

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HANÖNÜ GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİNİN FARKLI SİMÜLASYON
PROGRAMLARI İLE TASARIMI VE TEKNO-EKONOMİK PERFORMANS
PARAMETRELERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEFA KIRNAPCI

OCAK 2025

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HANÖNÜ GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİNİN FARKLI SİMÜLASYON
PROGRAMLARI İLE TASARIMI VE TEKNO-EKONOMİK PERFORMANS
PARAMETRELERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
SEFA KIRNAPCI

DANIŞMAN

: Doç. Dr. Nihat PAMUK

ZONGULDAK

Ocak 2025

KABUL:

Sefa KIRNAPCI tarafından hazırlanan “Hanönü Güneş Enerji Santralinin Farklı Simülasyon Programları İle Tasarımı ve Tekno-Ekonomik Performans Parametrelerinin Değerlendirilmesi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle/oyçokluğuyla kabul edilmiştir. 31/01/2025

Danışman: Doç. Dr. Nihat PAMUK
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik
Mühendisliği Bölümü

Üye: Prof. Dr. Yılmaz UYAROĞLU
Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Bölümü

Üye: Doç. Dr. Fuad ALHAJ OMAR
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak Meslek Yüksekokulu, Elektrik
ve Enerji Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım./....../20....

Prof. Dr. Fikret GÖLGELEYEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



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

Sefa KIRNAPCI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HANÖNÜ GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİNİN FARKLI SİMÜLASYON PROGRAMLARI İLE TASARIMI VE TEKNO-EKONOMİK PERFORMANS PARAMETRELERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Sefa KIRNAPCI

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Nihat PAMUK

Ocak 2025, 111 sayfa

Bu çalışma, Kastamonu'nun Hanönü ilçesinde 2021 yılında kurulan 276 kWp kapasiteli güneş enerjisi santralinin performans analizi ve farklı simülasyon programları ile tasarımına odaklanmaktadır. Enerji ihtiyacının artışı ve fosil yakıtların çevresel etkileri nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yönelimin artış gösterdiği bir dönemde, güneş enerjisinin önemi bu çalışma ile vurgulanmıştır.

Hanönü Güneş Enerji Santrali'nin PVsyst ve PV*SOL gibi simülasyon programları kullanılarak tasarımı ve çıktılarının gerçek üretim verileriyle karşılaştırılması, bu çalışmanın ana amacını oluşturmuştur. Bu kapsamda, ön fizibilite çalışmalarından yer seçimi ve arazi değerlendirmesine, teknolojik analizlerden çevresel etkilerin incelenmesine kadar birçok temel adım ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır.

ÖZET (devam ediyor)

Araştırma sonucunda, simülasyon programlarının yatırımcı kararlarını destekleyen kritik veriler sunduğu ve bu yazılımların gerçek üretim değerlerine yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, hem mevcut yatırımların performansını değerlendirmek hem de gelecekteki projelerin planlanmasında bu tür programların etkinliğini ortaya koymaktadır.

Çalışma, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına dair önemli bir çerçeve sunmakta ve yerel enerji potansiyelinin simülasyon destekli analizlerle daha etkin bir şekilde değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Güneş enerjisi santrali tasarımı ve performans analizinde bu çalışmanın sunduğu bulguların, gelecekteki projelere rehberlik etmesi beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, simülasyon programları, Hanönü, PVSOL, PVSYST, performans değerlendirmesi

Bilim Kodu: 608.02.00.

ABSTRACT

M. Sc.Thesis

DESIGN OF HANÖNÜ SOLAR POWER PLANT USING DIFFERENT SIMULATION PROGRAMS AND EVALUATION OF TECHNO-ECONOMIC PERFORMANCE PARAMETERS

Sefa KIRNAPCI

**Zonguldak Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical Electronics Engineering**

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Nihat PAMUK

January 2025, 111 pages

This study focuses on the performance analysis and design of a 276 kWp solar power plant established in 2021 in the Hanönü district of Kastamonu. At a time when the increasing energy demand and environmental impacts of fossil fuels have led to a shift towards renewable energy sources, this study highlights the importance of solar energy.

The primary objective of this research was to compare the design and outputs of the Hanönü Solar Power Plant, modeled using simulation programs such as PVsyst and PV*SOL, with actual production data. The study comprehensively addressed critical steps, including feasibility studies, site selection, land assessment, technological analyses, and environmental impact evaluations.

ABSTRACT (continued)

The research findings demonstrate that simulation programs provide critical data to support investment decisions and that these tools produce results closely aligned with actual production values. This highlights their effectiveness in evaluating the performance of existing investments and planning future projects.

This study presents a significant framework for the use of renewable energy sources and emphasizes the need for simulation-supported analyses to better assess local energy potential. The findings of this research are expected to guide future projects in the design and performance analysis of solar power plants.

Keywords: Solar energy, simulation programs, Hanönü, PVSOL, PVSYST, performance analysis

Science Code: 608.02.00.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında değerli desteklerini esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Nihat Pamuk’a ve sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, çalışmamı zenginleştiren katkılarından dolayı tüm arkadaşlarıma ve meslektaşlarıma minnettarım.





İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL:.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
 BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	 1
1.1 TEZİN AMACI.....	2
1.2 TEZİN ÖNEMİ.....	3
1.3 TEZİN YÖNTEMİ.....	4
1.4 LİTERATÜR TARAMASI.....	4
 BÖLÜM 2 GENEL BİLGİLER.....	 7
2.1 ENERJİ KAYNAKLARI.....	8
2.2 YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI.....	8
2.3 GÜNEŞ ENERJİSİ.....	11
2.3.1 Dünyada Güneş Enerjisi.....	13
2.3.2 Türkiye’de Güneş Enerjisi.....	20
2.4 FOTOVOLTAİK SİSTEMLER.....	25
2.4.1 Fotovoltaik Sistemlerin Çalışma Prensibi.....	25
2.4.2 Fotovoltaik Sistemlerin Bileşenleri.....	28
2.4.2.1 Fotovoltaik Modül ve Dizi.....	31
2.4.2.2 Fotovoltaik Sistem Akümülatörü.....	34
2.4.2.3 Şarj Kontrol Cihazı.....	34
2.4.2.4 Dönüştürücü.....	35
2.5 GÜNEŞ SİMÜLASYON PROGRAMLARI.....	37

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.5.1 PVsyst	40
2.5.2 PV*SOL	41
2.5.3 BlueSOL	43
2.5.4 PVGIS	43
2.5.5 HOMER	44
 BÖLÜM 3 MATERYAL VE METOT	 45
 3.1 ÇALIŞMA ALANI.....	 45
3.2 HANÖNÜ (KASTAMONU) GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİ	49
3.3 PVSOL VE PVSYST PROGRAMLARININ DETAYLI ÖZELLİKLERİ VE KARŞILAŞTIRILMASI.....	 54
 BÖLÜM 4 BULGULAR VE TARTIŞMA.....	 59
 4.1 KURULU SİSTEM GERÇEK ÜRETİM DEĞERLERİ.....	 59
4.2 PVSOL SİMÜLASYON PROGRAMI İLE TASARIMI.....	61
4.2.1 PVSOL Simülasyonu Sonucunda Elde Edilen Tahmini Üretim Değerleri	72
4.3 PVSYST SİMÜLASYON PROGRAMI İLE TASARIMI	78
4.3.1 PVSYST Simülasyonu Sonucunda Elde Edilen Tahmini Üretim Değerleri	86
4.4 GERÇEK ÜRETİM VERİLERİ İLE SİMÜLASYON PROGRAMINDAN ELDE EDİLEN SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI.....	 92
4.5 KURULU SİSTEMİN TEKNO-EKONOMİK PERFORMANSI	96
 BÖLÜM 5 SONUÇ VE ÖNERİLER.....	 103
 KAYNAKLAR	 107
 ÖZGEÇMİŞ	 111

ŞEKİLLER DİZİNİ

No	Sayfa
Şekil 2. 1 Dünyada Fosil Yakıtlara ve Temiz Enerjiye Yapılan Yıllık Yatırım (trilyon ABD doları) (International Energy Agency, 2023)	11
Şekil 2. 2 Dünyada kaynak türüne göre santral kurulu güçlerinin yıllara göre değişimi (IRENA Statics web).....	15
Şekil 2. 3 Dünyada kaynak türüne göre üretilen elektrik miktarının yıllara göre değişim grafiği (IRENA Statistics web)	16
Şekil 2. 4 Dünyada güneş enerji kurulu gücünün yıllara göre değişim grafiği (IRENA Statics web 2024).....	17
Şekil 2. 5 Dünyada güneş enerjisi ile üretilen elektrik miktarının yıllara göre değişim grafiği (IRENA Web sttics).....	18
Şekil 2. 6 Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Haritası (ETKB - Bilgi Merkezi)	21
Şekil 2. 7 (a) Türkiye Global Radyasyon Verileri (KWh/m ² *gün) (b) Güneşlenme Periyotları (saat) (ETKB - Bilgi Merkezi)	21
Şekil 2. 8 Türkiye Güneş Enerjisine Dayalı Elektrik Kurulu Gücünün Yıllara Göre Değerleri ETKB – Enerji İşleri Genel Müdürlüğü)	23
Şekil 2. 9 Türkiye Güneş Enerjisine Dayalı Elektrik Kurulu Gücünün Toplam Kurulu Güç İçerisindeki Oranı (ETKB – Enerji İşleri Genel Müdürlüğü)	23
Şekil 2. 10 Enerji Bakanlığı’nın yenilenebilir enerji üretim planı	24
Şekil 2. 11 Fotovoltaik Modüllerin Çalışma Prensibi (Keskin, 2019)	26
Şekil 2. 12 Güneş Enerjisi Sistemini Oluşturan Temel Donanımlar.....	30
Şekil 2. 13 PV hücre, modül, panel ve dizi	31
Şekil 2. 14 İnverter Yapısı (Özyiğit,2019).....	36
Şekil 2. 15 PVGIS Sistem Arayüzü	44
Şekil 3. 1 Kastamonu İli Işınım Haritası (https://gepa.enerji.gov.tr/pages/37.aspx)	46
Şekil 3. 2 Kastamonu ili güneş enerjisi potansiyeli grafikleri (a) Global radyasyon değerleri (kWh/m ²) (b) Güneşlenme süreleri (saat)	46
Şekil 3. 3 Hanönü Güneş Enerji Santrali Kurulum Alanı	49
Şekil 3. 4 Hanönü (Kastamonu) Güneş Enerji Santralinin Tek Hat Bağlantı Şeması	50
Şekil 3. 5 Hanönü (Kastamonu) Belediyesi GES Görünümü	52
Şekil 3. 6 Hanönü (Kastamonu) Belediyesi GES Görünümü	52
Şekil 4.1 Hanönü (Kastamonu) Güneş Enerji Santrali Kurulum Alanı	60
Şekil 4.2 Hanönü (Kastamonu) Güneş Enerji Santrali Kurulu Hali	60
Şekil 4.3 PVSOL Giriş Ekranı	63
Şekil 4.4 Program Veritabanları.....	63
Şekil 4.5 Program Ayarları.....	64

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No	Sayfa
Şekil 4.6 Simülasyon Ayarları	64
Şekil 4.7 Sistem Tipi, İklim ve Şebeke	65
Şekil 4.8 Seçili koordinatlara göre bilgi ekranı.....	65
Şekil 4.9 Harita üzerinde konum işaretlenmesi.....	66
Şekil 4.10 PVSOL Meteonorm veritabanı	66
Şekil 4.11 3D Tasarım.....	67
Şekil 4.12 Tasarım güney yönünden görünüm.....	68
Şekil 4.13 Tasarım yandan görünüş	68
Şekil 4.14 Montaj sisteminin düzenlenmesi.....	69
Şekil 4.15 Panel elektriksel verileri.....	69
Şekil 4.16 Panel akım ve gerilim karakteristikleri	70
Şekil 4.17 Panel akım ve gerilim karakteristikleri (düşük ışıktta)	70
Şekil 4.18 Panele ilişkin ek parametreler	70
Şekil 4.19 Panel detay	71
Şekil 4.20 Panel boyutları	71
Şekil 4.21 Panel verim grafikleri.....	71
Şekil 4.22 Şebekeye bağlı PV sistem genel tasarımı	72
Şekil 4.23 PVSOL simülasyon sonuçları	72
Şekil 4.24 Genel sistem sonuçları	73
Şekil 4.25 PVSOL tasarım sonucu bulunan aylık üretim tahmini (kWh).....	73
Şekil 4.26 Evirici başına tahmini üretim.....	74
Şekil 4.27 Aylara göre performans oranı değişimi	74
Şekil 4.28 Modül alanı başına ışıınım	75
Şekil 4.29 Kayıp özeti	76
Şekil 4.30 Kayıp Diyagramı.....	77
Şekil 4.31 Ufuk Çizgisi	78
Şekil 4.32 Enerji akış diyagramı	78
Şekil 4.33 PVSYST Giriş Ekranı	79
Şekil 4.34 Hanönü GES Konumunun seçilmesi.....	80
Şekil 4.35 Hanönü GES meteonorm aylık meteorolojik veriler	81
Şekil 4.36 Hanönü Ges yönlendirme yönetimi ekranı	81
Şekil 4.37 PV modül seçimi.....	82
Şekil 4.38 İnvertör seçimi	82
Şekil 4.39 Dizi boyutlandırması.....	82
Şekil 4.40 Termal Kayıp Faktörü Giriş Ekranı	83
Şekil 4.41 Omik Kayıplar Giriş Ekranı	83
Şekil 4.42 Modül, LID ve gerilim uyumsuzluğu kayıpları	84
Şekil 4.43 Kirlenme kayıplarının tanımlanması.....	84
Şekil 4.44 Ufuk tanımlaması	85
Şekil 4.45 Hanönü GES 3 boyutlu gölgeleme sahnesi.....	86

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.46 Simülasyon başlatma ekranı.....	87
Şekil 4.47 Santralin aylık üretim değerleri.....	88
Şekil 4.48 Performans Oranı Grafiği.....	89
Şekil 4.49 Normalize Üretim Grafiği.....	90
Şekil 4.50 Tesis kayıp şeması	91
Şekil 4.51 Yılın İlk 6 Ay Üretim Verileri Karşılaştırma Grafiği	92
Şekil 4.52 Yılın Son 6 Ay Üretim Verileri Karşılaştırma Grafiği	93
Şekil 4.53 Yıllık Toplam Üretim Miktarları	96
Şekil 4.54 Alfa Solar firmasına ait solar panelin yıllara göre performans grafiği (Alfasolar Enerji, 2024).....	98





ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Yıllara göre yenilenebilir enerjinin üretim kapasitesi (REN21 Global Status Report 2023).....	10
Çizelge 2.2 Dünyada güneş enerjisi kurulu gücünün yıllara göre değişimi (IRENA,2023)....	17
Çizelge 2.3 Dünyada güneş enerjisinden elektrik üretiminin yıllara göre değişimi (IRENA, 2023).....	19
Çizelge 2.4 Yıllara göre güneş enerjisi üretim kapasitesi (RECS 2023 IRENA)	20
Çizelge 2.5 Türkiye'nin yıllara göre güneş enerjisi üretim gücü (EİGM, 2023).....	24
Çizelge 2.6 Fotovoltaik sistemin çalışmasını etkileyen faktörler	28
Çizelge 2.7 GES projelerinde kullanılan simülasyon yazılımları ve bu yazılımların başlıca avantajları (Kınalı,2019)	40
Çizelge 3. 1 Kastamonu İline Ait Meteorolojik Veriler (MGM,2024)	48
Çizelge 3. 2 Hanönü (Kastamonu) Belediyesi GES Teknik Bilgiler Çizelgesi	51
Çizelge 3. 3 Hanönü GES fotovoltaik sistem dizilimi	53
Çizelge 4.1 Hanönü Güneş Enerji Santralinde Üretilen Elektrik Enerjisinin Aylık Dağılımı .	61
Çizelge 4.2 Simülasyon sonuçları ile gerçek üretim değerleri arasındaki aylık yüzdesel farklar	93
Çizelge 4.3 Simülasyon sonuçları ile gerçek üretim değerleri arasındaki yıllık toplam yüzdesel farklar	96
Çizelge 4.4 PV ekipmanlarının yatırım tutarı içindeki oranları	97



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

kWp	: Kilowattpeak
CO ₂	: Karbondioksit
°C	: Santigrat derece
%	: Yüzde
MW	: Megawatt
W	: Watt
W/m ²	: Metrekare başına güç
GWh	: Gigawattsaat
GW	: Gigawatt
kWh	: Kilowattsaat
kWh/m ²	: Metrekare başına saatlik güç
V	: Volt
Hz	: Hertz
Ah	: Saat başına amper
mm	: milimetre
Wp	: Waatpeak
kV	: Kilovolt
kVA	: Kilovoltamper
We	: Watt effective
kWe	: Kilowatt effective
I	: Akım
Cu	: Bakır
Al	: Alüminyum
MWh	: Megawattsaat
Lc	: Kollektör Kaybı (Pv-dizi kayıpları)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

Ls	: Sistem Kaybı (invertör vs.)
Yf	: Üretilen Faydalı Enerji (inverter çıkışı)
CO ₂ /MWh	: Megawattsaat başına Karbondioksit miktarı
kW	: Kilowatt

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AC	: Alternatif Akım
AGM	: Emdirilmiş Cam Elyaf Akü
AGP	: Ana Giriş Panosu
AR-GE	: Araştırma Geliştirme
COP	: Taraflar Konferansı
ÇŞİDB	: Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
DC	: Doğru Akım
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
FV	: Fotovoltaik
GEL	: Jel Elektrolit Akü
GEPA	: Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası
GES	: Güneş Enerji Santrali
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
IP65	: Koruma Sınıfı
IRENA	: Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
LID	: Işık Kaynaklı Bozulma
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MPP	: Maksimum Güç Noktası
MPPT	: Maksimum Güç Noktası Takibi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

NREL	: Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
OFF-GRID	: Şebekeden Bağımsız
ON-GRID	: Şebekeye Bağlı
PV	: Fotovoltaik
REN21	: 21. Yüzyıl için Yenilenebilir Enerji Politikası Ağı
SCADA	: Gözetleyici Kontrol ve Veri Toplama Sistemi
STC	: Standart Test Koşulları
TL	: Türk Lirası
UNFCCC	: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
YEKDEM	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması
YÜFE	: Yurtiçi Tüketici Fiyat Endeksi
3D	: Üç Boyutlu Tasarım



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Enerji, günümüzde modern tarım, ulaşım, sanayi ve ticaret için vazgeçilmez bir unsurdur. Bir ülkenin yaşam kalitesi için kritik bir dayanak olarak kabul edilen enerji, üretkenliği artırması, sağlık koşullarını iyileştirmesi ve ekonomik büyümeyi desteklemesiyle önem taşımaktadır. Ancak, sürekli fosil yakıt tüketimi ve giderek artan enerji talebi nedeniyle dünya, sera gazı emisyonlarının olumsuz etkilerini hissetmeye başlamıştır. Karbon salınımı, küresel ısınma ve mevsimsel dönüşüm gibi ciddi sonuçları beraberinde getirerek, insanlığın bu süreci tersine çevirmesi gereken acil bir durum olarak ortaya çıkmıştır. Elektrik enerjisi talebi gün geçtikçe artarken, enerjiye olan ihtiyaç sebebiyle çeşitli alternatif üretim kaynakları aranmaktadır.

Fosil yakıtların çevresel zararlı etkileri, elektrik üretiminde doğaya zarar vermeyen temiz ve tükenmeyen enerji kaynaklarının kullanılmasının artmasına neden olmaktadır. Yenilenebilir enerjilerin kullanılması en önde gelen verimli çözümlerden biri olarak görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları olarak güneş, rüzgâr, jeotermal, biyokütle ve gel-git gibi temiz enerji kaynakları örnek olarak verilebilir. Son birkaç yılda güneş enerjisi, kurulumunun kolay olması ve güneş radyasyonunun yoğun olduğu herhangi bir yere genişletilebilmesi nedeniyle umut verici bir çözüm olduğunu göstermiştir. Çeşitli bileşenlerin verimlilik iyileştirmeleri ile birlikte yatırım maliyetlerinin azaltılması, yani büyük ölçekli şebeke bağlantılı fotovoltaik (PV) güneş enerji sistemlerinin kurulması, kurulu gücün gelecekte de büyümeye devam etmesini sağlayacaktır.

Dünya genelinde büyük ve sınırsız bir potansiyele sahip olan güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında öne çıkan bir kaynaktır. Bu potansiyeli daha etkili bir şekilde değerlendirebilmek ve güneş enerjisini kullanılabilir enerjiye dönüştürebilmek amacıyla çeşitli çalışmalar hız kazanmıştır. Teknolojinin ilerlemesi ve üretim maliyetlerinin düşmesi gibi faktörlerle birlikte, fotovoltaik sistemlerin günlük yaşamda elektrik enerjisi üretimi için kullanımı önemli ölçüde artmıştır. Güneş enerjisinden daha fazla yararlanabilmek ve kullanılabilir enerjiye dönüştürmek için yapılan çalışmalar yoğunlaşmıştır. Fotovoltaik

sistemlerin günlük hayatta kullanılması, teknolojinin gelişmesi ve üretim maliyetlerinin azalması gibi nedenlerle hız kazanmıştır.

Günümüzde, fotovoltaik sistemler genellikle arazi uygulamaları, konutlar ve endüstriyel tesisler çatı ve cephe uygulamaları başta olmak üzere taşıt, telekomünikasyon, ışıklandırma, tarımsal sulama vb. sistemlere kadar geniş bir alanda kendilerine yer bulmaktadır.

Fotovoltaik sistemler teknolojinin ilerlemesi ile birlikte her geçen gün geliştirilerek verimlilik ve dayanıklılık konusunda önemli aşamalar kaydedilmektedir. Öncelikle bu verimlilik ve dayanıklılık analizi ön fizibilite çalışmalarının yapılması ile başlamaktadır. Bu fizibilite çalışmaları sırasında alınan veriler enerji üretim tesisi kurulumu yapılmadan bize sonuçları ve ortalama ömrü hakkında bilgi verebilmektedir. Ön fizibilite çalışmaları sırasında; güneş verisi analizi, yer seçimi ve arazi değerlendirilmesi, teknolojik değerlendirme, finansal analiz, çevresel etki değerlendirmesi, pazar araştırması, yasal ve teknik izinler, risk değerlendirilmesi yapılarak projenin başarılı bir şekilde hayata geçmesi için analizler yapılmaktadır. Bu analizler yapılırken de çeşitli simülasyon programlarından faydalanılmaktadır. Simülasyon programları ile kurulum maliyeti, enerji üretim potansiyeli ve amortisman süreleri hesaplanabilmektedir. Girişimciler için yeterince bilgi girişinin sağlanabilmesi ve bilgilerin tasarım ve simülasyonu sonucunda verimlilik tespitinin yapılabilmesini sağlaması yüksek ölçüde fayda sağlamaktadır.

Bu çalışma, Türkiye'nin kuzeyinde yer alan ve güneşlenme süresi ülke ortalamasına kıyasla daha düşük olan Kastamonu ilinin Hanönü ilçesinde, 2021 yılında Hanönü Belediyesi tarafından kurulan 276 kWp kapasiteli güneş enerjisi santralının simülasyon programları ile tasarımının yapılması ve sonuçlarının performans açısından karşılaştırılmasını kapsamaktadır. Analiz, PVSyst ve PVSOL simülasyon programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Santralin devreye alınmasından sonra sistem Scada'sından alınan üretim verileri, simülasyonlardan elde edilen veriler ile kıyaslanarak kullanılan simülasyon programları ile performans analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kurulu tesisin tekno-ekonomik performansı da değerlendirilmiştir.

