji Raporu: 2050’de %100 Yenilenebilir Enerji2” 2050 yılına kadar küresel enerji arzının tamamının yenilenebilir enerjiden karşılanabileceğini ortaya koymaktadır. Teknik, yasal, toplumsal ve ekonomik anlamda gerçekleştirilecek küresel dönüşümlerle önümüzdeki 40 yıl içerisinde artan enerji gereksiniminin tamamının yenilenebilir enerjiden karşılanması mümkündür. Bunun için yalnız hükümetlerin değil, özel sektörün ve hatta bireylerin üstlenmesi gereken çok önemli roller bulunmaktadır (WWF-Türkiye, 2011).

Yenilenemez enerji kaynaklarına alternatif olarak düşünülen enerji kaynakları konusunda yapılan araştırmalarda, enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği vurgulanmaktadır. Yani yenilenebilir enerji kaynakları çevreye, ekosisteme, biyolojik yaşama, toprağa, suya ve atmosfere zarar vermemeli, doğal yaşamın devamlılığını etkilememelidir. Enerji kaynaklarının sınırsız ve tükenmez olması sürdürülebilir olduğunu göstermez. Hidrolik (su), güneş, rüzgâr gibi enerji kaynakları hem yenilenebilir hem de sürdürülebilir enerji kaynaklarıdır (Aykal, Gümüş ve Akça, 2009).

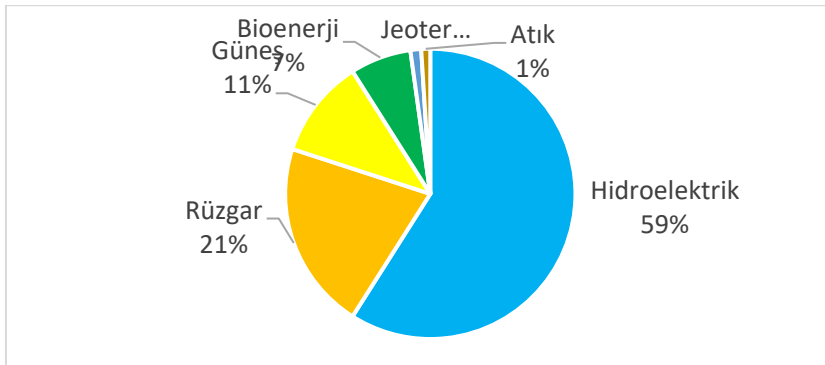
Çizelge 1.1.' de görüldüğü gibi 2020 yılı dünya genelinde üretilen 26.832.645 GWh elektrik enerjisinin 7.468.058 GWh'i yani yaklaşık %27,8' i yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmiştir.

Şekil 1.1' de 2014-2020 yılları arasında dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin dağılımı görülmektedir. Her geçen yıl dünya genelinde enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının payı artmaktadır (IRENA, 2022).



Şekil 1.1. Dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjinin yıllara göre dağılımı

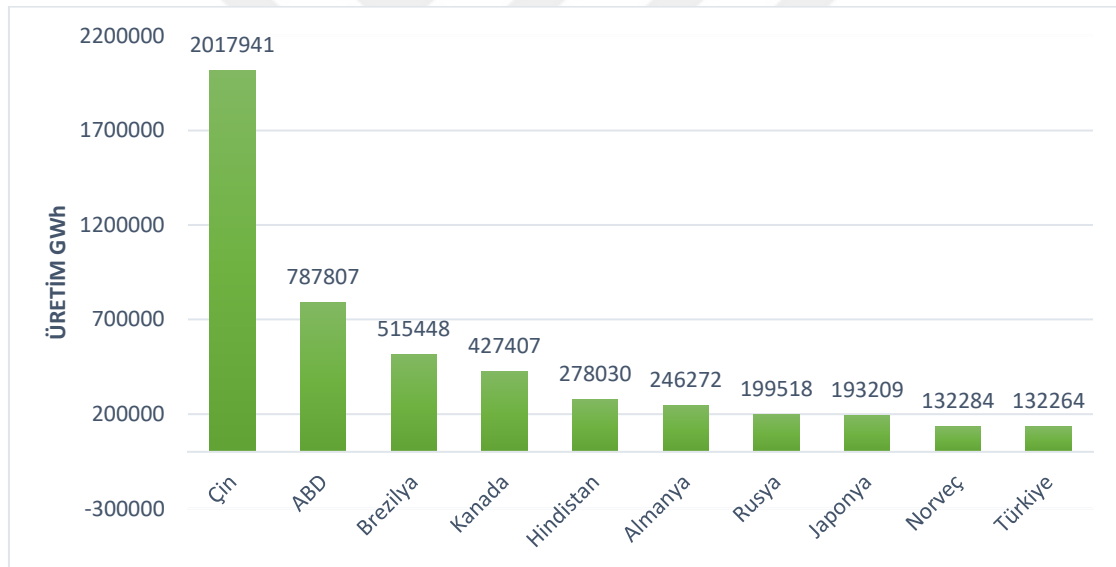
Şekil 1.2.'de 2020 yılında dünya genelinde kaynaklara göre yenilenebilir enerji dağılımına bakıldığında ilk sırayı %59 pay ile hidroelektrik enerjisinin aldığı, ikinci sırayı %21 ile rüzgâr enerjisinin, üçüncü sırayı ise %11 ile güneş enerjisinin aldığı görülmektedir.



Şekil 1.2 2020 yılı kaynaklara göre yenilenebilir enerji dağılımı

Enerji Dönüşümü Yatırım Trendleri Raporu 2020' ye göre dünya genelinde ülkeler, özel teşebbüsler ve konut sahipleri tarafından yenilenebilir enerji kaynaklarına 303,5 milyar dolar yatırım yapılmış, dünyanın en büyük güneş enerji santrali kurulmuş ve deniz üzerine kurulan rüzgâr enerji santralleri için 50 milyar dolar harcanmıştır. Dünya genelinde yapılan bu yatırımların %67'si Avrupa'da %12'si Çin'de ve %11'i ABD'de gerçekleşmiştir (Dünya Enerji Konseyi Türkiye, 2021).

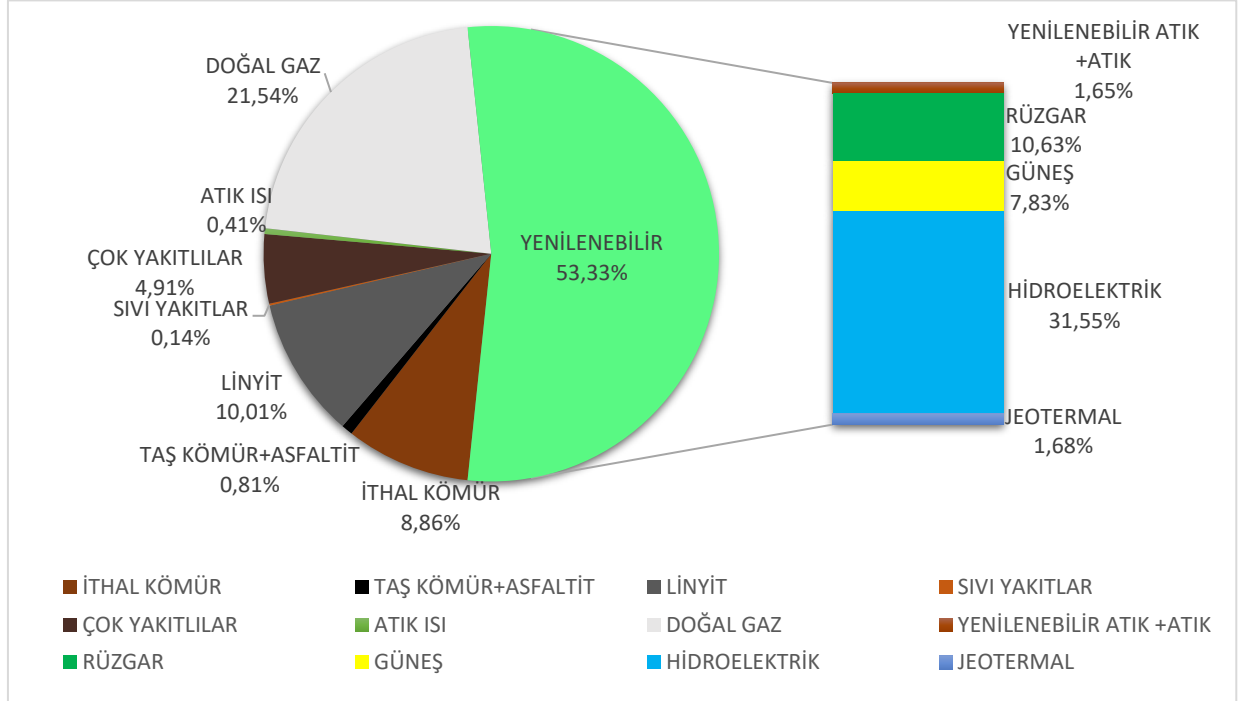
Şekil 1.3.' te 2019 yılı itibariyle dünya genelinde yenilenebilir kaynaklardan enerji üretim sıralamasındaki ilk 10 ülke görülmektedir. Çin 2.017.941,2 GWh üretimle birinci sırada bulunmaktadır. Ülkemiz 132.264 GWh yenilenebilir enerji üretimi ile dünya genelinde 10. sırada yer almaktadır ancak, 2020 yılında toplam 128.348 GWh yenilenebilir enerji üretimiyle ilk 10 ülke içine girememiştir (IRENA, 2023).



Şekil 1.3. 2019 yılı yenilenebilir kaynaklardan ülkeler bazında toplam üretim

Ülkemiz elektrik üretiminde yenilenemez enerji kaynaklarından çoğunlukla kömür ve doğalgazı, yenilenebilir enerji kaynaklarından ise; hidroelektrik enerjisini, jeotermal enerjiyi, rüzgâr enerjisini, güneş enerjisini ve yenilenebilir atıkları kullanmaktadır. Doğalgazı ve ithal kömürü ithal etmemiz sebebiyle ülkemiz bu kaynaklardan enerji üretiminde dolaylı olarak dışa bağımlı durumdadır. Bu nedenle yenilenebilir kaynaklarından enerji üretimi ülke ekonomimiz açısından oldukça önemlidir (Bilim, 2016). Şekil 1.4.'te 2021 yılı itibariyle kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı görülmektedir. Dağılım incelendiğinde birincil enerji kaynaklarına göre kurulu gücün %21,54'ünü doğalgaz

ve %8,86'sını ithal kömür oluşturmaktadır. Ülkemiz üretilen toplam enerjinin yaklaşık %35'inde dışa bağımlı durumdadır (TEİAŞ, 2021).



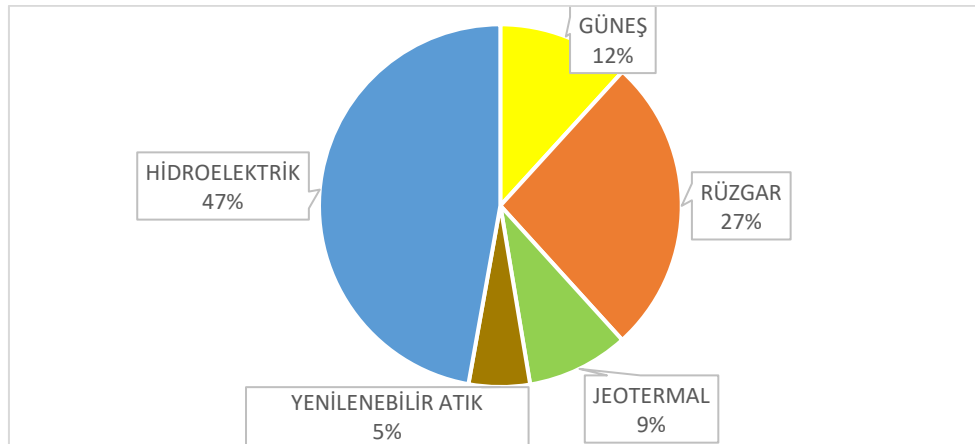
Şekil 1.4. 2021 yılı Türkiye’de kurulu gücün birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı

Çizelge 1.2’ de 2009-2021 yılları arasında Türkiye’ de toplam kurulu güç, yenilenebilir enerji kurulu gücü ve yenilenebilir enerji kurulu gücünün toplam kurulu güç içindeki oranı görülmektedir. Çağın gerekliliklerine bağlı olarak ortaya çıkan teknolojik gelişmeler, üretimin gelişmesi, nüfus artışı gibi enerjiye ihtiyaç duyulan alanlardaki gelişimler, enerji santrallerinin sayısının ve kapasitelerinin artmasına sebep olmuştur. Türkiye’ de 2009 yılında 15.487,1 MW olan kurulu güç 2021 yılında 99.819,6 MW olmuştur. Bununla birlikte 2009 yılında yenilenebilir enerji kurulu gücünün toplam kurulu güç içindeki payı %34,6 iken, 2021 yılında %51,7’ye çıkmıştır (TEİAŞ, 2021).

Çizelge 1.2. 2009-2021 yılları arasında yenilenebilir kaynaklı kurulu gücün Türkiye toplam kurulu gücü içindeki payının yıllar itibariyle gelişimi (TEİAŞ, 2021)

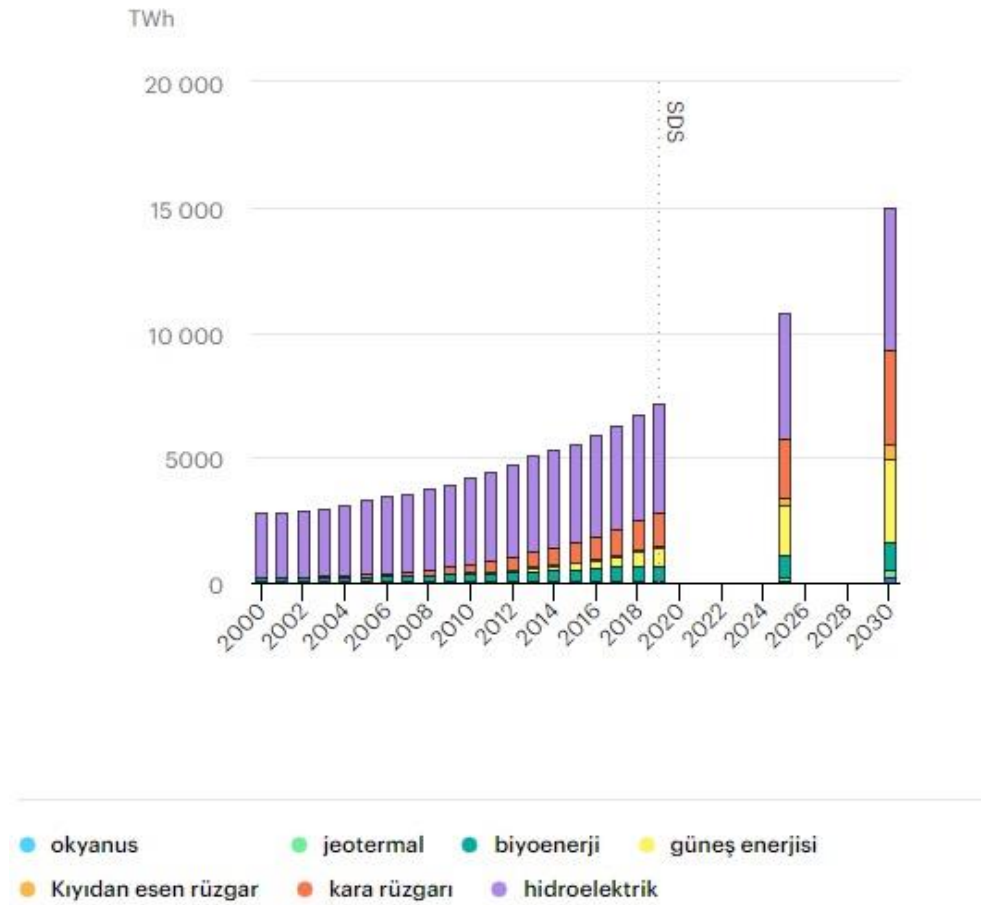
Yıllar	Yenilenebilir Enerji Kurulu Güç (MW)	Toplam Kurulu Güç (MW)	Yenilenebilir Enerji Kurulu Gücünün Toplam Kurulu Güçteki Oranı (%)
2009	15.487,1	44.761,2	34,6
2010	17.331,3	49.524,1	35,0
2011	19.084,2	52.911,1	36,1
2012	22.179,5	57.059,4	38,9
2013	25.537,5	64.007,5	39,9
2014	27.945,0	69.519,8	40,2
2015	31.520,8	73.146,7	43,1
2016	34.449,6	78.497,4	43,9
2017	38.751,1	85.200,0	45,5
2018	42.264,0	88.550,8	47,7
2019	44.395,3	91.267,0	48,6
2020	48.096,9	95.890,6	50,2
2021	51.591,4	99.819,6	51,7

2021 yılında ülkemizde yenilenebilir kaynaklardan üretilen 118.567,5 GWh enerjinin kaynaklar bazında üretim oranları şekil 1.5.'te görülmektedir. Toplam yenilenebilir enerji üretiminin yaklaşık olarak %47'si hidroelektrik enerjisinden, yaklaşık %26,5'i rüzgâr enerji sistemlerinden, yaklaşık %12'si güneş enerji sistemlerinden, yaklaşık %9'u jeotermal enerji santrallerinden ve yaklaşık %5'i yenilenebilir atıklardan üretilmektedir (TEİAŞ, 2021).



Şekil 1.5. 2021 yılında Türkiye’de yenilenebilir enerji üretim dağılımı

Dünyada güneş enerjisinden elektrik üretimi, International Renewable Energy Agency (IRENA) 2020 yenilenebilir enerji üretim raporlarına göre, üretilen toplam enerjinin yaklaşık olarak %2-%3'ü kadardır. Ancak Şekil 1.6'da 2000-2030 yılları sürdürülebilir kalkınma senaryosunda yenilenebilir enerji üretimi grafiğinde de görüldüğü gibi her geçen yıl güneş enerjisinden elektrik üretim miktarı artmıştır ve daha da artması beklenmektedir (IEA, 2020).

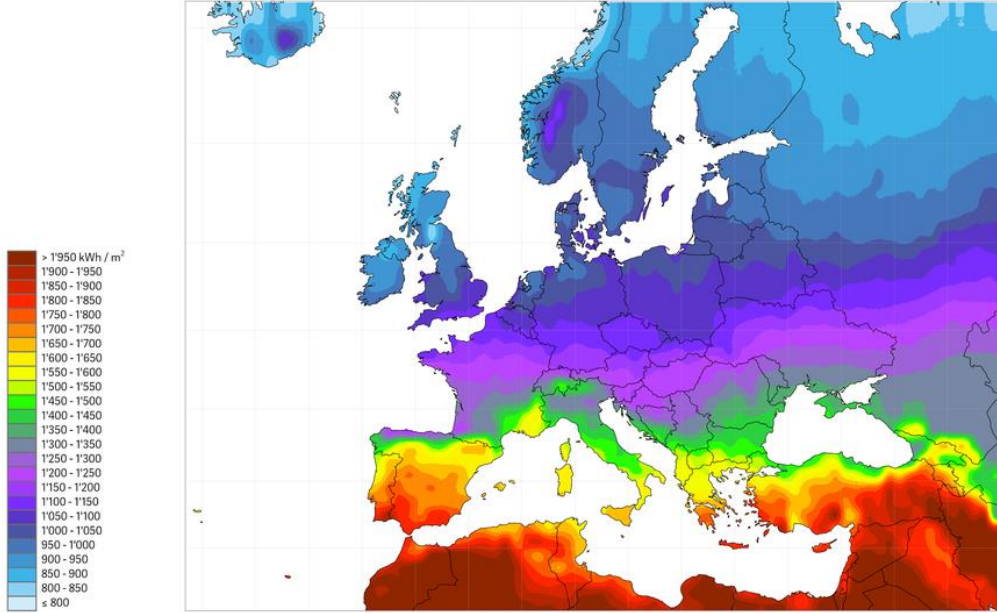


Şekil 1.6. 2000-2030 yılları sürdürülebilir kalkınma senaryosunda yenilenebilir enerji üretimi

1.1. Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli

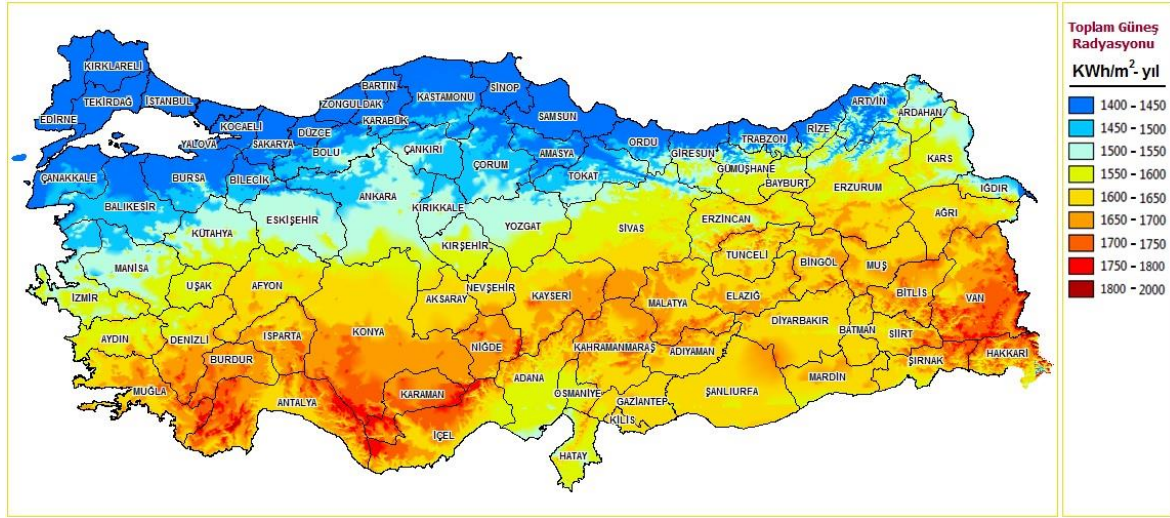
Türkiye coğrafi konum olarak Kuzey Yarım Küre'de, 36°-42° kuzey paralelleri ile 26°-45° doğu meridyenleri arasında bulunmaktadır. Bulunduğu konumdan dolayı ülkemiz güneşlenme potansiyeli bakımından Avrupa'nın birçok ülkesinden avantajlı durumdadır (Kılıç, 2015). Şekil 1.7.'de Avrupa kıtasının solar ışınım yoğunluğu haritasına bakıldığında Türkiye'nin m² başına solar ışınımının diğer Avrupa ülkelerine göre oldukça yüksek olduğu,

hatta solar ışınının en düşük yoğunlukta olduğu Karadeniz Bölgesi'nin birçok Avrupa ülkesinden daha elverişli olduğu görülmektedir (Meteonorm, 2015).