1.1 TEZİN AMACI

Dünyada giderek artan enerji talebini karşılamak üzere birçok enerji üretim sistemi kullanılmaktadır. Özellikle yüksek miktarda hidrokarbon içeren fosil yakıt kaynaklarından elde edilen enerji yüzdesel anlamda büyük bir orana sahiptir. Ancak fosil yakıtların çevreye verdiği

olumsuz etkilerinden dolayı kullanımının azaltılmasına yönelik dünya çapında çalışmalar yürütülmektedir. Her ne kadar bu çalışmalar ışığında fosil yakıt kaynaklarının kullanımı diğer kaynaklara göre büyük bir paya sahip olsa da yenilebilir enerji kaynaklarının kullanımı artış göstermektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan güneş enerjisi bu artışı destekleyen en önemli enerji türlerinin başında gelmektedir. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan ülkelerden biridir. Ancak gelişmiş ülkeler kadar bu potansiyeli kullanamasa bile devletin izlediği politikalar, teknolojik gelişmeler ve maliyetlerin azalması gibi etkenler neticesinde bu konuda yatırımcı sayısı her geçen gün giderek artmaktadır. Güneş enerjisi üzerine ön fizibilite çalışmaları mutlak ölçüde önem arz etmektedir. Bu yüzden uygulamaya geçilmeden yapılan iyi bir analiz hem zaman hem de maddi kayıpların önüne geçmek ile birlikte üretim tesisinin verimliliğini artırabilecek çalışmalarında önünü açmaktadır. Simülasyon programları işin proje aşamasında analizini etkin bir şekilde ortaya koyarak yatırımcıya rapor sunabilmektedir. Bu programların veriler ışığında doğru sonuç vermesi de oldukça önemlidir. Kastamonu ili Hanönü ilçesinde kurulumu gerçekleştirilerek 2021 yılında enerji üretimine başlayan Hanönü Belediyesi Güneş Enerji Santrali'nin gerçek üretim sonuçlarını önde gelen simülasyon programlarından olan PVsyst ve PVSOL programları ile simüle ederek üretim sonuçlarının karşılaştırılması ve simülasyon programlarının gerçeğe yakınlığının tespiti amaçlanmıştır.

1.2 TEZİN ÖNEMİ

Bu çalışmada 2021 yılında elektrik üretime başlamış olan ve faal olarak çalışmaya devam eden Hanönü (Kastamonu) Belediyesi Güneş Enerjisi santralinin enerji üretim verileri üzerinden ön fizibilite kısmında önemli bir yeri olan simülasyon programlarından elde edilen üretim verileri ile gerçek üretim değerleri karşılaştırılarak performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyon programları üretim tesisi henüz proje aşamasında iken kurulum aşamasından sonra neler ile karşılaşılacağını ve nasıl sonuçlar elde edilebileceği konusunda yardımcı olmaktadır. Bu program gerçeğe en yakın sonucu vermesi araştırmacılar açısından en önemli ölçüt olarak kabul edilmektedir. Önde gelen güneş enerjisi simülasyon programlarından olan PVsyst ve PVSOL ile yapılan bu çalışma ışığında simülasyon programların gerçeğe yakınlığı test edilmiş olup, verileri analiz yapma yetenekleri bu sayede değerlendirilmiştir.

1.3 TEZİN YÖNTEMİ

Bu çalışma kapsamında öncelikle enerji üretimi konusunda genel bilgiler verilmiş olup yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi ile ilgili bilgiler verilmiştir. Güneş enerjisinden en optimum şekilde faydalanabilmesi açısından çeşitli geliştirmeler yapılmaktadır. Güneş enerjisi üzerine geliştirilen simülasyon programları sayesinde veri analizleri yapılmaktadır. Santral kurulum sonrası için ön bilgiler oluşturularak santral üretim sonuçları ve performansları hakkında tahminler sunulmaktadır. Bu bağlamda geliştirilen PVsyst ve PVSOL programları üzerinde çalışılmıştır. Türkiye'nin kuzey bölgesinde yer alan Kastamonu ili Hanönü ilçesinde kurulan 276 kWp güce sahip güneş enerji santrali örnek alınmıştır. Söz konusu tesisin projesi ve imalat aşamasında kullanılan ekipmanların marka, modeline bağlı alınarak simülasyon programları yardımıyla simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Hanönü (Kastamonu) Belediyesi'ne ait Güneş Enerjisi Santrali 2021 yılında faaliyete alınarak yaklaşık 3 yıldır üretim yapmaktadır. Bu süreç içerisinde yıl bazında aylık ortalama gerçek üretim verileri simülasyon programları PVsyst ve PVSOL tarafından elde edilen simüle sonuçlarıyla aylık ve toplam üretim bazında karşılaştırılması yapılmıştır.

1.4 LİTERATÜR TARAMASI

Gülser Çelebi "Bina Düşey Kabuğunda Fotovoltaik Panellerin Kullanım İlkleri" başlıklı araştırmasında, fotovoltaik modüllerin önemine vurgu yapmaktadır. Araştırmada, güneş enerjisi kurulumu üzerine tasarım yapmayı planlayan girişimcilerin modülleri yerleştirirken zemine olan açısı ile yıl içerisinde güneşin en verimli olacağı açıya göre tasarım yapılmasının gerekliliği üzerinde durulmuştur (Çelebi, 2002).

Cem Tozlu Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi kampüsünde faaliyette olan güneş enerjisi santralinin SCADA verileri ile simülasyon sonuçları karşılaştırmıştır. Çıkan sonuçlar, simülasyon programından elde edilen değerlerle benzerlik göstermektedir, bu da simülasyon programının tutarlılığını ortaya koymaktadır (Tozlu, 2004).

Etem Keskin Off-grid şebeke yapısında 5 KWp bir güneş enerjisi santral modeli oluşturmuştur. PYsyst programı kullanılarak oluşturulan model tasarımda, monokristal modüller verimlilikleriyle dikkat çekmektedir (Keskin, 2012).

Cem Haydaroglu, Dicle Üniversitesi'nde faaliyette olan 250 kWp gücündeki fotovoltaik sistemin PVsyst yazılımı ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir. IEC 61724 performans kıstaslarına uyumu araştırılmıştır. Analiz edilen veriler ışığında, gerçek ve simülasyon sonuçları kıyaslandığında özellikle aralık ile ocak aylarında tutarsızlıklar gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, finansal değerlendirmede kar/yatırım parametresinin birin üzerinde olması, tasarımın finansal açıdan uygulanabilirliğini desteklemektedir (Haydaroglu, 2017).

Mesih Aldudak, PVsyst simülasyon programı kullanarak farklı lokasyonlarda enerji üretimi gerçekleştiren tesislerin fiili ürettikleri enerji değerlerini analiz etmiştir. Yazar, simülasyon verileri ile fiili üretilen enerji değerleri arasında dikkate değer bir benzerlik olduğuna dikkat çekmektedir (Aldudak, 2018).

Sinan Şimşek, iki farklı lokasyona ait simülasyon verilerini, gerçek üretilen enerji değerleri ile kıyaslamıştır. PVsyst yazılımı kullanılarak yapılan araştırmanın, elde edilen fiili SCADA sonuçlarıyla yaklaşık aynı sonuçlar verdiğini ifade etmektedir. Performans düşüklüğünün temel nedeninin yüksek sıcaklıktan kaynaklandığını belirtmektedir (Şimşek, 2018).

Hamit Kürşat Demiryürek ve arkadaşları, Lebit Enerji firmasına ait bir fotovoltaik santralin fiili üretilen enerji sonuçlarıyla simülasyon sonucunda ulaşılan bilgileri değerlendirmiştir. PVsyst programının uyguladığı tetkik ve çözümleme yapması sonucunda elde edilen değerler arasında neredeyse hiç fark olmadığını göstermektedir. Bu bağlamda, araştırmacılar PVsyst yazılımının sonucunda sağlam ve gerçeğe yakın bulgulara ulaşıldığı belirtilmiştir (Demiryürek, 2020).



BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

Teknolojinin gelişmesi ve dünya nüfusunun hızla artmasından dolayı enerjiye olan bağımlılığımız her alanda hızla artmaktadır. Enerji temel anlamda insan yaşamında üretimden tüketime kadar her seviyede önemli bir rol oynamaktadır. Üretkenliği arttırması, sağlık koşullarını iyileştirmesi ve ekonomik büyümeyi desteklemesi nedeniyle, herhangi bir ülkenin yaşam kalitesi için kritik bir unsurdur. Bu nedenle, bir ülkenin veya bölgenin kalkınma ve gelişmişlik düzeyini ölçmede kullanılan en önemli parametrelerden biridir.

Her yıl giderek artan enerji talebini karşılamaya yönelik maliyetin düşüklüğü ve ulaşılabilirliği sebebiyle yenilenebilir olmayan enerji kaynakları kullanılmaktadır. Karbon bazlı bu tür yakıtların kullanımından kaynaklanan çevresel etkiler ise olumsuz yönde etkilenmektedir. Bu yakıt türlerinin sarfiyatı, çevreye CO₂ ve benzeri atmosferik gazların salınımına yol açarak çevresel bozulmaya ve iklim değişikliğine neden olmaktadır. Bu durum, biyolojik çeşitlilikte ve tarımsal üretimde azalmalara, iklim değişikliklerine ve erozyon artışlarına yol açmaktadır.

Taraflar Konferansı olarak da bilinen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) 2015 yılında Paris'te gerçekleşen bir iklim zirvesidir. Bu zirve, küresel ısınmanın sınırlandırılması ve iklim değişikliği ile mücadele için bir çerçeve antlaşması olması sebebiyle tarihi bir dönüm noktasıdır. Bu anlaşma, 195 ülkenin katılımıyla gerçekleşmiştir ve 2020'de yürürlüğe girmiştir.

Paris Anlaşması'nın temel hedefi, küresel ısınmayı 2°C'nin altında tutmak ve mümkünse 1.5°C'ye kadar düşürmek olarak belirlenmiştir. Ülkeler, bu hedeflere ulaşmak için kendi ulusal hedeflerini belirleyerek, bu hedeflere ulaşmak için gerekli adımları atmaya teşvik edilmiştir. Anlaşma, her 5 yılda bir ülkelerin kendi hedeflerini revize etmelerini ve bu hedeflere ulaşmak için daha fazla çaba göstermelerini öngörmektedir.

Paris Anlaşması'nın kabul edilmesi, küresel düzeyde iklim değişikliği ile mücadelede önemli bir adım olarak kabul edilmektedir. Bu anlaşma, iklim değişikliği ile mücadelede uluslararası iş birliğini artırmayı ve düşük karbonlu bir ekonomiye geçişi hızlandırmayı amaçlamaktadır. Paris Anlaşması kapsamında çeşitli ülkeler sürdürülebilir enerjinin önemine binaen kısa ve uzun dönem planları arasına dahil etmişlerdir.

2.1 ENERJİ KAYNAKLARI

Dünya üzerinde bulunan enerji kaynakları iki ana başlık altında ayrılmaktadır. Bunlar yenilenebilir enerji kaynakları ve yenilenemez enerji kaynaklarıdır. Yenilenebilir enerji kaynakları, doğada sürekli olarak yenilenen ve tükenmeyen kaynaklardır. Güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidroelektrik enerji, jeotermal enerji ve biyokütle enerjisi gibi kaynaklar bu kategoriye girer. Bu enerji kaynakları, doğal süreçlerle ve sınırsız kaynaklarla sürdürülebilir bir şekilde üretilir.

Yenilenemez enerji kaynakları ise, doğada bulunan ve zamanla tükenen kaynaklardır. Petrol, doğal gaz, kömür ve uranyum gibi kaynaklar bu kategoriye girmektedir. Bu kaynaklar, milyonlarca yıl süren jeolojik süreçler sonucunda oluşur ve tükenme süreçleri, bu kaynakların yenilenme hızından çok daha hızlıdır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, sürdürülebilirlik ve çevre koruma açısından çok önemlidir. Bu kaynaklar, çevreye zarar vermeden ve doğal kaynakları tüketmeden enerji üretirler. Yenilenemez enerji kaynaklarının aşırı kullanımı ise çevresel etkilere ve enerji güvenliği sorunlarına yol açmaktadır. Bu nedenle, enerji kaynaklarının dengeli bir şekilde kullanılması ve sürdürülebilir enerji politikalarının benimsenmesi önemlidir.

2.2 YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

Doğal süreçlerde kendini yenileyebilen ve sürekliliği olan kaynaklara yenilenebilir enerji kaynakları denilmektedir. Bu kaynaklar, doğada sürekli olarak yenilenerek ihtiyaçları karşılamaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları genellikle güneş, rüzgar, su, jeotermal ve biyokütle gibi doğal kaynaklardan elde edilir.

Güneş enerjisi, güneş ışığının doğrudan veya dolaylı olarak kullanılmasıyla elde edilir. Rüzgar enerjisi, rüzgar türbinleri aracılığıyla rüzgarın kinetik enerjisine dönüştürülerek elde edilir.

Hidroelektrik enerji ise, akarsuların ve nehirlerin akışıyla elde edilir. Jeotermal enerji, yeraltı kaynaklarından gelen ısı ile elde edilir. Biyokütle enerjisi, organik madde ve biyolojik materyallerden elde edilir.

Bu enerji kaynakları, doğada sürekli olarak yenilenir ve tükenmezler. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynakları, enerji kaynağından alınan enerjiye eşit oranda veya kaynağın tükenme hızından daha çabuk bir şekilde kendini yenileyebilme kapasitesine sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynakları, çevresel etkileri göz önünde bulundurulduğunda sürdürülebilir bir enerji çözümü olarak öne çıkmakta ve doğaya dost bir enerji alternatifi sunmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik dünya çapında birçok çalışma yürütülmektedir. Bu çalışmalar, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha yaygın kullanılmasını ve enerji sektöründe sürdürülebilir bir dönüşümü teşvik etmeyi amaçlamaktadır.

2022 yılında, yenilenebilir enerji santralleri, fosil yakıtlı veya nükleer enerji üreten santrallerden daha fazla yatırım çekmiştir. Yeni yenilenebilir enerji santrallerine yapılan yatırımlar, toplamda yeni enerji üretim santrallerine yapılan yatırımların fosil yakıtlar ve nükleer enerji de dahil % 74'ünü oluşturmuştur (REN21 Global Status Report 2023).

Küresel ortalama sıcaklık artışını sınırlayan senaryoların çoğu, 2100 yılına kadar fosil yakıtla çalışan enerji üretiminin (karbon yakalama ve depolama olmadan) neredeyse tamamen sona erdirilmesiyle sonuçlanmaktadır. Paris Anlaşması, küresel sıcaklık artışını 1.5 °C'ye sınırlandırma hedefiyle finansal akışların bu amaca uygun hale getirilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu hedefe ulaşmak için, son on yıla kıyasla toplam yenilenebilir enerji yatırımında büyük bir artış gerçekleşecektir. Paris Anlaşması hedeflerine ulaşmak için 2030 yılında yıllık yenilenebilir enerji yatırımının 1,300–1,400 milyar dolar aralığında olması gerekmektedir (REN21 Global Status Report 2023).

Birçok ülke, yenilenebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi için büyük ölçekli Ar-Ge çalışmaları yürütmektedir. Bu çalışmalar, güneş panelleri, rüzgar türbinleri, hidroelektrik santralleri ve diğer yenilenebilir enerji teknolojilerinin verimliliğini artırmayı, maliyetlerini düşürmeyi ve daha geniş bir kullanım alanı bulmalarını sağlamayı hedeflemektedir.

Ülkeler tarafından yenilenebilir enerji kullanımını artırmak için hedefler ve politikalar belirlenmektedir. Bu hedefler, genellikle belirli bir yıl için yenilenebilir enerji miktarının toplam enerji tüketimindeki payını belirtmektedir. Bu politikalar, yenilenebilir enerji yatırımlarını teşvik etmeyi, yenilenebilir enerjiyi daha erişilebilir ve çekici hale getirmeyi ve fosil yakıtların kullanımını azaltmayı amaçlamaktadır.

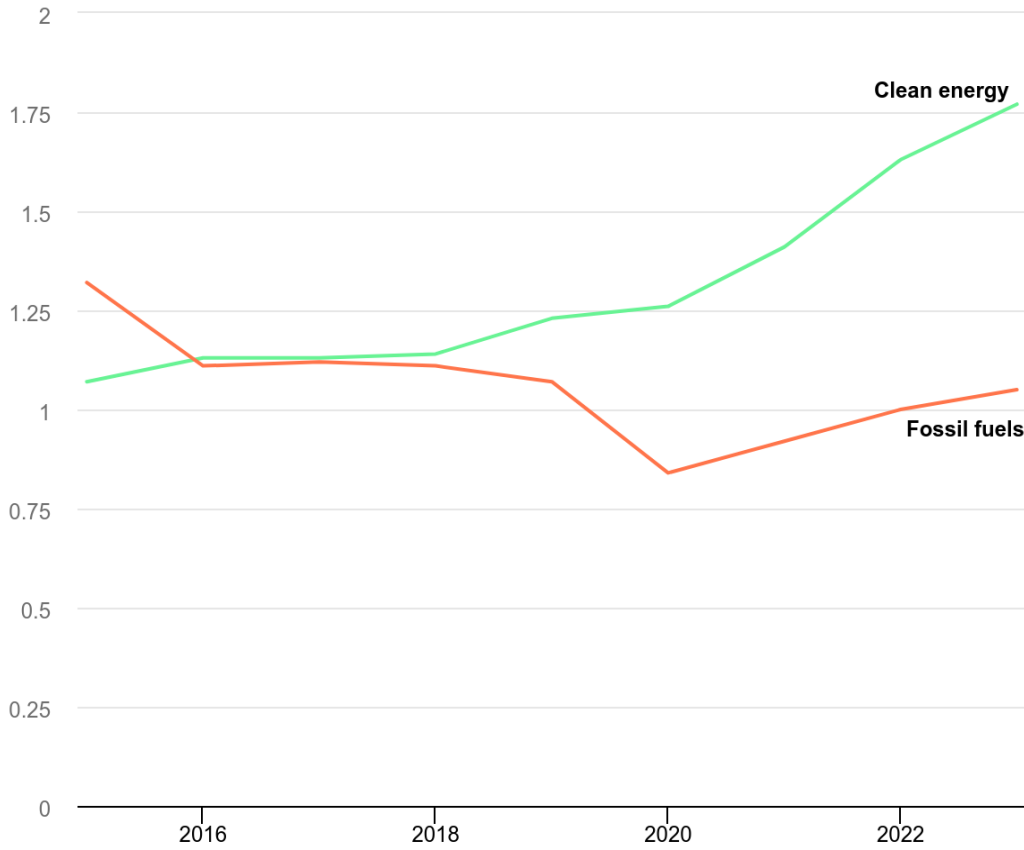
Yenilenebilir enerji, genellikle halkın ve işletmelerin bilinçlenmesi ve eğitimi yoluyla yaygınlaştırılmaktadır. Bu, yenilenebilir enerji kaynaklarının faydalarını, kullanımını ve uygulanmasını anlatan kampanyalar, eğitim programları ve bilgilendirme faaliyetleri içermektedir.

Yenilenebilir enerjiye yapılan yatırımlar, bu kaynakların geliştirilmesi ve kullanılması için önemli bir faktördür. Bu yatırımlar, yenilenebilir enerji projelerinin finansmanını sağlamak, altyapıyı geliştirmek ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin daha yaygın olarak kullanılmasını teşvik etmek için kullanılmaktadır.

Uluslararası kuruluşlar, hükümetler, işletmeler ve sivil toplum kuruluşları, yenilenebilir enerji kullanımını artırmak için iş birliği yapmaktadır. Bu iş birlikleri, yenilenebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesi, dağıtılması ve kullanılmasını teşvik etmeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmaların genel amacı, dünyanın enerji ihtiyacını karşılarken çevresel etkileri en aza indirmek ve sürdürülebilir bir enerji geleceği sağlamaktır. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynaklı üretim kapasitesi Çizelge 2.1 ve Şekil 2.1’de gösterildiği üzere her geçen yıl artmaktadır.

Çizelge 2.1 Yıllara göre yenilenebilir enerjinin üretim kapasitesi (REN21 Global Status Report 2023)

TOPLAM YENİLENEBİLİR ENERJİ (MW)							
Yıl	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Dünya	7750.94	7617.28	9496.02	9916.69	10436.72	11199.02	12435.68



Şekil 2.1 Dünyada Fosil Yakıtlara ve Temiz Enerjiye Yapılan Yıllık Yatırım Miktarı (trilyon ABD doları) (International Energy Agency, 2023)

2.3 GÜNEŞ ENERJİSİ

İklim değişikliği günümüzde insanlığı etkileyen en önemli sorunlardan biri haline gelmiş ve beraberinde birçok olumsuz etkiler yaratmıştır. Biyolojik çeşitliliğin azalması, iklim kuşaklarının değişmesi gibi etkilerle birlikte, enerji talebindeki artış da dikkate alınması gereken bir faktördür. Günümüzde enerji talebi giderek artmakta ve bu talep, çevreye daha az zarar veren ve CO₂ salınımını azaltan teknolojilerle karşılanması gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı, bu ihtiyacı karşılamamanın en önemli basamağıdır. Çevre dostu ve CO₂ içermeyen teknolojiler, fosil yakıtların kullanımının azaltılması ve iklim değişikliği ile mücadelede kritik bir rol oynamaktadır. Güneş enerjisi, bu yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde son yıllarda gelişen en dinamik dallardan birisidir. Teknolojik ilerlemeler ile birlikte maliyetlerin düşürülmesi, güneş enerjisi sistemlerinin daha erişilebilir hale gelmesini sağlamıştır. Ayrıca, güneş enerjisi, geniş bir coğrafi alanda kullanılabilir olması ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olması nedeniyle önemli bir potansiyele sahiptir.

Enerji politikalarının ve teşviklerin de yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırdığı bilinmektedir. Bu sayede, güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının payı giderek artmaktadır ve gelecekte enerji üretiminde daha büyük bir rol oynaması beklenmektedir. Bu da hem çevresel açıdan hem de enerji güvenliği açısından olumlu bir gelişmedir.

Güneş enerjisi, güneş ışınlarının paneller aracılığıyla toplanarak elektrik enerjisi olarak üretildiği temiz bir enerji kaynağıdır. Atmosferin dış yüzeyindeki her metrekareye ortalama 1367 W değerinde güç oluşmaktadır ve bu güç, dünyanın enerji ihtiyacını karşılayabilecek kapasitededir. Güneş enerjisinin kullanımı giderek artmakta ve birçok ülke, çevreye verdiği zararları azaltmak ve enerji bağımsızlığını artırmak için yenilenebilir enerjiye geçişi hızlandırmaktadır. Güneş enerjisi sistemleri, teknolojik olarak ilerleme kaydederek maliyetleri azaltmakta ve bu durum güneş enerjisi sistemlerini daha erişilebilir hale getirmektedir.

Güneş enerjisinin en yaygın kullanım alanlarından biri güneş panelleri aracılığıyla elektrik enerjisi üretimidir. Bu paneller, güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürürler ve binaların çatılarına veya arazilere kurularak geniş bir alanda kullanılabilirler. Ayrıca, güneş enerjisiyle sıcak su üretimi de yaygın bir uygulama olarak kullanılmakta ve önemli bir enerji tasarrufu sağlamaktadır. Güneş enerjisi, temiz bir enerji kaynağı olması, düşük maliyetli olması ve geniş kullanım alanlarına sahip olması nedenleriyle önemli bir potansiyele sahiptir. Gelecekte, güneş enerjisinin daha da yaygınlaşması ve gelişmesi beklenmektedir, bu da çevresel sürdürülebilirlik ve enerji güvenliği açısından olumlu bir gelişmedir.

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde bulunan hidrojen gazının helyuma dönüşmesi sürecinde ortaya çıkan ışıma enerjisini ifade eder. Güneş ışınlarının şiddeti atmosfer dışında 1370 W/m^2 iken, atmosfer tarafından tutulması nedeniyle dünyaya ulaşan ışınların şiddeti $0 - 1100 \text{ W/m}^2$ arasında değişmektedir. Bu durum, gezegenimize etki eden güneş ışınlarının, halihazırdaki enerji ihtiyacının çok daha ilerisini temsil etmektedir (Oluklulu,2001).

Ülkeler, fosil kaynakların çevresel zararlarını önlemeye yönelik sürdürülebilir enerjinin varlığını artırmaya yönelik çalışmalar yapmışlardır. Dolayısıyla güneşten ısı ve elektrik üretimiyle alakalı çok sayıda çalışma yapılmasına ve kullanımının artmasına yol açmıştır. 1970'li yıllardan itibaren güneşin yeryüzüne yaydığı enerjiden faydalanılmaya yönelik çalışmalar büyük oranda artış göstermiştir. Bu çalışmalar günümüz teknolojisinde fotovoltaiik sistemler olarak gelişimini ve verimini arttırarak maliyetlerini azaltmaktadır. Ayrıca, çevreye

duyarlı bir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Güneş enerjisinin en yaygın kullanım alanlarından bir tanesi de bina çatılarına monte edilen ve sıcak suya erişim imkanı veren güneş ısı kolektörleridir (Karamanav,2007).

2.3.1 Dünyada Güneş Enerjisi

Dünya üzerinde gittikçe artan enerji ihtiyacı ülkeleri tükenebilen enerji kaynaklarının yerine yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanmaya itmiştir. Bu yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş enerjisi de ülkelerin yatırım yapmış olduğu önemli bir kaynaktır. Güneş enerjisinden elektrik üretimi üzerine fotovoltaik sistemler geliştirilmiştir.

Enerji kaynakları, ülkelerin ekonomik büyümesi ve toplumsal gelişimi açısından hayati bir önem taşımaktadır. Sanayi Devrimi ile birlikte, dünya genelindeki enerjiye ihtiyaç, teknolojik yenilikler, sanayileşme ve hızla yükselen yeryüzü nüfusu nedeniyle sürekli katlanmaktadır. Günümüzde, küresel enerji gereksiniminin büyük bir bölümü kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıtlarla karşılanmaktadır (IEA, 2023). Ancak, fosil yakıtların çevresel tahribata yol açması ve tükenebilir bir kaynak olması, bu enerji türlerinin kullanımını giderek azaltmaktadır. Fosil yakıtların kullanımındaki azalma sonucu oluşan enerji açığı ise çevre dostu ve sürdürülebilir enerji kaynaklarıyla telafi edilmektedir.

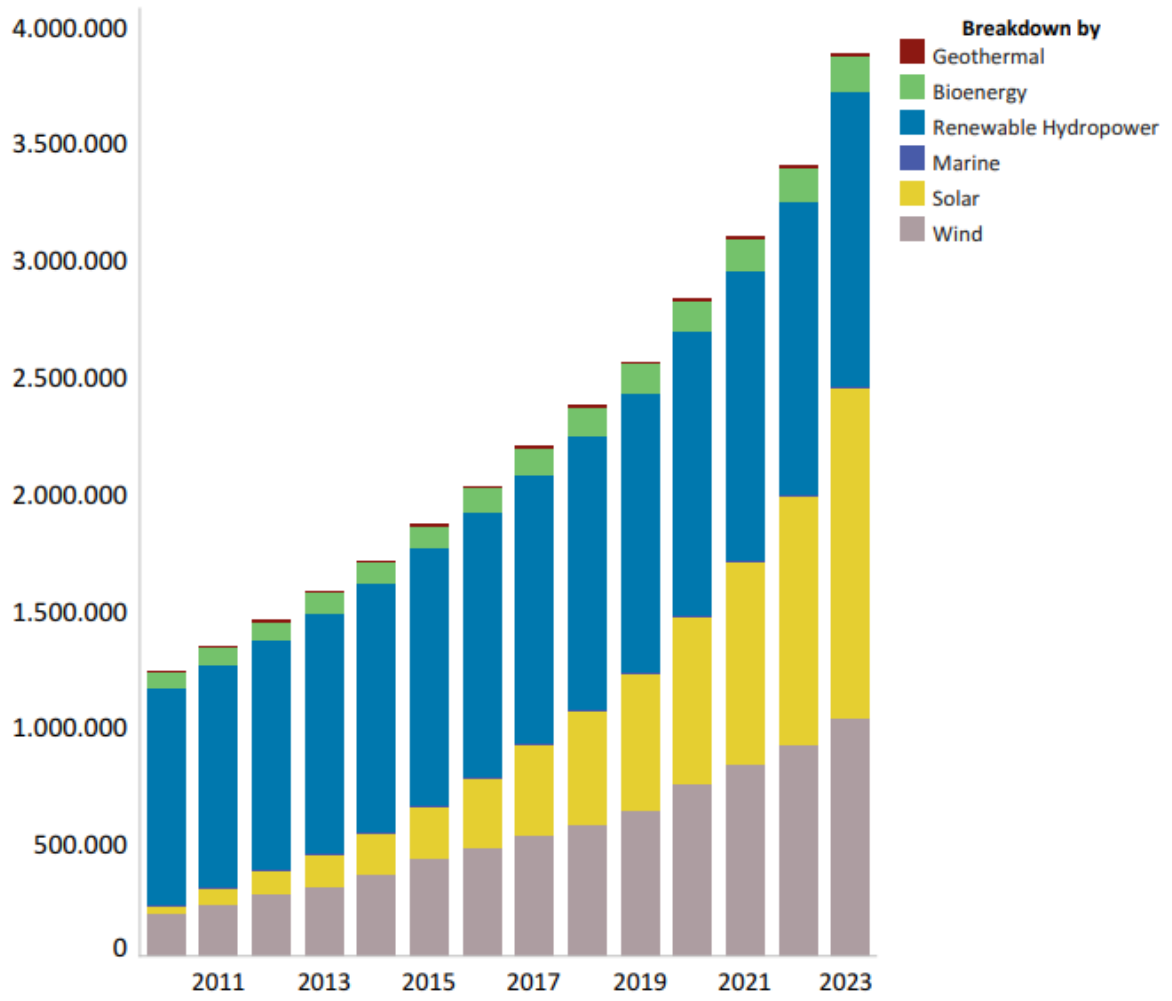
Fosil yakıt rezervleri bakımından yetersiz olan AB devletleri, Uzak Doğu'da sanayi bölgeleri ve enerji tüketiminde önde gelen ABD, yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve yaygınlaşmasında öncü bir rol oynamışlardır. Bu bağlamda, 2015 yılında Paris'te gerçekleştirilen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Zirvesi'nde, atmosfer sıcaklığının yükselmesini 2°C'nin altında tutulması hedeflenmiş ve ülkelerin bu doğrultuda stratejik ve destekleyici politikalar benimsemesi konusunda fikir birliğine varılmıştır (UNFCCC, Conference of the Parties (COP), 2015). Bu anlaşma ile ülkeler sürdürülebilir enerji sektöründe olumlu ve geliştirici yaklaşımlar uygulamaya yönelmiştir.

Fotovoltaik (PV) sistemler dünya genelinde hızla gelişen ve yaygınlaşan bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Son yıllarda, fotovoltaik sistemlerin kurulumu hızla artmıştır. Düşen maliyetler ve artan verimlilik sayesinde, birçok ülke güneş enerjisi projelerine yatırım yapmaktadır. Büyük güneş çiftlikleri ve çatı üstü sistemler giderek daha yaygın hale gelmektedir. Fotovoltaik teknolojilerde sürekli olarak yeni gelişmeler kaydedilmektedir. Panel verimliliği artmakta, üretim maliyetleri düşmektedir. İnovasyonlar sayesinde güneş enerjisi

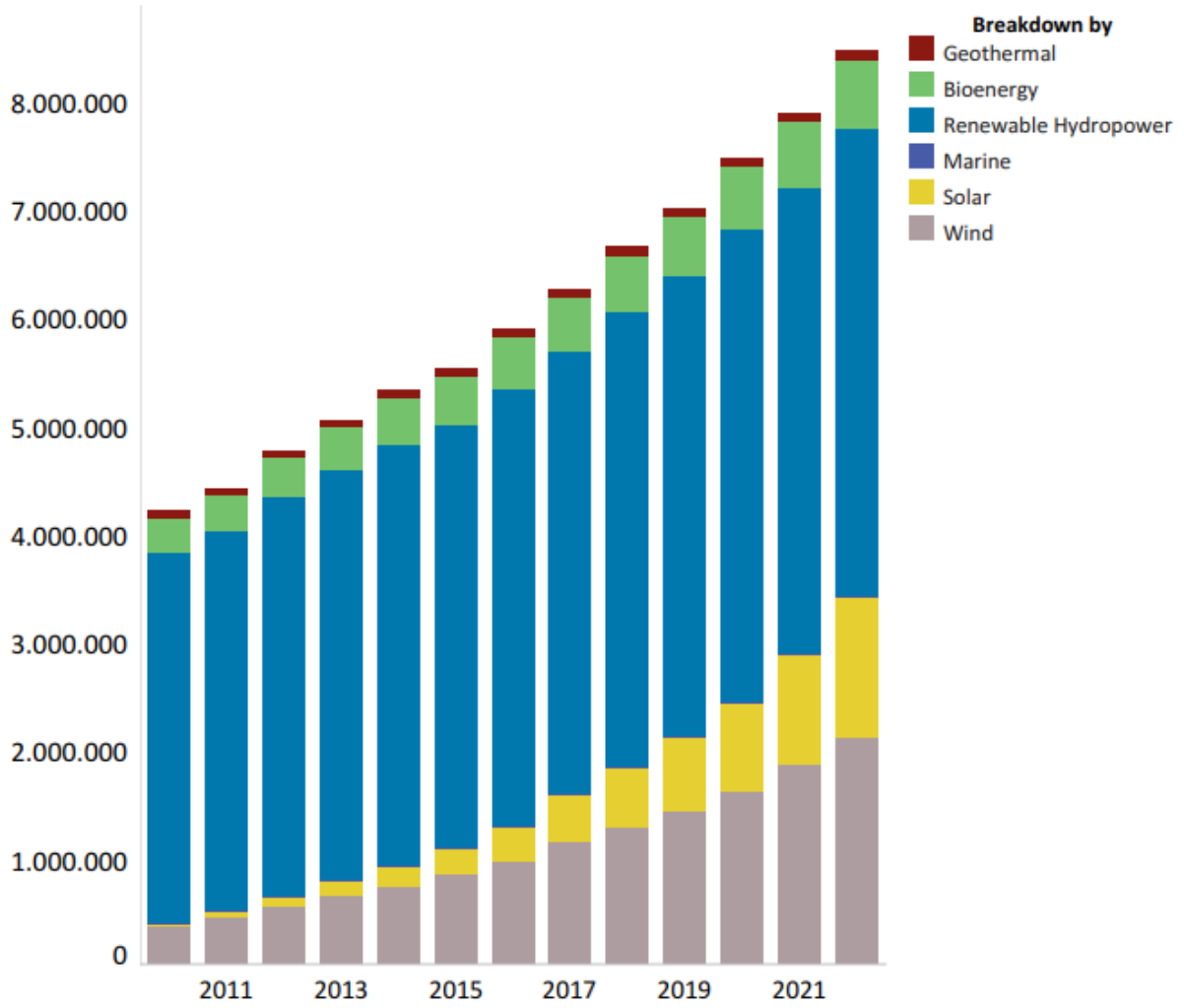
daha erişilebilir hale gelmektedir. Güneş enerjisi, sera gazı emisyonlarını azaltarak iklim değişikliğiyle mücadeleye katkı sağlamaktadır. Ayrıca, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltarak çevre kirliliğini azaltmaktadır. Birçok ülke, güneş enerjisi projelerini teşvik etmek için çeşitli politika ve teşvikler sunmaktadır. Minimum sabit fiyat uygulaması, vergi indirimleri ve hibe programları gibi politikalar, fotovoltaik sistemlerin kurulumunu teşvik etmektedir.

Güneş enerjisini en çok kullanan ülkeler arasında Almanya, Danimarka ve İspanya bulunmaktadır, ancak güneş enerjisinin kullanımı yalnızca bu ülkeler ile kısıtlı kalmamaktadır. Son dönemde, küresel ısınmanın etkisiyle birlikte Rusya ve Çin gibi büyük ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım yapmaya başlamıştır. Almanya'da her ne kadar güneşlenmeli gün sayısı düşük olsa da fotovoltaik sistemler yardımıyla güneş enerjisinden yararlanmanın mümkün olduğunu savunmaktadır. Bu nedenle Almanya, dünyanın en çok güneş enerjisi üreten ülkelerinden biridir. Gelişmiş ülkeler, alternatif enerji üretimi için yeni sistemler aracılığıyla güneş enerjisi üretim alanlarını arttırmaktadır.

Uluslararası alanda yenilenebilir enerji konusunda çalışma sağlamak üzere 2011 yılında Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı kurulmuştur. Temel amacı, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmek, yenilenebilir enerji teknolojilerini desteklemek ve uluslararası iş birliği sağlamak olan bir ajanstır. IRENA'nın merkezi Birleşik Arap Emirlikleri'nin Abu Dabi şehrinde bulunmaktadır. Yıllara göre güncel veri tabanı sağlayan IRENA bu bilgileri internet sitesi aracılığıyla paylaşma açmaktadır. Paylaşılan güncel veriler ile kaynağın cinsine göre tesis kurulu gücünün yıl bazında grafiği Şekil 2.2'de, kaynağın cinsine göre elde edilen elektrik üretim hacmi yıl bazında grafiği Şekil 2.3'de gösterilmektedir. Söz konusu veriler incelendiğinde yıllar içerisinde fotovoltaik sistemlerin kurulu gücünün artış göstermesi ile birlikte güneş enerjisinden elde edilen elektrik üretim hacmi daha da artmaktadır.



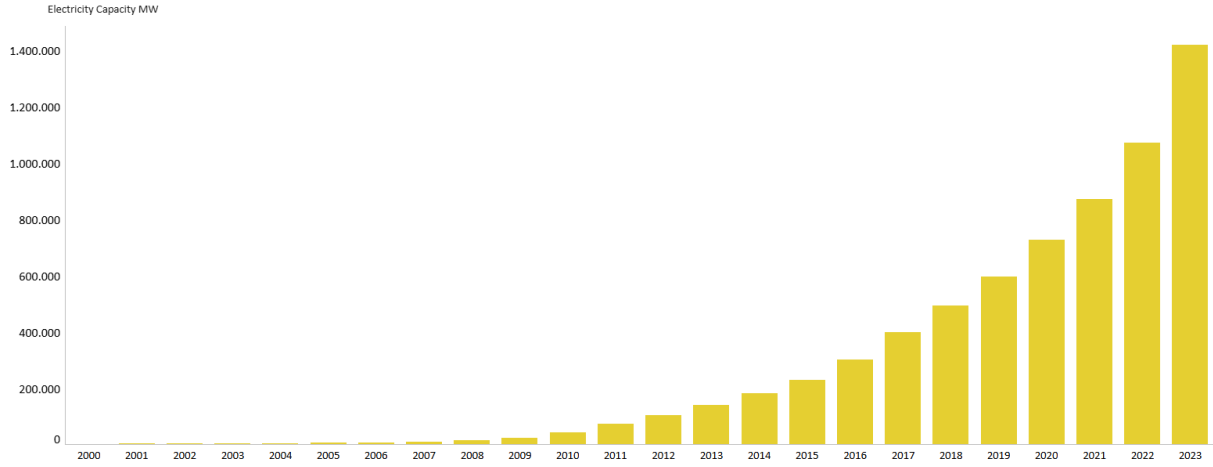
Şekil 2.2 Dünyada kaynak türüne göre santral kurulu güçlerinin yıllara göre değişimi (IRENA, 2023)



Şekil 2.3 Dünyada kaynak türüne göre üretilen elektrik miktarının yıllara göre değişim grafiği (IRENA, 2023)

IRENA'nın güncel verilerine bakıldığında, 2000 ile 2024 yılları arasında bir önceki yıla göre artış oranında azalma olsa da, yıllar içerisinde kurulu güç devamlı artış göstermiştir. Güneş enerjisi kurulu güç değeri 2000'de 1.216 MW değerindeyken 23 yıl içinde bu değer 1.416.800 MW artış göstererek 2022 yılında 1.418.016 MW değerine ulaşmıştır.

Çizelge 2.2 ile Şekil 2.4'te belirtildiği gibi IRENA'nın güncel verilerine göre, 2000 ile 2023 yılları arasında belirli yıllarda bir önceki yıla oranla azalma olmasına rağmen, fotovoltaik sistemler ile üretilen elektrik enerjisi seviyesi düzenli bir şekilde yükselmiştir. Fotovoltaik sistemler sayesinde üretilen elektrik hacmi 2000 yılında 1.216 GWh, 2023 yılında ise bu hacim 1.418.016 GWh seviyesine yükselmiştir. Söz konusu tablo, dünya çapında enerji ihtiyacının giderek fotovoltaik sistemlerden elde edilen enerjiyle karşılandığını göstermektedir.

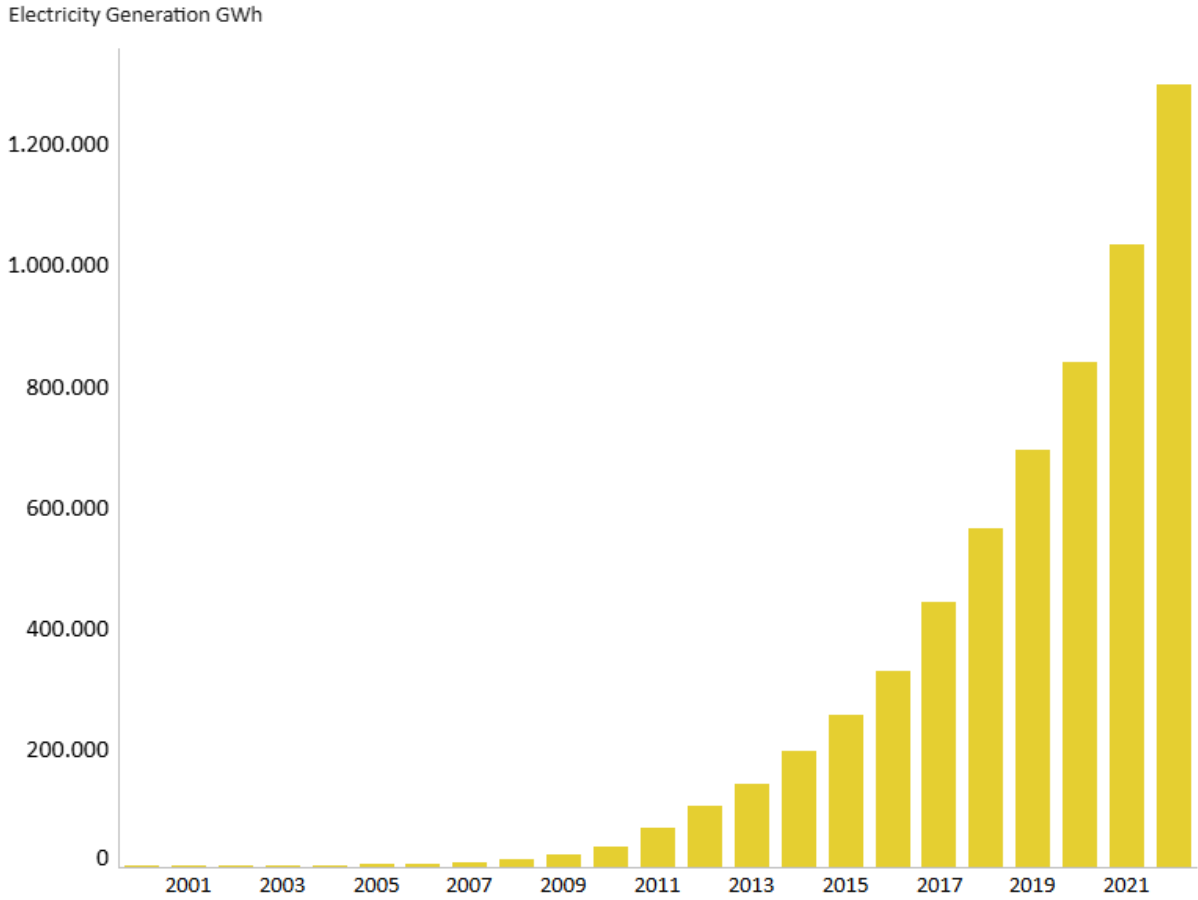


Şekil 2.4 Dünyada güneş enerji kurulu gücünün yıllara göre değişim grafiği (IRENA, 2023)

Çizelge 2.2 Dünyada güneş enerjisi kurulu gücünün yıllara göre değişimi (IRENA,2023)

Yıl	Kurulu Güç Miktarı (MW)	Bir Önceki Yıla Göre Artış Miktarı
2000	1.216	
2001	1.466	20,56%
2002	1.811	23,53%
2003	2.337	29,04%
2004	3.421	46,38%
2005	4.929	44,08%
2006	6.480	31,47%
2007	8.953	38,16%
2008	15.221	70,01%
2009	23.543	54,67%
2010	41.538	76,43%
2011	72.828	75,33%
2012	103.036	41,48%
2013	140.216	36,08%
2014	179.639	28,12%
2015	228.081	26,97%
2016	300.146	31,60%
2017	395.854	31,89%
2018	491.988	24,29%
2019	595.027	20,94%
2020	726.229	22,05%
2021	870.643	19,89%
2022	1.070.851	23,00%
2023	1.418.016	32,42%

Çizelge 2.3 ve Şekil 2.5’te gösterildiği üzere son 20 yılda güneş ve rüzgar enerjisinin hızla artış göstermesiyle birlikte, yenilenebilir enerji teknolojileri de büyük bir atılım gerçekleştirmiştir. Teknolojik gelişmeler, düşen maliyetler ve fosil yakıtlara yönelik artan endişelerle birlikte, hava koşulları ve diğer faktörlere bağlı olarak dalgalanabilen yenilenebilir enerji teknolojileri hızla popülerlik kazanmıştır (REN21 Global Status Report 2023).



Şekil 2.5 Dünyada güneş enerjisi ile üretilen elektrik miktarının yıllara göre değişim grafiği (IRENA, 2023)

Çizelge 2.3 Dünyada güneş enerjisinden elektrik üretiminin yıllara göre değişimi (IRENA, 2023)

Yıl	Üretilen Elektrik Miktarı (GWh)	Bir Önceki Yıla Göre Artış Miktarı
2000	1.312	-
2001	1.678	27,90%
2002	1.950	16,21%
2003	2.370	21,54%
2004	3.064	29,28%
2005	4.381	42,98%
2006	5.995	36,84%
2007	8.079	34,76%
2008	12.752	57,84%
2009	20.945	64,25%
2010	33.759	61,18%
2011	65.612	94,35%
2012	101.662	54,94%
2013	137.368	35,12%
2014	192.602	40,21%
2015	252.269	30,98%
2016	324.797	28,75%
2017	437.515	34,70%
2018	560.036	28,00%
2019	689.902	23,19%
2020	835.685	21,13%
2021	1.030.571	23,32%
2022	1.294.481	25,61%

2022 yılına gelindiğinde, dünya genelinde elektrik üretiminde güneş enerjisinin payı yaklaşık %3,3 seviyesine ulaşmıştır. Bu oran, 2020 yılında % 2,8 seviyesindedir ve bu durum güneş enerjisinin hızla yayıldığını göstermektedir (Renewable Capacity Statistics 2023).