Şekil 1.7. Avrupa solar ışınım yoğunluğu haritası (Meteonorm, 2015)

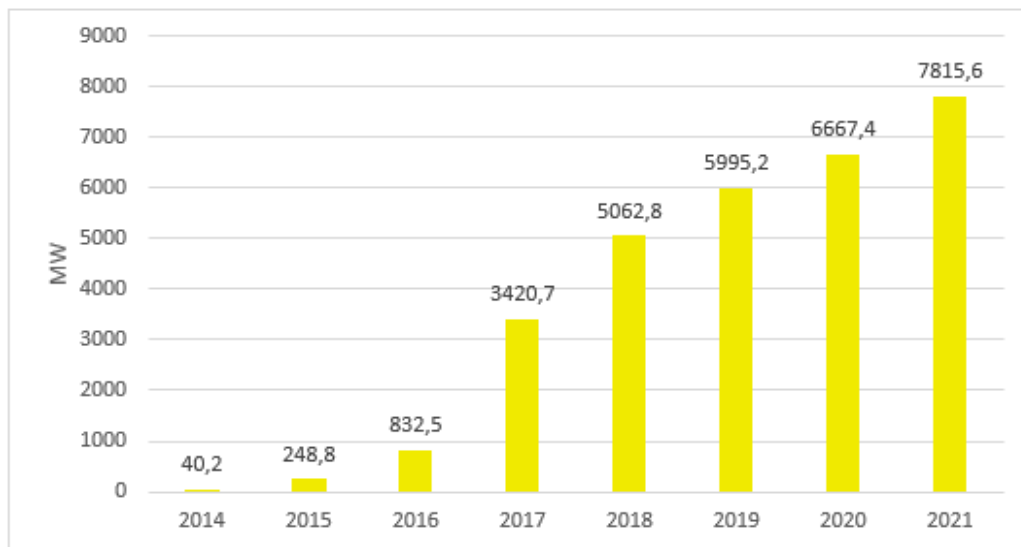
T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na (ETKB) bağlı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü bünyesinde bulunan Yenilenebilir Enerji Kaynakları Dairesi Başkanlığı tarafından Türkiye'nin kaynak bazında yenilenebilir enerji potansiyeli atlasları, coğrafi bilgi sistemi (CBS) teknikleri kullanılarak geliştirilmekte ve güncel tutulmaktadır. Bu kapsamda oluşturulan Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA) şekil 1.8'de görülmektedir. GEPA verilerine göre ülkemiz yılda toplam 2.741,07 saat güneşlenmektedir. Yıllık süre 365'e bölüldüğünde, günlük ortalama 7,5 saat olarak hesaplanmıştır. Bir yılda m² başına düşen ortalama toplam enerji ise 1.527,46 kWh'tir (ETKB, 2022).



Şekil 1.8. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (ETKB, 2022)

Güneş enerji sistemlerinin ilk kurulum maliyetleri yüksek olmasına rağmen, Türkiye’de güneş enerjisi potansiyelinin fazla olması, güneş enerji sistemlerinde doğrudan elektrik elde edilebilmesi, atık oluşturmaması ve uzun ömürlü olması gibi avantajları bu sistemlerin kurulumunu cazip hale getirmiştir (Kılıç, 2015).

Son yıllarda güneş enerji sistemlerindeki teknolojilerin artmasıyla ülkemizdeki kurulu güç kapasitesi hızlı artış göstermektedir. Şekil 1.9’da 2014-2021 yılları arasında Türkiye’deki güneş enerjisi kurulu gücünün değişimi görülmektedir. 2014 yılında 40,2 MW olan toplam güneş enerjisi kurulu gücü, 2021 yılında 7815,6 MW’a çıkmıştır.



Şekil 1.9. Türkiye’de güneş enerjisi kurulu gücünün yıllara göre değişimi

1.2. Güneş enerjisinin Türkiye’de kullanımı

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) 2021 yılı “Solar Heat Worldwide” raporuna göre 2019 yılında Türkiye’de yaklaşık 1,88 milyon m² alana güneş kolektörü kurulumu gerçekleşmiştir. Toplam kurulu alanı 26 milyon m² ye ulaşan Türkiye, Avrupa’da 1. sırada, dünyada Çin’den sonra 2. sırada yer almaktadır. 2019 yılında ulaşılan toplam güneş kolektörü kapasitesi ile ülkemizde 0,78 Milyon TEP’i konutlarda, 0,37 Milyon TEP’i endüstride olmak üzere yaklaşık olarak 1,15 Milyon TEP ısı enerjisi üretimi gerçekleştirmiştir (IEA, 2021).

5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, 10.05.2005 Tarihinde Kabul Edilmiş ve 18.05.2005 tarihinde Resmî Gazetede yayınlanarak yürürlüğe girmiştir. 5346 sayılı kanunda amaç; *“Bu Kanunun amacı; yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımının yaygınlaştırılması, bu kaynakların güvenilir, ekonomik ve kaliteli biçimde ekonomiye kazandırılması, kaynak çeşitliliğinin artırılması, sera gazı emisyonlarının azaltılması, atıkların değerlendirilmesi, çevrenin korunması ve bu amaçların gerçekleştirilmesinde ihtiyaç duyulan imalat sektörünün geliştirilmesidir”* şeklinde ifade edilmektedir.

Güneş enerjisi santrallerinin kurulumunu için 5346 sayılı kanun haricinde, 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu, Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) Kurul Kararları da bağlayıcıdır (Ceylan, 2018).

Bu çalışmada öncelikle; Tokat İli Erbaa İlçesi’nde kurulu olan, kurulumu ve işletmesi Erbaa Belediyesi tarafından gerçekleştirilmiş, şebekeye bağlı 990 kWp gücündeki güneş enerji santralinin bir yıllık enerji üretim verileri elde edilmiş, daha sonra; güneş enerji santrallerinin fizibilite çalışmalarında yaygın olarak kullanılan PV*SOL ve PVsyst yazılımlarının deneme sürümleri kullanılarak “Erbaa Belediyesi 990 kWp GES” in coğrafi koordinatları, santral devre şemaları, Erbaa İlçesi’nin meteorolojik verileri ile benzetimler gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonuçları, gerçek üretim verileri ile karşılaştırılarak yazılımların gerçek üretim sonuçları ile tutarlılığı incelenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Güneş enerji sistemlerinin ve santrallerinin kurulumu için fizibilite çalışmalarında kullanılan yazılım programlarının uygulamaları ve sonuçları hakkında birçok araştırma bulunmaktadır.

Petrović, Simic ve Vražić (2013) tarafından yapılan çalışmada, Hırvatistan'ın Varazdin şehrinde bulunan The Solvis SE Varazdin isimli fotovoltaik (FV) tesisin 1 Mart 2011 ile 7 Mart 2012 tarihleri arasındaki gerçek üretim verileri ölçülmüş, Homer, PVsysts ve PVGIS programlarına aynı veriler işlenerek, benzetim sonuçları tesisin gerçek üretim sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tesiste üretilen yıllık enerji 26.500 kWh olarak gözlemlenmiştir. Homer programının yıllık benzetim sonucu 28.500 kWh, PVGIS programının yıllık benzetim sonucu 17.300 kWh, PVsyst programının yıllık benzetim sonucu 26.600 kWh olarak hesaplanmıştır. Oluşan hata yüzdelerinin; Homer'de %7, PVGIS'te %35 ve PVsyst'te %1'den az olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Sharma ve Chandel (2013) çalışmalarında Hindistan'ın Khatkar-Kalan bölgesinde kurulu olan 190 kWp gücündeki fotovoltaik enerji santralinin gerçek üretim verilerini, PVsyst yazılımıyla simüle ettikleri üretim verileri ile karşılaştırmışlar, benzetim sonuçlarının gerçek değer ile %1,4 farklı olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca santraldeki enerji üretiminin mart, eylül ve ekim aylarında en fazla, ocak ayında ise en az olduğu sonucuna varılmıştır.

Psomopoulos, Loannidis, Kaminaris, Mardikis ve Katsikas (2015) tarafından yapılan çalışmada, Yunanistan'ın Atina şehrinde 9,6 kWh'lik çatı üstü fotovoltaik sistem, güneybatı Yunanistan'da 105,6 kWh'lik fotovoltaik dizi ve kuzeybatı Yunanistan'da iki eksenli güneş takip sensörlü 98,4 kWh'lik fotovoltaik sistemlerin PVGIS, PVWatts ve RETScreen yazılımları kullanılarak benzetim sonuçları ile üretim verileri karşılaştırılmıştır. 9,6 kWh çatı üstü sistemin üretim verileri ile benzetim sonuçları arasındaki yıllık sapmalar; PVGIS'te -%2, PVWatts'ta -%9,2 ve RETScreen'de -%13,8 olarak hesaplanmıştır. 105,6 kWh'lik fotovoltaik dizinin üretim verileri ile benzetim sonuçları arasındaki yıllık sapmalar; PVGIS'te +%3, PVWatts'ta -%8 ve RETScreen'de -%2,4 olarak hesaplanmıştır. İki eksenli güneş takip sensörlü 98,4 kWh'lik fotovoltaik sistemin üretim verileri ile benzetim sonuçları arasındaki sapmalar; PVGIS'te -%4, PVWatts'ta -%6,5 ve RETScreen'de -%12,6 olarak hesaplanmıştır.

Haydaroglu ve Gümüş (2017) çalışmasında Dicle Üniversitesi'nde kurulu olan 250 kWp gücündeki güneş enerji santralinin yıllık üretim verilerini, PVGIS benzetim programının ve Sunny Designer Web programının benzetim sonuçları ile karşılaştırmıştır. Sonuçlara bakıldığında PVGIS gerçek üretim verilerinden %4,85 daha az, Sunny Designer Web benzetim programı ise gerçek üretim verilerinden %3,9 daha fazla enerji üretimini simüle etmiştir.

Koçak (2018) çalışmasında PV*SOL yazılımından yararlanarak Büyükçekmece ilçesinde kurulacak güneş enerji santralinin farklı güneş pili ve evirici kombinasyonlarında üretim ve maliyet analizlerini gerçekleştirmiş, en uygun güneş pili -evirici kombinasyonunu tespit etmiştir.

Tekkale (2018) çalışmasında halihazırda çalışmakta olan Kahramanmaraş, Çankırı ve Uşak illerinde kurulu güneş enerji santrallerinin gerçek verileri ile PVsyst yazılımı benzetim sonuçlarını karşılaştırarak yazılımın tutarlılığını tespit etmiş, daha sonra seçtiği sekiz il için PVsyst yazılımını kullanarak üretim ve maliyet analizleri gerçekleştirmiştir. Çalışmasında yatırım geri dönüş süresinin en hızlı Şanlıurfa ilinde gerçekleştiği sonucuna varmıştır.

Kılcı ve Koklu (2019) çalışmalarında Konya ili Alinekin ilçesinde kurulan 1148 kWp gücündeki güneş enerji santralinde bulunan güneş pillerinin eğim açılarının başarımlarını analizlerini PVsyst yazılımı ile gerçekleştirmişlerdir. Öncelikle güneş pili eğim açılarını 25° sabit değerde almışlar, daha sonra yaz mevsimi için 10°, kış mevsimi için 30° olarak iki farklı analiz sonuçlarını yorumlamışlardır. Analiz sonucunda mevsimsel sistemde sabit sisteme göre yıllık kazancın daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir.

Sarı ve Özyiğit (2020) çalışmasında Sivas ilinin Merkez, Divriği, Gürün, Yıldızeli ve Zara olmak üzere 5 ilçesinde PVsyst yazılımı ile her bir ilçede 10 MWp kurulu güce sahip güneş enerji santrallerinin; monokristal ve polikristal güneş pilleri kullanılarak fizibilite çalışmalarını yapılmış, benzetim sonuçlarını değerlendirilmiştir. Benzetim sonuçlarına göre monokristal panellerle oluşturulan sistemlerde, polikristal panellerle oluşturulan sistemlerden enerji üretiminin daha fazla olduğu ancak ilk kurulum maliyetlerinin daha yüksek olduğu sonucu ortaya konulmuştur.

Demiryürek, Arifoğlu ve Bolat (2020) çalışmasında Siirt ilinde kurulu olan Lebit Enerji güneş enerji santralının yıllık üretim verilerini PVsyst yazılımı kullanılarak karşılaştırmış, benzetim sonuçları ile gerçek üretim sonuçları arasında %0,56 fark ortaya konulmuştur.

Yağlı ve Koç (2020) çalışmalarında Gaziantep ili ve civarına kurulacak güneş enerji santrallerinde kullanılacak güneş pillerinin optimum eğim açısı değerini hesaplamışlar, hesaplanan optimum açısı değerlerini PVsyst yazılımına girerek benzetimler gerçekleştirmişler, sonuçlarının karşılaştırılmasıyla, optimum açısı değerinin 30° olması gerektiğini belirtmişlerdir.

Changkakati, Syed, Sahu, Kumar ve Kesari (2020) tarafında yapılan çalışmada Hindistan'ın Asasar bölgesinde kurulacak 500 kWp gücünde şebekeye bağlı fotovoltaik enerji santralının yıllık başarımlar verilerini PVsyst yazılımı kullanarak elde edilmiştir. Gerçekleştirilen maliyet analizleri sonucunda, ayrıca enerji üretiminde kömür kullanımı ile ortaya çıkan karbon emisyonu, kömür yataklarının tükenmesi ve Hindistan hükümetinin alternatif enerji arayışı gibi durumlar ilişkilendirilerek kurulacak fotovoltaik enerji santralının önemi vurgulanmıştır.

Altınkök (2021) çalışmasında Giresun Üniversitesi Mühendislik Fakültesi binasına PV*SOL yazılımı kullanarak çatı üstü fotovoltaik sistem tasarımı gerçekleştirmiştir. Benzetim sonucunda sistemin geri ödeme süresini 7 yıl olarak belirlemiş, kurulabilecek sistemin yıllık üretiminin, fakültenin yıllık tüketiminin %52'sini karşılayabileceği sonucuna varmıştır.

Waseem, George, Hameed, Yadav, Pillai ve Shukla (2021) çalışmalarında Dubai'de belirledikleri bir alanda PVsyst yazılımını kullanarak şebekeye bağlı 100 kWp gücünde güneş enerji santralının benzetimini gerçekleştirmiştir. PVsyst yazılımında 265 Watt gücünde 378 adet Si-poli güneş pili kullanarak yapılan benzetim sonucunda sistemin verimliliğini, başarımlarını, optimum güneş pili eğim açılarını belirlemişler, 100 kWp gücünde güneş enerji santralının yıllık üretiminin 175,8 MWh olduğu sonucuna varmışlardır.

Yalılı (2021) çalışmasında PVGIS programını kullanarak Van ili Edremit ilçesinde lisanslı ve şebekeye bağlı 1 MWp gücünde örnek güneş enerji santralının enerji üretimini hesaplamış, finansal analizini gerçekleştirerek öz sermaye ile yatırım yapılan tesisin geri ödeme süresini 9 yıl olarak tespit etmiştir.

Çınaroğlu (2021) yapmış olduğu çalışmada Kilis ilinde kurulu olan 1040 kWp, 1029 kWp ve 1000 kWp gücündeki santrallere ait veriler kullanılarak PVsyst yazılımında simüle edilmiş, santrallerin 3 yıllık üretim sonuçları ile benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçlarının gerçek üretim sonuçları ile yakın ancak az olduğu sonucu ortaya konulmuştur.

Limem ve Sezen (2021) çalışmasında, Kocaeli Üniversitesi Umuttepe Kampüsü Teknoloji Fakültesi binasındaki 5,1 kWh'lik çatı üstü fotovoltaik sistemin yıllık üretim verilerini PV*SOL, PVGIS, PVsyst ve RETscreen yazılımlarını kullanarak karşılaştırmıştır. Sistemin yıllık toplam üretimi 6436,54 kWh olarak belirtilmiş, benzetim sonuçları ise PV*SOL ile 6306 kWh, PVGIS ile 6238,9 kWh, PVsyst ile 6274 kWh, ve RETscreen ile 6258,8 kWh olarak belirtilmiştir. Benzetim sonuçlarına göre PV*SOL %97,97, PVsyst %97,47 doğrulukta tahminde bulunmuş böylece güvenilir olarak değerlendirilmiştir.

Öztürk (2021) yazmış olduğu yüksek lisans tezinde, Aksaray ilinde kurulu olan 1125 kWp gücündeki güneş enerjisi santralinin yıllık üretim verilerini, PVsyst programı benzetim sonuçları ile karşılaştırmış, ortaya çıkan %3,74'lük farkın sebeplerini ortaya koymuştur.

Özkan (2021) yapmış olduğu çalışmada Tekirdağ İli Çerkezköy İlçesi'nde bir fabrika binasına Homer yazılımı kullanarak çatı üstü fotovoltaik sistem tasarımı gerçekleştirmiştir. Yapmış olduğu benzetim sonucunda fabrikanın ihtiyaç duyduğu toplam elektrik yükünün çatı üstü sistemden karşılanamayacağı ve kalan kısmın şebekeden karşılanmasının gerektiğini ortaya koymuştur.

Ardıç Çakmak (2022) çalışmasında Türk Standartlar Enstitüsü binasına PV*SOL yazılımı kullanarak çatı üstü şebekeden bağımsız güneş enerji sistemi kurulumu gerçekleştirmiştir. Benzetim sonuçlarına bakıldığında kurulabilecek şebekeden bağımsız sistemin yıllık enerji üretiminin %30'unu karşılayabileceği sonucuna varmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde güneş enerjisinin kullanımı, güneş enerjisi teknolojileri, fotovoltaik etki, güneş pilinin eş değer devresi, güneş pillerinin çeşitleri, fotovoltaik sistem çeşitleri ve fotovoltaik sistemlerde kullanılan benzetim yazılımları anlatılmaktadır.

3.1. Güneş Enerjisi ve Teknolojileri

Güneş enerjisi, Güneş'te meydana gelen radyoaktif reaksiyon çeşidi olan füzyon tepkimesi ile gerçekleşir. Hidrojen atomlarının çekirdekleri kaynaşarak helyum atomuna dönüşür, bu sırada saniyede 876×10^7 milyon ton eşdeğer petrol (MTEP) değerindeki enerji güneşten yayılır. Bu reaksiyon milyonlarca yıl daha devam edeceğinden dolayı Güneş, Dünya için sınırsız enerji kaynağıdır. Güneşten ışıma yoluyla Dünya'ya ulaşan enerji atmosfer dışında 1370 W/m^2 iken, yeryüzüne ulaşan enerji miktarı $0-1100 \text{ W/m}^2$ 'dir (Kılıç, 2015). Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre 90 dakika boyunca Güneş'ten ışıma yoluyla Dünya'ya ulaşan enerji, Dünya'nın 1 yıllık enerji ihtiyacına karşılık gelmektedir.

Güneş enerjisi teknolojileri, kullanılan malzemeye ve yöntemine göre farklılık göstermektedir. Bu nedenle farklı şekillerde sınıflandırılabilir. En yaygın sınıflandırma aktif ve pasif teknolojiler olarak sınıflandırmadır. Pasif güneş enerjisi teknolojilerinde herhangi bir dönüşüm teknolojisi kullanılmadan güneş enerjisi doğrudan kullanılır. Soğuk iklim şartlarında binaların ısıtılması amacıyla güneş enerjisinin toplanması veya dağıtılması pasif güneş enerjisi teknolojisidir. Aktif güneş enerjisi teknolojisinde solar ışıma, ısı veya elektrik enerjisine dönüştürülür. Aktif güneş enerjisi teknolojisi güneş ısı ve güneş Fotovoltaik (FV) olarak ikiye ayrılır.