Dünya genelinde, 2022 yılı itibariyle güneş enerjisi kurulu gücü yaklaşık olarak 1000 GW seviyelerindedir. Bu durum, güneş enerjisinin dünya genelinde önemli bir enerji kaynağı olarak kabul edildiğini göstermektedir. Birçok ülkenin güneş enerjisi kurulu gücü hızla artmaktadır. Çin, bu alanda lider konumdadır ve 2022 itibariyle yaklaşık 430 GW'lık bir kapasiteye ulaşmıştır. Ayrıca Hindistan, ABD, Japonya, Almanya gibi diğer ülkeler de güneş enerjisi kurulu gücünde önemli büyüme göstermektedir. Güneş enerjisi kurulu gücü her yıl dünya çapında artış göstermektedir ve son on yılda bu artış hızı büyük bir ivme kazanmıştır. Bu durum, güneş enerjisinin giderek daha geniş bir şekilde benimsendiğini ve elektrik üretiminde önemli

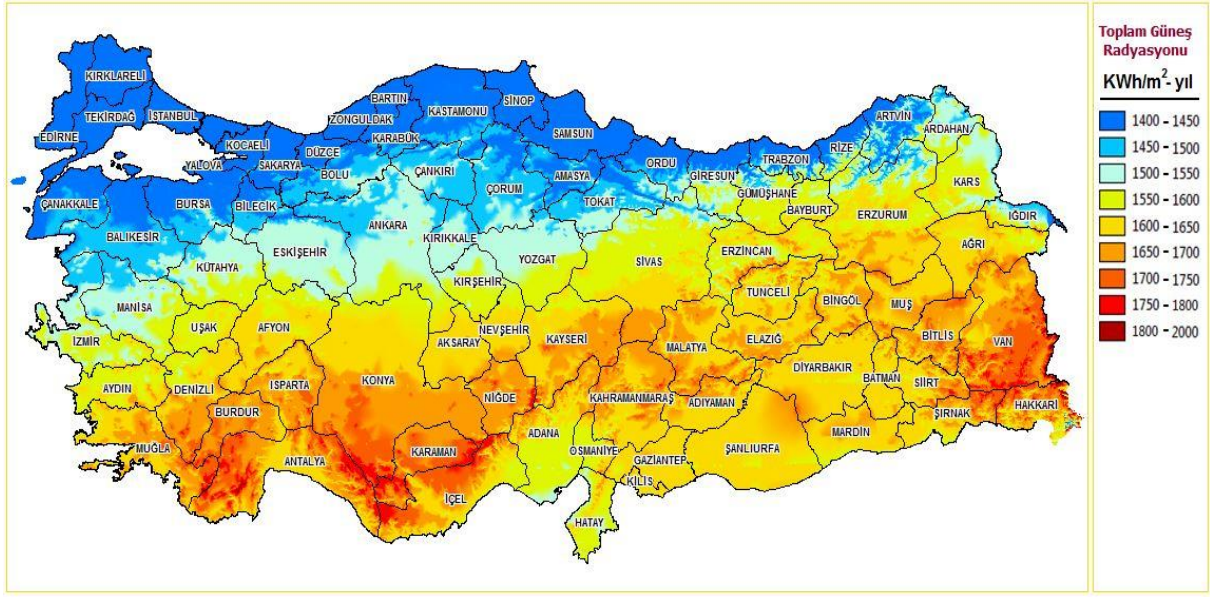
bir role sahip olduğunu göstermektedir. Çizelge 2.4’te de görüldüğü üzere dünya genelinde güneş enerjisi kullanımı ve kapasitesinin hızla arttığını ve güneş enerjisinin giderek daha belirgin bir enerji kaynağı haline geldiğini vurgulamaktadır (Renewable Capacity Statistics 2023).

Çizelge 2.4 Yıllara göre güneş enerjisi üretim kapasitesi (RECS 2023 IRENA)

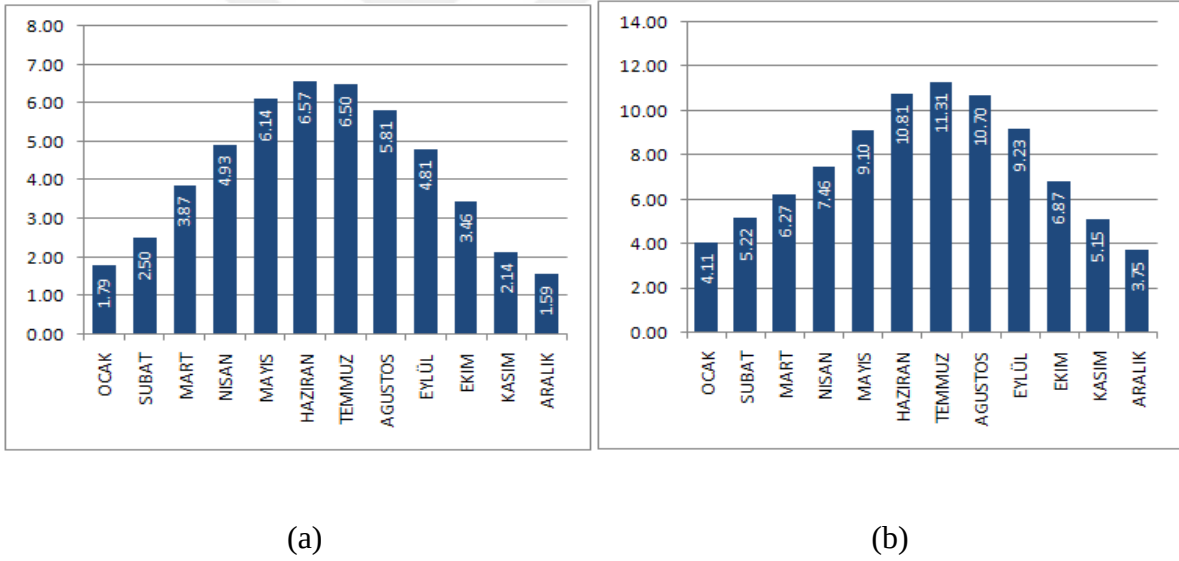
GÜNEŞ ENERJİSİ (MW)							
Yıl	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Dünya	301 082	395 947	489 306	592 245	720 429	861 537	1 053 115

2.3.2 Türkiye’de Güneş Enerjisi

Türkiye, doğal kaynak çeşitliliği açısından yenilenebilir enerji için büyük bir avantaj sunmaktadır. Hem stratejik konumu hem de coğrafi yapısı sayesinde, ülke özellikle güneş ve rüzgâr enerjisi alanında öne çıkan bir potansiyel barındırmaktadır. Türkiye dünya üzerinde coğrafi koordinat olarak 36° ile 42° kuzey enlemleri ve 26° ile 45° doğu boylamları içerisinde yer almaktadır. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasının (GEPA) yapmış olduğu araştırmalar sonucunda Türkiye’nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2.741 saat sonucuna ulaşılmıştır. Ortalama yıllık toplam ışıınım değerinin ise 1.527,46 kWh/m² olduğu belirlenmiştir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’nın hazırlamış olduğu güneş enerjisi potansiyeli haritası Şekil 2.6’da gösterilmiş olup Şekil 2.7’de de ülkeye ait radyasyon verileri ile güneşlenme süreleri verilmiştir (ETKB - Bilgi Merkezi).



Şekil 2.6 Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Haritası (ETKB - Bilgi Merkezi)



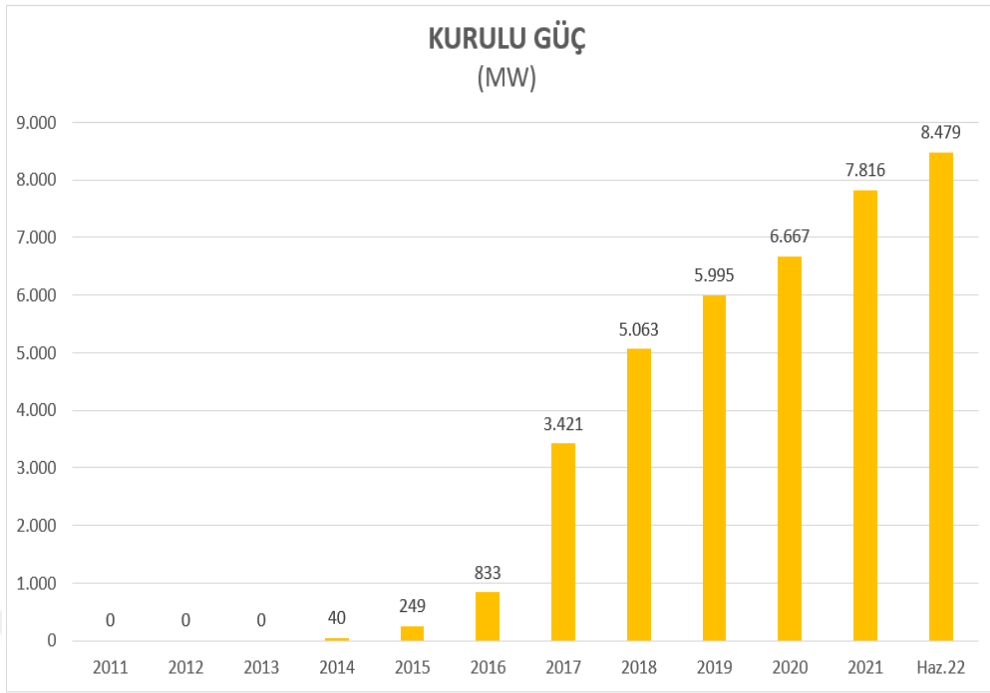
Şekil 2.7 (a) Türkiye Global Radyasyon Verileri (KWh/m²·gün) (b) Güneşlenme Periyotları (saat) (ETKB - Bilgi Merkezi)

Ülkemizin yüksek güneş enerjisi potansiyelini etkin bir şekilde değerlendirmek amacıyla, son yıllarda Bakanlık düzeyinde önemli çalışmalar hayata geçirilmiştir. Bu doğrultuda, özel sektör, kamu kurumları, belediyeler ve farklı ölçeklerdeki işletmeler güneş enerjisinden elektrik üretimi konusunda bilinçlendirilmiş ve kredi ile hibe gibi maddi destekler sağlanmıştır. Ayrıca, güneş enerjisinin küçük çaplı üretimlerde dahi kullanılabilmesini teşvik etmek amacıyla, 2013 yılında “Yenilenebilir Enerji Kaynakları Kanunu” kapsamında “Elektrik Piyasasında Lisanssız

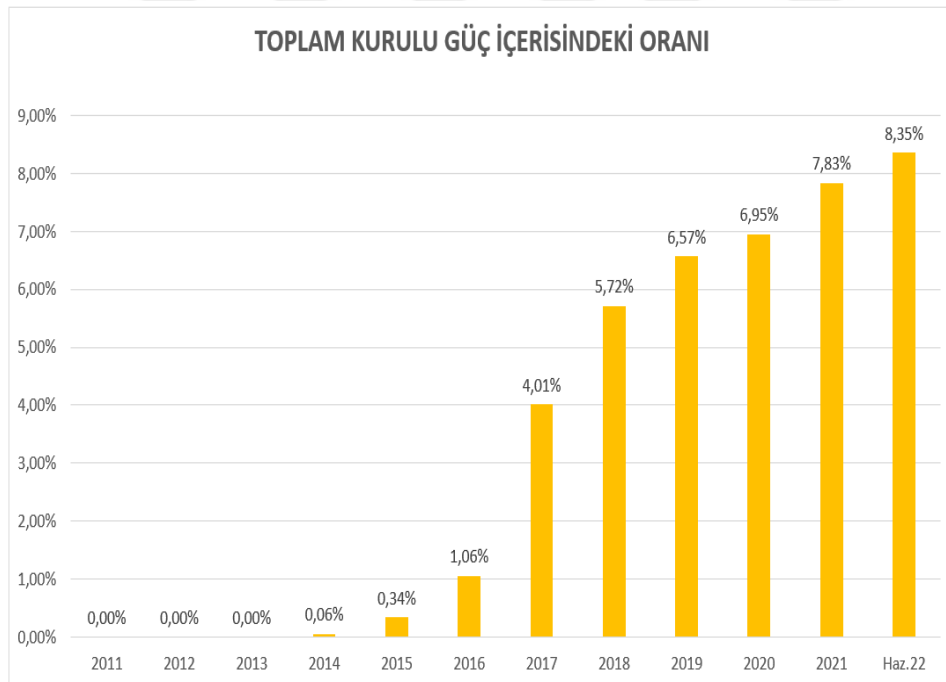
Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik” yürürlüğe girmiştir. Bu düzenleme sayesinde, güneş enerjisi santrallerinin sayısı hızlı bir şekilde artış göstermiştir. (Kırnapcı, 2024).

Güneş enerjisi başta olmak üzere rüzgar enerjisi, hidroelektrik enerji, biyokütle enerjisi ve jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı elektrik üretimini teşvik etmek amacıyla 2011 yılında Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması (YEKDEM) hayata geçirilmiştir. YEKDEM kapsamında, yenilenebilir enerji üretimi yapan tesislere elektrik üretimleri için belirli bir süre boyunca (genellikle 10-15 yıl) sabit bir fiyat garantisi sağlanmıştır. Bu fiyat garantisi, kilovat saat başına belirlenen bir miktar olup, üreticilere istikrarlı gelir sağlama amacı taşımaktadır. Bu mekanizma, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmek, çevreye duyarlı enerji üretimini arttırmak ve Türkiye'nin enerji bağımsızlığını güçlendirmek gibi hedefleri desteklemektedir. YEKDEM sayesinde, Türkiye'de özellikle güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklara dayalı elektrik üretimi önemli ölçüde artış göstermiştir (Enerji Ajansı, 2023).

Haziran 2022 itibariyle, fotovoltaik sistemlere dayalı elektrik kurulu gücü 8,479 MW değerlerine çıkarak toplam kurulu güç içerisinde % 8,35 seviyelerine yükselmiştir. Yıllara göre kurulu gücün verileri ve toplam kurulu güç içerisindeki yüzde oranları Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da gösterilmiştir (ETKB – Enerji İşleri Genel Müdürlüğü).



Şekil 2.8 Türkiye Güneş Enerjisine Dayalı Elektrik Kurulu Gücünün Yıllara Göre Değerleri (ETKB – Enerji İşleri Genel Müdürlüğü)

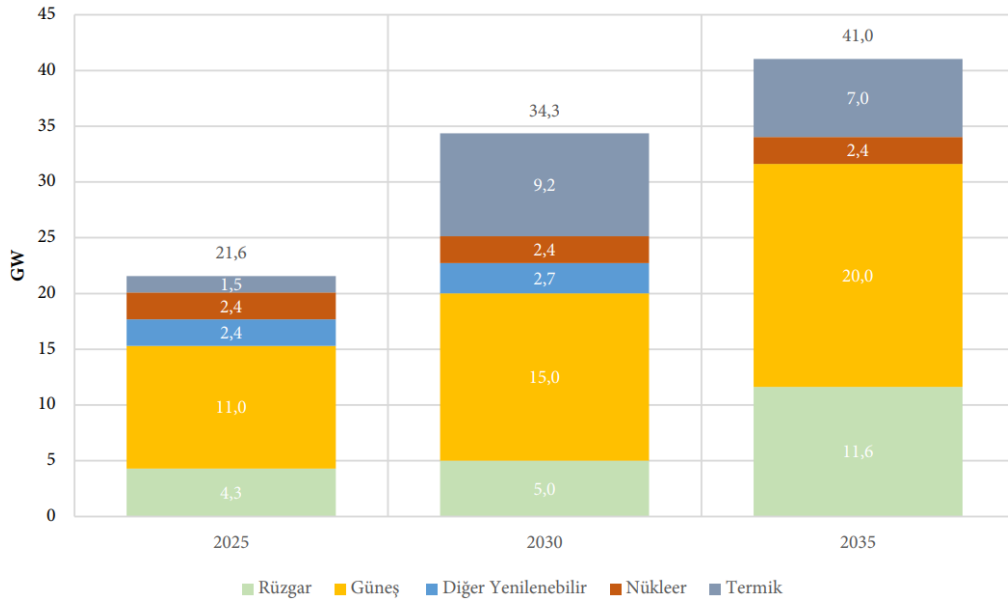


Şekil 2.9 Türkiye Güneş Enerjisine Dayalı Elektrik Kurulu Gücünün Toplam Kurulu Güç İçerisindeki Oranı (ETKB – Enerji İşleri Genel Müdürlüğü)

Enerji Bakanlığı 2022 yılı sonunda, 2035 yılına kadar her bir elektrik üretim kaynağı için kapasite hedefi belirleyen uzun vadeli bir enerji planı yayınlanmıştır. Planda, toplam kurulu

gücün 2035 yılına kadar neredeyse iki katına çıkması ve yeni eklenecek kapasitenin büyük kısmının güneş enerjisi başta olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması öngörülmektedir (EİGM, 2023).

2021-2035 döneminde devreye alınması gereken yeni kapasite miktarı 96,9 GW düzeyindedir. Şekil 2.10’da görüldüğü üzere beşer yıllık dönemler açısından 2021-2025 döneminde 21,6 GW, 2026-2030 döneminde 34,3 GW, 2031-2035 döneminde ise 41,0 GW gücünde yeni kapasite artışlarının sağlanması hedeflenmektedir. Söz konusu kurulu güç artışının, büyük çoğunluğu güneş ve rüzgar enerjisi olmak üzere, % 74,3’ü yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşmaktadır. Güneş ve rüzgar enerjisi için yıllık yeni kapasite gereksinimi sırasıyla ortalama 3,1 ve 1,4 GW’tır. Ömürlerinin dolması nedeniyle devreden çıkacak santrallerin kurulu güçten eksilmesi ile devreye alınacak yeni kapasitenin kurulu güce yansımaları daha düşük düzeyde olmaktadır. Ayrıca ülkenin fotovoltaik sistemlerden elde etmiş olduğu elektrik enerjisinin yıllara göre üretim gücü çizelge 2.5’te gösterilmiştir (EİGM, 2023).



Şekil 2.10 Enerji Bakanlığı’nın yenilenebilir enerji üretim planı (EİGM, 2023)

Çizelge 2.5 Türkiye’nin yıllara göre güneş enerjisi üretim gücü (EİGM, 2023)

GÜNEŞ ENERJİSİ (MW)							
Yıl	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Türkiye	834	3 422	5 064	5 996	6 668	7 817	9 426

2.4 FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

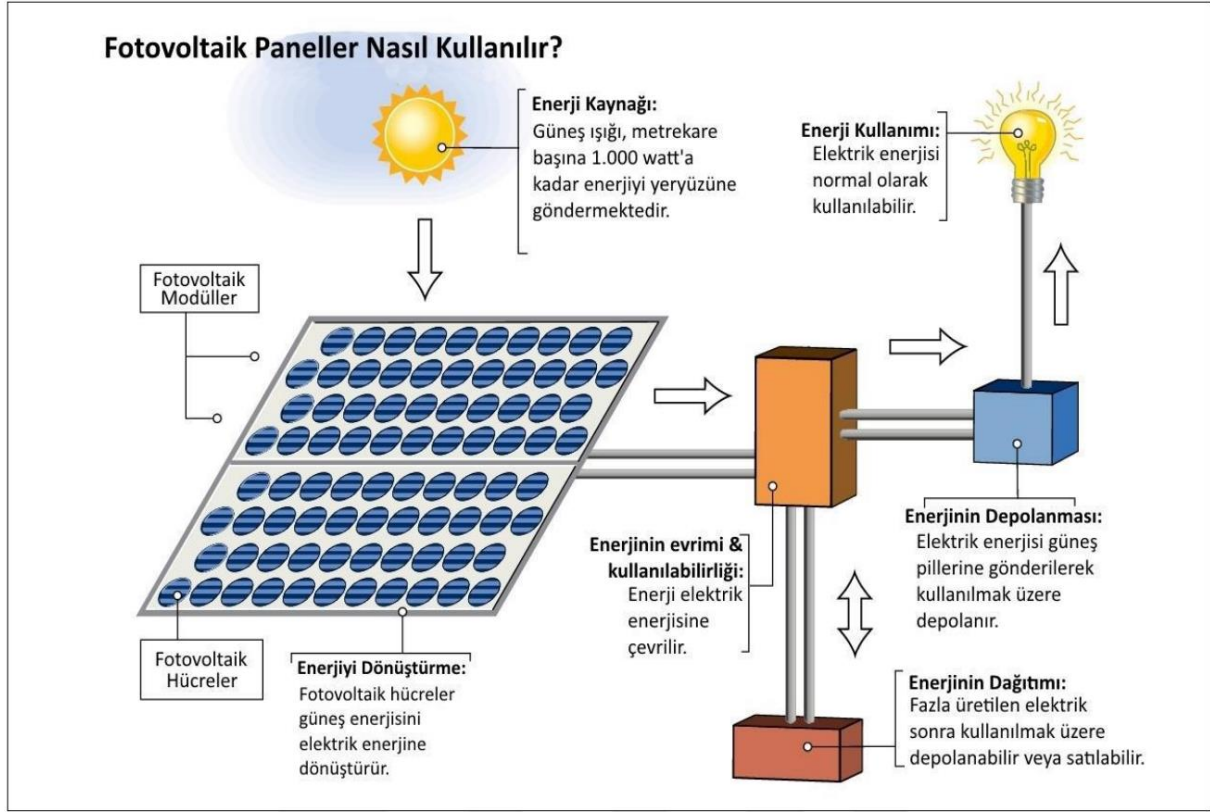
Fotovoltaik sistemler, güneş ışığını kullanarak elektriğe dönüştüren ve böylece yenilenebilir enerji sağlayan teknolojilerdir. Bu sistemler, çevre dostu bir seçenek olup, güvenli ve kirlilik oluşturmada enerji üretme avantajına sahiptirler. PV cihazları, tek tek hücrelerden oluşur ve her biri genellikle 1 veya 2 W güç üretmektedir (Strachan, 2005). Bu gücü artırmak için, birden fazla hücre birleştirilerek modüller oluşturulur ve bu modüller panelleri, paneller ise dizileri meydana getirir. İlk pratik uygulaması yapılan silikon bazlı PV hücreleri 1954 yılında keşfedilmiştir ve o dönemdeki verimleri yaklaşık % 6 civarındadır (Yıldız ve MacEachern, 2018; Blaze, 2020). 1960 ve 1970’li yıllarda, fotovoltaik teknolojilerin gelişimi hız kazanmıştır ve birçok farklı malzeme ve yapı kullanılarak daha verimli hücreler geliştirilmiştir. 1970’li yılların sonlarına doğru, fotovoltaik hücreler ticari olarak satılmaya başlanmış ve güneş enerjisi sistemleri, özellikle uzak bölgelerde elektrik enerjisi sağlamak için kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzdeki PV hücrelerinde temel prensipler hala aynı durumda ve paneller genellikle silikon temellidirler. PV hücrelerinin bir araya getirilmesi ve çeşitli bileşenlerin eklenmesiyle PV sistemleri oluşturulur. Tipik bir PV sistemi, bir PV modülü (veya dizisi), bir batarya, bir şarj kontrol ünitesi ve bir inverter gibi dört ana bileşenden oluşur. Bu bileşenlerin rolleri ve önemi, genellikle bir PV sistemi kurulumunda temel adımları oluşturur.

2.4.1 Fotovoltaik Sistemlerin Çalışma Prensibi

Fotovoltaik etki, güneş ışığının hücreye düşmesiyle başlamaktadır. Güneş ışığı, hücre içindeki yarı iletken malzemeyi etkilemekte ve bu malzemede elektronların hareketine neden olmaktadır. Elektronlar, hücredeki belirli bir yöne doğru hareket ederler ve bu hareket, elektrik akımının oluşmasını sağlamaktadır.

Fotovoltaik hücreler genellikle p-tipi ve n-tipi bölgelerden oluşmaktadır. P-tipi bölgede yüklerin yoğunluğu pozitif (artı), n-tipi bölgelerde ise negatif (eksi) yüklerin yoğunluğu daha yüksektir. Güneş ışığının etkisiyle, p-tipi ve n-tipi bölgeler arasında bir elektrik alanı oluşmakta ve bu alan, elektronların hareketini belirli bir yöne doğru zorlamaktadır.

Elektronlar, elektrik alanı etkisiyle hücre içerisinde hareket ederler ve oluşan elektrik akımı ile elektrik enerjisinin elde edilmesi sağlanır. Bu şekilde, fotovoltaik sistemler güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürerek temiz ve sürdürülebilir bir enerji sağlamaktadır. Şekil 2.11 ‘de fotovoltaik panelin çalışma prensibi gösterilmektedir.



Şekil 2.11 Fotovoltaik Modüllerin Çalışma Prensibi (Keskin, 2019)

Fotovoltaik sistemler içerisinde tasarım şekline etki eden pek çok faktör vardır. Bu faktörler genellikle çevresel faktörler, PV sistem faktörleri ve PV (fotovoltaik) sistem kurulum faktörleri olarak üç başlık altında incelenebilir. Bu faktörlerin tümü, fotovoltaik sistemlerin verimliliğini ve performansını etkiler. Optimum sonuçlar için her bir faktörün dikkatlice değerlendirilmesi ve uygun önlemlerin alınması gerekmektedir.

Fotovoltaik sistemlerin çalışmasını etkileyen faktörler arasında en önemli olanı güneş ışınlarının/radyasyonunun miktarıdır. Çünkü fotovoltaik sistemler, doğrudan güneş ışığından enerji üretirler ve bu nedenle maksimum güneş ışığına erişimleri ne kadar fazla olursa, sistemlerin çalışma verimliliği de o kadar yüksek olmaktadır.