Güneş ısı teknolojileri, güneş enerjisinin ısı enerjisine dönüştürüldüğü, ısıtma, kurutma, temiz su arıtımı, pişirme gibi kullanım alanları olan evsel veya endüstriyel amaçlarla kullanılan sistemlerdir. Bu sistemlerde güneş kolektörleri veya reflektörleri kullanılır. Bu sistemler kullanılarak dolaylı yollardan elektrik üretimi de gerçekleştirilir. Güneş ısı teknolojileri fosil yakıt tüketimini azalttığı için CO₂ emisyonunu da azaltmaktadır (Türkiye Bilimler Akademisi [TÜBA], 2018). Güneş Fotovoltaik teknolojileri, solar ışımanın doğrudan elektrik enerjisine dönüştürüldüğü uygulamalardır (Dinçer, 2011).

3.1.1. Fotovoltaik etki

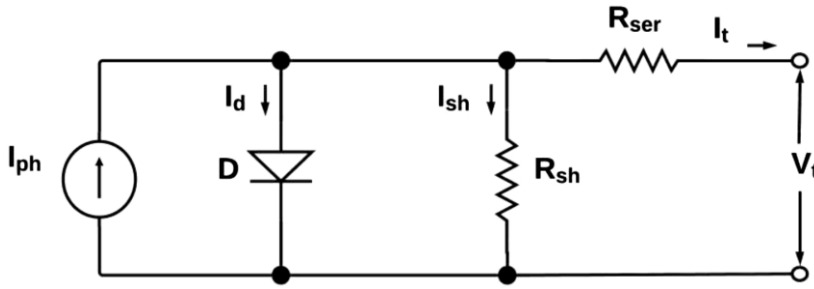
Fotovoltaik (photovoltaic) kelimesi photos ve voltaik kelimelerinin birleşmesinden meydana gelmektedir. Burada photo; Yunanca ışık, voltaik ise volt (gerilim) kelimesinden gelir. Fotovoltaik etki; güneş hücreleri üzerine düşen foton adı verilen enerji paketlerinin enerjisinin elektriksel enerjiye dönüşmesidir (Öztürk, 2008).

3.1.2. Fotovoltaik hücreler ve güneş pilleri

Fotovoltaik (FV) pillerle ilgili ilk çalışmayı 1839'da Edmond Becquerel yapmış ve ilk kez fotovoltaik kelimesini kullanmıştır. Sonraki yıllarda Adams ve Day, Charles Edgar Fritts gibi bilim insanları güneş hücreleri ile çalışmalar yapmış, üzerinde çalışılan bu 1. Nesil güneş hücrelerinde ancak %1 elektriksel verimliliğe ulaşılabilmiştir. 1948' de yarı iletken olan silikon kullanılarak geliştirilen transistörlerden sonra, 1953'te Chain-Fuller-Pearson ekibi silikon kullanarak güneş hücreleri üretmiş ve %6 verimliliğe ulaşmışlardır. 1960'larda uzay sistemlerinde yarı iletken güneş hücreleri kullanımı yaygınlaşmıştır (Durak, 2016).

FV hücreler yarı iletken silikondan yapılan ince katmanların birleştirilmesiyle elde edilir. Katmanlar, eklenen katkı maddelerine göre p-tipi ve n-tipi yarı iletkenler olarak adlandırılır. N-tipi malzeme yapımında antimon, arsenik veya fosfor kullanılarak elektron fazlalığı oluşturulur, p-tipi malzemelerin yapımında genellikle bor, alüminyum veya galyum kullanılır, p-tipi malzemelerde hole adı verilen boşluklar bulunur. P ve n tipi malzemelerin bir araya getirilmesi ile oluşturulan yapıya p-n eklemi adı verilir. P-n eklemi üzerine düşen fotonlar enerjilerini valans elektronlarına aktarır, uyarılan elektronlar hollere doğru harekete geçer ve elektrik akımı oluşur (Durak, 2016; Adak, Cangi ve Yılmaz, 2019).

Bir FV hücrenin eşdeğer elektriksel devresi şekil 3.1.'de görülmektedir. Bu devrede FV akım kaynağına paralel bağlı bir diyot (D) ve bir direnç (R_{sh}) ile seri bağlı bir direnç (R_{ser}) bulunmaktadır.



Şekil 3.1. FV hücrenin eşdeğer devresi

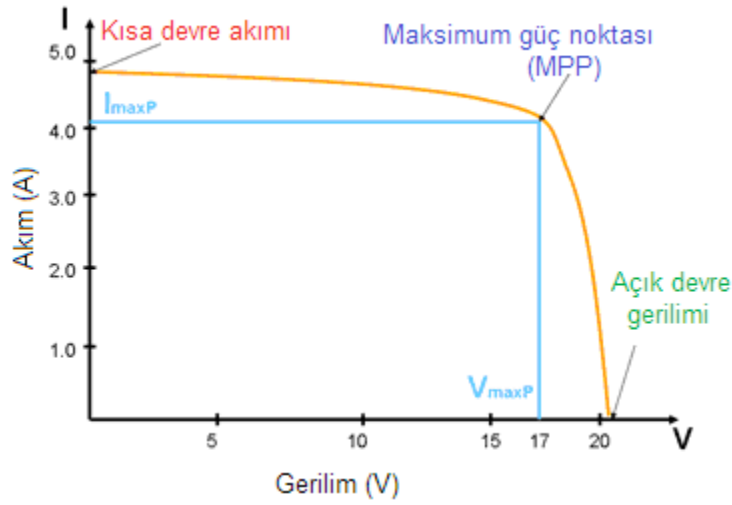
Tek diyotlu FV hücrenin çıkış akımına karşılık gelen I_t 'yi hesaplamak için Kirshhoff'un akım yasasına göre denklem (1) elde edilir. Denklem (1)'de FV hücrede üretilen akımdan (I_{ph}), paralel kollardaki yani diyot üzerinden geçen akım (I_d) ve paralel kolda yer alan direnç üzerinden geçen akım (I_{sh}) çıkarılarak çıkış akımı (I_t) hesaplanmaktadır.

$$I_t = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

I_{ph} foto-akım, I_0 doyma akımı, m diyot idealite faktörü, R_{ser} seri bağlı direnç, V_t çıkış gerilimi, R_{sh} paralel bağlı direnç olmak üzere I_d ve I_{sh} yerine karşılıkları olan denklemler yazıldığında denklem (2) elde edilir (Chellaswamy ve vd., 2019).

$$I_t = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{(V + IR_{ser})}{V_t m}} - 1 \right) - \frac{V + IR_{ser}}{R_{sh}} \quad (2)$$

Kısa devre akımı, açık devre gerilimi, maksimum güç noktası, dolum faktörü ve verim parametreleri FV hücrelerin karakteristiklerini ortaya çıkarır. Devrenin iki ucu arasındaki gerilimin 0 olduğu yani $V=0$ iken akım değerine kısa devre akımı denir, I_{SC} ile gösterilir. FV hücreden elde edilebilen en yüksek gerilim değeri açık devre gerilimidir. Kısaca V_{OC} ile gösterilir. Bir FV hücrede akım ve gerilim çarpım ($V \times I$) sonucunun en yüksek olduğu değere maksimum güç noktası denir, kısaca P_{max} ile gösterilir. Şekil 3.2' de FV hücrenin akım gerilim eğrisi ve maksimum güç noktası görülmektedir (Öztürk, 2017).



Şekil 3.2. FV hücrenin akım gerilim eğrisi ve maksimum güç noktası

FV hücrenin maksimum gücünün kısa devre akımı ve açık devre gerilimi çarpımına oranına FV hücrenin “dolum faktörü” denir. İngilizce karşılığı *fill factor* olan dolum faktörü FF şeklinde gösterilir. FV hücrenin seri bağlı dirençlerinin ve bağlantının kalitesini FF değeri gösterir. FV hücrenin dolum faktör değeri 0,7-0,85 aralığındadır. Dolum faktörü hesaplamada denklem (3) kullanılır (Bartesaghi ve vd., 2015).

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (3)$$

Maksimum gücün, FV hücreye düşen ışık gücüne oranı ile FV hücrenin verimi hesaplanır. P_{max} ; maksimum güç, P_{in} ; gelen ışık gücü, G ; ışık şiddeti, A ; FV hücre alanı olmak üzere, verimlik (η) hesabında denklem (4) kullanılmaktadır (Kazem ve Khatib, 2013).

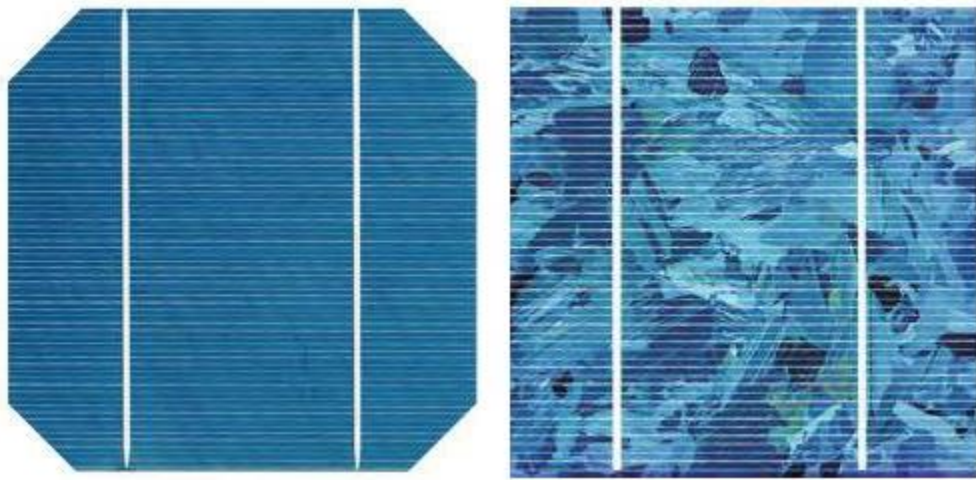
$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{G \times A} \quad (4)$$

FV hücrelerin birleştirilmesiyle güneş pilleri elde edilir. Güneş pillerinin birçok çeşidi bulunur ancak en yaygın kullanılan çeşitleri; monokristal, polikristal ve ince film güneş pilleridir. Güneş pilleri tarihsel gelişimine göre çizelge 3.1’de gösterildiği gibi sınıflandırılmaktadır.

Çizelge 3.1. Güneş pillerinin tarihsel gelişimine göre sınıflandırılması (Ceylan, 2018)

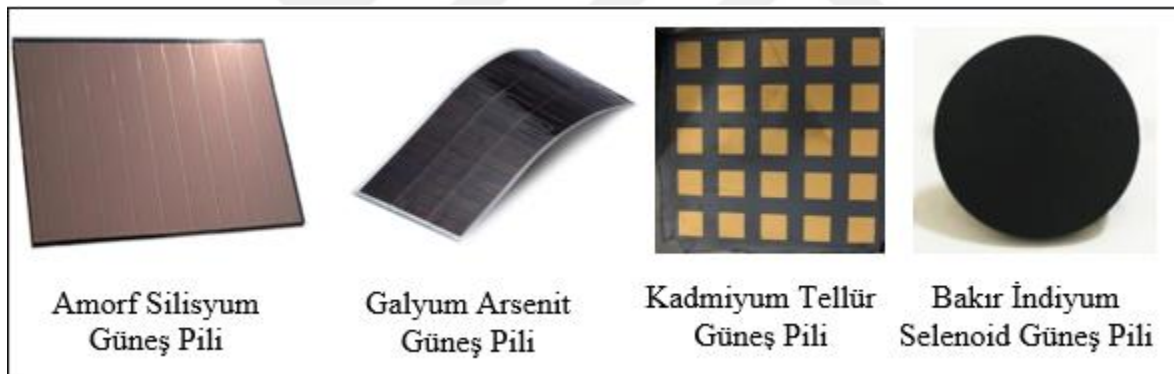
Nesil	Tip
1. Nesil güneş pilleri	Monokristal silisyum piller Polikristal silisyum piller
2. Nesil güneş pilleri	Amorf silisyum piller Kadmiyum tellür piller Bakır indiyum selenoid piller Galyum arsenit piller
3. Nesil güneş pilleri	Çok eklemli (tandem) güneş pilleri Organik piller Nano-kristal yapılar Boya ile duyarlaştırılmış piller

1. nesil güneş pilleri, ilk üretilen güneş pilleridir. Bu güneş pilleri yapılarında bulunan silikonun saflığına göre monokristal ve polikristal güneş pilleri olarak sınıflandırılır. Silisyum elementi kimyasal ve ısı işlemlerle saflaştırılarak %90'ın üzerinde saflıkta silikon maddesi elde edilir. Monokristal güneş pillerinde silikon daha saf halde bulunur bu nedenle monokristal güneş pilleri daha verimlidir ancak polikristal pillerin üretim süreleri ve maliyetleri monokristal pillere göre daha düşüktür. Günümüzde binalarda ve ticari kullanımda en yaygın kullanılan güneş pilleri 1. Nesil güneş pilleridir (Ceylan, 2018). Şekil 3.3'de monokristal ve polikristal güneş pilleri görünmektedir.



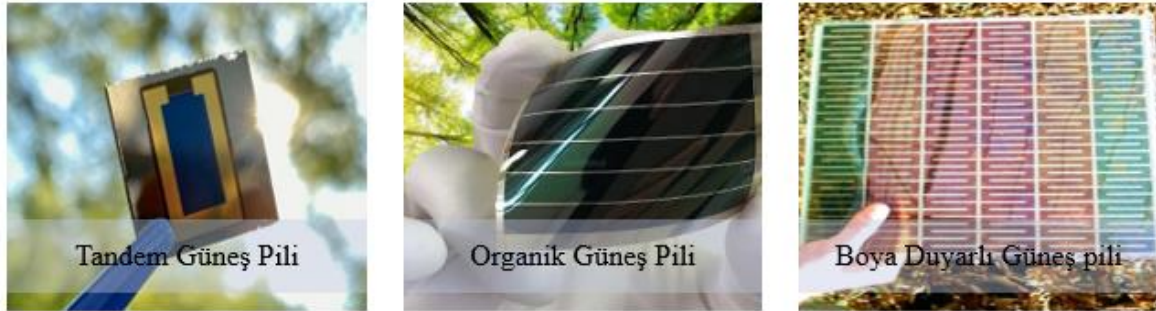
Şekil 3.3. Monokristal ve polikristal güneş pilleri

2. Nesil güneş pilleri ince film teknolojisi kullanılarak geliştirilen güneş pilleridir. Üretimleri 2000’li yıllardan sonra hız kazanmıştır. İnce film güneş pilleri uzay teknolojilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Amorf silikondan yapılan FV pillere amorf silisyum piller denir, yapımında zehirli metaller kullanılmadığından çevre dostu pillerdir. Amorf silisyum pillerin üretimi ucuzdur ancak verimi düşüktür. FV pil yapımında silikon yerine kristal yapılı bir yarı iletken olan galyum arsenit kullanılarak galyum arsenit piller üretilir. Galyum arsenitin verimi silikonun veriminden fazladır ancak oldukça pahalıdır bu nedenle günümüzde ticari kullanımı yaygınlaşmamıştır. İnce film teknolojisi kullanılarak geliştirilen FV pillerden biri de kadmiyum tellür pillerdir. Bu pillerin üretimi ucuz ancak verimi 1. Nesil pillerden azdır. Ayrıca kadmiyum elementinin toksik yapıda olması bu pillerin daha az tercih edilmesine yol açmaktadır. Bakır, indiyum ve selenoid çözeltisi yarı iletken özelliktedir, bu yarı iletken üretilen pillere bakır indiyum selenoid piller denir. İndiyumun pahalı olması bu verimi yüksek olan bu pillerin üretimi için dezavantajdır (Durak, 2016).



Şekil 3.4. 2. Nesil güneş pilleri

3. Nesil güneş pillerinin maliyetini azaltmak, üretimini kolaylaştırmak ve verimini arttırmak amacıyla Ar-Ge çalışmaları devam etmekte olup ticari kullanımı pek yaygın değildir. Verimi arttırmak amacıyla birden fazla yarı iletken tabakanın birbirine eklenmesiyle oluşturulan yaklaşık %25 verimliliğe sahip çok eklemlili (tandem) piller, nano teknolojideki gelişmelerle birlikte “nano-kristal” yapıda üretilen piller, organik polimerler kullanılarak üretilen ince ve esnek yapılı, düşük maliyetli, çevre dostu organik piller 3. Nesil güneş pilleri arasında yer almaktadır (Ceylan,2018). 3. nesil güneş pilleri çeşitlerinden olan boya duyarlı güneş pilleri (DSSC) güneş ışığının renkli organik maddelerle soğurulmasını temel alarak, bitkilerin ışık enerjisini kimyasal bağ enerjisine dönüştürdükleri fotosentez olayından esinlenilerek geliştirilmiştir ve %12 düzeyinde verimliliğe sahiptir (Ceylan,2018).



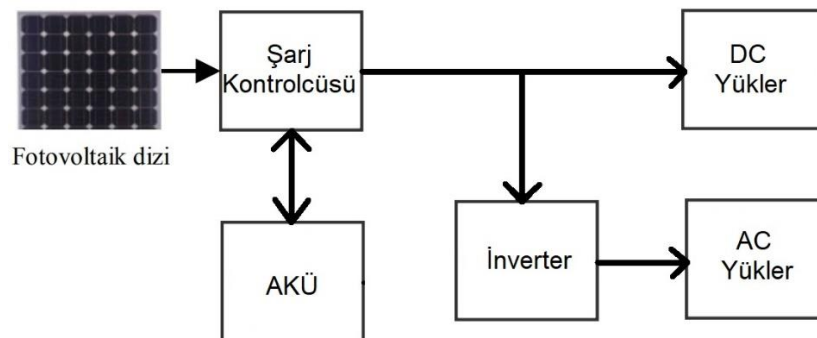
Şekil 3.5. 3. Nesil güneş pilleri

3.1.3. Fotovoltaik sistem çeşitleri

Fotovoltaik sistemler şebekeden bağımsız (off grid) ve şebekeye bağlı (on grid) olmak üzere iki ana gruba ayrılır.

3.1.3.1. Şebekeden bağımsız (off grid) fotovoltaik sistemler

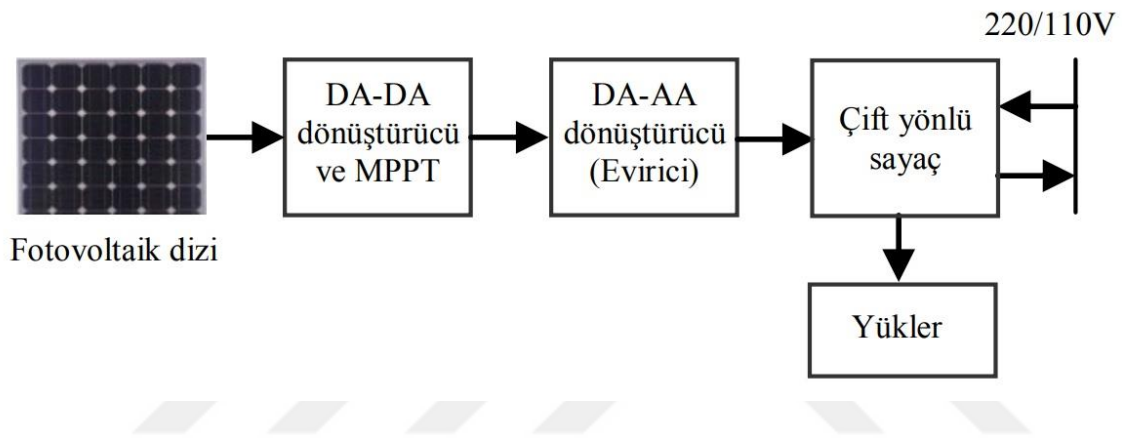
Yerleşim yerlerinden uzak bölgelerde enerji ihtiyacının karşılanması için şebekeden bağımsız sistemler kullanılmaktadır. Bu sistemlerde enerji kaynağı olarak güneş pilleri kullanılır. Üretilen enerji şarj kontrolcüsü ile akülerde depolanır. Yük, doğru akım kullanıyorsa şarj kontrolcüsü ile akım akülerden yüke iletilir. Alternatif akımın gerekli olduğu durumlarda ise sisteme evirici eklenerek AC elde edilir (Wong ve Chai, 2012). Şekil 3.8'de şebekeden bağımsız FV sistem şeması görülmektedir.



Şekil 3.6. Şebekeden bağımsız fotovoltaik sistemlerin blok şeması

3.1.3.2. Şebekeye bağlı (on grid) fotovoltaik sistemler

Şebekeye bağlı sistemlerde, fotovoltaik sistemler ile şebeke enerji sistemi birlikte kullanılır. Bu sistemlerde enerji yetersiz olduğunda enerji ihtiyacı şebekeden karşılanmakta, enerji fazlası ise şebekeye satılmaktadır. Bu sistemlerde enerji depo edilmez, güneş pillerinde üretilen DC akım evirici ile şebeke akımı olan AC akıma dönüştürülerek şebekeye verilir (Kobe, Ngoben ve Chowdhury, 2018). Şekil 3.9’da şebekeye bağlı FV sistem şeması görülmektedir.



Şekil 3.7. Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerin blok şeması

3.1.4. Güneş enerji sistemlerinde yaygın olarak kullanılan benzetim yazılımları

Güneş enerji sistemlerinin ve güç santrallerinin kurulumunda fizibilite çalışmalarında kullanılan birçok yazılım bulunmaktadır. Bu bölümde, en yaygın kullanılan yazılımlar sıralanmaktadır.