Güneş ışığının miktarı birçok faktörden etkilenmektedir. Bu faktörler arasında coğrafi konum, mevsim, bulutluluk derecesi ve günün saatleri gibi unsurlar bulunmaktadır. Örneğin, güneş ışığının yoğunluğu ve süresi, bir bölgedeki fotovoltaik sistemlerin verimliliğini belirleyebilir. Daha fazla güneş ışığına maruz kalan bölgelerde, fotovoltaik sistemler daha fazla elektrik enerjisi üretebilirken, daha az güneş alan bölgelerde verimlilik düşmektedir. Bu nedenle,

fotovoltaik sistemlerin kurulacağı konumun ve panel yerleşiminin dikkatlice seçilmesi önemlidir. Maksimum güneş ışığına erişimi sağlamak için panellerin doğru bir şekilde yerleştirilmesi ve güneş ışığını en iyi alacak şekilde açlandırılması gerekmektedir. Böylece, güneş ışığının miktarını en üst düzeye çıkararak sistemlerin verimliliği artırılabilir.

Fotovoltaik sistemlerin verimliliği açısından, çevrede kirlenmeye sebep olabilecek maddelerin panellerden uzaklaştırılması ve panellerin temiz tutulması sağlanmalıdır. Paneller çoğunlukla yağmur suları ile temizlenirken, panel üzerinde oluşabilecek kirlenmelerin ve kalıntıların yağmur suyu aracılığıyla panele zarar vermesini engellemek için panel temizliğine özen gösterilmelidir.

Çevresel faktörlerin içerisinde, güneş ışınlarının varlığıyla paralel olarak gölgelenme değerleri de önemlidir. Birincil enerji kaynağı olan güneşten gelen ışıma enerjisi gölgelenmeye uğradığında akım miktarı değişmekte ve enerji üretim verimini azaltmaktadır. Bu sebeple, çalışma alanında bulunabilecek ağaçlar, direkler veya diğer nesnelerin gölge oluşturabilecek konumları dikkatle belirlenmelidir. Bu faktörlerin tamamı, fotovoltaik sistemlerin performansını ve verimliliğini etkilemektedir ve optimal enerji üretim miktarları elde etmek için dikkatlice yönetilmesi gerekmektedir.

Fotovoltaik sistemlerin çalışma performansını etkileyen bir diğer önemli faktör ise, sistem yapısıdır. Sistem yapısı içerisinde modül yapısı, kullanılan pilin yapısı, pil verimliliği, kullanılan malzemeler ve fotovoltaik sistemin atom yapısı gibi unsurlar bulunmaktadır. Modül yapısı, sistemde kullanılan pilin tasarımı ve verimliliği üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Pilin yapısı ve tasarımı, güneş ışığını en verimli şekilde yakalayarak elektriğe dönüştürme yeteneğini belirlemektedir. Fotovoltaik sistemlerde kullanılan malzemelerin seçimi, sistem verimliliğini etkiler. Silikon, galyum arsenit (GaAs), bakır indiyum diselenid (CuInSe₂), kadmiyum tellür (CdTe), indiyum fosfit gibi farklı malzemelerin kullanılması, enerji verimliliğini belirleyen önemli bir faktördür. Bazı sistem türleri, kullanılan malzemelere bağlı olarak daha yüksek enerji verimliliği sağlayabilir. Fotovoltaik hücrelerin atom yapısı, hücre ve modül verimliliğini etkiler. Mono-kristalli, poli-kristalli, amorf veya nano yapıdaki hücrelerin farklı özellikleri vardır. Örneğin, monokristal hücreler genellikle daha yüksek hücre ve modül verimliliği sağlar. Mono-kristal hücrelerde hücre verimi genellikle %24 civarındayken, poli-kristal hücrelerde bu oran %18'e kadar düşebilir.

Çizelge 2.6’da belirtildiği üzere güneş enerjisi sistemlerinin performansını etkileyen en önemli faktörlerden biri de kurulum faktörleridir. Sistemin kurulumunda dikkate alınması gereken çeşitli bileşenler hem çalışma prensibini etkiler hem de sistem performansını belirler. Bu ekipmanlar içerisinde kablolar, modül yönelimi, uyumluluk, izleme sistemleri ve MPPT (Maksimum Güç Noktası Takibi) gibi faktörler oldukça önemlidir. Fotovoltaik sistemlerde kullanılan kabloların, yüksek sıcaklıklara dayanıklı olması gereklidir. Fotovoltaik enerjinin elektriğe ve ısıya dönüştürülmesi sürecinde ortaya çıkan yüksek sıcaklık ve ortam gerilimi, kablolarda dayanıklılığın arttırılmasını gerektirir. Modüllerin kurulumunda, güneş ışığını en verimli şekilde alacakları açı ve yönde konumlandırılmaları önemlidir. Modüllerin eğimi ve yönelimi, üretilen elektrik miktarını etkiler. Doğru bir eğim ve yönlendirme, sistemin verimliliğini artırabilir. Modüllerin birbirine seri veya paralel olarak bağlanması, toplam sistem performansını etkiler. Seri bağlantılar gerilim değerini artırırken, paralel bağlantılar ise akım değerini arttırmalar. Doğru bağlantı şekli, sistem verimliliğini optimize eder.

Çizelge 2.6 Fotovoltaik sistemin çalışmasını etkileyen faktörler

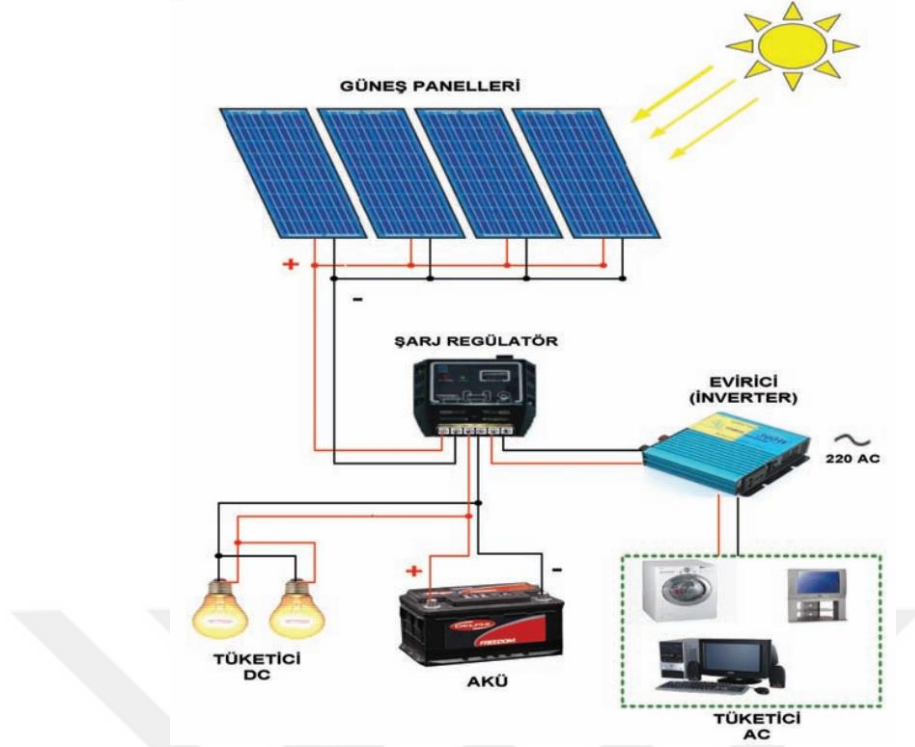
Çevresel Faktörler	PV Sistem Faktörleri	PV Sistem Kurulum Faktörleri
-Güneş ışınları/ Radyasyon -Modül Sıcaklığı -Toz Birikimi -Gölgeleme -Modülün kirlenmesi	-Pil verimliliği -Modül yapısı -PV Malzemesi -PV Atom yapısı -Modül verimliliği	-Kablo özellikleri -Eğitim açısı veya yönü -Uyumsuzluk etkileri

2.4.2 Fotovoltaik Sistemlerin Bileşenleri

Fotovoltaik sistemler, kullanım senaryosuna, bütçeye ve sistem gereksinimlerine bağlı olarak farklı yapılandırmalara sahip olabilir. Bu bileşenler, genel olarak fotovoltaik bir güneş enerjisi sisteminin temel yapı taşlarını oluşturur. Fotovoltaik sistemlerde temel eleman olan güneş panelleri haricinde birçok ekipman kullanılmaktadır. Güneş panellerinin üzerine düşen güneş ışınlarından elde edilen doğru akım, eviriciler aracılığıyla alternatif akıma dönüştürülebilmektedir. Sistem şebekeye bağlı ise şebeke bağlantı noktası, şebekeden bağımsız ise enerji depolamak ve kullanım için saklamak üzere akü grubu içermektedir. Panellerin

güvenli şekilde montajının yapılabilmesi ve güneşe doğru uygun açıda kurulumu için montaj ekipmanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca panellerden son ekipmana kadar bağlantıyı sağlamak üzere kablolar ve bağlantı ekipmanları kullanılmaktadır.

Fotovoltaik sistemlerde gerekli miktarda güneş paneli, güneş ışınlarından elde edilecek enerjinin toplandığı ilk ekipmandır. Güneş ışığının zayıf olduğu saatlerde veya gece boyunca enerji sağlamak için çoğunlukla sistemde akü bulundurulmaktadır. Güneş panelleri ve modüller aracılığıyla, gün içerisinde elektrik enerjisi üretimi yapılır ve bu enerji aküye depolanır. İhtiyaç duyulduğunda ise yüke gerekli olan enerji aküden sağlanır. Akünün fazla şarj veya deşarj olmasını önlemeye yönelik bir kontrol ünitesi olan şarj regülatörü, akü doluluk seviyesine göre güneş panellerinden gelen akımı veya yüke verilen enerjiyi sonlandırır. 220 V gerilim seviyesinde AC elektriğin gerektiği tasarımlarda, sistem içerisine evirici (invertör) eklenir ve aküde depolanan 12 Volt DC gerilim, 220 V gerilim seviyesine yükseltilerek 50 Hz sinüzoidal gerilim dalgasına dönüştürülür. Tasarımın gereksinimlerine bağlı olarak farklı ekipmanlar da sisteme dahil edilebilir. Sistemin özelliğine bağlı olarak, güneş panellerinin maksimum güç seviyesinde çalışmayı sağlayarak maksimum güç noktası izleyici cihazı da bulunabilir. Bu cihaz, güneş ışığının değişkenliğine bağlı olarak sistemden en yüksek verimi almayı sağlar. Tasarımın ana ekipmanları aşağıdaki Şekil 2.12’de görülmektedir.



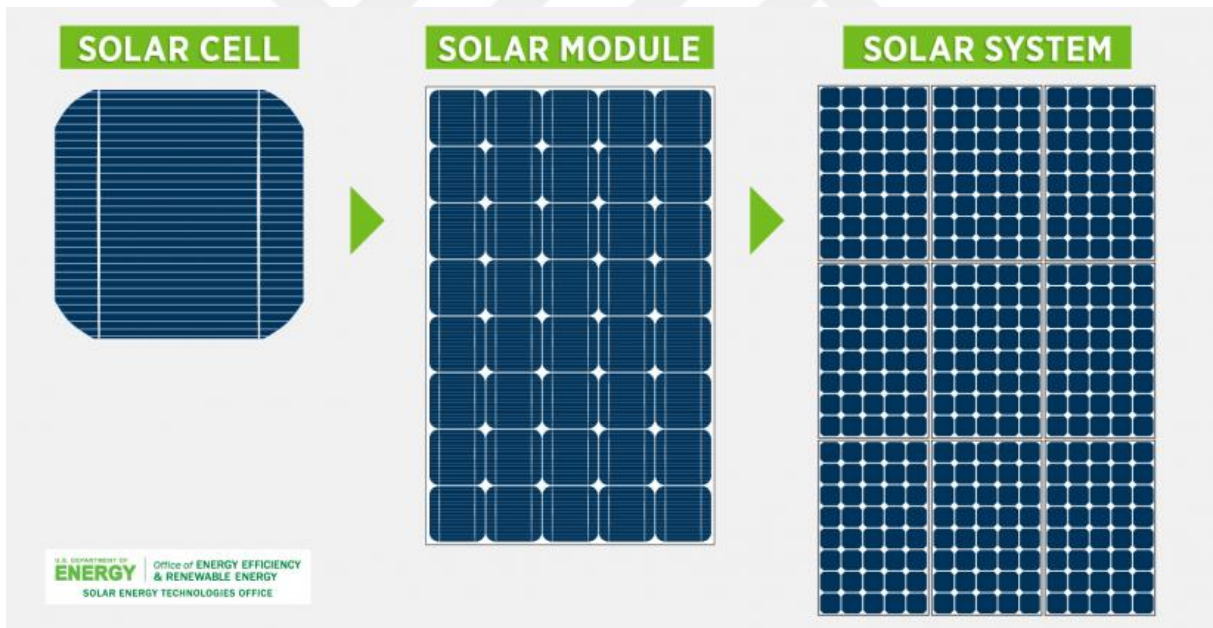
Şekil 2.12 Güneş Enerjisi Sistemini Oluşturan Temel Donanımlar

Şebeke bağlantılı güneş pili sistemleri genellikle küçük ölçekli uygulamalarda kullanılır. Evlerde veya küçük işletmelerde kullanıldığında, güneş panelleri genellikle çatılara monte edilir ve üretilen elektrik doğrudan binanın elektrik sistemine bağlanır. Bu sayede, güneş ışığı mevcut olduğunda, ev veya işyeri kendi enerji ihtiyacını karşılayabilir.

Bunun yanı sıra, ev veya işyeri sahipleri bazen ihtiyaçlarından daha fazla elektrik üretebilirler. Bu fazla enerji, elektrik şebekesine satılarak enerji üretimine katkıda bulunabilirler. Güneş ışığı yetersiz olduğunda veya tüketiciler tarafından talep edilen enerji arttığında elektrik şebekesinden enerji alınabilir. Bu tür bir sistem yapısında enerjinin depolanmasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Ancak, bazı durumlarda, elektrik şebekesindeki dalgalanmaları dengelemek veya acil durumlar için enerji yedekleme sağlamak amacıyla enerji depolama sistemleri (örneğin, aküler) kullanılabilir. Ancak, genellikle bu sistemler ek maliyet ve bakım gerektirir. Özetle, şebeke bağlantılı güneş pili sistemleri, küçük ölçekli kullanımlarda genellikle enerji depolaması gerektirmezler.

2.4.2.1 Fotovoltaik Modül ve Dizi

Güneş enerji santrallerinin temel bileşenlerinden biri, fotovoltaik (PV) güneş panelleridir. Fotovoltaik güneş panelleri, güneş ışığından aldıkları enerjiyi özel yarıiletken malzemeler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştüren unsurlardır. Bir fotovoltaik panelin temel yapı taşı fotovoltaik hücrelerdir. Bu hücreler, güneş ışığını yakalayıp içerdikleri yarıiletken malzeme üzerinden elektrik enerjisi üretirler. Şekil 2.13'te görüldüğü üzere tek bir hücre, genellikle mikrometre ölçeğinde ince bir tabaka şeklinde üretilir ve genellikle kare, dikdörtgen veya dairesel şekillerde olabilir. Birden çok hücre, panellerde bir araya getirilerek güneş dizileri oluşturulur. Her bir fotovoltaik hücre, genellikle düşük miktarda enerji üretir, bu yüzden hücreler, güneş panelleri oluşturmak için seri veya paralel şekilde bir araya getirilir. Elektrik üretimini artırmak için, paneller birbirine seri veya paralel olarak bağlanarak fotovoltaik bir dizi oluştururlar. Bu düzenek, büyük miktarda elektrik enerjisi üretmek için kullanılır ve güneş enerjisi sistemlerinin temelini oluşturur.



Şekil 2.13 PV hücre, modül, panel ve dizi (Solar Energy Technologies Office, 2023)

Güneş panelleri, güneş ışığının etkisiyle içlerinde bulunan yarı iletken malzeme üzerinde fotoelektrik etki yaratır. Bu etki, fotonlarla atomların etkileşime girerek elektronların serbest bırakılmasını sağlar. Serbest bırakılan bu elektronlar, panellerin içerisindeki devreyi aktive ederek akımın oluşmasını sağlarlar. Işık kaynaklı taşıyıcı üretimi ve toplanması, yarı iletken malzemenin yapısından kaynaklanır ve güneş panellerinin temel işleyiş prensibini oluşturur.

Güneş panellerinin kısa devre akımı, güneş ışığına maruz kaldıklarında fotovoltaiik etkisiyle oluşan elektronların akımının en yüksek olduğu durumu ifade eder. Bu durumda, panellerin pozitif ve negatif terminalleri birbirine doğrudan bağlandığında, bir devrede sıfır gerilim olmasına rağmen akım en yüksek değerindedir. Bu kısa devre akımı, güneş panellerinin tasarımı ve performansının değerlendirilmesinde önemli bir parametredir çünkü panelin maksimum güç noktasını belirler. Güneş panellerinin verimliliği ve performansı, kısa devre akımı gibi parametrelerle değerlendirilir ve bu parametreler panellerin tasarımında ve kullanımında dikkate alınır (Özyiğit, 2019).

Açık devre gerilimi, bir fotovoltaiik hücre veya panelin yüke bağlı olmadığı durumda, yani bir devreye akım akışı olmadığında ölçülen en yüksek gerilimi ifade eder. Bu durumda, hücre veya panel üzerindeki gerilim, ışık kaynaklı taşıyıcıların oluşturduğu potansiyel farkın maksimum değerine ulaşır. Fotovoltaiik hücreler, güneş ışığına maruz kaldıklarında elektronların serbest bırakılmasını sağlayarak bir gerilim oluştururlar. Ancak, bu gerilimde bir akım akışı olmaz çünkü devre kapalı değildir, yani bir yük bağlı değildir. Bu nedenle, bu durumda ölçülen gerilim, hücre veya panelin açık devre gerilimi olarak adlandırılır. Ancak, bir yük bağlandığında, yani bir devre oluşturulduğunda, akım akar ve bu akım nedeniyle gerilim düşer. Bu durumda ölçülen gerilim, yük bağlı olduğu durumda elde edilen gerilime denk gelir. Açık devre gerilimi, bir fotovoltaiik hücre veya panelin performansını değerlendirmek için önemli bir parametredir. Panelin üretkenliği ve verimliliği açısından önemlidir ve genellikle güneş panellerinin teknik özelliklerinde belirtilir (Özyiğit, 2019).

Fotovoltaiik Modüllerin Verimliliğini Etkileyen Faktörler

Fotovoltaiik (PV) hücrelerin verimliliğini etkileyen birçok farklı faktör bulunmaktadır. Bu faktörler, genellikle hücrenin yapısına, malzemesine ve çalışma koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Bazı önemli faktörler şunlardır:

- **Güneş Işınımı:** Güneş pili tarafından üretilen güç miktarı doğrudan alınan güneş ışınımına bağlıdır. Güneş ışınımı, gün boyunca değişkenlik gösterir ve genellikle öğle saatlerinde maksimum değerlerine ulaşır. Bu nedenle, bir fotovoltaiik (PV) modülün en yüksek güneş ışınımı seviyelerinden yararlanabilmesi için, yüzeyinin güneş ışığına dik olarak yönlendirilmesi önemlidir. Bir PV modülünün en yüksek elektrik üretim oranlarını elde etmek için, PV hücrelerinin eğim açısı coğrafi konuma göre ayarlanmalıdır. Özellikle,

güneş ışınlarına dik bir açıda olacak şekilde monte edilmiş bir PV modülü, maksimum güneş ışığı alımını sağlar. Bu nedenle, PV sistemlerinin kurulacağı coğrafi konuma ve güneşin hareketine bağlı olarak uygun eğim açıları seçilmelidir. Ayrıca, güneş izleyicileri kullanılarak PV hücreleri, gün boyunca güneşin hareketine göre otomatik olarak takip edilebilir. Bu, PV hücrelerinin güneş ışınlarına her zaman dik bir şekilde hizalanmasını sağlar ve mümkün olan maksimum ışınlamayı emmelerini sağlar. Güneş izleyicileri, PV sistemlerinin performansını artırabilir ve daha fazla elektrik üretimini sağlayabilir. Bu nedenle, PV sistemlerinin tasarımında, güneşin hareketine göre optimum performansı sağlamak için PV modüllerinin montaj açıları ve gerektiğinde güneş izleyicilerinin kullanımı önemlidir. Bu uygulamalar, güneş enerjisi sistemlerinin verimliliğini artırarak daha fazla elektrik üretimini sağlar.

- **Hücre Temizliği:** Hücrelerin yüzeylerinde biriken kir, toz veya diğer kirleticiler, güneş ışığının hücreye ulaşmasını engelleyebilir ve verimliliği azaltabilir. Bu nedenle, düzenli olarak temizlenmeleri gerekebilir. Martinez-Plaza ve ekibi, Katar'daki açık hava test tesisinde çeşitli fotovoltaik (PV) teknolojilerini inceleyerek, toz nedeniyle PV modül veriminde günlük yaklaşık % 0,45'lik bir azalma tespit etmiştir (Martinez-Plaza vd., 2015). Tanesab ve diğer araştırmacılar, tozun farklı fotovoltaik (PV) hücre tipleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Araştırmanın sonuçlarına göre, büyük boyutlu toz örneklerinin gözenekli olduğu ve daha fazla ışık geçişine izin verdiği belirlenmiştir. Ayrıca, köşeli ve köşegen şekilli tozların, eliptik ve küresel şekilli tozlara göre daha iyi optik özelliklere sahip olduğu gözlemlenmiştir (Tanesab vd., 2019).
- **Sıcaklık:** Yüksek sıcaklıklar, hücrelerin verimliliğini genellikle düşürür. Çünkü yüksek sıcaklıklar, elektron hareketliliğini azaltabilir ve hücrenin performansını olumsuz yönde etkileyebilir. Panelin sıcaklığı arttığında, genellikle modülün gerilim çıkışında bir azalma ve akımda küçük bir artış meydana gelir. Bu durum, PV panellerin elektrik üretimini etkiler ve tüm PV sisteminin güç çıkışını azaltır. Bu nedenle, PV sistemlerinin performansını optimize etmek için, iklimsel parametrelerin ve panel sıcaklığının dikkate alınması önemlidir. Bu bilgiler, PV sistemlerinin tasarımı ve çalışma koşullarının belirlenmesinde kullanılır (Santhakumari ve Sagar, 2019). Elibol ve ekibi, yaptıkları çalışmada ortam hava sıcaklığındaki her 1°C'lik artışın, amorf kristal panellerin verimliliğini % 0,029, çok kristalli panellerin verimliliğini % 0,033 artırdığını ve tek kristalli panellerin verimliliğini % 0,084 azalttığı sonucuna ulaşmışlardır (Elibol vd., 2017).

2.4.2.2 Fotovoltaik Sistem Akümülatörü

Fotovoltaik sistemler genellikle güneş enerjisi üretimi için kullanılır ve bu sistemler genellikle güneş panellerinden oluşur. Ancak, fotovoltaik sistemler genellikle bir enerji depolama cihazına da ihtiyaç duyarlar. Bu cihazlar genellikle akülerdir. Fotovoltaik sistem aküleri, güneş panelleri tarafından üretilen enerjiyi depolamak için kullanılır. Bu depolama, güneş ışığı mevcut olmadığında veya talep arttığında kullanılabilir. Aküler, genellikle kurulumun bir parçası olarak fotovoltaik sistemlere entegre edilir ve genellikle DC (doğru akım) enerjiyi depolamak için kullanılır.

Fotovoltaik sistem aküleri, evlerde, işyerlerinde veya uzak bölgelerde elektrik ihtiyacını karşılamak için kullanılır. Bu aküler, güneş ışığı bol olduğunda enerji depolamak için kullanılır ve daha sonra ihtiyaç duyulduğunda elektrik sağlarlar. Bu, güneş enerjisi sistemlerinin güvenilirlik ve süreklilik sağlamasına yardımcı olur.

Genel olarak üç ana tip akü bulunmaktadır: Bu tipler; Kuru, AGM ve GEL tipi akü gruplarıdır. Bunlar arasında, kuru tip aküler fotovoltaik sistemlerde daha yaygın olarak kullanılır. Akülerin kapasite değerleri genellikle amper-saat (Ah) cinsinden belirtilir. Akülerin ömrünü uzatmak için genellikle kapasitesinin % 50 kapasitesinin altında şarj edilmeleri önerilir. Bu, derin deşarj önler ve akünün ömrünü uzatır. Akülerin verimliliği genellikle % 90 civarındadır, yani aküye giren enerjinin % 90'ı depolanır ve kullanılmak üzere geri alınabilir. Bu, akülerin güvenilir bir şekilde enerji depolamak için etkili bir seçenek olduğunu göstermektedir (Güneş Sistemleri, 2024).