TRNSYS: 40 yılı aşkın bir süredir kullanılmakta olan TRNSYS yazılımı ile; elektrik enerjisi ve termal enerji ile ilgili grafik tabanlı benzetimler, fotovoltaik enerji ve rüzgâr enerjisi benzetimleri, hidrojen yakıt hücreleri modellemesi, biyokütle enerji santralleri modellemesi ve benzetimi, hava akımı analizleri gibi birçok alanda çalışma yapılabilmektedir.

HOMER: Çoklu enerji kaynakları ile en iyileme ve modelleme yapılabilen bir yazılımdır. Bu yazılım ile şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız sistemler tasarlanabilir, yükün ihtiyacına bağlı olarak depolama yönetimi ve fizibilite çalışmaları yapılabilir.

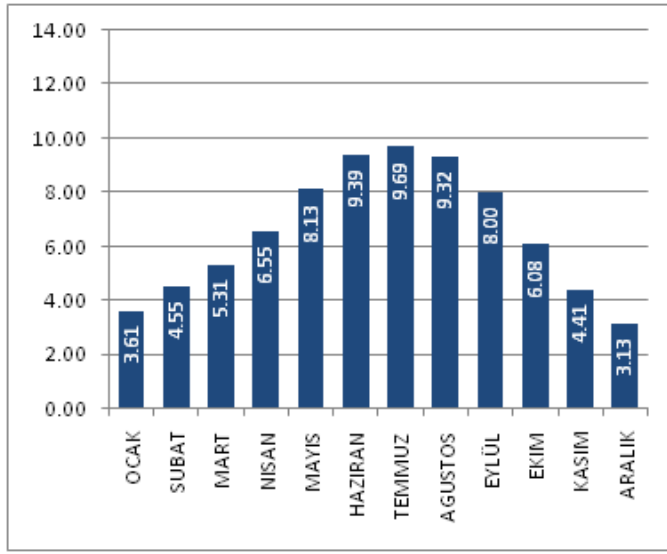
RETScreen: Yenilenebilir enerji alanında yapılacak projelerin teknik, maliyet ve verimlilik açısından fizibilite çalışmalarının yapılabildiği bir çeşit benzetim yazılımdır.

PV*SOL: FV sistemlerin tasarımı ve benzetimi için kullanılan bir yazılımdır. Ara yüzü oldukça kullanışlıdır ayrıca kütüphanesinde çok sayıda güncel modül ve evirici bulundurmaktadır. Bu yazılım ile modellenen FV sistemin üretim-tüketim maliyet analizi ve amortisman süresi hesaplanabilmektedir.

PVSYST: Şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız FV sistemleri tasarımının yapılabildiği oldukça kullanışlı yazılımdır. Bu yazılım ile fizibilite çalışması yapılan FV sistemin kurulacağı matematiksel koordinatlarda optimum panel eğim açılarının belirlenebilir. Ayrıca yazılım oldukça geniş meteorolojik verilere sahiptir (Durak, 2016).

4. BULGULAR

Erbaa, Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlas'ına (GEPA) göre yıllık toplam güneş radyasyonu ortalaması 1400-1450 kWh/m² aralığında olan, güneş enerjisi potansiyeli bakımından Tokat ilinin en düşük ilçelerinden biridir. En uzun güneşlenme süresi ortalaması 9,69 saat ile temmuz ayı, en kısa güneşlenme süresi ortalaması ise 3,13 saat ile aralık ayıdır. İlçenin güneşlenme süreleri ortalamaları şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Erbaa güneşlenme süreleri (ETKB, 2022)

4.1. Erbaa Belediyesi 990 kWp Güneş Enerji Santrali

Erbaa Belediyesi 990 kWp Güneş Enerji Santrali 2021 yılı şubat ayında faaliyete geçerek şebekeye enerji vermeye başlamıştır. Santralde 6 adet evirici, 3068 adet güneş pili, solar kablolar, alternatif akım kabloları, güneş enerjisi santral panosu, yüksek gerilim trafosu ve güneş enerji santrali trafo merkezi bulunmaktadır.

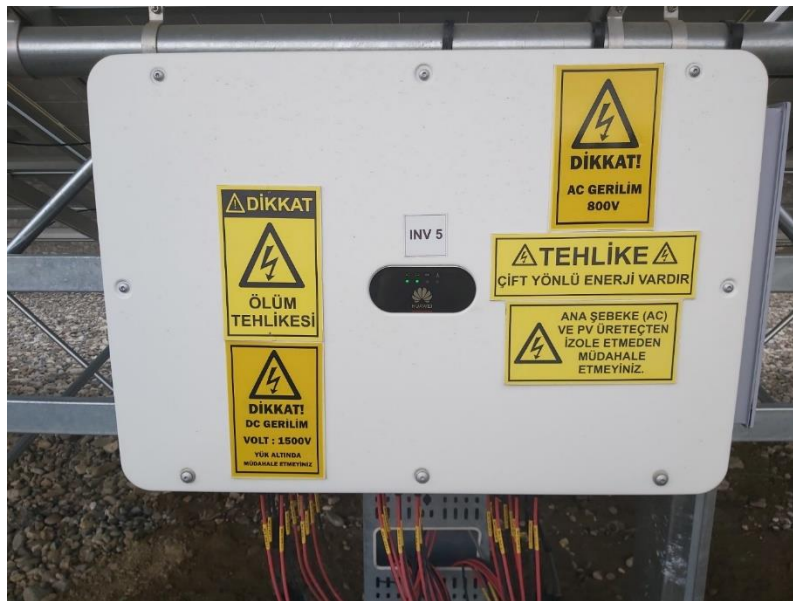
4.1.1. Santralde kullanılan eviriciler ve teknik özellikleri

Santralde Huawei markasına ait SUN2000-185KTL-H1 modelinde 6 adet evirici kullanılmıştır. Eviricilerin teknik özellikleri incelendiğinde verimliliklerinin yaklaşık olarak %99 olduğu, çıkış güçlerinin 185000 W olduğu görülmektedir ancak ÇEDAŞ elektrik dağıtım şirketi ile yapılan 990 kWh'lik bağlantı anlaşması nedeniyle eviricilerin çıkışı 165

kWh ile sınırlandırılmıştır. Eviricilerde 18 adet giriş olup, 9 adet maksimum güç noktası izleyicisi (MPPT) bulunmaktadır. Eviricilerin en yüksek giriş geriliminin 1500V, MPPT başına düşen en yüksek giriş akımının 26A olduğu, her bir MPPT'nin kısa devre akımının 40A olduğu, MPPT'lerin çalışma gerilim aralığının 500V ile 1500V arasında olduğu görülmektedir. Normal şartlarda eviricilerin çıkış gerilimi 800V olup, en yüksek çıkış akımı 134,9A'dır. Eviricilerin teknik özelliklerine ait şema şekil 2.2'de gösterilmiştir.

SUN2000-185KTL-H1 Technical Specifications	
Efficiency	
Max. Efficiency	99.03%
European Efficiency	98.69%
Input	
Max. Input Voltage	1,500 V
Max. Current per MPPT	26 A
Max. Short Circuit Current per MPPT	40 A
Start Voltage	550 V
MPPT Operating Voltage Range	500 V ~ 1,500 V
Nominal Input Voltage	1,080 V
Number of Inputs	18
Number of MPP Trackers	9
Output	
Nominal AC Active Power	175,000 W @40°C, 168,000 W @45°C, 160,000 W @50°C
Max. AC Apparent Power	185,000 VA
Max. AC Active Power (cosφ=1)	185,000 W
Nominal Output Voltage	800 V, 3W + PE
Rated AC Grid Frequency	50 Hz / 60 Hz
Nominal Output Current	126.3 A @40°C, 121.3 A @45°C, 115.5 A @50°C
Max. Output Current	134.9 A

Şekil 4.2 Eviricilerin teknik özellikleri (Huawei, 2023)



Şekil 4.3. Huawei Sun2000-185KTL-H1

4.1.2. Santralde kullanılan güneş pilleri ve özellikleri

Santralde Ödül solar markasına ait OSMp72 modelinde 72 hücreli, 390 W gücünde 3068 adet monokristal güneş pili kullanılmıştır. Güneş pili 1006mm x 1986mm x 40mm ölçülerinde, 22,5 kg kütleindedir. Güneş pilinin maksimum güç noktasında sıcaklık katsayısı -0,40 %/°C, azami çalışma şartlarında sıcaklık aralığı -40°C ile +85°C arasındadır. Güneş pillerinin mekanik bileşenleri, sıcaklık katsayıları ve azami çalışma şartları şekil 2.4'te gösterilmiştir.

MEKANİK BİLEŞENLER

Hücre Tipi	Monokristal Perc Hücre / 158.75 mm x 158.75 mm
Hücre Dizilimi	72 Hücre (6x12)
Panel Ölçüsü	1006 x 1986 x 40 mm
Ağırlık	22,5 Kg
Cam	3.2 mm (0,125") Düşük Demirli, Yüksek Geçişli Temperli Cam
Arka Yüzey	Çok Tabakalı Beyaz Polimer Film
Çerçeve	Beyaz Eloksal Kaplamalı Alüminyum
Bağlantı Kutusu	IP 67 veya IP 68 - 1500 VDC / 15A
Çıkış Kabloları	IEC, UL onaylı (4 mm ² ,12 AWG) (PV Kablo Tipi) , 1200mm
Konnektör	Uyumlu MC4 (IP67, IEC ve UL onaylı)
Yangın Dayanım Tipi	Type 1, Type 2 - A Sınıfı
Darbe Direnci	1300mm / 51,19" Yükseklikten Düşürülen (1.18 lbs / 535g) Çelik Top Testi

SICAKLIK KATSAYILARI

NOTC (Nominal Hücre Çalışma Sıcaklığı)	45°C (± 2°C)
Sıcaklık Katsayısı (P _{max})	-0,40 %/°C
Sıcaklık Katsayısı (V _{oc})	-0,3409 %/°C
Sıcaklık Katsayısı (I _{sc})	+0,0447 %/°C

MAKSİMUM ÇALIŞMA ŞARTLARI

Çalışma Sıcaklık Aralığı	-40~+85°C
Maksimum Sistem Voltajı	1500V DC (UL / IEC)
Maksimum Ters Akım	15A / 20A
Maksimum Yük	75 lbs ft (UL Standart) 5400 Pa (IEC Standart)

Şekil 4.4. Güneş pili mekanik bileşenleri, sıcaklık katsayıları ve maksimum çalışma şartları (Odulsolar, 2023)

Solar ışıınının 1000 W/m², hücre sıcaklığının 25°C, atmosfer yoğunluğunun 1,5 AM ve rüzgâr hızınının 1 m/s olduğu standart test koşullarında (STC) güneş pillerinin elektriksel verileri incelendiğinde, en yüksek güç 390W, en yüksek güç gerilimi 41,1V, en yüksek güç akımını 9,49A, açık devre gerilimi 49,3V, kısa devre akımını 10,12A ve panel verimliliği

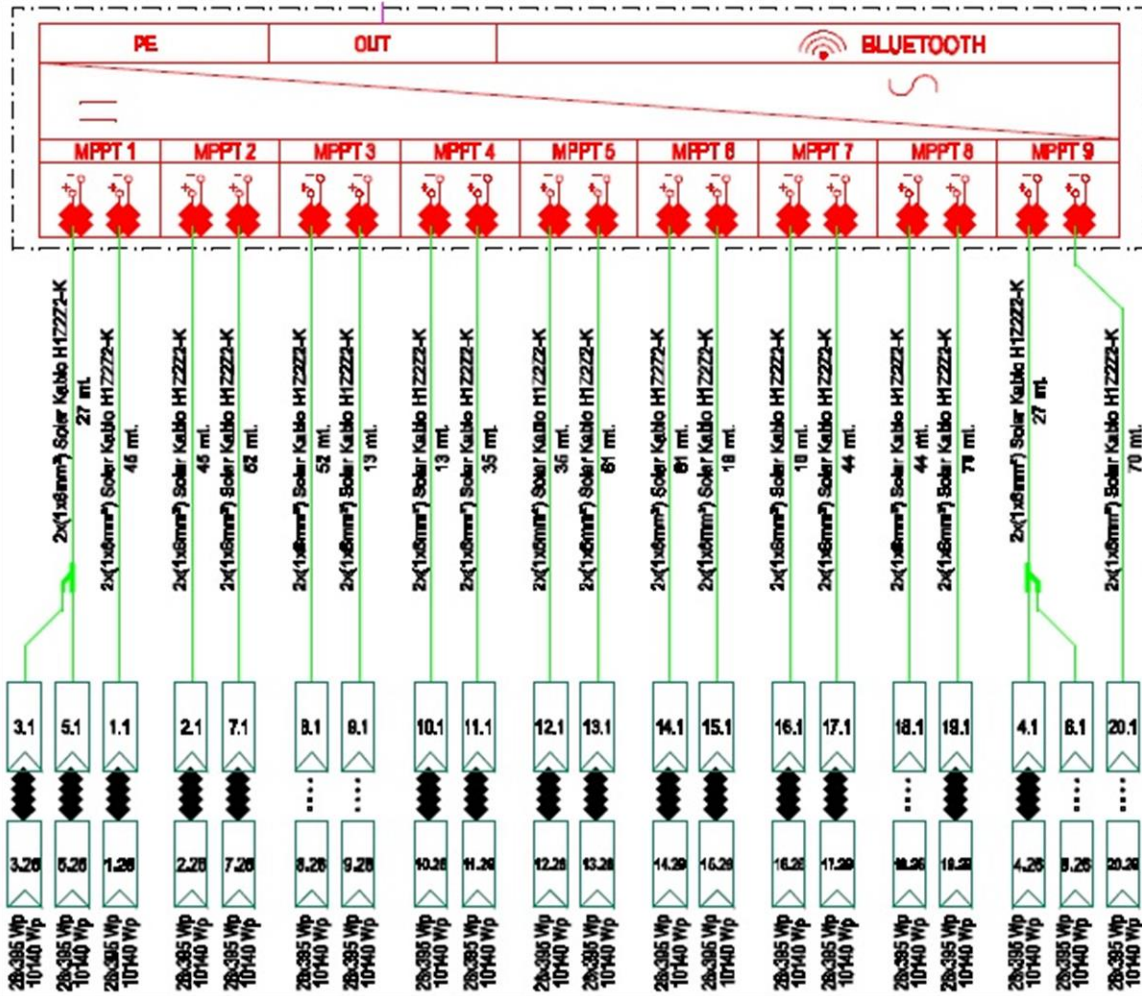
%19,52 ölçüm sonuçlarına ulaşılmaktadır. Güneş pilinin elektriksel verileri şekil 2.5'te görülmektedir.

	Birim	OSMp72-390W
Maksimum Güç	Pmaks (Wp)	390
Pozitif Çıkış Toleransı		0 ~ +5W
Maksimum Güç Voltajı	Vmpp (V)	41,1
Maksimum Güç Akım	Impp (A)	9,49
Açık Devre Voltajı	Voc (V)	49,3
Kısa Devre Akımı	Isc (A)	10,12
Panel Verimliliği	η_m (%)	19,52

Şekil 4.5. Güneş pilinin elektriksel verileri (Odulsolar, 2023)

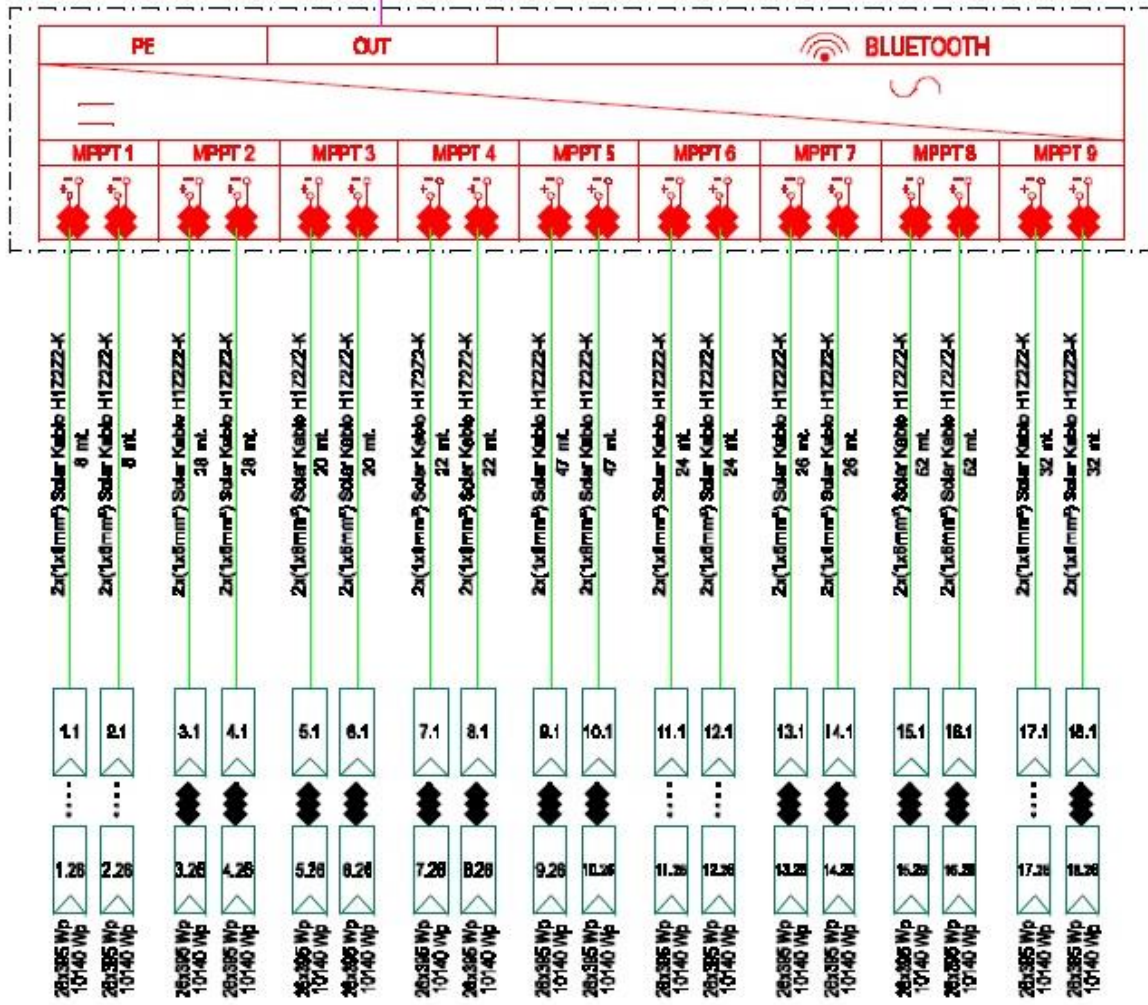
4.1.3. Evirici ve güneş pili bağlantıları

Santralde bulunan altı eviriciden ilk beş tanesinin bağlantıları aynıdır. 1,2,3,4 ve 5 numaralı eviricilere 20 dizi bağlıdır. Her bir dizi 26 adet güneş pilinden oluşmaktadır. İlk beş eviriciye bağlı olan toplam güneş pili sayısı 2600'dür. İlk beş eviricini her birinden elde edilebilecek en fazla güç 202.800 Wp' tir ancak enerji dağıtım şirketi ile yapılan 990 kWh'lik bağlantı anlaşması nedeniyle, eviricilerin çıkışı 165 kWh ile sınırlandırılmıştır. Eviricilerde 18 çıkış vardır bu nedenle ilk beş eviricide ikişer tane dizi Y bağlantı ile bağlanarak 20 dizi oluşturulmuştur. Şekil 4.6'da ilk beş eviricinin bağlantı şeması gösterilmiştir.



Şekil 4.6. 1,2,3,4 ve 5 numaralı eviricilerin bağlantı şeması

6 numaralı eviriciye 18 dizi bağlıdır. Her bir dizi 26 adet güneş pilinden oluşmaktadır. 6 numaralı eviriciye bağlı olan toplam güneş pili sayısı 468'dir. Bu eviriciden elde edilebilecek en fazla güç 182.520 Wp' tir bağlantı anlaşması gereğince eviricinin çıkışı 165 kWh ile sınırlandırılmıştır. Şekil 4.7' de 6 numaralı eviriciye ait bağlantı şeması gösterilmiştir.

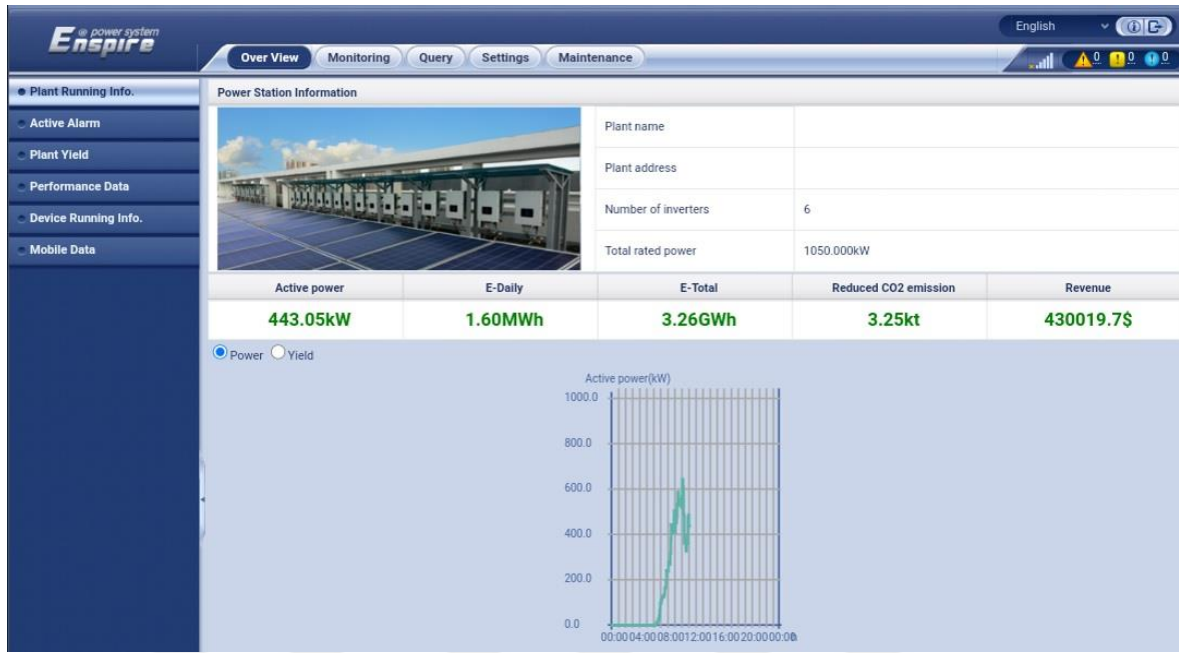


Şekil 4.7. 6 numaralı eviricinin bağlantı şeması

Santralde toplam 8480 m uzunluğunda 6mm² çapında solar kablo kullanılmıştır. Eviricilerin güneş enerji santral panosuna olan bağlantısı için toplam 471 m uzunluğunda 3x120+70 mm² NAYY alternatif akım kablosu kullanılmıştır.

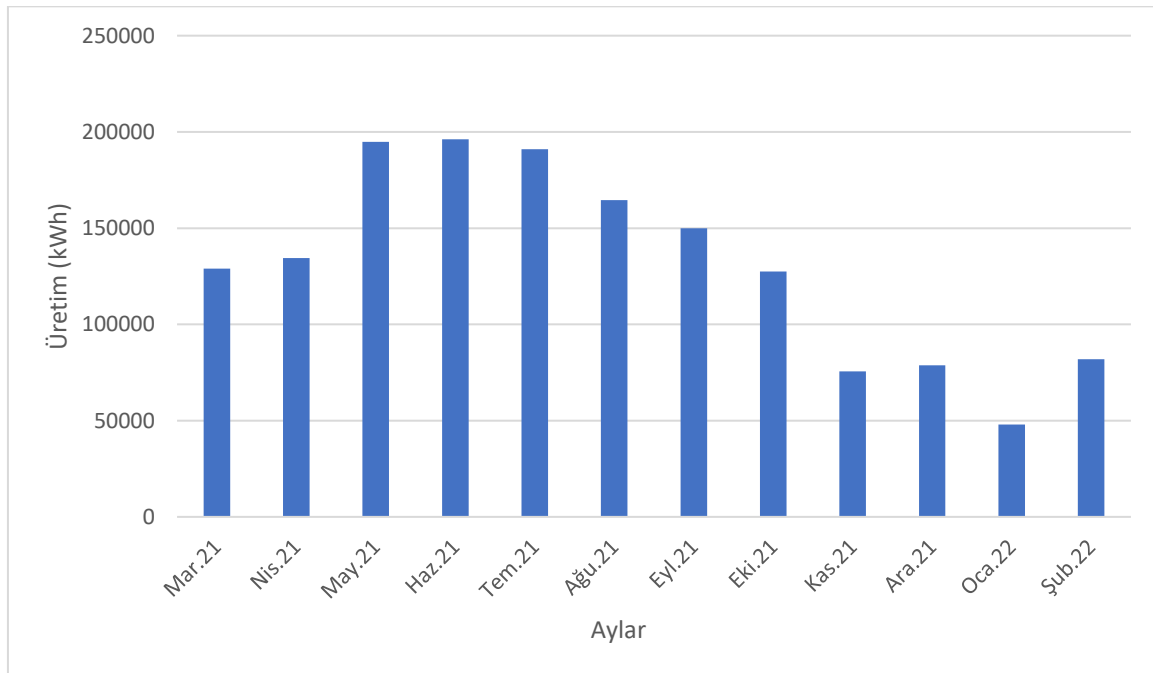
4.1.4. Güneş enerji santrali panosu

Eviricilerden çıkan alternatif akım kabloları güneş enerji santrali (GES) panosunda bulunan 6 adet 3x160A sigortalı yük ayırıcıya bağlıdır. GES panosunda bulunan GES tek yönlü sayaç 3x800/5A akım trafosuna bağlıdır ve santralin iç ihtiyaç tüketimini ölçmektedir. Eviricilerden gelen toplam akım ve gerilimi ölçen enerji analizörü 3x800/5A akım trafosuna bağlıdır, termik manyetik şartel (TMS) 3x1000A yük ayırıcı iç ihtiyaç trafosunu ve



Şekil 4.9. Enspire power system yazılımı arayüzü

Çalışmada kullanılmak üzere Espire power system yazılımından 1 Mart 2021 ile 28 Şubat 2022 tarihleri arasında santralin ürettiği toplam enerji elde edilmiştir. Toplam üretim 1.571.541,8 kWh olup aylık üretim şekil 4.10.' da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. GES üretim verileri

4.2. Güneş Enerji Santralinin PV*SOL ve PVsyst Yazılımları ile Benzetimleri

Bu çalışmada Erbaa Belediyesi 990 kWp Güneş Enerji Santrali'nin PV*SOL ve PVsyst yazılımlarının kısıtlı olan deneme sürümleri kullanılarak yıllık enerji üretim benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Benzetim yazılımlarında eğimli yüzeyler üzerine düşen toplam ışıınım (I_T) hesaplanırken, doğrudan ışııma (I_{bn}), yüzeylerden yansiyarak gelen (albedo) ışıınım (I_{Td}) ve atmosfere yayılan eğik ışıınım (solar difüzyon ışıınımı, I_{hd}) toplanır.

$$I_T = I_{bn} + I_{Td} + I_{hd} \quad (5)$$

Benzetim yazılımları güneşten FV modül üzerine doğrudan gelen ışıınımı (I_{bn}) hesaplarırken sistemin kurulduğu matematiksel koordinatlara bağılı olarak güneşin mevsimsel değışen eğim açısı ve modülün eğim açısı değışkenlerinin yer aldığı algoritma kullanılır.

Yüzeylerden yansiyarak modül üzerine gelen ışıınım albedo olarak adlandırılır. Farklı yüzeylerin albedo değıerleri de farklıdır. Benzetim yazılımlarında albedo değıeri yüzde olarak girilir, yazılım yüzeylerden yansiyarak modül üzerine gelen ışıınımı (I_{Td}) hesaplar. Çizelge 4.1.'de farklı yüzeylerin albedo değıerleri gösterilmiştir (Valentin, 2023).

Çizelge 4.1. Farklı yüzeylerin albedo değıerleri

Yüzey	% olarak albedo
Nehirler ve göller	5-10
Deniz	3-8
Kar	45-90
Buzullar	20-45
Kumlu zemin	20-40
Orman	10-20
Koyu renkli toprak	5-10
Çayır	15-30
Çim	18-23
Yerleşim alanları	15-20
Asfalt	15

Solar difüzyon ışıınımı (I_{hd}) hesaplamasında kullanılan farklı modeller bulunmaktadır. PV*SOL ve PVSyst yazılımlarında ortak olan modeller; Hay ve Davies ve Perez modelleridir.

Hay ve Davies modeli PV*SOL yazılımının sistem varsayılanıdır. 1980 yılında geliştirilen bu modele göre solar difüzyon ışıınımı; izotropik ve güneş çevresi bileşeninden oluşmaktadır, ufuk aydınlatması modele dahil edilmemiştir. I_{bn} doğrudan ışıma, I_{on} doğrudan dünya dışı ışıma olmak üzere; denklem (6)' te A ile tanımlanan anizotropi indeksi, atmosferin ışıma geçirgenliğidir.

$$A = \frac{I_{bn}}{I_{on}} \quad (6)$$

Anizotropi indeksi, solar difüzyon ışıınımının bir kısmını ölçmek için kullanılır. Solar difüzyon ışıınımının kalan kısmı izotropik olarak kabul edilir. Doğrudan yatay ışıınım; I_{hb} , solar difüzyon ışıınımı; I_{hd} , anizotropi indeksi; A , değişken geometrik faktör; R_b , küresel güneş ışıınımı I_h , zemin yansıması; ρ , ufuk çizgisine göre yüzey eğim açısı; β olmak üzere toplam ışıma (I_T) denklem (7)'te gösterilmiştir (Loutzenhiser vd. 2007).

$$I_T = (I_{hb} + I_{hd}A)R_b + I_{hd}(1 - A)\left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + I_h\rho\left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (7)$$

Perez modeli PVSyst yazılımının sistem varsayılanıdır, 1990' da Perez ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Bu modelde eğimli yüzeylere düşen toplam ışıınım diğer modellere göre daha kapsamlı olarak hesaplanmıştır. Perez modelinde gökyüzünün netliğine bağlı olarak değişen F_1 ve F_2 parlaklık katsayıları ayrı ayrı farklı parametrelerle hesaplanmaktadır. a ve b , mevcut yüzey eğim açısına bağlı güneşin yüzeye geliş açısını hesaplamakta kullanılan terimlerdir. Eğimli yüzey üzerine gelen toplam ışıma (I_T) denklem (8)'da gösterilmiştir (Loutzenhiser vd. 2007).

$$I_T = I_{hb}R_b + I_{hd}\left[(1 - F_1)\left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + F_1\frac{a}{b} + F_2 \sin \beta\right] + I_h\rho\left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (8)$$

4.2.1. Güneş enerji santralinin PV*SOL yazılımı benzetimi

PV*SOL yazılımı 1988'de Almanya'da kurulan Valentin Software şirketi tarafından üretilmiştir. Yazılım ile güneş enerji sistemlerinin tasarım, verim ve maliyet benzetimleri gerçekleştirilmektedir. PV*SOL yazılımında bulunan MeteoSyn modülü ile interaktif harita üzerinden seçili bölgenin iklim verileri alınmaktadır (Çakmak, 2022).

PV*SOL yazılımının ilk açılışında welcome penceresi yer almaktadır. Bu pencerede yeni bir proje başlatılabilir veya daha önceden kaydedilmiş bir proje açılabilir. İkinci sekmede bulunan Project data bölümünde projeye ait kullanıcı bilgileri, müşteri bilgileri gibi kişisel bilgilerin girişi yapılmıştır. Benzetim için önemli olan bilgilerin girişi üçüncü sekme olan System Type, Climate and Grid sekmesinde başlamaktadır. Bu sekmede santralin bağlantı türü Grid-connected PV system yani şebekeye bağlı FV sistem olarak seçilmiştir. Benzetimde çizime gerek duyulmadığı için Use 3D Design seçeneği boş bırakılmıştır. Climate data bölümünde ülke olarak Turkey, Location için Google Satellite ile harita üzerinden santralin kurulu olduğu nokta seçilmiştir. OK düğmesine basılarak Meteonorm veri tabanından seçili konumun 10 yıllık meteorolojik verileri alınmıştır. Şekil 4.11.' de System Type, Climate and Grid sekmesi görülmektedir.

System Type, Climate and Grid sekmesinin alt tarafında Simulation Parameters linki yer almaktadır. Bu bölümden benzetim parametreleri düzenlenebilmektedir. Benzetim parametrelerinde benzetim adımları 1 saatlik seçilmiştir, iklim verilerindeki sapma sistem varsayılanı olarak %1 olarak kabul edilmiştir, FV modüllerdeki serbest geçiş diyotlarında veya uyumsuzluklarda oluşabilecek kayıplar sistem varsayılanı olarak sırasıyla %0,5 ve %2 olarak kabul edilmiştir, santralin kurulu olduğu zeminin ve santral çevresinin kumlu yüzey olmasından dolayı albedo %20 olarak kabul edilmiştir, kirlenmeye bağlı yıllık kayıp oranı sistem varsayılanı %0 kabul edilmiştir. Tüm parametrelerin sabit kalması koşulu ile eğimli yüzeylere düşen ışınımın hesaplanmasında kullanılan Hay & Davies modeli ve Perez modeli ile ayrı ayrı iki farklı benzetim gerçekleştirilmiştir.

System Type, Climate and Grid

Type of System
Grid-connected PV System

Type of Design
☐ Use 3D Design

Climate Data

Country		Location	
Turkey		Erbaa GES	
Latitude	40° 41' 57" (40,7°)	Annual sum of global irradiation	1313 kWh/m ²
Longitude	36° 34' 10" (36,57°)	Annual Average Temperature	12,3 °C
Time zone	UTC+3		
Time Period	1991 - 2010		
Resolution	Hourly		

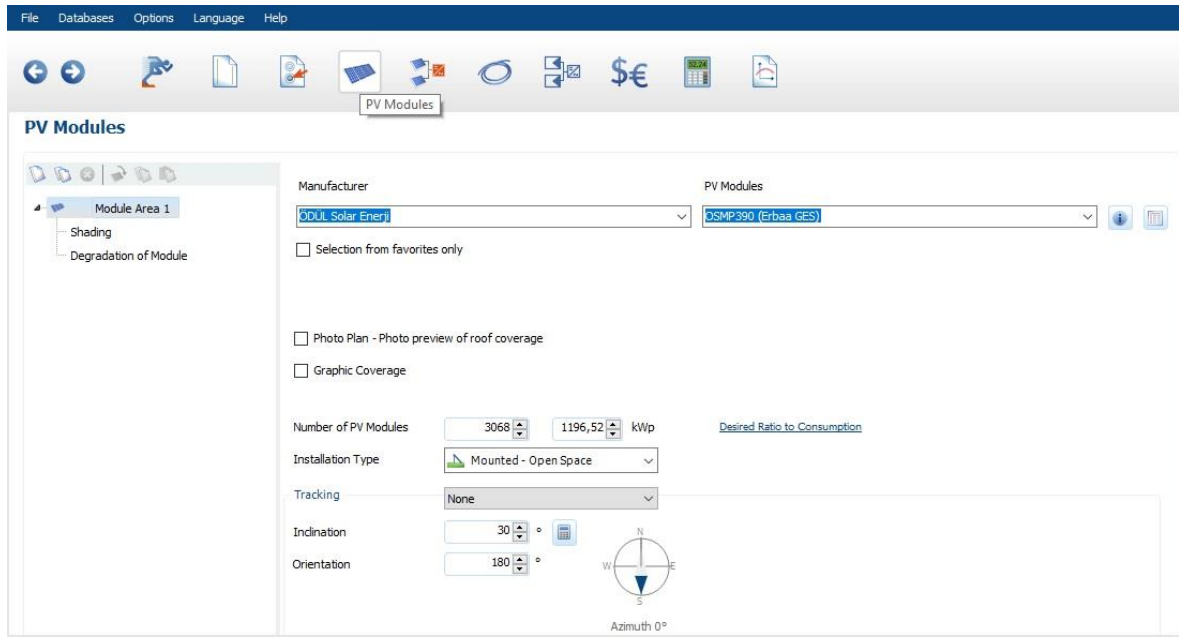
[Simulation Parameters](#)

AC Mains

Voltage (N-L1)	230 V
Number of Phases	3-phase
cos φ	1
Maximum Feed-in Power Clipping	No

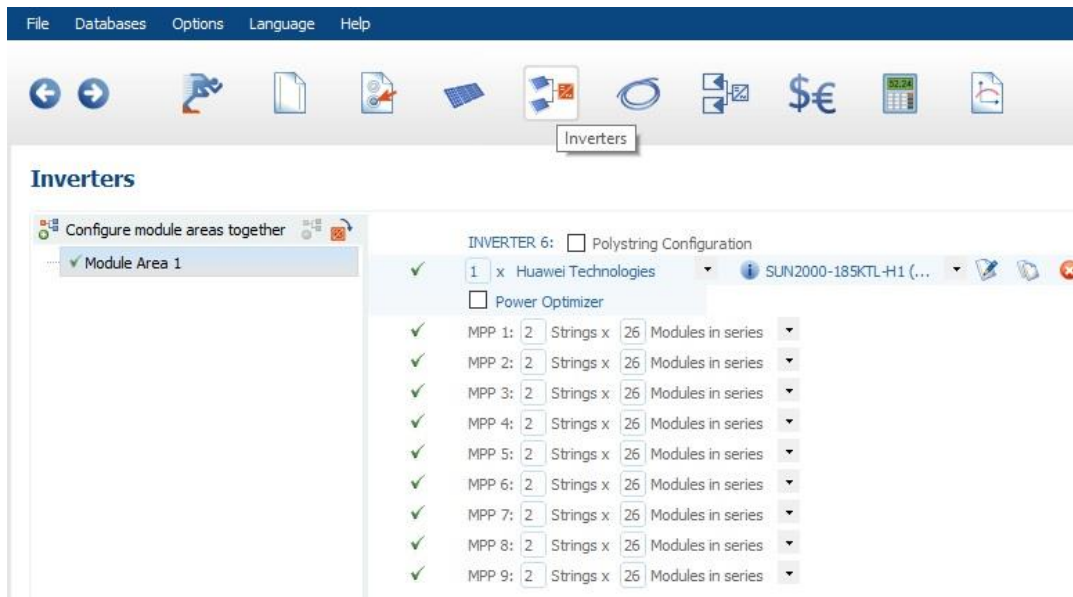
Şekil 4.11. System Type, Climate and Grid sekmesinin görünümü

PV Modules sekmesinde bulunan Manufacturer kısmına Ödül Solar Enerji, PV Modules bölümünden ise OSMP390 modeli güneş pili seçilmiştir. Santralde kullanılan güneş pili sayısı Number of PV Modules bölümüne 3068 olarak girilmiştir. Yazılım otomatik olarak toplam güneş pili gücünü 1196,52 kWp olarak hesaplamıştır. Santral sahası açık alan olduğu için Installation Type kısmından Mounted-Open Space olarak seçilmiştir. Santralde güneş takip sistemi kullanılmadığı için Tracking kısmı None olarak seçilmiştir. Güneş pili eğim açısı Inclination bölümüne 30⁰ olarak girilmiştir. Santral sahasında bulunan güneş pilleri güney yönünde yerleştirilmiştir bu nedenle azimut açısı 0⁰ olacak şekilde Orientation bölümüne 180⁰ olarak girilmiştir. Şekil 4.12.' de PV Modules sekmesi görülmektedir.



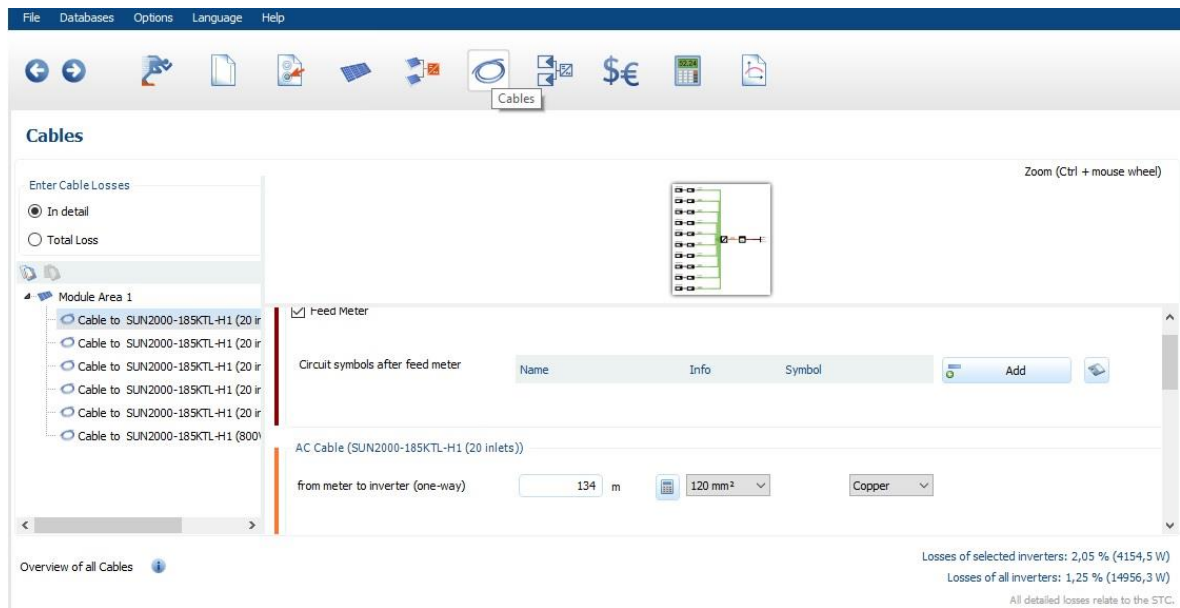
Şekil 4.12. PV Modules sekmesinin görünümü

Inverters sekmesinden 6 adet Huawei Technologies firmasına ait SUN2000-185KTL-H1 modeli evirici seçilmiştir. 1,2,3,4, ve 5 numaralı eviriciler için her biri 26 güneş pilinden oluşan 20 dizi, 6 numaralı evirici için her biri 26 güneş pilinden oluşan 18 dizi seçilmiştir. Evirici ve FV dizilerin uyumlu olduğu ✓ işareti ile anlaşılmaktadır. Şekil 4.13.'te Inverters sekmesinde yer alan 6 numaralı eviricinin dizi ve modül sayıları gösterilmektedir.