2.4.2.3 Şarj Kontrol Cihazı

Şarj kontrolörleri fotovoltaik panellerden gelen akımı düzenleyerek aküye iletilmesini sağlarlar. Bu kontrolörler, fotovoltaik panelin ürettiği enerjiyi doğru bir şekilde yönetir ve aküyü aşırı şarj durumundan korur. Doğru şarj kontrolörleri aynı zamanda akünün tam dolmasını ve aşırı kullanımlarda deşarj olmasını engellemektedir (Güneş Sistemleri, 2024). Bu kontrolörler genellikle akünün durumunu izler ve akünün tamamen dolması durumunda güneş panellerinden gelen enerjiyi keserek aşırı şarjı önlerler. Ayrıca, aküdeki enerji seviyesi düştüğünde, kontrolör aküyü aşırı deşarjdan koruyacak şekilde güneş panellerinden gelen enerjiyi kesmektedir. Bu kontrolörler, fotovoltaik sistemlerin güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak ve akünün ömrünü uzatmaktadır. Ayrıca, güneş panellerinden gelen enerjinin optimum şekilde

kullanılmasını sağlayarak sistemin performansını arttırmaktadır. Bir regülatör seçimi yapılırken en kritik unsur, regülatörün ihtiyaç duyulan maksimum akımı karşılayabilme kapasitesidir. Ayrıca, regülatörün, kullanılan bataryanın voltajıyla tam uyumlu olması da göz önünde bulundurulmalıdır (Arden Enerji, 2024).

2.4.2.4 Dönüştürücü

Fotovoltaik sistemlerde kullanılan evirici (inverter), güneş panellerinden elde edilen doğru akım (DC) elektriğini, alternatif akım (AC) elektriğine dönüştüren cihazlardır. PV sistemlerinde inverterlerin doğru şekilde kurulması ve işletilmesi önemlidir. Yüksek sıcaklıklarda, inverterlerin kapalı bir hizmet odasına yerleştirilmesi, sıcaklık artışına ve dolayısıyla inverterlerin performansının azalmasına neden olurlar. Bu durum inverterin ömrünü kısaltabilir ve verimliliğini düşürebilir.

İnverterlerin verimli çalışabilmesi için üretici tarafından belirtilen çalışma sıcaklıklarını sağlamak önemlidir. Bunun için uygun havalandırma ve hava akışı sağlanmalıdır. Ayrıca inverterler, nem, sıcaklık, su buharı ve toz parçacıkları gibi çevresel koşullardan korunan yerlere monte edilmelidir.

Aşırı gerilim koruma cihazlarının (parafudr) kullanılması da önemlidir. Bu cihazlar, topraklama mümkün olmayan alanlarda veya yıldırıma maruz kalan bölgelerde inverterleri yıldırım nedeniyle oluşabilecek yüksek gerilimin olumsuz etkilerinden korurlar. Bu, inverterlerin güvenliğini ve uzun ömürlülüğünü sağlamak için önemli bir adımdır. (Santhakumari ve Sagar, 2019)

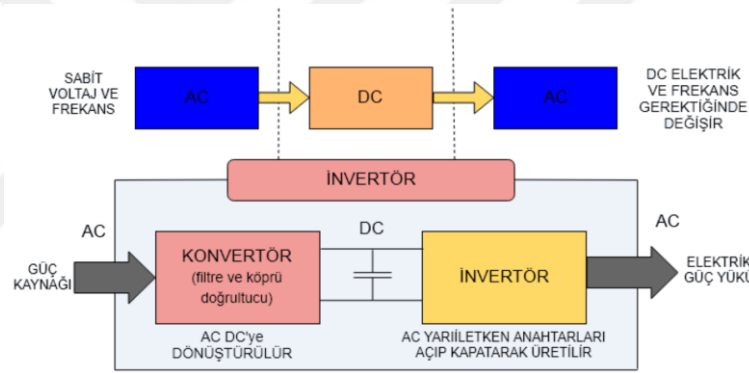
Güneş enerjisi sistemlerinde, akü grupları veya güneş panellerinden alınan doğru akım (DC) değerleri, 220 V veya 380 V alternatif akım değerlerine (AC) dönüştürülürler. Güneş enerjisi sistemlerinin hem şebekeye bağlı (on-grid) hem de şebekeden bağımsız (off-grid) olduğu durumlarda, bir eviriciye ihtiyaç duyulmaktadır.

On-grid sistemlerde, güneş panelinden üretilen gerilim değeri 220 V gerilim seviyesinde şebekeyi beslemektedir. Bu tip sistemler için kullanılan eviriciler genellikle tam sinüs formunda alternatif akım üretirler. Bununla birlikte, off-grid sistemlerde modifiye sinüzoidal eviriciler de kullanılabilir. Modifiye sinüzoidal eviricilerin çıkışları kare dalga formundadır ve tam sinüzoidal eviriciler gibi saf sinüzoidal çıkış dalgası üretmezler. Bu nedenle, modifiye

sinüzoidal eviricilerin hassas cihazların zamanla bozulmasına yol açabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Ancak, fiyatları tam sinüzoidal eviricilere göre daha uygun olabilir.

Tam sinüzoidal eviriciler, tam dalga çıkışı oluşturarak enterkonnekte şebeke elektriği ile aynı standartlarda akım değerleri üretirler. Bu nedenle hassas cihazlar için, sistemde kullanılan diğer cihazlara zarar vermemeleri için tam sinüzoidal eviriciler tercih edilirler.

Solar kullanım için en uygun olan seçeneklerden biri, şarj regülatör devresi içeren akıllı eviricilerdir. Akıllı eviricilerin avantajları arasında uygulama kolaylığı, yedek parça bulunabilirliği, bakım kolaylığı, şebeke veya jeneratör destekli şarj ve tüketim seçeneklerinin bulunması gibi özellikler yer almaktadır. Bu özellikler, fotovoltaik sistemlerin yüksek performanslı ve esnek bir şekilde kullanılmasını sağlarlar (SBSOLAR, 2024). Şekil 2.14’de evirici yapısı görülmektedir.



Şekil 2.14 İnverter Yapısı (Özyiğit,2019)

Günümüzde, güneş enerji sistemlerinde kullanılan eviricilerin verim değerleri genellikle % 98 gibi yüksek seviyelere ulaşabilmektedir. Evirici seçimi yaparken, genellikle anlık talep edilebilecek maksimum gücün 1.5 katı kadar bir kapasite tercih edilmektedir. Bu, sistemdeki ani yük artışları veya dalgalanmaları karşılayabilmek için önemlidir. Özellikle şebekeye bağlı sistemlerde, güneş panelinden üretilen enerjinin şebekeye dengeli bir şekilde aktarılabilmesi için tam sinüzoidal eviriciler tercih edilir. Çünkü tam sinüzoidal eviriciler, saf sinüzoidal dalga formunu oluşturarak şebeke elektriğine daha yakın bir değerde akım üretirler. Bu, şebekeye bağlı cihazların ve ekipmanların daha stabil bir şekilde çalışmasını sağlar ve cihazlara zarar verme riskini en aza indirir. Bu nedenle, güneş enerjisi sistemlerinde modifiye sinüzoidal evirici yerine tam sinüzoidal eviriciler tercih edilmesi, sistem performansını ve güvenilirliğini artırır.

2.5 GÜNEŞ SİMÜLASYON PROGRAMLARI

Fotovoltaik sistemlerin uygulanabilirliği, verimliliği, olası zorluklar ve teknik özellikler ile ekonomik fizibilite gibi bir dizi kritik verilerin önceden değerlendirilmesi, projenin başarılı bir şekilde hayata geçirilmesi için büyük önem taşımaktadır. Bu ön analiz süreci, projenin başlangıcından sonuna kadar doğru kararlar alınmasını sağlayarak beklenmedik sorunların önceden tanımlanmasına yardımcı olmaktadır.

Fotovoltaik sistemlerin her geçen gün öneminin artması ile birlikte verimliliklerinin de büyük oranda geliştirilmesi sağlanmaktadır. Bir güneş enerji santralinde bulunan bütün ekipmanların uygun fayda-maliyet ilişkisi ile kalite seviyesi projenin verimliliğini etkilemektedir. Projenin uygulama aşaması öncesi fizibilite çalışmaları sırasında çalışmalara öngörü ve gerçeklik kazandıran simülasyon programları üretilerek kullanıcıların hizmetine sunulmaktadır. Bu simülasyon programları bir fotovoltaik enerji üretim tesisinin fizibilite aşamasında önemli bir yere sahip olmuştur. Geliştirilen sistemler sayesinde yatırımcıların fotovoltaik sistem tarafından üretilebilecek ve şebekeye veya sisteme sağlanabilecek enerji miktarını öğrenebilmektedir. Simülasyon programı sayesinde oluşturulan rapor ile çalışmayı yapan kullanıcı ve yatırımcıya tasarım konusunda yardımcı olduğu gibi sonuç hakkında da bir senaryo ortaya koymaktadır. Simülasyon programını kullanan kişinin teknik bilgisi de büyük önem taşımaktadır. Simülasyon çalışmaları sırasında doğru parametrelerin tanımlanması, simülasyon sonuçları ile gerçek değerler arasındaki farkın azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

Simülasyon programları, yatırımcıların enerji üretimi ile ilgili rapor desteğine ek olarak planlama süreçlerine de destek sağlamaktadır. Temelde Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması dahilinde üretilerek ve şebeke elektriğine aktarılacak enerji miktarı gibi bilgiler yatırımcılar için önemlidir. Performans değerlendirmesi, finansal verim hesaplamaları ve karbon emisyonu azaltımı gibi kriterler, fotovoltaik sistemlerin faydalarını göstererek yatırımcıya karar verme sürecinde etkili olabilecek önemli parametreler sunar. Simülasyon programları, yatırımcılara ve tesis planlaması yapan mühendislere tesis şeması, parametreler, veri sayfaları, özelleştirilmiş hesaplamalar, ekipman sayı listeleri, devre şemaları, imalat ve kurulumla dair yönergeleri ile şebeke dağıtım şirketi için gereken belgeler gibi bilgileri içeren bir rapor sunma konusunda yardımcı olabilir (Haselhuhn & Hemmerle, 2012).

Tasarım aşamasında olan bir güneş enerji sisteminde karşılaşılan sorunlardan birisi de gölgelenmeden kaynaklanan problemlerdir. Bu sorunlar, hem çatı üstü hem de arazi tipi fotovoltaik sistemlerde karşılaşılabılır. Çatı üstü sistemlerde baca, parapet gibi çıkıntılar, arazi tipi sistemlerde ise sehpaların gölge oluşturması, panellerde oluşan gerilimlerde azalmaya neden olabilir. Bu da elektrik üretiminde kayıplara sebebiyet vermektedir. Simülasyon programları, tasarlanan sistemin gölgelenme etkilerini önceden tahmin etmek ve önlem almak için önemli bir araçtır. PVSOL ve PVSyst gibi ticari programlar, 3 boyutlu gölgelenme imkanları sunmaktadırlar. PVSOL yazılımında, bypass diyot devreleri ile akım-gerilim eğrileri üzerindeki etkileri dikkate alınarak gölgelenme analizi modül düzeyinde gerçekleştirilir. Buna karşılık, PVSyst yazılımı gölgelenmeyi önceden tanımlanmış dizi konfigürasyonları üzerinden, alan bazında veya fotovoltaik modüllerin tamamını kapsayan bir perspektifte değerlendirir. Bu simülasyon programları, tasarımcılara sistemin optimize edilmesi için önemli bilgiler sağlamaktadır ve gölgelenme kaynaklı kayıpların minimize edilmesine yardımcı olmaktadır. Bu ise fotovoltaik tesislerin verimliliğini artırmaktadır.

Simülasyon sonuçlarını doğru bir şekilde elde etmek için kullanılan meteorolojik verilerin gerçekçi ve bölgeye özgü olması önemlidir. Fotovoltaik sistemlerin performansı, güneş ışığı miktarı, hava sıcaklığı, rüzgar hızı ve yönü gibi meteorolojik faktörlere bağlıdır. Bu nedenle, simülasyon çalışmalarında kullanılan meteorolojik verilerin doğruluğu, sonuçların güvenilirliği üzerinde büyük etkiye sahiptir.

Yerel meteorolojik verilerin kullanılması, sistemin kurulacağı bölgenin iklim koşullarına daha iyi uyum sağlamasını ve gerçek dünya koşullarını daha iyi yansıtmalarını sağlamaktadır. Bu durum tasarım bileşenlerinin daha doğru olmasını sağlayarak sistemin gerçek performansının daha doğru tahmin edilmesine olanak sağlayacaktır.

Dolayısıyla, fotovoltaik sistemlerin simülasyonunda kullanılan meteorolojik verilerin, sistemin kurulacağı bölgeye en yakın konumdaki veriler içinde olması önemlidir. Bu durum, daha etkili ve güvenilir sonuçlar elde etmek için kritik bir faktördür. Artan güneş enerjisi santrali (GES) kurulumları, fotovoltaik sistemlerin tasarımı, simülasyonu ve veri analizi için kullanılan yazılımlara olan talebi artırmıştır. Bu yazılımlar, fotovoltaik projelerin planlanması, optimize edilmesi ve yönetilmesinde kritik bir rol oynamaktadır.

Tasarım ve simülasyon yazılımları, mühendislerin ve tasarımcıların sistemin en verimli şekilde çalışmasını sağlamak için panel konumlandırması, gölgelenme analizi, enerji üretimi tahminleri gibi önemli faktörleri değerlendirmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca bu yazılımlar, farklı sistem konfigürasyonlarını karşılaştırarak en uygun olanının seçilmesine imkan vermektedir.

Veri analizi yazılımları ise mevcut sistemlerin performansını izlemek, verimlilik kayıplarını belirlemek ve bakım zamanlamasını optimize etmek için kullanılır. Güneş paneli üretim verileri, meteorolojik koşullar ve elektrik üretimi gibi verilerin analizleri, sistemlerin güvenilirliğini artırarak işletme maliyetlerini düşürmektedir. Bu yazılımların talebi, güneş enerjisi sektöründeki büyüme ile paralel olarak artmıştır ve sektörün daha verimli, güvenilir ve sürdürülebilir olmasına katkıda bulunmuştur. Bu nedenle, fotovoltaik sistemlerin tasarımı, simülasyonu ve veri analizi için kullanılan yazılımların geliştirilmesi ve iyileştirilmesi, sektörün ilerlemesinde önemli bir rol oynamaktadır. Çizelge 2.7’de fotovoltaik enerji üretimi üzerine destek sağlayan simülasyon programları ve önde gelen avantajları verilmektedir.

Çizelge 2.7 GES projelerinde kullanılan simülasyon yazılımları ve bu yazılımların başlıca avantajları (Kınalı,2019)

Yazılım Adı	Yazılım Geliştirici	Yazılımın Avantajı	Avantajı
Archelios	University of Savoie, France	GES sistemi boyutlandırma ve planlama, Güneş ışınlamı hesaplama	Kullanımı kolay
Calsol	INES, Lyon, France	GES sistemi boyutlandırma ve planlama	Resmi kaynaktan meteorolojik veriler elde etme
Homer	National Renewable Energy Laboratory, USA	GES sistemi boyutlandırma ve planlama, finansal çalışmalar	Hibrit sistem boyutlandırma
Pv f-chart	University of Wisconsin, USA	GES sistemi boyutlandırma ve planlama	Komple bir yazılım
PVGIS	European Commission	GES sistemi boyutlandırma ve planlama	Kullanımı kolay, iklim verisi haritalama
PVSOL	Valentin company, Germany	GES sistemi boyutlandırma ve planlama	Komple, grafiksel araçlar
PVSyst	University of Geneva, Switzerland	Komple GES sistemi boyutlandırma ve planlama	Esnek, grafiksel araçlar, gölgeleme
Pvwatts	National Renewable Energy Laboratory, USA	GES sistemi boyutlandırma ve planlama	Doğru hesaplamalar
Retscreen	Natural Resources, Canada	Çevresel ve finansal çalışmalar	NASA'nın meteorolojik veri tabanını kullanabilme

2.5.1 PVSyst

PVSyst programı, İsviçre'nin Cenevre Üniversitesi'nde fizikçi André Mermoud ve elektrik mühendisi Michel Villoz ile birlikte geliştirilmiştir. Fotovoltaik sistemlerin tasarımı, bilgi analizi ve benzetim yapılabilmesi amacıyla kullanılan bu yazılım, off-grid, on-grid, su pompa

sistemleri ve DC şebekeli tesis türleri için detaylı simülasyonlar gerçekleştirebilir. PVSyst, ön fizibilite çalışmaları, sistem boyutlandırması ve finansal analiz değerlendirmeleriyle fotovoltaik projelerin teknik ve ekonomik açıdan optimize edilmesine olanak tanır. Bu sayede kullanıcılar için, farklı senaryolar altında sistemin performansını değerlendirebilir ve optimize edebilirler. (Umar, Bora, Banerjee, & Panwar, 2018). Bu yazılım, çeşitli fotovoltaik sistem türleri için ön fizibilite çalışmaları, sistem boyutlandırması ve finansal analizler yapılmasına olanak sağlamaktadır. Şebekeye bağlı sistemlerden bağımsız sistemlere, pompalama sistemlerinden DC şebekeli sistemlere kadar geniş bir yelpazede kullanılabilir.

PVSyst programının meteorolojik verilerini sağlamak için Meteonorm 7.1 veritabanı kullanılmaktadır. Meteonorm, meteorolojik veri tabanı olan bir yazılımdır. Fotovoltaik enerji sistemleri ve yenilenebilir enerji projelerinin planlanması ve değerlendirilmesi için kullanılır. Meteonorm, güneş ışınımı, sıcaklık, rüzgar hızı ve diğer meteorolojik parametreler gibi verileri içermektedir. Meteonorm veritabanındaki aylık veriler, fotovoltaik sistemlerin tasarımı ve analizleri için genellikle yeterli olsa da, bazı durumlarda saatlik verilere de ihtiyaç duyulabilir. Bu durumlarda, PVSyst kullanıcıları, Meteonorm'dan gelen aylık verileri temel alarak saatlik verileri de hesaplayabilirler. Ancak, sıcaklık ve rüzgar hızı gibi parametreler için Meteonorm'un doğrudan verileri kullanıldığında daha güvenilir sonuçlar elde edilir. Bu nedenle, PVSyst kullanıcıları genellikle Meteonorm veritabanını tercih ederler (PVsyst, 2023).

Sistem konfigürasyonu, bir panel ve bir evirici seçildiği durumda, sistem tasarımcısı tarafından proje lokasyonunda kurulacak güce dayandırılarak program ile otomatik şekilde gerçekleştirilir. En uygun tesis tasarımı, DC/AC oranlarının farklılığına bağlı olarak inverterin aşırı yük kayıplarındaki değişimi göz önünde bulundurularak belirlenir. Program, kablolar arasındaki gerilim düşüşlerini, aynı stringdeki modüllerin birbirleri arasında oluşabilecek uyumsuzlukları, düşük/yüksek sıcaklık değerlerinden kaynaklanabilecek kayıpları, trafo kaybını, kirlenme ve gölgelenme gibi çeşitli faktörleri tanımlayarak konfigüre eder. Bu düzenleme ve tanımlar, daha yüksek performansa sahip olabilecek tesis tasarımının gerçekleştirilmesini sağlar.

2.5.2 PVSOL

PVSOL, fotovoltaik enerji sistemlerinin tasarımı ve simülasyonu için kullanılan bir yazılımdır. Güneş paneli sistemlerinin kurulumu ve performansının değerlendirilmesi sürecinde kullanıcılarına yardımcı olmaktadır. PVSOL, sistem tasarımını oluştururken coğrafi konum,

panel tipi, eğim açısı, yönelim gibi parametreleri dikkate almaktadır ve güneş ışıınının yanı sıra gölgelendirme etkilerini de hesaba katmaktadır. Ayrıca, finansal analiz araçları sunarak yatırım getirisi ve geri ödeme süresi gibi ekonomik faktörlerin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. PVSOL, fotovoltaik projelerin planlanması ve optimize edilmesi sürecinde mühendisler ve tasarımcılar için güvenilir bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Güneş enerjisi tesislerinin gerçek sisteme yakın tasarımı yapılarak girilen veriler ışığında simülasyonlar gerçekleştirilmektedir. PVSOL programı detaylı olacak şekilde elektrik üretim santrali tasarımı yapabilen bir programdır. Programın içinde 3 boyutlu tasarım alanı bulunmaktadır. Bu kısım, arazi görünümü, nesne görünümü, modül kapsama alanı, modül montajı, modül konfigürasyonu ve kablo planı seçenekleri olmak üzere altı bölümden oluşur. 3 boyutlu cisimlere göre yapılan gölgelenme analizleri sayesinde, fotovoltaik sistemlerin gölgelenme kayıpları hem hesaplanmaktadır hem de görsel olarak sunulabilmektedir. 3 boyutlu gölgelenme ekranı, yıl içerisinde herhangi bir zaman diliminde modüle düşebilecek gölgelenme değerlerini göstermektedir (İşler, 2020).

PVSOL, gölge hesaplama özelliği sayesinde fotovoltaik sistemlerin gölgeleme kayıplarını hesaplayarak görseller oluşturmaktadır. Gölge hesaplama modülü, güneş enerjisi sistemlerinin verimini etkileyen kritik bir etkidir. Gölgeleme, güneş ışığının panel üzerine düşmesini engelleyen nesnelerin (binalar, ağaçlar, çevredeki yapılar vb.) varlığından kaynaklanır. Bu nesnelerin gölgelemesi, panelin üretimini azaltabilir veya hatta durdurabilir.

Gölge hesaplama, bir PV sisteminin tasarımında ve yerleşiminde dikkate alınması gereken önemli bir adımdır çünkü gölgelenme, sistem verimliliğini önemli ölçüde etkileyebilir. Bu nedenle, gölgelenme analizi, sistemin en uygun şekilde konumlandırılması ve bileşenlerin doğru bir şekilde yerleştirilmesi için önemlidir. Bu özellik, sistemin optimize edilmesi ve en verimli şekilde tasarlanması için önemlidir. Yazılım ayrıca finansal analiz araçları da sunmaktadır. Yatırım getirisi, geri ödeme süresi ve diğer finansal göstergeleri hesaplayarak kullanıcıların projenin ekonomik performansını değerlendirmesine yardımcı olmaktadır. PVSOL, fotovoltaik projelerin planlanması ve optimize edilmesi sürecinde mühendisler ve tasarımcılar için önemli bir araçtır.

2.5.3 BlueSOL

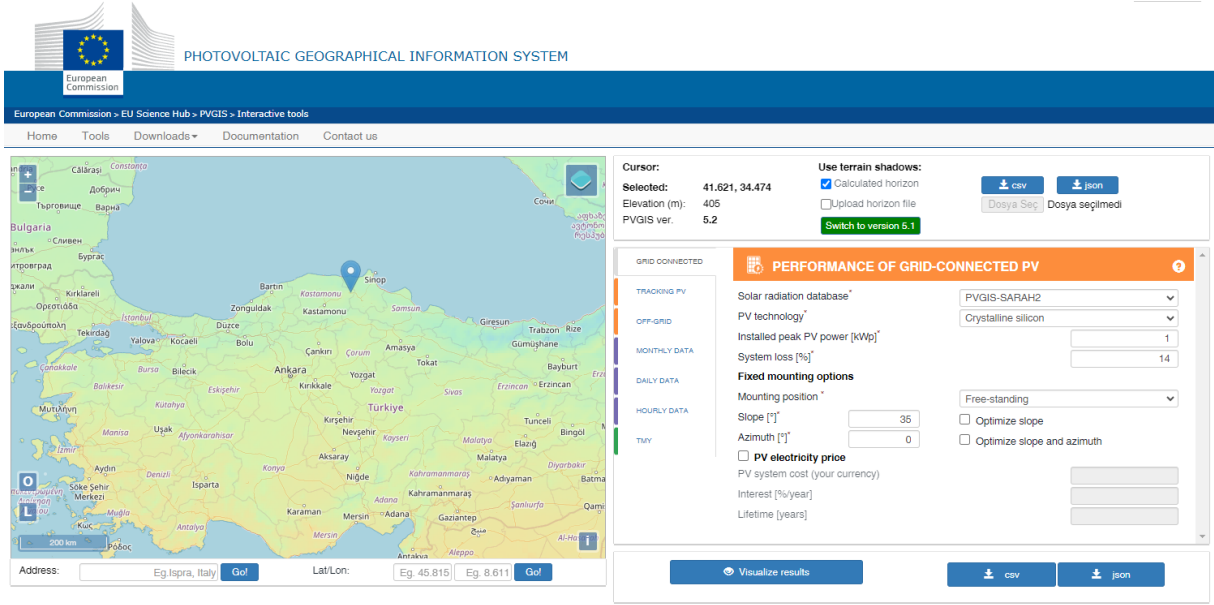
Bluesol yazılım modeli, güneş enerjisi sistemlerinin fizibilite çalışmalarını planlamak için tasarlanmış bir programdır ve Microsoft'un kullanıcı ara yüzünü yardımı ile modelleme işlemlerini gerçekleştirir. BlueSol programının başlıca sunduğu özellikler şunlardır:

- Çalışma yapılacak alanın harita içerisinde otomatik şekilde seçilebilmesine imkan sağlayarak, 3 boyutlu gözlemlene seçeneği oluşturabilmektedir.
- Çalışma alanını optimum seviyede kullanılarak kayıpları azaltmakta ve sistem verimliliğini arttırabilmektedir.
- Üretim tesisi içerisinde kullanılan ekipmanların (inverter, panel, akü vs.) program arayüzü sayesinde otomatik yerleştirilebilmesine imkan sağlamaktadır.