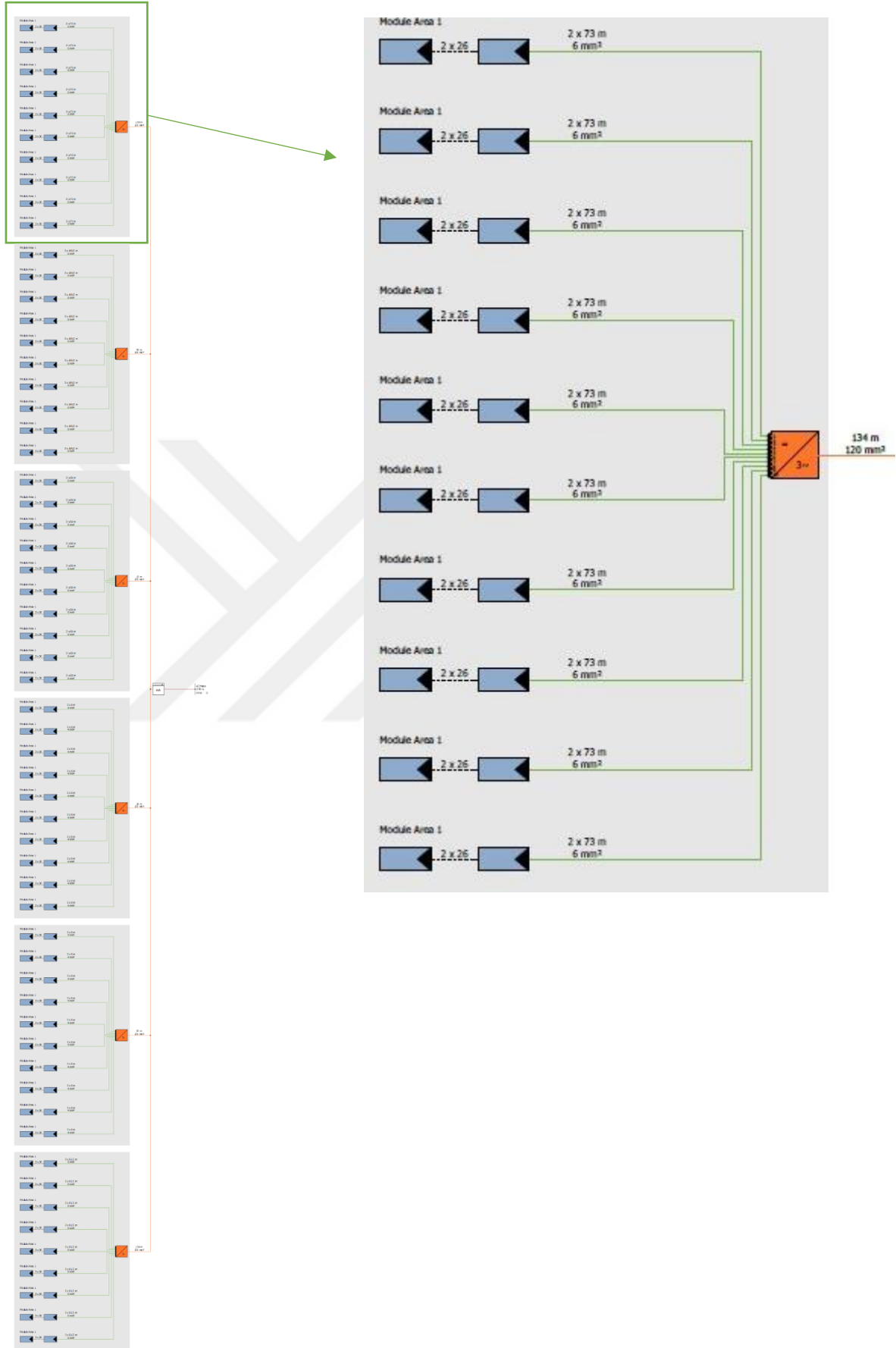
Şekil 4.13. Inverters sekmesinde 6 numaralı eviricinin dizi-modül sayıları

Cables sekmesinde sistemin kablolamadan dolayı kayıpları hesaplanmaktadır. Sistemin kablolamadan kaynaklı kayıplarının hesaplanmasında iki seçenek bulunmaktadır. Total Loss seçildiğinde yüzdelik ortalama bir kayıp oranı girilebilmektedir. Ancak santralin AC ve DC kablo çeşitleri ve uzunlukları bilindiği için In detail seçeneği tercih edilmiştir. Bu bölümde her bir evirici ve dizi arasında kullanılan solar kabloların, eviriciler ile GES panosu arasında kullanılan AC kabloların kalınlıklarının ve uzunluklarının girişi yapılmıştır. Veri girişleri sonrasında yazılım tarafından toplam kayıp %1,25 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.14.' te Cables sekmesi görülmektedir.



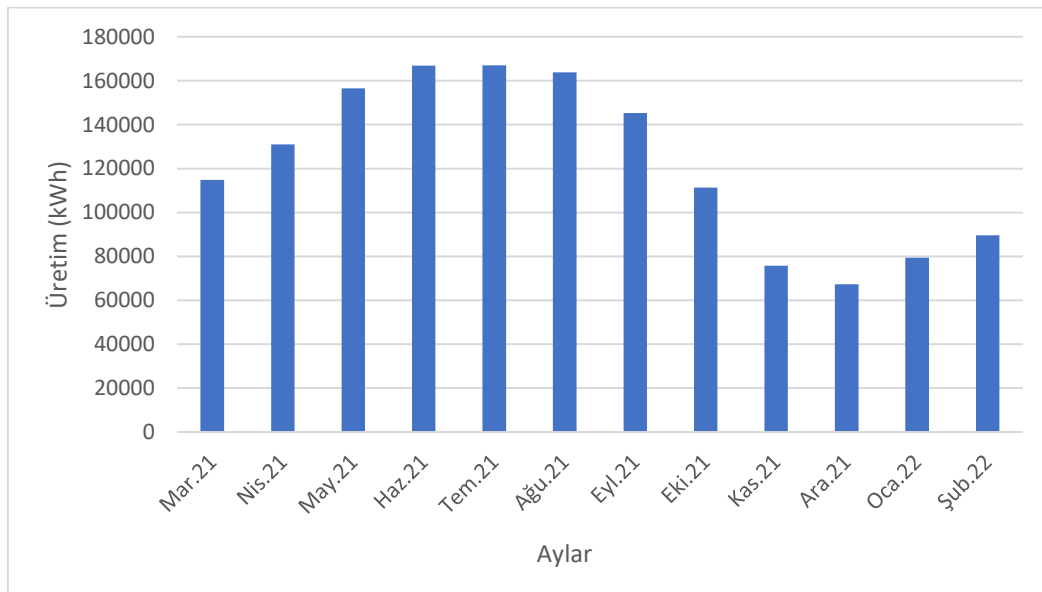
Şekil 4.14. Cables sekmesinin görünümü

Plans and Parts List sekmesinde devre şeması ve kullanılan malzemelerin listesi bulunmaktadır. Şekil 4.15.' te devre şeması görülmektedir. Financial Analysis sekmesinde finansal analiz için gerekli parametrelerin girişi yapılmaktadır. Çalışmada, güneş enerji santralının enerji üretim benzetimleri gerekli olduğu için finansal analiz kısmına veri girişi yapılmamıştır.

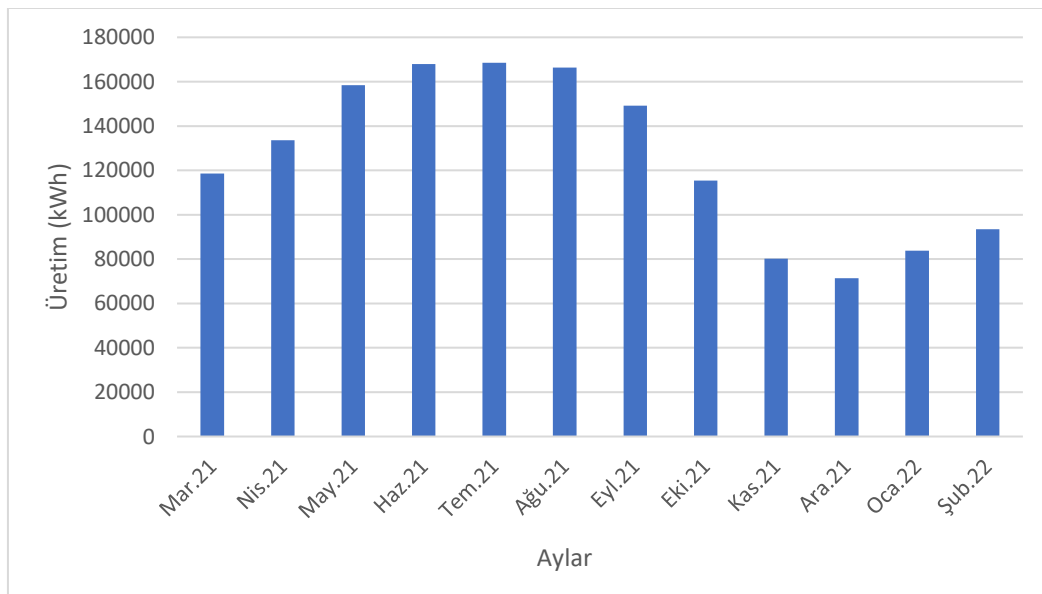


Şekil 4.15. Devre şeması

Results sekmesi kullanılarak sistemin bir yıllık benzetimi yapılmaktadır. Benzetimler 1 Mart 2021 ile 28 Şubat 2022 tarihleri arasını kapsamaktadır. Eğimli yüzeyler üzerine düşen toplam ışıınım modellerinden Hay & Davies modeli baz alınarak gerçekleştirilen benzetim sonucunda toplam 1.468.936 kWh enerji üretimi hesaplanmış ve aylık enerji üretim grafiği şekil 4.16.'da gösterilmiştir. Perez eğimli yüzeyler üzerine düşen toplam ışıınım modeli baz alınarak gerçekleştirilen benzetim sonucunda toplam 1.506.913 kWh enerji üretimi hesaplanmış ve aylık enerji üretim grafiği şekil 4.17.' de gösterilmiştir.



Şekil 4.16. PV*SOL benzetim sonuçları (Hay ve Davies modeli)

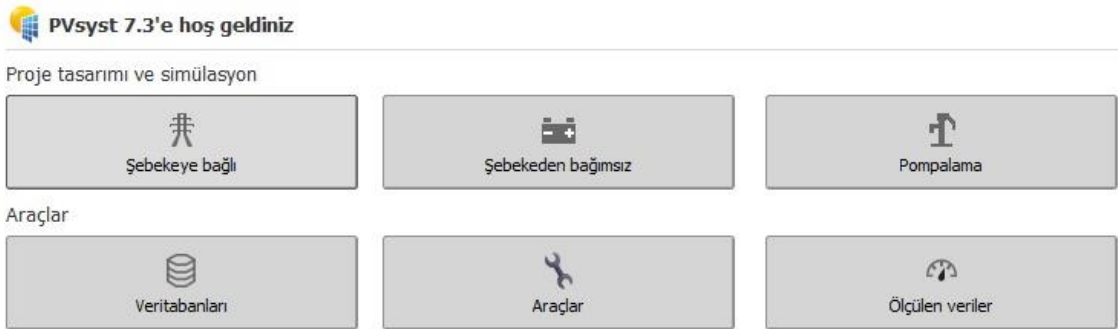


Şekil 4.17. PV*SOL benzetim sonuçları (Perez modeli)

4.2.2. Güneş enerji santralının PVsyst yazılımı benzetimi

PVsyst yazılımı Cenevre Üniversitesi tarafından geliştirilmiştir. Benzerlerine göre daha detaylı veri girişlerine izin verdiği için gerçeğe yakın sonuçlar verebilmekte bu nedenle yaygın olarak kullanılmaktadır. PVsyst ile şebeke bağlantılı, depolamalı, hibrit FV sistemler tasarlanabilmektedir (Akcan, Kuncan ve Minaz, 2020).

PVsyst yazılımında Türkçe, dil seçenekleri arasında mevcut olduğu için dil Türkçe olarak tercih edilmiştir. Yazılımın açılışında bulunan Hoş Geldiniz penceresinde tasarlanacak olan fotovoltaik sistemin çeşidi Şebekeye Bağlı olarak seçilmiştir. Araçlar bölümünde bulunan Veri tabanları sekmesindeki eviriciler içinde Huawei SUN2000-185KTL bulunmaktadır. Ancak FV modüller içinde santralde kullanılan Ödül Solar OSMP390 bulunmamaktadır. FV modülün elektriksel verileri, mekanik bileşenleri ve sıcaklık katsayıları kullanılarak yeni modül oluşturulmuş ve veri tabanına eklenmiştir. Veri girişi sonucunda yazılımın panel verimlilik hesaplamasının %19,53 olarak gerçek veri ile tutarlı olduğu görülmüştür. Şekil 4.18.'de "Hoş Geldiniz" penceresi, şekil 4.19.'da yeni modül girişi görülmektedir.



Şekil 4.18. PVsyst'te Hoş Geldiniz penceresi

PV modül tanımlaması

Ana veriler | Boyutlar ve Teknoloji | Model parametreleri | Ek veriler | Ticari | Grafikler

Model: Üretici:

Dosya adı: Veri kaynağı:

Yeni nesne

Nominal güç (STC'de): Wp Tol. +/- %

Teknoloji:

Üretici teknik özellikleri veya diğer ölçümler

Referans koşulları	Gref	1000 W/m ²	TRef	25 °C
Kısa devre akımı	Isc	10.120 A	Açık devre Voc	49.30 V
Maks güç noktası	Imp	9.490 A	Vmpp	41.10 V
Sıcaklık katsayısı	muIsc	4.5 mA/°C	Seri mod. say.	72 seri
	veya muIsc	0.045 %/°C		

İç model sonuçları

İşletme koşulları	GOper	1000 W/m ²	TOper	25 °C
Maks güç noktası	Pmpp	390.2 W	Sıcaklık katsayısı	-0.30 %/°C
	Akım Imp	9.59 A	Gerilim Vmpp	40.7 V
Kısa devre akımı	Isc	10.12 A	Açık devre Voc	49.3 V
Verim / Hücre yüzeyi		48.04 %	/ Panel yüzeyi	19.53 %

Model özeti

Ana parametreler

R_{şönt} Ω

R_{sh} (G = 0) Ω

R seri model Ω

R seri maks. Ω

Görünür R seri Ω

Model parametreleri

Gama

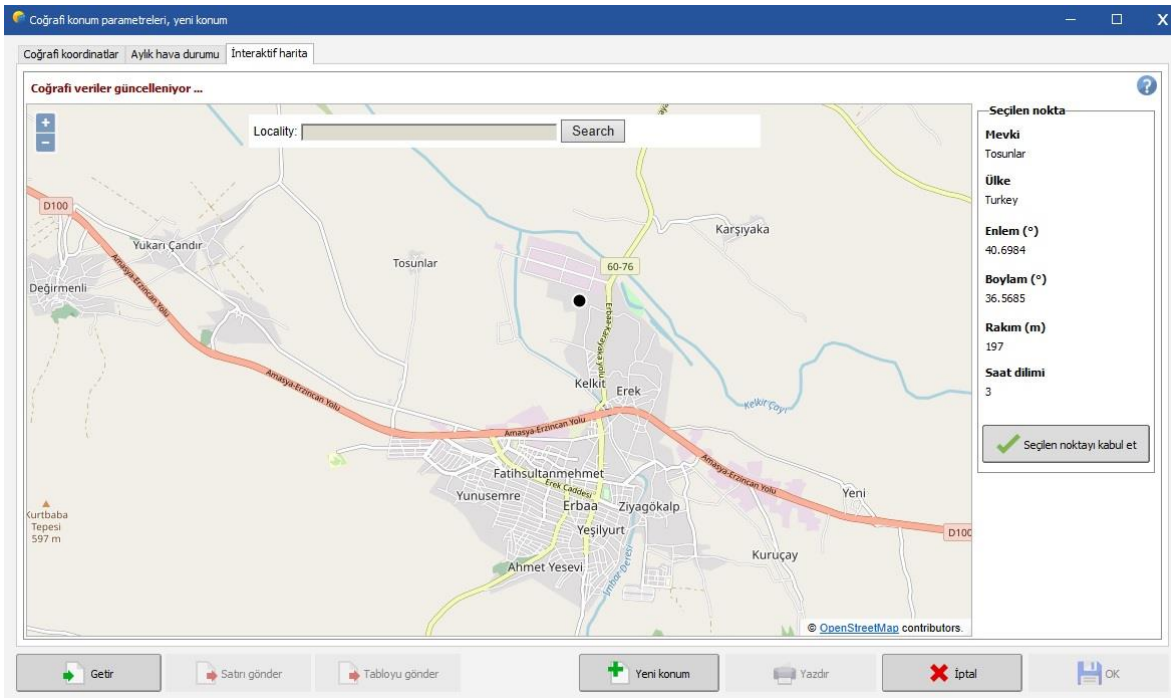
IoRef nA

muVoc mV/°C

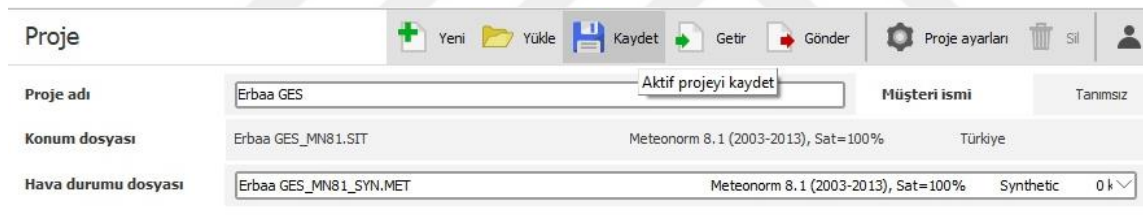
Optimizasyonu göster | Kopya | Yazdır | İptal | OK

Şekil 4.19. Yeni FV modül tanımlama

Şebekeye bağlı sistem seçildikten sonra Proje sayfası açılmaktadır. Sayfanın üst tarafında proje adı Erbaa GES olarak belirlenmiştir. Konum dosyası bölümüne harita üzerinden santralin mevcut konumu seçilmiştir. Seçilen konum için hava durumu dosyası Meteonorm 8.1 veri tabanı içinden seçilmiştir. Şekil 4.20.'de konum penceresi, şekil 4.21.'de kayıt sonrası proje bilgileri görülmektedir.



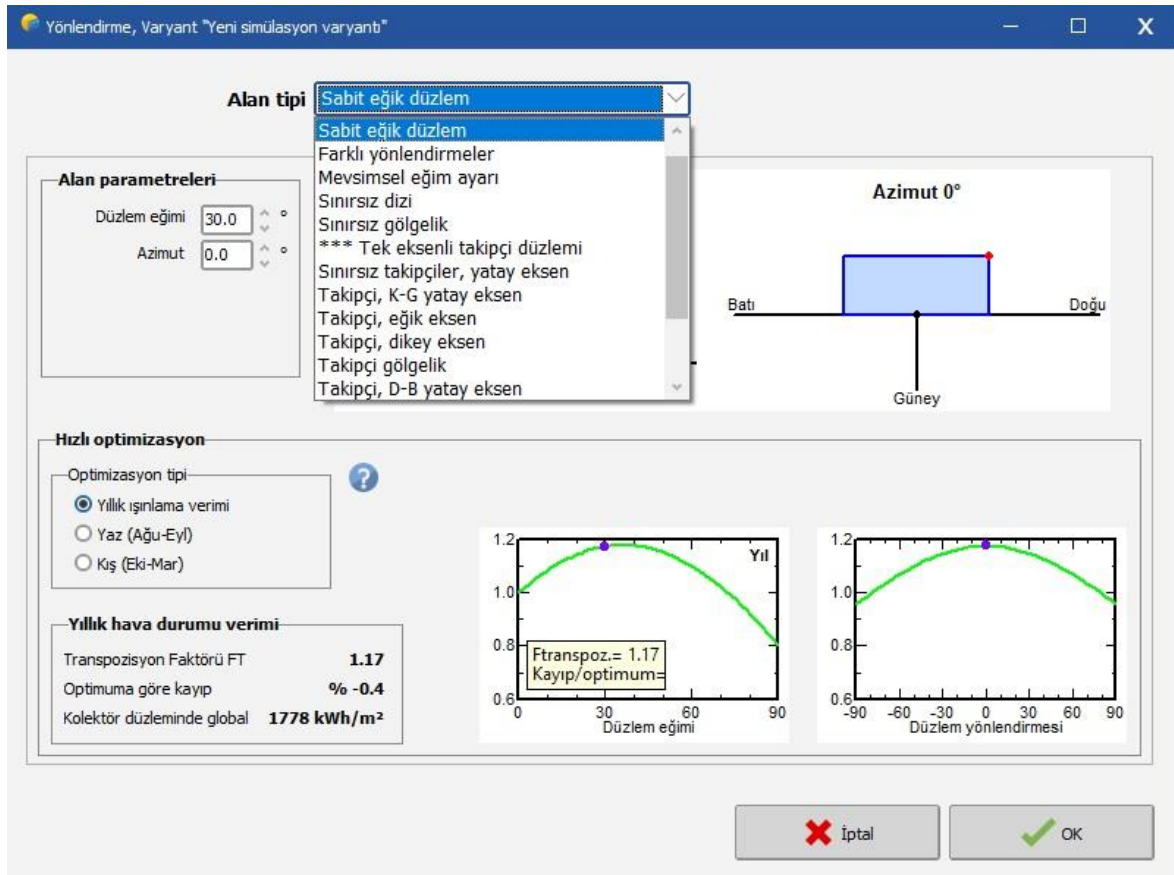
Şekil 4.20. Konum penceresi



Şekil 4.21. Proje bilgileri

Proje kaydedildikten sonra Variant bölümü aktif hale gelmektedir. Variant bölümünde üç ana bölüm bulunmaktadır. Bunlar; Ana parametreler, Opsiyonel parametreler ve Simülasyon bölümleridir. Ana parametreler bölümünde Yönlendirme, Sistem, Detaylı kayıplar, Öz tüketim ve Depolama pencereleri için linkler bulunmakta olup sırayla veri girişi yapılmıştır.

Yönlendirme penceresinde alan tipi olarak sabit eğik düzlem seçilmiştir. Panel eğim açısı 30^0 olarak girilmiştir. Modüller güneye konumlandırıldığı için azimut 0^0 olarak seçilmiştir. Santral tüm yıl çalıştığı için en iyileme yıllık olarak seçilmiştir. Şekil 4.22.'de Yönlendirme penceresi görülmektedir.



Şekil 4.22. Yönlendirme penceresi

Sistem penceresi santralin kurulumu için gerekli ekipmanların tamamının girişinin yapıldığı penceredir. Ön boyutlandırma bölümünde alan ve güç seçenekleri bulunmaktadır. Güç seçeneğinde toplam güç 1.196,52 kWp olarak seçilmiştir. Santralin toplam modül çıkış gücüne göre seçili modül sayısı yazılım tarafından 3068 adet olarak hesaplanmıştır. İnverter seçiminden Huawei SUN2000-185KTL modeli 6 adet seçilmiştir. Şekil 4.23.'te Sistem penceresi görülmektedir.

Şebekeye bağlı sistem tanımlama, Varyant VCO: "Yeni simülasyon varyantı"

Alt alan

Alt dizinin ismi ve yönü

İsim: PV alanı

Yön: Sabit eğik düzlem

Eğim: 30°

Azimet: 0°

Ön boyutlandırma yardımı

☐ Boyutlandırmasız

Planlanan gücü giriniz: 1196.5 kWp

☒ Boyutlandır

... veya mevcut alan(modül): 6130 m²

PV modül seçimi

Mevcut: Filtre: Tüm PV modüller

Gereken tahmini modül sayısı: 3068

Ödül Solar Enerji: 390 Wp 35V Si-mono Osmo72-390 Manufacturer

☐ Optimizer kullan

Gerilim boyutlama: Vmpp (60°C): 36.2 V

Voc (-10°C): 53.6 V

İnvertör seçimi

Mevcut: Çıkış gerilimi 800 V Tri 50Hz

Huawei Technologies: 175 kW 550 - 1500 V TL 50/60 Hz SUN2000-185KTL-H1 2019 yılından beri

İnvertör sayısı: 6

Çalışma gerilimi: 550-1500 V İnvertör global gücü: 1050 kWac

☐ Multi-MPPT kullanımı

Maksimum giriş gerilimi: 1500 V 9 MPPT ile invertör

İnvertörde güç paylasımı

Dizi boyutlandırması

Modül ve zincir sayısı

Seri mod. sayısı: 25

Zincir sayısı: 118

Aşırı yük kaybı: 0.0 %

Nom. güç oranı: 1.14

Panel sayısı: 3068

Yüzey: 6130 m²

İşletme koşulları

Vmpp (60°C): 941 V

Vmpp (20°C): 1075 V

Voc (-10°C): 1392 V

Yüzey ısrımı: 1000 W/m²

İmpp (STC): 1120 A

İsc (STC): 1194 A

İsc (STC'de): 1194 A

Veri maks: Veri maks

STC: 1168 kW

Maksimum işletme gücü: 1057 W/m² ıgın ve 50°C

Alan nominal gücü (STC): 1197 kWp

Alt alanlar listesi

İsim	#Mod #İnv.	#Zincir #MPPT
PV alanı		
Ödül Solar Enerji - Osmo72-390	26	118
Huawei Technologies - SUN200...	6	1

Global sistem özeti

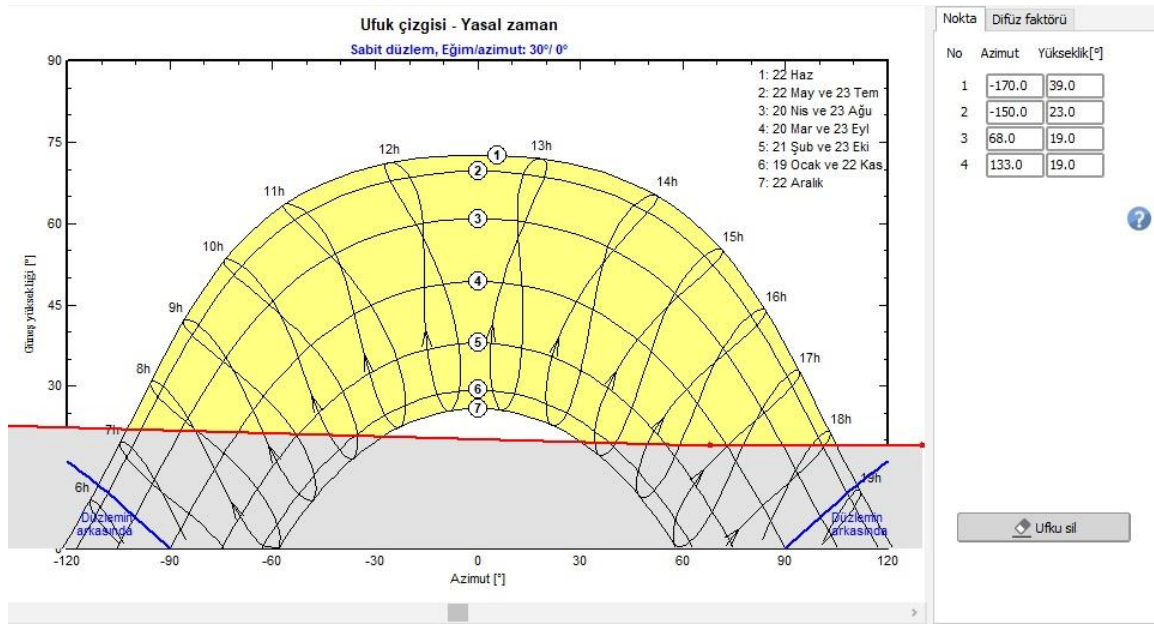
Panel sayısı	3068
Panel yüzeyi	6130 m²
İnvertör sayısı	6
PV nominal gücü	1197 kWp
Nominal AC gücü	1050 kWac
Nom. güç oranı	1.140

Sistem özeti Tek hat şeması İptal OK

Şekil 4.23. Sistem penceresi

Detaylı Kayıplar penceresinde bulunan omik kayıplar sekmesinde PV*SOL yazılımında hesaplanan kablolamaya bağlı %1,25'lik kayıp kullanılmıştır. Öz tüketim penceresinde sistem öz tüketimsiz olarak seçilmiştir. Depolama penceresinde sistem depolamasız olarak seçilmiştir.

suncalc.org web adresinde santralin kurulu olduğu koordinatlar kullanılarak güneşin azimet ve yükseklik açıları alınmış, Opsiyonel parametreler den ufuk çizgisi penceresinde veri girişi yapılmıştır. Şekil 4.24'te veri girişi sonrası ufuk çizgisi görülmektedir. Gölgeleme penceresinde gölgelemesiz olarak seçim yapılmıştır. Modül düzeni penceresinde sistemin üç boyutlu çizimine gerek duyulmamıştır. Enerji yönetimi penceresinde şebeke gücü kısıtlaması bağlantı anlaşmasında olan 990 kWp olarak girilmiştir. Çalışmada ekonomik veri analizi yapılmadığı için ekonomik değerlendirme penceresine veri girişi yapılmamıştır.



Şekil 4.24. Ufuk çizgisi

Proje Ayarları penceresinde albedo %20 kabul edilmiştir. Veri girişleri tamamlandıktan sonra Proje Ayarları penceresinde bulunan parametrelerin tamamı sabit kalmak koşulu ile transpozisyon modellerinden Hay modeli ve Perez modeli ile ayrı ayrı iki farklı benzetim gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.25.'te Proje Ayarları penceresi görülmektedir.

Konuma bağlı ayarlar

İnvertör giriş gerilimlerine göre dizi tasarımı için referans sıcaklıklar

Mutlak gerilim sınırı için düşük sıcaklık: -10 °C ✓

VmppMax için kış çalışma sıcaklığı: 20 °C ✓

1000 W/m²'nin altında olağan çalışma sıcaklığı: 50 °C ✓

VmppMin için yaz aylarında çalışma sıcaklığı: 60 °C ✓

Diğer tasarım parametreleri

Alan maks. gerilimi

☒ IEC (genelde 1000V)

☐ UL (genelde 600 V)

µVoc değeri

☒ Bir diyotlu modelden

☐ Teknik özelliklerden

Bu proje için transpozisyon modeli

☒ Hay modeli (sağlam)

☐ Perez-Ineichen modeli (gelişmiş)

AC kayıpları güç referansı

☒ STC'de PNom PV

☐ PNom (invertör)

Circumsolar işlemi

☒ Difüze dahil

☐ Ayrı işlem

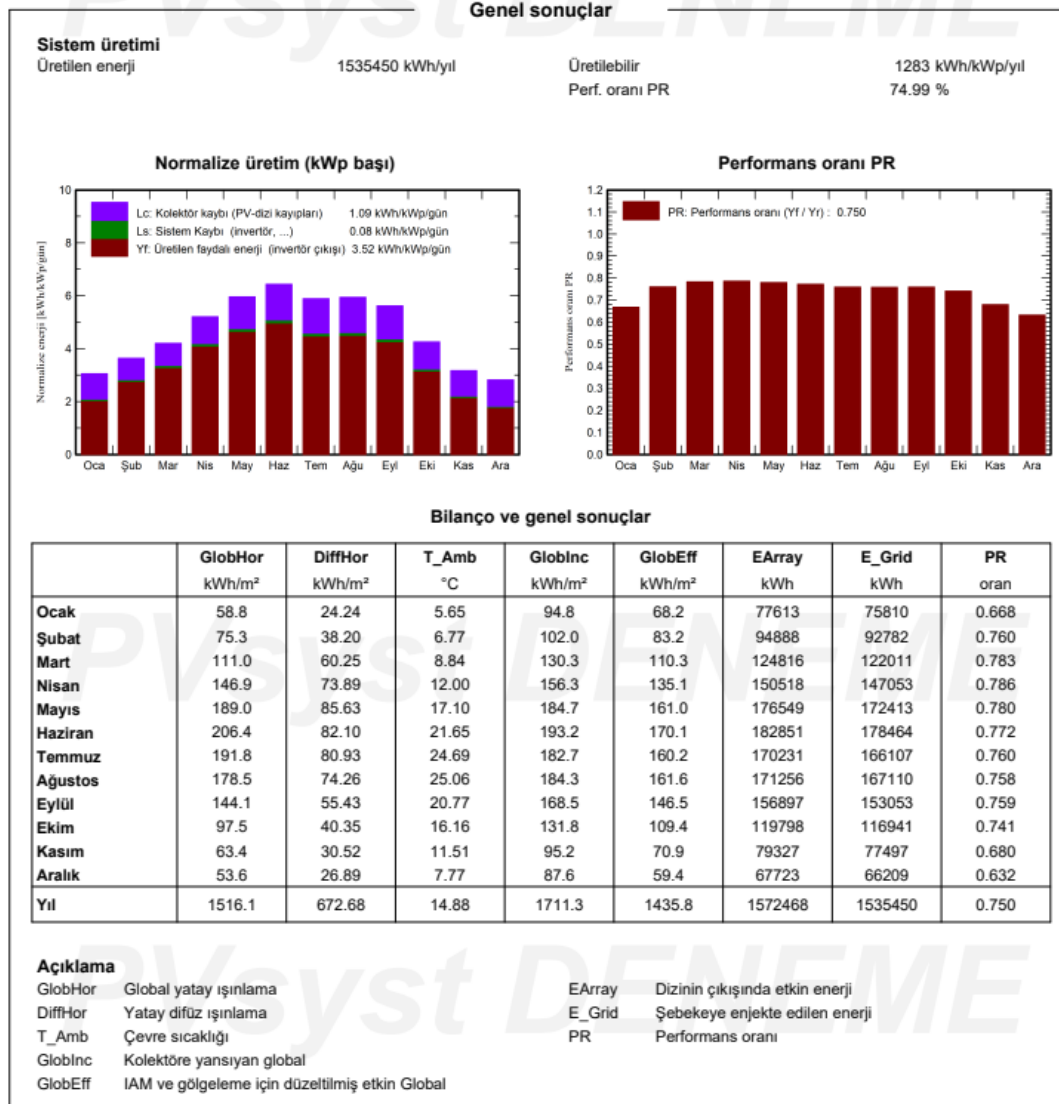
Şekil 4.25. Proje Ayarları

Tamamlanan veri girişleri sonucunda varyant penceresinde bulunan simülasyonu yürüt seçeneği ile benzetim tamamlanmıştır. Şekil 4.26'da varyant penceresinin genel görünümü gösterilmektedir.

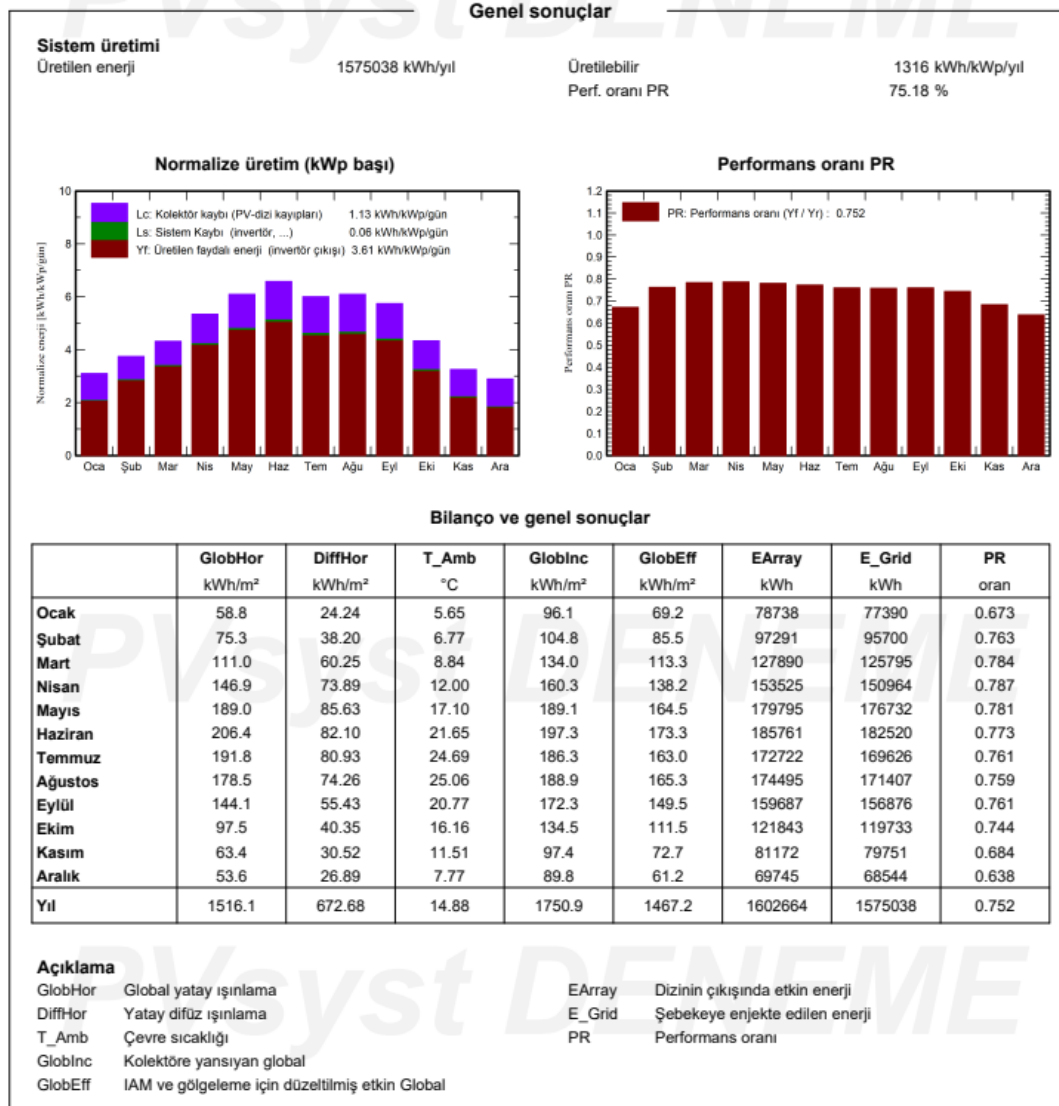
Sonuç özeti	
Sistem tipi	3B sahne tanımlanmadı, gölgelermesiz
Sistem üretimi	1535 MWh/yıl
Üretilebilir	1283 kWh/kWp/yıl
Performans oranı	0.750
Normalize üretim	3.52 kWh/kWp/gün
Dizi kayıpları	1.09 kWh/kWp/gün
Sistem kayıpları	0.08 kWh/kWp/gün

Şekil 4.26. Varyant penceresi

Benzetimler 1 Mart 2021 ile 28 Şubat 2022 tarihleri arasını kapsamaktadır. Transpozisyon modellerinden Hay ve Davies modeli baz alınarak gerçekleştirilen benzetim sonucunda toplam 1.535.450 kWh enerji üretimi hesaplanmış ve aylık enerji üretim grafiği şekil 4.27.'de gösterilmiştir. Perez eğimli yüzeyler üzerine toplam ışıınım modeli baz alınarak gerçekleştirilen benzetim sonucunda toplam 1.506.913 kWh enerji üretimi hesaplanmış ve aylık enerji üretim grafiği şekil 4.28.' de gösterilmiştir.



Şekil 4.27. PVsyst benzetim sonuçları (Hay ve Davies modeli)



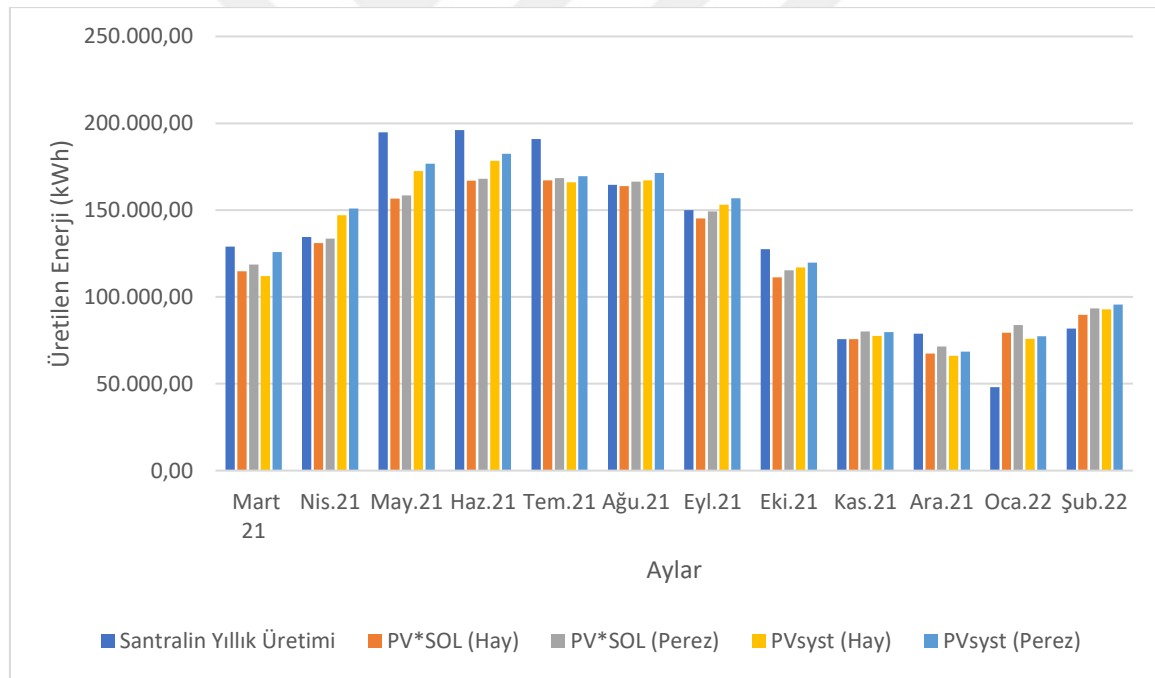
Şekil 4.28. PVsyst benzetim sonuçları (Perez modeli)