2.5.4 PVGIS

Avrupa Komisyonu'nun Ortak Araştırma Merkezi tarafından geliştirilen PVGIS yazılımı, çevrimiçi olarak erişilebilen ücretsiz bir fotovoltaik enerji hesaplama aracıdır. Bu uygulama, kurulum yapılan konum için ortalama günlük ve aylık elektrik enerjisi üretimini sağlar. Ayrıca, metrekare başına ortalama aylık ve yıllık güneş ışınım miktarını grafik ve tablo olarak sunar. Ek olarak, yerel ortam sıcaklığı kullanılarak tahmini kayıpların hesaplanması sağlanır. Bu kayıplar arasında sıcaklık ve düşük ışınım nedeniyle oluşan kayıplar, açısız yansıma etkilerinden kaynaklanan kayıplar, kablo kayıpları, inverter kayıpları ve kombine fotovoltaik sistem kayıpları bulunur. Bu veriler, kullanıcılara güneş enerjisi sistemlerinin performansını değerlendirme ve optimize etme konusunda kapsamlı bir görünüm sunar.

PVGIS, fotovoltaik sistemlerin tasarımı ve analizinde kullanılan çevrimiçi bir yazılım aracıdır. Coğrafi bilgi sistemlerini kullanarak, ay ve yıl bazında öngörülen elektrik enerjisi üretim kapasitesini değerlendirmektedir. Bu hesaplama işlemi, 10 yıl boyunca toplanan yatay ve yayılmış radyasyon bilgilerini hesaba katarak gerçekleştirilir. Ayrıca, günlük ışınım değerinin ay bazında ortalaması da sunulur. Bahsedilen bilgiler, Avrupa kıtasına yer alan 566 yeryüzü istasyonundan elde edilir (Pavlovic vd. 2013). Son olarak sistem kayıpları ile ilgili rapor sunabilme kapasitesine sahip olan bu program yüksek sıcaklık, düşük ışınım, kablo, inverter ve kombine sistem kayıpları ile ilgili bilgiler sunmaktadır. Şekil 2.15'de PVGIS sistem arayüzü gösterilmiştir.



Şekil 2.15 PVGIS Sistem Arayüzü

2.5.5 HOMER

HOMER, ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı aracılığıyla yenilenebilir enerji sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu için oluşturulmuş bir yazılım aracıdır. Enerji sistemlerinin ekonomik ve teknik analizlerini yaparak, projelerin tasarım sürecinde doğru kararların alınmasına yardımcı olmaktadır. Özellikle hibrit enerji sistemleri, mikro şebekeler ve uzak bölgelerde enerji çözümleri geliştiren projelerde kullanılır. Ekonomik, teknik ve çevresel parametreleri dikkate alarak, enerji sistemlerinin en verimli şekilde tasarlanmasına imkan sağlar. Güneş, rüzgar, batarya, jeneratör gibi farklı enerji kaynaklarının birleştirilerek hibrit enerji sistemlerinin oluşturulmasına olanak tanır.

HOMER, enerji maliyetlerini ve verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için sistem tasarımı ve optimizasyonu yaparken, çevresel ve ekonomik faktörleri de göz önünde bulundurmaktadır. Mikro şebekeler ve uzak bölgelerdeki enerji çözümleri için yaygın olarak kullanılmaktadır ve farklı enerji kaynaklarının en verimli kombinasyonlarının oluşturulmasına imkan sağlamaktadır.

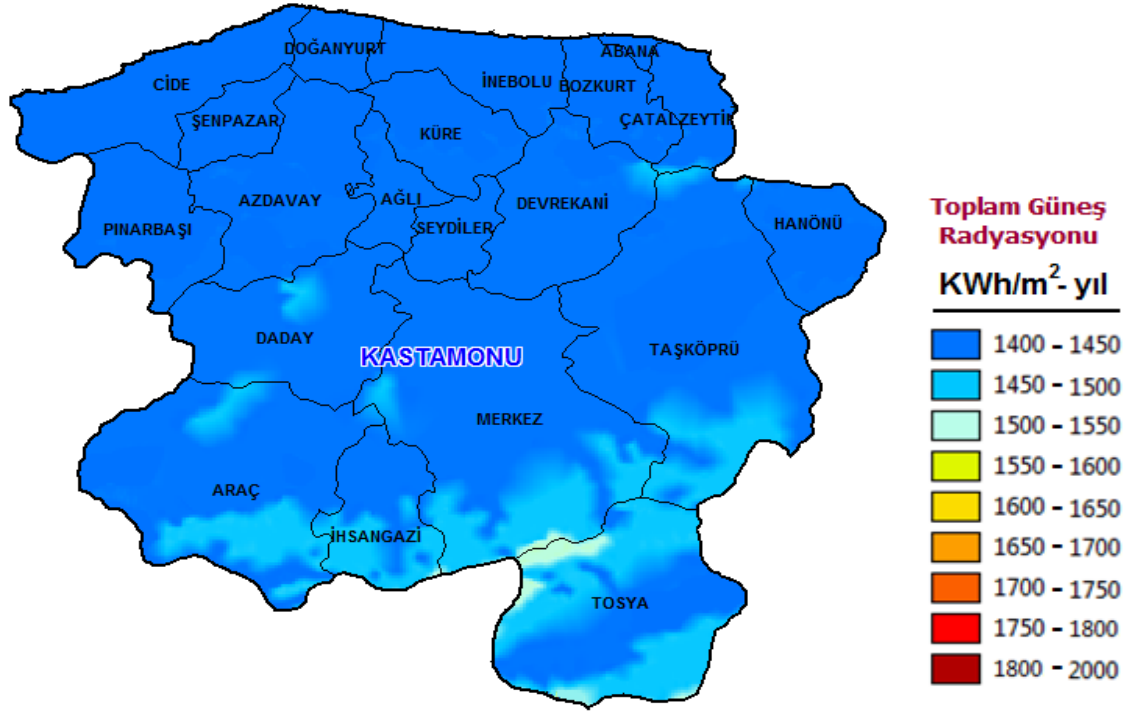
BÖLÜM 3

MATERYAL VE METOT

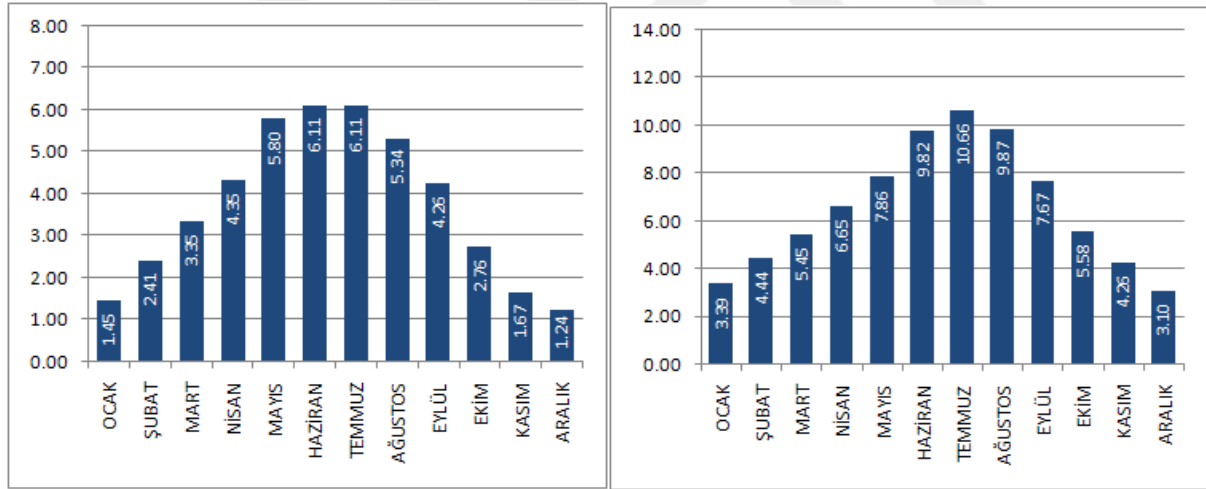
3.1 ÇALIŞMA ALANI

Hanönü Güneş Enerji Santrali, Hanönü (Kastamonu) Belediyesi tarafından ihalesi yapılarak İller Bankası Kastamonu Bölge Müdürlüğü tarafından izleme denetimli yürütülerek 2018 yılında faaliyete geçirilmiştir. İlçede gerek göçün kısmen geri oluşumu gerekse de inşaat ve maden sektöründeki gelişmeler sonucu nüfus artışı yaşanmış olup, buna bağlı olarak su ihtiyacı artış göstermiştir. Son yıllarda oluşan kuraklık nedeniyle de cazibeli sularda önemli ölçüde azalma yaşanmış terfili içme ve kullanma suyu ihtiyaçları artmıştır. İçme suyu pompaları kaynaklı enerji sarfiyatı Belediye için yüksek seviyelere ulaşmıştır. Uzun vadede belediyeye büyük mali yük getirecek olan bu elektrik enerjisi harcamasının düşürülmesi amacıyla Hanönü Güneş Enerji Santrali kurulmuştur. Kurulumu yapılan alan Belediye tahsisinde yer aldığı için herhangi bir kiralama veya tahsis ücreti masrafı oluşmamıştır.

Kurulumu yapılan alan için soğuk karasal iklim hakim olmaktadır. Türkiye'nin günlük ortalama güneşlenme sürelerinin genel ortalaması incelendiğinde santral kurulumu yapılan Kastamonu bölgesinin yeterli seviyede olduğu görülmektedir. Kastamonu ili için ortalama güneşlenme süresi 2,1 saat ile en düşük Aralık ayında gerçekleşirken en yüksek değeri ise 9,7 saat ile Temmuz ayında gerçekleşmektedir (MGM, 2023). Kastamonu iline ait ışınlam haritası Şekil 3.1.'de detaylı olarak gösterilmiş olup Şekil 3.2'de de güneş enerjisi potansiyeli ile radyasyon değerleri gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Kastamonu İli Işınım Haritası (GEPA, 2023)



(a)

(b)

Şekil 3.2 Kastamonu ili güneş enerjisi potansiyeli grafikleri (a) Global radyasyon değerleri (kWh/m²) (b) Güneşlenme süreleri (saat) (GEPA, 2023)

Kastamonu ilinin güneş enerjisi potansiyeli incelendiğinde ışınlım ve güneşlenme süreleri bakımından Türkiye ortalamasının altında bir konumda bulunduğu görülmektedir. Güneş

enerjisi yatırımı açısından bu durum Türkiye'nin güney kesimlerine göre daha uzun vadede ilk yatırım maliyetini karşılayacağını göstermektedir. Ancak bu durum yatırım yapılamayacağı veya kar etmeyeceği anlamına gelmemektedir.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün veri tabanında Kastamonu iline ait Meteorolojik veriler Çizelge 3.1'de verilmiştir.



Çizelge 3.1 Kastamonu İline Ait Meteorolojik Veriler (MGM,2024)

KASTAMONU	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
<i>Ortalama Sıcaklık (°C)</i>	-1,0	0,8	4,4	9,6	14,1	17,5	20,2	20,0	15,9	10,9	5,3	1,0	9.9
<i>Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)</i>	3,3	6,2	10,9	16,6	21,3	24,7	27,9	28,2	24,0	18,2	11,1	5,0	16.4
<i>Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)</i>	-4,5	-3,5	-0,9	3,4	7,6	10,5	12,3	12,3	8,9	5,2	0,9	-2,4	4.2
<i>Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)</i>	2,3	3,5	4,4	5,6	7,1	8,4	9,7	9,4	7,3	5,4	3,7	2,1	5.7
<i>Ortalama Yağışlı Gün Sayısı</i>	12,34	11,35	12,17	12,98	14,57	12,05	6,37	5,68	6,62	8,98	9,56	11,96	124.6
<i>Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm)</i>	29,5	27,1	35,9	51,4	75,4	74,5	32,6	31,5	30,7	34,2	28,6	33,7	485.1
<i>Ortalama Sıcaklık (°C)</i>	-1,0	0,8	4,4	9,6	14,1	17,5	20,2	20,0	15,9	10,9	5,3	1,0	9.9
<i>En Yüksek Sıcaklık (°C)</i>	19,2	21,1	27,8	31,4	35,1	37,5	42,2	40,2	39,3	32,5	25,3	21,1	42.2
<i>En Düşük Sıcaklık (°C)</i>	-26,9	-22,3	-19,7	-8,5	-3,6	0,2	0,0	0,9	-1,5	-7,5	-19,3	-23,7	-26.9

3.2 HANÖNÜ (KASTAMONU) GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİ

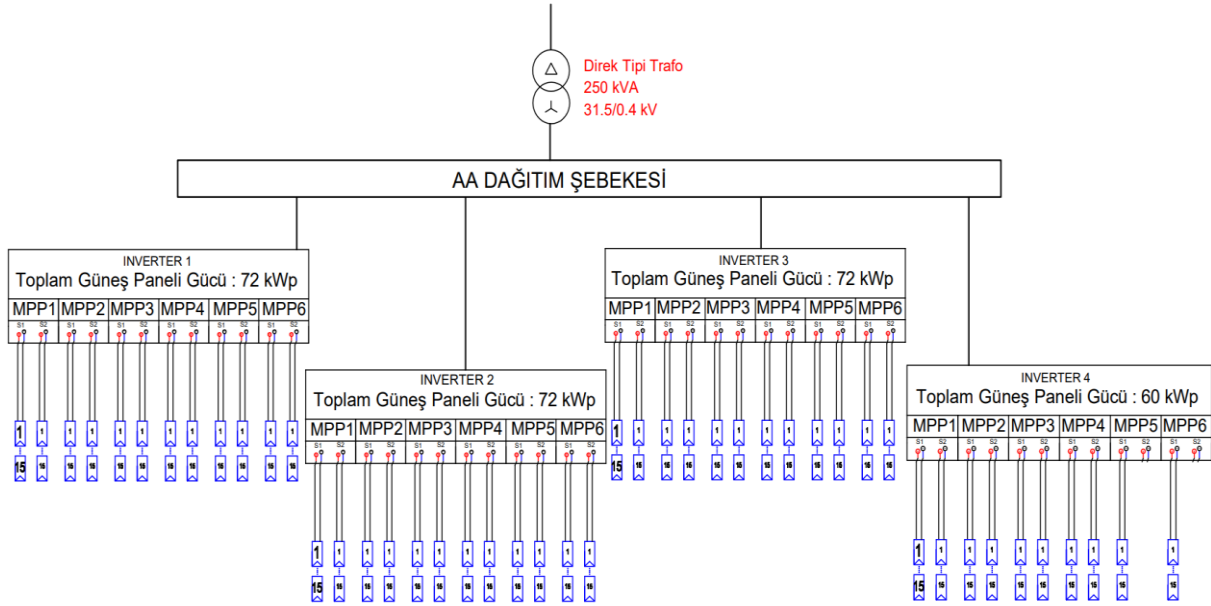
Hanönü (Kastamonu) Belediyesinin en büyük giderlerinden biri olan elektrik tüketim bedelini belli oranda karşılması adına, Kastamonu'nun Hanönü ilçesinde bulunan Bağdere Mevkiinde 41.6197° enlem, 34.4710° boylam coğrafi koordinatlarında bir fotovoltaik güneş enerji santrali tesis edilmiştir. Şekil 3.3'de kurulumu yapılan alanın uydu görüntüsü verilmiştir. Santral 276 kWp güç üretebilecek kapasitede tasarımı yapılarak hayata geçirilmiştir. Santralin kurulu olduğu bölgede yıllık ortalama hava sıcaklıkları, en düşük -4.5°C ile en yüksek 28.1°C arasında değişiklik göstermektedir (MGM, 2024).



Şekil 3.3 Hanönü Güneş Enerji Santrali Kurulum Alanı

Tesiste, Türkiye’de üretimi gerçekleştirilen Alfa Solar firmasının A3S72M400 model monokristal güneş panelleri kullanılmıştır. Toplamda 690 adet ve her biri 400 Wp güç değerinde olan bu panellerden oluşan fotovoltaik sistem, 30° eğim açısıyla güney yönüne konumlandırılarak kurulumu tamamlanmıştır. Sistem, üç adet 72 kWp ve bir adet 60 kWp gücündeki dört ayrı diziye bölünmüştür. 72 kWp kapasiteli diziler, her biri 12 panel grubundan oluşmakta ve 72 kWp inverterlerin maksimum güç noktası izleme girişlerine bağlanmaktadır. 60 kWp kapasiteli dizide ise 10 panel grubu yer almakta olup, bu gruplar 60 kWp inverterlerin maksimum güç noktası izleme girişlerine bağlanmıştır. Tüm dizilerde, her panel grubu 15 adet fotovoltaik modülün seri bağlantısıyla oluşturulmuştur.

Santralde, Growatt New Energy firmasına ait MAX 60KTL3 LV model inverterler grupları tercih edilmiştir. İnverter çıkışlarından elde edilen alçak gerilim elektrik enerjisi, üç fazlı 0,4/31,5 kV, 50 Hz, 250 kVA kapasiteli direk tipi bir güç trafosu ile 31,5 kV'luk dağıtım şebekesine aktarılmaktadır. Tesise ait tek hat şeması, Şekil 3.4'te sunulmuş olup, tesise ait teknik veri çizelgesi de Çizelge 3.2'de sunulmuştur.



Şekil 3.4 Hanönü (Kastamonu) Güneş Enerji Santralinin Tek Hat Bağlantı Şeması

Çizelge 3.2 Hanönü (Kastamonu) Belediyesi GES Teknik Bilgiler Çizelgesi

<i>PARAMETRE</i>	<i>AÇIKLAMA</i>
İli	Kastamonu
İlçesi	Hanönü
Mevki	Bağdere
Teknoloji Türü	Optimum açıda sabitlenmiş fotovoltaik sistemler
Uygulama Yeri	Arazi
Fotovoltaik Hücre Türü	Monokristal
Kullanılan Modül Marka ve Modeli	Alfa Solar A3S72M400
Ünite Modül Gücü (Wp)	400
Ünite Modül Sayısı (Adet)	690
Kullanılan Evirici Marka ve Modeli	Growatt New Energy MAX60KTL3 LV
Evirici Gücü (We)	60000 We
Evirici Sayısı (Adet)	4
Tesis toplam kurulu gücü DC (kWp)	276 kWp
Tesis toplam kurulu gücü AC (kWe, kVA)	240 kWe

Çizelge 3.2’de görüldüğü üzere Hanönü (Kastamonu) Belediyesi Güneş Enerji Santralinde 400 Watt gücünde 690 adet fotovoltaik monokristal panel kullanılarak, 276 kWp DC kurulu güç değerindeki tesis 240 kWe AC güç ile dağıtım şebekesine entegre edilmiştir. Kurulumu tamamlanan tesisin fotoğrafları Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’ta gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Hanönü (Kastamonu) Belediyesi GES Görünümü



Şekil 3.6 Hanönü (Kastamonu) Belediyesi GES Görünümü

Alfa solar firması tarafından yerli üretim olarak kullanıcılara sunulan A3S72M panel modeli tesiste tercih edilmiştir. Panel monokristal olup bir panel 72 adet hücreden oluşmaktadır. Paneller üretim aşamasında tuz – sis, kar yükü, amonyak korozyon, rüzgar yükü, gibi birçok teste maruz kaldıktan sonra kullanıma hazır hale gelmektedir. Bu testlerden kar yükü testi de Hanönü yerleşkesinde kış mevsiminde kar yağışının yüksek olduğu düşünüldüğünde gerekli olmaktadır. Gelişmekte olan teknolojiyle birlikte, güneş paneli tercihlerinde önemli değişimler yaşanmıştır. Daha önce yaygın şekilde tercih edilen polikristal güneş panellerinin yerine daha yüksek verimliliğe sahip olan monokristal paneller tercih edilmeye başlanmıştır. Monokristal güneş panelleri, polikristal panellere kıyasla daha verimli çalışmakta ve bu nedenle kullanım ömürleri de daha uzun olmaktadır. Tesise ait sistem dizilimi Çizelge 3.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 Hanönü GES fotovoltaik sistem dizilimi

<i>Evirici</i>	<i>Dizi Sayısı</i>	<i>Dizideki</i>	<i>Panelin</i>	<i>Eviriciye</i>	<i>Eviriciye</i>
<i>Numarası</i>		<i>Panel</i>	<i>Maksimum</i>	<i>Bağlı Panel</i>	<i>Bağlı</i>
		<i>Sayısı</i>	<i>Gücü (W)</i>	<i>Sayısı</i>	<i>Maksimum</i>
					<i>Güç (W)</i>
1. Evirici	12	15	400	180	72.000
2. Evirici	12	15	400	180	72.000
3. Evirici	12	15	400	180	72.000
4. Evirici	10	15	400	150	60.000
Toplam				690	276.000

25 yıllık üretim garantisi sunan monokristal paneller, sıcak havalardan ziyade ılıman iklim koşullarında daha yüksek performans göstermektedir. % 15 ila % 20 arasında verim oranına sahip bu paneller, düşük ışınım seviyelerinde bile polikristal panellere göre üstün performans sergileyerek güneş enerjisi sistemlerinde en çok tercih edilen panel türü olmuştur. Alfa güneş panelleri, +5 Watt pozitif güç toleransı ile 10 yıl boyunca % 90’ın üzerinde, 25 yıl boyunca ise % 80’in üzerinde performans garantisi sağlamaktadır. Ayrıca, 10 yıl ürün garantisi sunan bu paneller, yerli üretim olmalarının yanı sıra üretim sürecinde 12 kritik kontrol noktasından geçirilerek kalite standartlarına uygun bir şekilde üretilmektedir. (Alfasolar Enerji, 2024).

Growatt MAX 60KTL3, fotovoltaik sistemler için tasarlanmış, kompakt yapıya sahip 3 fazlı ve 6 MPPT özellikli bir solar inverterdir. IP 65 koruma sınıfı ile dış etkenlere karşı dayanıklıdır ve verimli bir akıllı soğutma sistemi ile donatılmıştır. İnverterin boyutları 860x600x300 mm olup, ağırlığı 82 kg'dır.

Maksimum % 98,8 verimlilikle çalışan bu solar inverter, I-V eğrisi üzerinden akıllı arıza tespiti yapabilmektedir. Dizi bazlı izleme seçeneği, sistemin kolaylıkla takip edilmesine olanak tanırken, olası arızalarda hızlı müdahale imkanı sağlayarak sorunların kısa sürede çözülmesini desteklemektedir. Uzaktan erişim ile veri izleme ve depolama özellikleri sayesinde, sistemin enerji üretimi anlık olarak takip edilebilmektedir. AC ve DC Tip III parafudrlar ile donatılmış olan bu yapı on-grid solar inverterler içerisinde bu özellikleriyle ön plana çıkmaktadır.