4.3. Benzetim Sonuçlarının Gerçek Üretim Verileri ile Karşılaştırılması

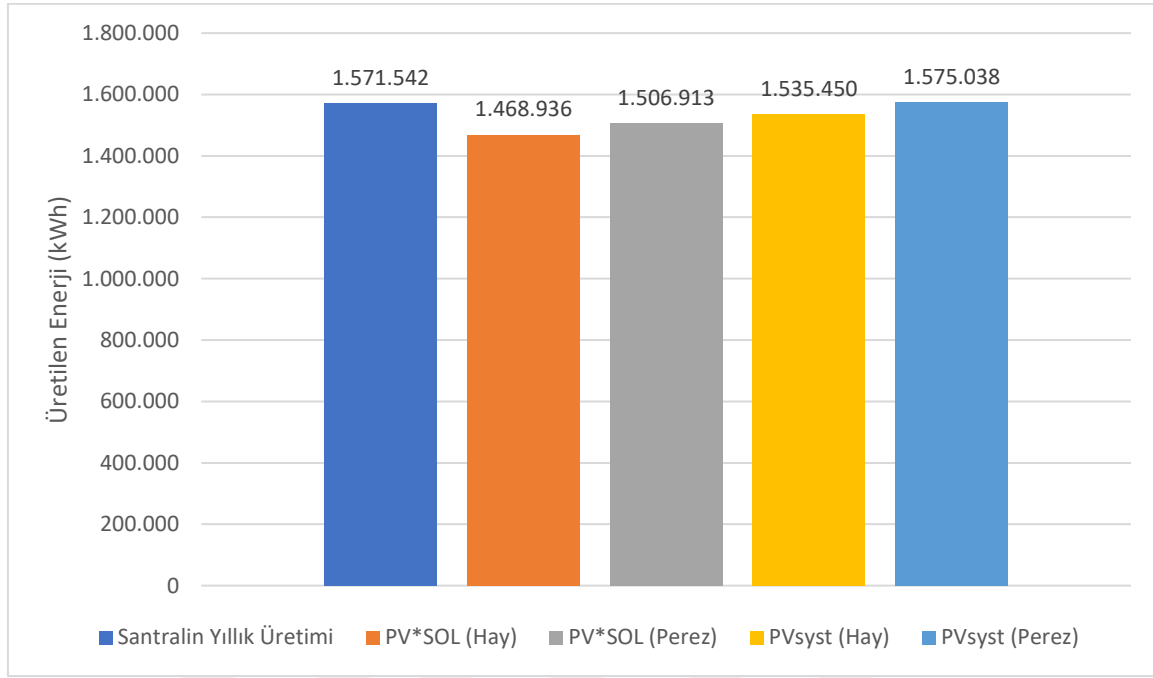
Bu bölümde santralde üretilen yıllık enerji, PV*SOL ve PVsyst yazılımlarında elde edilen benzetim sonuçları ile tablo ve grafikler üzerinde karşılaştırılmış, yüzdelik farklar aylık ve yıllık bazda ortaya konulmuştur. Çizelge 4.2.'de karşılaştırma tablosu, şekil 4.29.'da benzetim sonuçlarının aylık karşılaştırma grafiği, şekil 4.30'da benzetim sonuçlarının yıllık karşılaştırma grafiği gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Sonuçların karşılaştırması

Aylar	Santral yıllık üretim (kWh)	PV*SOL (Hay)		PV*SOL (Perez)		PVsyst (Hay)		PVsyst (Perez)	
		Sonuç (kWh)	%'de fark	Sonuç (kWh)	%'de fark	Sonuç (kWh)	%'de fark	Sonuç (kWh)	%'de fark
Mart	128.964,4	114.838,9	-10,9	118.608,7	-8	112.011	-13	125.795	-2,5
Nisan	134.454	130.955	-2,6	133.651,7	-0,6	147.053	+9,4	150.964	+12,3
Mayıs	194.866,2	156.553	-19,6	158.420,1	-18,7	172.413	-11,5	176.732	+9,3
Haziran	196.161,2	166.929,3	-14,9	167.999,1	-14,4	178.464	-9	182.520	-6,9
Temmuz	190.980,3	167.069,1	-12,5	168.467,8	-11,7	166.107	-13	169.626	-11,2
Ağustos	164.559,5	163.873,3	-0,4	166.348,1	+1	167.110	+1,9	171.407	+4,1
Eylül	149.918,3	145.272,2	-3	149.210,7	-0,4	153.053	+2	156.876	+4,6
Ekim	127.441,5	111.301,8	-12,6	115.395,9	-9,5	116.941	-8,2	119.733	-6
Kasım	75.762,5	75.769,3	+0,1	80.166	+5,8	77.497	+2,3	79.751	+5,3
Aralık	78.762,1	67.320,5	-14,5	71.426,3	-9,3	66.209	-15,9	68.544	-12,9
Ocak	47.990,8	79.421,9	+65,5	83.756,1	+74,5	75.810	+58	77.390	+61
Şubat	81.866,5	89.632,1	+9,5	93.462,9	+14	92.782	+13,3	95.700	+16,9
Toplam	1.571.542	1.468.936	-6,5	1.506.913	-4	1.535.450	-2,3	1.575.038	+0,2



Şekil 4.29. Benzetim sonuçlarının aylık karşılaştırma grafiği



Şekil 4.30. Benzetim sonuçlarının yıllık karşılaştırma grafiği

5. TARTIŞMA

T.C. Amasya Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi binasında kuru olan 200 kWp gücündeki çatı üstü güneş enerji santralinin ocak-2016’da enerji üretim ölçümüne başlanmıştır. Amasya Üniversitesi 200kWp GES verileri internet sitesinden alınmıştır. Çizelge 5.1. de Amasya Üniversitesi GES’ in yıllara göre enerji üretimleri görülmektedir.

Çizelge 5.1. Amasya Üniversitesi GES enerji üretimi (2016-2020)

Yıl	Üretilen Enerji (kWh)
2016	235.995
2017	203.527
2018	252.100
2019	214.472
2020	242.146

Şekil 5.1.’de gösterilen Amasya Üniversitesi güneş enerji santralinin MATLAB benzetim yazılımı devre şemasından yararlanılarak santralde kullanılan 800 adet Renesola JC250M-24/Bb 250 Watt güneş pili, 10 adet Replus-20000TL3B evirici kullanılarak PV*SOL ve PVsyst benzetim yazılımlarında Hay ve Davies ve Perez modelleri ile ayrı ayrı benzetimler gerçekleştirilmiştir.

Benzetimlerin sonuçları incelendiğinde santral üretimine en yakın sonucun 2018 yılı için PV*SOL yazılımında Hay ve Davies eğimli yüzeyler üzerine düşen toplam ışıınım modeli ile gerçekleştirilen benzetimin olduğu tespit edilmiştir. Benzetim sonucu ile santral üretimi arasındaki fark +%0,02 olarak gözlemlenmiştir. Benzetim sonucunun üretim değerlerine yakın olmasının nedeni Amasya Üniversitesi güneş enerji santralindeki üretim verilerinin uzun süreli olmasından kaynaklandığı düşünülebilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gün geçtikçe artan enerji ihtiyaçları ve enerji üretiminin yenilenemez enerji kaynaklarından elde edilmesine bağlı olarak ortaya çıkan çevre sorunları, ayrıca ülke olarak enerjide dışa bağımlılığımız, geri dönüştürülebilir, çevreci, tükenmez ve ekonomik olan yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını arttırmıştır. Ülkemiz güneşlenme süresi ve m^2 'ye düşen global radyasyon miktarı bakımında güneş enerjisinden elektrik üretimi için uygundur. Güneş enerjisi santrallerinin kurulum maliyetleri yüksek olsa da kurulduktan sonra uzun süre kullanılabilmesi, bakım ve onarım ihtiyacının fazla olmaması, şebekeye satıldığında en çok 5 ile 7 yıl aralığında kurulum maliyetini çıkarması güneş enerjisi santralini cazip hale getirmektedir.

Bu çalışmada Erbaa Belediyesi tarafından kurulmuş olan 990 kWp gücündeki güneş enerji santralinin yıllık ve aylık enerji üretimi, deneme sürümleri kullanılan PV*SOL ve PVSyst yazılımlarındaki aylık ve yıllık enerji üretim benzetimleri ile karşılaştırılmıştır.

Kullanılan her iki yazılımda da meteorolojik veriler meteonorm veri tabanından alınmıştır, albedo, modül açısı, azimut açısı, modüller, eviriciler, kablo kaybı, modül-evirici uyumsuzluğuna bağlı kayıplar sabit tutulmuş; eğimli yüzeyler üzerine düşen toplam ışıınım modellerinden Hay ve Davies ve Perez modelleri bağımsız değişken olarak kabul edilerek her iki yazılımda ikişer tane olmak üzere toplam dört farklı kontrollü benzetim gerçekleştirilmiştir.

Benzetim sonuçlarının üretim verileri ile aylık ve yıllık karşılaştırılması çizelge ve grafikler halinde gösterilmiştir. Gerçekleştirilen dört benzetim için aylık benzetim sonuçlarının aylık üretim verileri ile benzerliklerine bakıldığında en yakın benzerliklerin ağustos, eylül, ekim ve kasım aylarında gerçekleştiği görülmektedir. Aylık benzetim benzerliklerinin PV*SOL yazılımında daha fazla olduğu görülmektedir. PV*SOL yazılımında Hay ve Davies eğimli yüzeyler üzerine düşen toplam ışıınım modeli kullanılarak gerçekleştirilen kasım ayı benzetimi +%0,1, ağustos ayı benzetimi -%0,4 ve aynı yazılımın Perez eğimli yüzeyler üzerine düşen toplam ışıınım modeli kullanılarak gerçekleştirilen eylül ayı benzetimi -%0,4, nisan ayı benzetimi -%0,6 fark ile santralin aylık üretim sonucuna en yakın benzetimlerdir.

Her ne kadar aylık benzetim sonuçlarında farklılıklar olsa da yıllık benzetim sonuçlarında PVsyst yazılım sonuçlarının yıllık üretim verilerine daha yakın olduğu görülmektedir. Yıllık benzetim sonuçlarında en yakın benzetimin +%0,2'lik fark ile PVsyst yazılımında Perez eğimli yüzeyler üzerine düşen toplam ışıınım modeli ile gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada ulaşılan benzetim sonuçlarının kapsamının arttırılması ve yapılacak çalışmalara kaynak olması amacıyla tartışma bölümünde 2016 yılında faaliyete geçen Amasya Üniversitesi 200 kWp Güneş Enerji Santrali'nin benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Santralin MATLAB yazılımında çizilen elektrik devre şemasından yararlanılmış ve benzetimlerde santralde kullanılan sayıda ve modelde güneş pilleri ve eviriciler kullanılmıştır. Yapılan benzetimlerin sonuçlarında en yakın benzetimin 2018 yılı için PV*SOL yazılımı Hay ve Davies eğimli yüzeyler üzerine düşen toplam ışıınım modeli olduğu gözlenmiştir.

Gerçekleştirilen benzetimlerdeki eğimli yüzeyler üzerine düşen ışıınım modellerinin santral üretim verileri ile aylık ve yıllık benzerlik ve farklılıkları seçilen coğrafi konum için geçerli olup, genelleme yapılabilmesi için farklı coğrafi konumlarda benzer benzetimler yapılmalıdır. Meteorolojik faktörler bazı yıllarda 10 yıllık ortalamadan farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle, yapılacak benzetim sonuçları ile üretim verileri karşılaştırılan santrallerin 5-10 yıllık üretim verilerinin karşılaştırılmasının sonuçların genellenebilmesi için daha tutarlı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Adak, S., Cangı, H. ve Yılmaz, A. S. (2019). Fotovoltaik Sistemin Çıkış Gücünün Sıcaklık ve Işımaya Bağlı Matematiksel Modellemesi ve Simülasyonu. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11 (1), 316-327.
- Akcan, E., Kuncan, M. ve Minaz, M. R. (2020). PVsyst Yazılımı ile 30 kW Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemin Modellenmesi ve Simülasyonu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (18), 248-261.
- Akın, G. (2006). Küresel Isınma, Nedenleri ve Sonuçları. *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, 46(2), 29-43.
- Altınkök, S. (2021). *Giresun Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İhtiyaçlarına Uygun Fotovoltaik Sistem Tasarımı ve Analizi*. Yayınlanmamış Yüksek lisans tezi, Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Giresun.
- Aykal, F. D., Gümüş, B. ve Akça, Y. B. Ö. (2009). Sürdürülebilirlik kapsamında yenilenebilir ve etkin enerji kullanımının yapılarda uygulanması. *V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu YEKSEM*, 9, 19-22.
- Bartasaghi, D., Pérez, I. D. C., Kniepert, J., Roland, S., Turbiez, M., Neher, D., and Koster, L. J. A., (2015). Competition between recombination and extraction of free charges determines the fill factor of organic solar cells. *Nature Communications*, 6(1), 7083
- Bilim, N. (2016). Türkiye'nin Elektrik Enerjisi Üretimindeki Dışa Bağımlılığın Azaltılması İçin Uygulanması Gereken Politikalar, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 145-154.
- Bolat, M., Arifoğlu U. ve Demiryürek, H.K. (2020). Lebit Enerji Güneş Santralinin Pvsyst Programı ile Analizi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(3), 1351-1363.
- Ceylan, M. (2018). *Kampüs Binalarında Şebekeden Bağımsız Bir Çatı Üstü Fotovoltaik Sistem Tasarımı ve Benzetimi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Changkakati, S., Syed, R., Sahu, A. K., Kumar, S. and Kesari, J. P. (2020), Performance Evaluation of Grid-Connected Solar Photovoltaic Plant using PVSYST Software. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 9(10).
- Chellaswamy, C., Taha, M., Shaji, R., Rao Y., Jawwad, M. and Sharma, G. (2019), A Novel Optimization Method for Parameter Extraction of Industrial Solar Cells. *Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, 1, 1-6.
- Çakmak, T. A. (2022). *Türk Standartları Enstitüsü binasında bir çatı üstü fotovoltaik sistem tasarımı ve simülasyonu*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Çınaroğlu, M.S. (2021). Şebekeye Bağlı Üç Adet Fotovoltaik Enerji Santralinin PVsyst Programı ile Analizi; Kilis Örneği. *El-Cezeri*, 8(2), 675-687.
- Dikmenli, Y., Öztürk Demirbaş, Ç. ve Gafa, İ. (2019). Öğretim Elemanlarının Türkiye'de Nükleer Enerjiye Yönelik Görüşleri. *Gazi Eğitim Bilimleri Dergisi*, 5, 254-272.
- Dinçer, F. (2011). Türkiye'de Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi Potansiyeli – Ekonomik Analiz ve AB Ülkeleri ile Karşılaştırmalı Değerlendirme. *KSU Mühendislik Dergisi*, 14(1), 8-17.
- Durak, M. (2016). *Güneş Enerjisi: Teori ve Uygulama*, Ankara.
- Dünya Enerji Konseyi Türkiye (2021). Enerji Dönüşümü Yatırım Trendleri Raporu, Şubat 2021, (219).
- ETKB, (2022). URL: <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/> Son Erişim Tarihi: 26.06.2022.
- Haydaroğlu, C. ve Gümüş, B. (2017). Examination of Web-Based PVGIS and SUNNY Design Web Photovoltaic System Simulation Programs and Assessment of Reliability of the Results. *Journal of Engineering and Technology*, 1(1), 32-38.
- Huawei (2023). Sun2000 KTL Technical Data. URL: <https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/EDOC1100083285/eb33de84/technical-data> Son Erişim Tarihi: 15.04.2023.
- International Energy Agency (IEA), (2020). Renewable power generation by technology in the Sustainable Development Scenario, 2000-2030. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/renewable-power-generation-by-technology-in-the-sustainable-development-scenario-2000-2030>. Son Erişim Tarihi: 10.02.2023.
- International Energy Agency (IEA), (2021). Turkey 2021, <https://www.iea.org/reports/turkey-2021>. Son Erişim Tarihi: 10.02.2023.
- International Energy Agency (IEA), (2023). IEA Data and Statistics: World Energy Data 2019. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewables-data-explorer> Son Erişim Tarihi: 10.02.2023.
- International Renewable Energy Agency (IRENA), (2022). Renewable energy statistics 2022. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Renewable_energy_statistics_2022.pdf?rev=8e3c22a36f964fa2ad8a50e0b4437870. Son Erişim Tarihi: 14.02.2023.
- International Renewable Energy Agency (IRENA), (2022). Capacity and Generation, Country Rankings-2023. URL: <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings>. Son Erişim Tarihi: 16.02.2022.

- Kazem, H. A. and Khatib, T. (2013). Techno-economical assessment of grid connected photovoltaic power systems productivity in Sohar, Oman. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 3, 61-65.
- Kılıcı, O. and Koklu, M. (2019). The Importance of Fixed and Variable Angle in Solar Power Plants Analysis. *International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers*, 7 (4), 75-83.
- Kılıç, F. Ç. (2015). Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri. *Mühendis ve Makina*, 56(671), 28-40.
- Kobe, R., Ngoben, A. and Chowdhury, D. (2018). Design of a Grid-Connected Solar System for Borehole Pumps. *2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica*.
- Koçak, M. E. (2018). *Büyükçekmece İlçesindeki Güneş Enerji Santralinin Tasarımı ve Ekonomik Analizi*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Limem, F. and Sezen, S. (2021). Comparative Analysis of Different Photovoltaic Simulation Software: Case Study on Analyzing the Performance of a 5,1 kWp Grid Connected Photovoltaic System. *European Journal of Science and Technology*, (32), 816-826.
- Loutzenhiser, P. G., Manz, H., Felsmann, C., Strachan, P. A., Frank, T. and Maxwell, G. M. (2007). Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation. *Solar Energy*, 81(2), 254-267.
- Meteonorm (2015). Europe- Yearly sum of global horizontal irradiation 1996–2015. URL: <https://meteonorm.com/en/demo-files-maps> Son Erişim Tarihi: 14.04.2023
- Odulsolar (2023). 72 hücre monokristal güneş paneli elektriksel bileşenleri URL: <https://www.odulsolar.com/urun/72-hucre-monokristal-gunes-paneli-385w-400w/> Son Erişim Tarihi: 15.04.2023
- Özkan, U. (2021). *Şebekeye Bağlı Çatı Üstü Fotovoltaik Sistem Tasarımı ve Analizi*, Yayımlanmamış Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Öztürk, H. (2021). *Bir güneş enerji santralinin üretim ile simülasyon değerlerinin karşılaştırılması ve kayıp analizi: Beştepe Enerji örneği*. Yayımlanmamış Yüksek lisans tezi, Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- Öztürk, H.H. (2008). *Güneş Enerjisi ve Uygulamaları*. Birsan Yayınevi, İstanbul, ISBN 978-975-511-502-3.
- Öztürk, H.H. (2017) Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler. *Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi Bildirileri*, 1, 1-14.
- Petrović, I., Simic, Z. and Vražić, M. (2013). Comparison of PV plant energy generation prediction tools with measured data. *Przeglad Elektrotechniczny*, 89, 121-124.

- Psomopoulos, C.S., Ioannidis, G.C., Kaminaris, S.D., Mardikis, K.D. and Katsikas, N.D. (2015). A Comparative Evaluation of Photovoltaic Electricity Production Assessment Software (PVGIS, PVWatts and RETScreen). *Environ*, 2(1), 175–189.
- Sarı, V. ve Özyiğit, F. Y. (2020). Sivas İlinin Farklı İlçelerinde Şebeke Bağlantılı Güneş Enerji Santrallerinin Tasarımı ve Analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (20), 425-437.
- Sharma, V. and Chandel, S. S. (2013). Performance analysis of a 190 kWp grid interactive solar photovoltaic power plant in India, *Energy*, 55, 476-485.
- Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ), (2021). Türkiye elektrik üretim-iletim 2021 yılı istatistikleri. URL: <https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri> erişim tarihi: 14.04.2023
- Tekkale, G. (2018). *Türkiye'nin Çeşitli İllerinde Yapılacak Arazi Tipi Lisanssız Güneş Enerjisi Santrali Yatırımlarının Teknik ve Finansal Analizi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA), (2018). TÜBA- Güneş Enerjisi Teknolojileri Raporu. *Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları TÜBA Raporları*, 26.
- Üçgül, İ. ve Elibüyük, U. (2015). *Yenilenebilir ve Alternatif Enerji Çeşitleri Çevre Eğitimi ve Enerji*. Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 207-208.
- Waseem, N., George, A. S., Hameed, S., Yadav, A., Pillai, S. R. and Shukla, V. K. (2021) Simulation of a Dubai Based 100 KW Solar Plant on PVsyst. *2021 9th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO)*, 1-5.
- World Wide Fund for Nature (WWF) - Türkiye, (2011). *Yenilenebilir Enerji Geleceği ve Türkiye*. WWF-Rapor, ISBN 978-605-61279 8-4.
- Valentin (2023). URL: <https://help.valentin-software.com/pvsol/en/calculation/irradiation/irradiation-onto-inclined-plane/>. Son Erişim Tarihi: 16.04.2023
- Yağlı, H. ve Koç, Y. (2020). Gaziantep Bölgesi İçin Güneş Enerjisinden Elektrik Üretiminde Kurulacak Panellerin Optimum Eğim Açılarının Belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (19), 475-483.
- Yalılı, M. (2021). Lisanslı Fotovoltaik Güneş Enerji Santrali Yatırımının Finansal Analizi: Van İli Örneği. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(3), 1055-1074.
- Y.Wong, S. and Chai, A. (2012). An Off-Grid Solar System for Rural Village in Malaysia. 2012. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*.

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Bilgehan EGEMEN

Öğrenim durumu

Lisans : 2007, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Amasya Eğitim Fakültesi, Fen Bilgisi Öğretmenliği

Bilimsel Faaliyetler

1-) UBÇAK 11. Uluslararası Bilimsel Çalışmalar Kongresi, 2023