3.3 PVSOL VE PVSYST PROGRAMLARININ DETAYLI ÖZELLİKLERİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

PVSOL, fotovoltaik (PV) sistemlerin simülasyonu ve tasarımı için geliştirilmiş kapsamlı bir yazılımdır. Güneş enerjisi projelerinin planlanmasında, boyutlandırılmasında ve performans analizinde kullanılan bu araç, kullanıcıların farklı PV bileşenlerini entegre ederek sistemlerini en verimli şekilde tasarlamalarını sağlamaktadır. PVSOL, özellikle enerji üretim potansiyelini tahmin etme ve yatırım geri dönüş sürelerini hesaplama konularında öne çıkmaktadır. Yazılım, meteorolojik verilerden faydalanarak gerçekçi enerji üretim simülasyonları yapmaktadır ve yıllık üretim tahminlerini sunmaktadır. Ayrıca, yazılımın 3D modelleme özelliği sayesinde PV panellerinin monte edileceği alanlar detaylı bir şekilde tasarlanabilir ve gölge analizleri yapılabilir. Bu durum, ağaçların, binaların veya diğer engellerin PV sistem performansı üzerindeki etkilerinin doğru bir şekilde değerlendirilmesine imkan sağlamaktadır. Böylece, gölgelenmeden kaynaklanan enerji kayıpları minimize edilebilmektedir.

PVSOL'un gelişmiş analiz yetenekleri, sistem verimliliğini etkileyen kayıpları (sıcaklık etkisi, kablo kayıpları, inverter verimliliği gibi) detaylı bir şekilde hesaplanmaktadır. Yazılım ayrıca projenin maliyet analizini yaparak yatırımcıların geri dönüş sürelerini ve ekonomik faydalarının değerlendirmesine imkan sağlamaktadır. Detaylı raporlama özellikleri, sistemin teknik performansından finansal analizlere kadar geniş bir yelpazede bilgi sunmaktadır. Bu özellikler, hem küçük ölçekli çatı üstü güneş enerjisi projeleri hem de büyük ölçekli güneş tarlası projeleri için uygundur. PVSOL, PV sistem mühendisleri, danışmanlık firmaları ve eğitim kurumları tarafından yaygın bir şekilde kullanılmakta olup, kullanıcılarına yüksek doğrulukla tasarım ve

performans değerlendirme imkanı sunmaktadır. Böylece, güneş enerjisi projeleri daha güvenilir ve verimli bir şekilde hayata geçirilebilir.

PVSYST, fotovoltaik (PV) sistemlerin tasarımı, simülasyonu ve performans analizi için kullanılan kapsamlı bir yazılımdır. Güneş enerjisi projelerinde detaylı analizler yapmak isteyen mühendisler, araştırmacılar ve yatırımcılar için geliştirilmiştir. Yazılım, hem küçük ölçekli çatı uygulamalarından büyük güneş tarlalarına kadar geniş bir yelpazede projelerin tasarlanmasına olanak tanımaktadır. PVSYST'in en dikkat çekici özelliklerinden birisi de geniş bir veri tabanına sahip olmasıdır. Bu veri tabanı, dünya genelindeki meteorolojik verileri ve güneş enerjisi bileşenlerine ilişkin bilgileri içermektedir, böylece kullanıcılar yerel koşulları en iyi yansıtan simülasyonları yapabilirler.

PVSYST, güneş panellerinin ve inverterlerin seçiminden kablo kayıpları ve sıcaklık etkisine kadar her türlü teknik detayı değerlendirme imkanı sunar. Yazılım, sistemin enerji üretim potansiyelini gerçek meteorolojik veriler ışığında simüle eder ve yatırımcılar için enerji verimliliği, üretim tahmini, ekonomik analiz ve geri ödeme süreleri gibi önemli kriterleri hesaplar. Ayrıca, gölge analizleri yaparak, sistem üzerindeki olası gölgeleme etkilerini belirler ve bu gölgelerin enerji üretimi üzerindeki etkilerini minimize etme stratejileri sunar.

PVSYST, sadece teknik analizlerle sınırlı kalmayıp, finansal analizleri de içeren bir yapıya sahiptir. Kullanıcılar, yatırım maliyetlerini, işletme giderlerini ve beklenen gelirleri hesaba katarak projelerinin finansal fizibilitesini değerlendirebilirler. Yazılım, detaylı raporlama yetenekleri ile kullanıcılarına hem teknik hem de ekonomik açıdan kapsamlı bilgiler sunar. Bu sayede, güneş enerjisi projelerinin başarısı ve sürdürülebilirliği için gereken tüm parametreler profesyonel bir yaklaşımla analiz edilebilir.

PVSOL ve PVSYST, her ikisi de fotovoltaik (PV) sistemlerin tasarımı, simülasyonu ve performans analizi için yaygın olarak kullanılan yazılımlardır. İkisi de güneş enerjisi projelerinin planlanması, boyutlandırılması ve enerji üretim tahmini gibi alanlarda kritik rol oynar. Ancak bu iki yazılım arasında hem ortak hem de farklı özellikler bulunmaktadır.

Ortak Yönler:

- **Simülasyon ve Performans Analizi:** Her iki yazılım da güneş enerjisi sistemlerinin enerji üretimini simüle eder ve performans analizleri sunar. Kullanıcılar, tasarladıkları sistemin yıllık üretim tahminlerini alabilir.

- **Meteorolojik Veri Kullanımı:** PVSOL ve PVSYST, sistem performansını tahmin etmek için gerçek meteorolojik verileri kullanır. Her iki program da, güneş ışınlamı, sıcaklık ve diğer çevresel faktörleri göz önünde bulundurarak enerji üretim tahminleri yaparlar.
- **Kapsamlı Raporlama:** Her iki yazılım da kullanıcılarına teknik ve ekonomik açıdan detaylı raporlar sunar. Bu raporlar, sistemin verimliliği, enerji üretimi, maliyetler ve yatırım geri dönüş süreleri gibi bilgileri içermektedir.
- **Gölge Analizi:** İki program da gölgelenmenin sistem performansı üzerindeki etkilerini analiz edebilir. Gölge analizleri ile PV sistemlerin üretim kayıpları değerlendirilebilir.
- **Bileşen Veritabanı:** Her iki yazılım da geniş bir PV bileşen veri tabanına sahiptir. Paneller, inverterler ve diğer sistem bileşenleri seçilebilir ve analiz edilebilir.
- **Farklı Proje Ölçekleri:** Küçük çatı sistemlerinden büyük güneş tarlalarına kadar farklı ölçekte projelerin tasarımına olanak tanır.

Farklı Yönler:

- **Kullanıcı Arayüzü ve Kolaylık:**
 - **PVSOL:** Genellikle kullanıcı dostu bir arayüze sahip olarak bilinir. Özellikle 3D modelleme ve görselleştirme araçları sayesinde daha görsel odaklı ve kullanımı kolaydır.
 - **PVSYST:** Daha teknik ve detay odaklı bir yazılımdır. Öğrenmesi daha zor olabilir, ancak ileri düzey mühendislik analizleri ve akademik kullanım için güçlü bir araçtır.
- **3D Modelleme ve Gölgeleme Simülasyonu:**
 - **PVSOL:** 3D modelleme konusunda daha gelişmiş özellikler sunar. Özellikle bina, ağaçlar ve çevredeki diğer nesnelerin sisteme etkisini detaylı bir şekilde simüle etmek için güçlü bir araçtır.
 - **PVSYST:** Gölgeleme analizi yapabilse de 3D modelleme konusunda PVSOL kadar gelişmiş değildir. Genellikle daha basit ve teknik analiz odaklıdır.
- **Kapsam ve Kullanım Alanı:**
 - **PVSOL:** Genellikle ticari ve konut tipi PV projeleri için daha çok tercih edilir ve küçük ve orta ölçekli projelerde popülerdir.

- **PVSYST:** Daha geniş ölçekli projelerde (örneğin, büyük güneş tarlaları) ve akademik çalışmalar ya da detaylı mühendislik analizleri için daha uygundur. Karmaşık sistemlerin detaylı analizine imkan tanımaktadır.
- **Ekonomik Analiz ve Finansal Araçlar:**
 - **PVSOL:** Daha kullanıcı dostu ekonomik analiz araçlarına sahip olup, yatırım geri dönüş sürelerini ve maliyet/kar analizlerini kolayca sunmaktadır.
 - **PVSYST:** Ekonomik analizleri de sunar ancak genellikle teknik analizlere daha fazla odaklanır. Ekonomik analiz açısından PVSOL kadar basit ve sezgisel olmayabilir.
- **Kullanıcı Kitlesi:**
 - **PVSOL:** Daha geniş bir kullanıcı kitlesine hitap etmektedir. Kullanımı daha kolay olduğundan, küçük ölçekli ticari projelerle uğraşan tasarımcılar ve mühendisler tarafından sıklıkla tercih edilirler.
 - **PVSYST:** Daha çok mühendisler, araştırmacılar ve büyük ölçekli projelerle uğraşan profesyoneller tarafından tercih edilirler. Yazılım, daha derinlemesine teknik analizler sunduğu için ileri düzey kullanıcılar için uygundur.

Sonuç olarak her iki yazılım da PV sistem tasarımı ve simülasyonu için güçlü araçlardır, ancak kullanıcının ihtiyaçlarına göre farklı avantajlar sunmaktadırlar. PVSOL, görselliği ve kullanım kolaylığı ile öne çıkarken, PVSYST daha detaylı teknik analizler ve büyük projeler için tercih edilmektedir.



BÖLÜM 4

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde yapımı tamamlanarak 2021 yılında üretime başlayan Hanönü Belediyesi Güneş Enerji Santrali'nin gerçek üretim değerleri ile güneş enerjisi simülasyon programlarından elde edilen üretim sonuçları verilmiş ve kıyaslanmıştır. Çalışma kapsamında simülasyon programlarından PVSOL ve PVsyst tercih edilmiştir. Tesis içerisinde tercih edilen donanımların teknik ve fiziksel karakteristiklerine eşit veya aynı düzeyde seçimine dikkat edilmiştir. Santralin PVSOL ile PVsyst yazılımlarında tasarımları yapılarak simülasyonu oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda PVsyst ve PVSOL programların gerçeğe yakınlığı test edilmiş olup aralarında da kıyaslama yapılmıştır. Simülasyonun sonuçlarına göre sisteme ait elektrik enerjisi üretim değerleri, enerji kayıp oranları ve bu veriler ışığında performans sonuçları hesaplanmıştır.

4.1 KURULU SİSTEM GERÇEK ÜRETİM DEĞERLERİ

Hanönü (Kastamonu) Belediyesi'nin bünyesinde kurulan güneş enerji santralinin kurulumu Haziran 2021'de tamamlanarak devreye alınmıştır. Şekil 4.1'te Hanönü (Kastamonu) güneş enerjisi santralinin kurulum alanı, Şekil 4.2'de ise santralin kurulu durumu yer almaktadır. Hanönü Güneş Enerji Santraline ait SCADA sistemi üzerinden elde edilmiş olan ay bazında üretilen elektrik enerjisi rakamları Çizelge 4.1'de ifade edilmiştir.



Şekil 4.1 Hanönü (Kastamonu) Güneş Enerji Santrali Kurulum Alanı



Şekil 4.2 Hanönü (Kastamonu) Güneş Enerji Santrali Kurulu Hali

Çizelge 4.1 Hanönü Güneş Enerji Santralinde Üretilen Elektrik Enerjisinin Aylık Dağılımı

Dönem	Üretim Değeri (kWh)
Ocak	10.122
Şubat	15.362
Mart	24.096
Nisan	30.286
Mayıs	33.205
Haziran	36.914
Temmuz	38.711
Ağustos	33.266
Eylül	31.175
Ekim	31.868
Kasım	15.637
Aralık	11.301

Çalışma kapsamında, Hanönü Belediyesi’nden temin edilen ve 2021 yılı Ocak ayı ile 2023 yılı Ekim ayı tarihleri arasında santral tarafından üretilerek şebekeye iletilen elektrik enerjisi verilerinin aylık ortalamaları alınarak gerçek veri olarak karşılaştırma amacıyla kullanılacaktır.

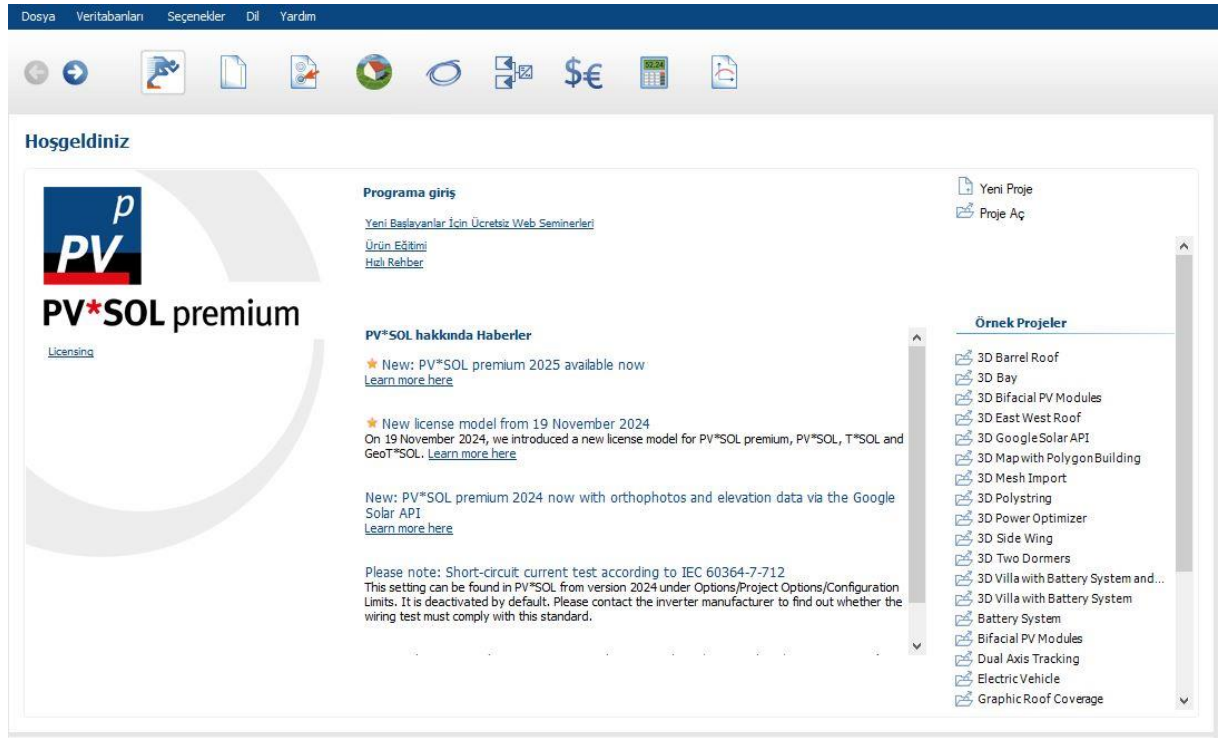
4.2 PVSOL SİMÜLASYON PROGRAMI İLE TASARIMI

PVSOL güneş enerji sistemleri simülasyon programı, Windows altyapısı ile çalışan bir yazılım programıdır. Fotovoltaik sistemler üzerine tasarım yapılabilmesi ile birlikte, sistem bileşenleri olarak eviriciler, kontrol cihazları ve diğer elektrikli araçları da kapsamaktadır. Program, 3 boyutlu görselleştirme ve ayrıntılı gölgeleme analizini içeren dinamik bir simülasyon

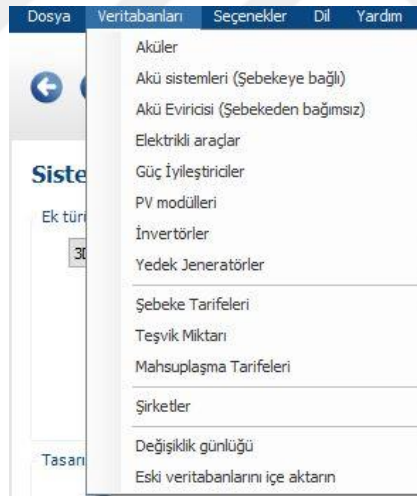
sunmaktadır. Fotovoltaik sistem tasarımında kullanılan simülasyon programlarından biri olan PVSOL programı ile fotovoltaik sistemlerin tüm tasarımları ve simülasyonları sağlanmaktadır. Küçük çatı tipi sistemlerden ticari ve orta ölçekli çatılara, hatta büyük ölçekli güneş enerjisi tarlalarına kadar geniş bir yelpazede çalışmalar yaparak önemli sonuçlar vermektedir. Program içeriği düşünüldüğünde veri tabanında 20.000'den fazla fotovoltaik modül, yaklaşık 4.800 model evirici, yaklaşık 1.500 model pil sistemi ve elektrikli araçlar gibi birçok ürün çeşidi bulunmaktadır. PVSOL programının en önemli özelliklerinden biri, tüm sistemler için 3 boyutlu görselleştirme sunabilmesidir. Küçük açılı çatıların yanı sıra büyük endüstriyel alanlarda, çatıya monte edilmiş olarak, 7.500 çeşit modül veya 10.000 çeşit çatı-panel modül sistemleri 3 boyutlu olarak modellenenilmektedir.

Bilgisayar üzerinden PVSOL program arayüzü açıldıktan sonra giriş ekranının üst kısmında yer alan bölümler alanında seçilen konfigürasyona göre değişiklikler yapabilen sekme alanı bulunmaktadır. Şekil 4.3'de görüldüğü üzere başlangıç kısmında “Dosya” sekmesinde bulunan “Yeni Proje” kısmına tıklanarak tasarlanacak olan projeye başlangıç yapılır. İlk aşama geçildikten sonra, projeye ait detaylı verilerin girildiği “Proje Verileri” bölümü bulunmaktadır. Ardından, sistem türü, iklim ve şebeke bilgileri ile ilgili olan bölümler yer almaktadır. Sistem Tipi seçimi gerçekleştirildikten sonra, Şekil 4.4'te gösterilen iklim veri tabanlarından biri seçilir ve şebeke tipi bölümünden sonra, yapılan seçime bağlı olarak bölümler arasında geçişler yapılmaktadır. Bölümler arası geçişler aşağıda gösterilmiştir.

- 3D Tasarım
- Kablolar
- Planlar ve parça listesi
- Finansal analiz
- Sonuçlar
- Sunum



Şekil 4.3 PVSOL Giriş Ekranı



Şekil 4.4 Program Veritabanları

Şekil 4.5'te simülasyon için gerekli ayarlamalar ve düzenlemelerin yapıldığı ekran gösterilmiştir.

Program Seçenekleri

- Kullanıcı
- Geniştirilmiş
- Veritabanları
- Teslimat Durumuna Sıfırlayınız

Proje Seçenekleri

- AC Şebekesi
- Simülasyon
- Konfigürasyon sınırları
- Otomatik Konfigürasyon
- Sunum
- Simülasyon sonuçları

Faz ve nötr arasındaki şebeke gerilimi: 230 V

Faz Adeti: 3-fazlı

Deplasman Güç faktörü (cos φ): +/- 1,00

☐ Maksimum Güç Sınırlaması

☒ göreceli (% olarak) ☐ mutlak (kW cinsinden)

PV güç %'liği (0 kW): 70

☒ eviricide ☐ Beslenme noktasında

PV enerjisi kullanımı ile belirli CO₂ tasarrufu: 470 g/kWh

Şekil 4.5 Program Ayarları

Şekil 4.6'da yapılan simülasyon ayarları gösterilmiştir. Ayarlamalarda, yıllık albedo, yani güneş ışığının modül üzerinden yansıtma kapasitesi değeri % 20 olarak belirlenmiş ve PV modüllerinin kirlenmesi nedeniyle oluşabilecek çıkış kayıpları % 0 olarak kabul edilmiştir.

Modül Alanı Parametreleri

☐ Modül alanlarını tek tek giriniz

By-pass Diyotlarındaki Gerilim Düşümünden kaynaklanan Güç Kaybı: 0,5 %

Uyumsuzluk veya Azaltılmış Kazançtan Kaynaklanan Güç Kayıpları: 2,0 %

Modül eviriciler ve güç iyileştiriciler ile uyumsuzluk kayıpları hesaba kalmaz.

Zemin Yansıtma Katsayısı (Albedo)

☒ Yıllık yansıtılabilirliği (albedo) giriniz: 20 %

☐ Aylık yansıtılabilirliği (albedo) giriniz

Oca	Şub	Mar	Nis	May	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Kas	Ara
20 %	20 %	20 %	20 %	20 %	20 %	20 %	20 %	20 %	20 %	20 %	20 %

Kirlenme nedeniyle PV modüllerinin çıkış kayıpları

☒ Kirlenmeye bağlı yıllık kayıpları giriniz: 0,0 %

☐ Kirlenmeye bağlı aylık kayıpları giriniz

Oca	Şub	Mar	Nis	May	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Kas	Ara
0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %

Şekil 4.6 Simülasyon Ayarları

Şekil 4.7'de kurulumu gerçekleştirilen sistemin tipi, iklim bilgisi ve şebeke bağlantısı seçilmiştir. 3 boyutlu dizayn bölümü aktifleştirilmiş ve tesis için iklim verisi, Şekil 4.9'da gösterilen harita üzerinde seçilen konuma göre sistem tarafından belirlenmiştir. Şekil 4.8'de seçilen konuma göre meteorolojik veri sayfası görülmektedir. Program, bu verileri Meteonorm 8.2'den almaktadır. Buna göre, enlem ve boylam değerleri görünmekte, verilerin zaman aralığı 2001 - 2020 yılları arasını kapsamaktadır. Ayrıca, global güneş radyasyonu değeri 1551,8

kWh/m², ortalama sıcaklık değeri ise 11.3 °C olarak Şekil 4.10'da da görüldüğü üzere kaydedilmiştir.

Sistem Türü, İklim ve Şebeke

Ek türü

3D, Şebekeye bağlı PV sistemi

Tasarım Türü

3D Tasarım kullan

Simülasyonun zaman adımı

1 Saat (daha hızlı simülasyon)
1 Dakika (daha hassas simülasyon)

İklim verileri

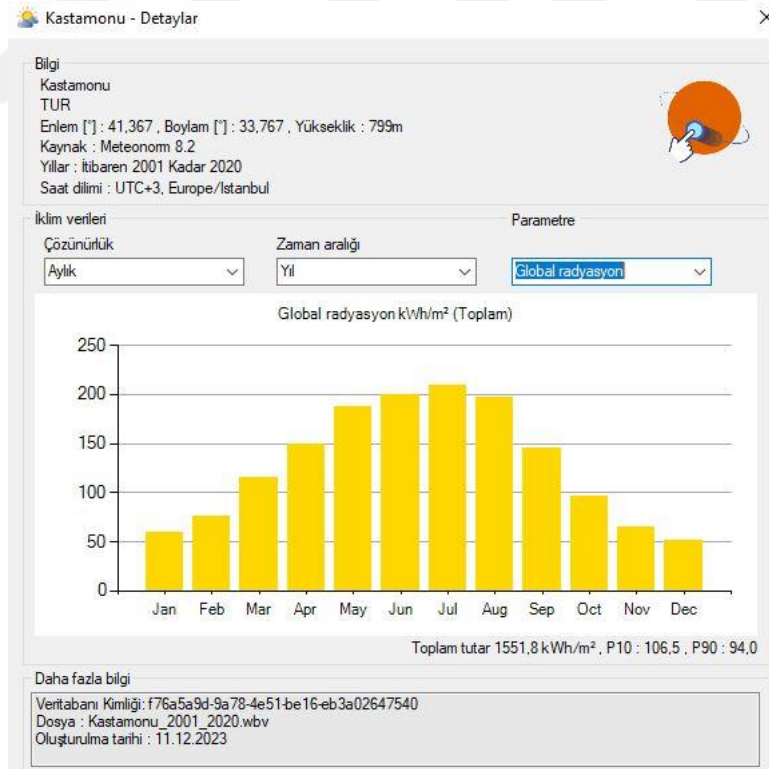
Ülke: Türkiye Konum: Kastamonu (2001-2020, Meteororm 8.2)

Enlem: 41° 22' 1" (41,37°) Küresel ışınlamanın yıllık toplamı: 1552 kWh/m²
Boylam: 33° 46' 1" (33,77°) Yıllık Ortalama Sıcaklık: 11,3 °C
Saat Dilimi: UTC+3
Zaman dilimi: 2001 - 2020
Kaynak: Meteororm 8.2

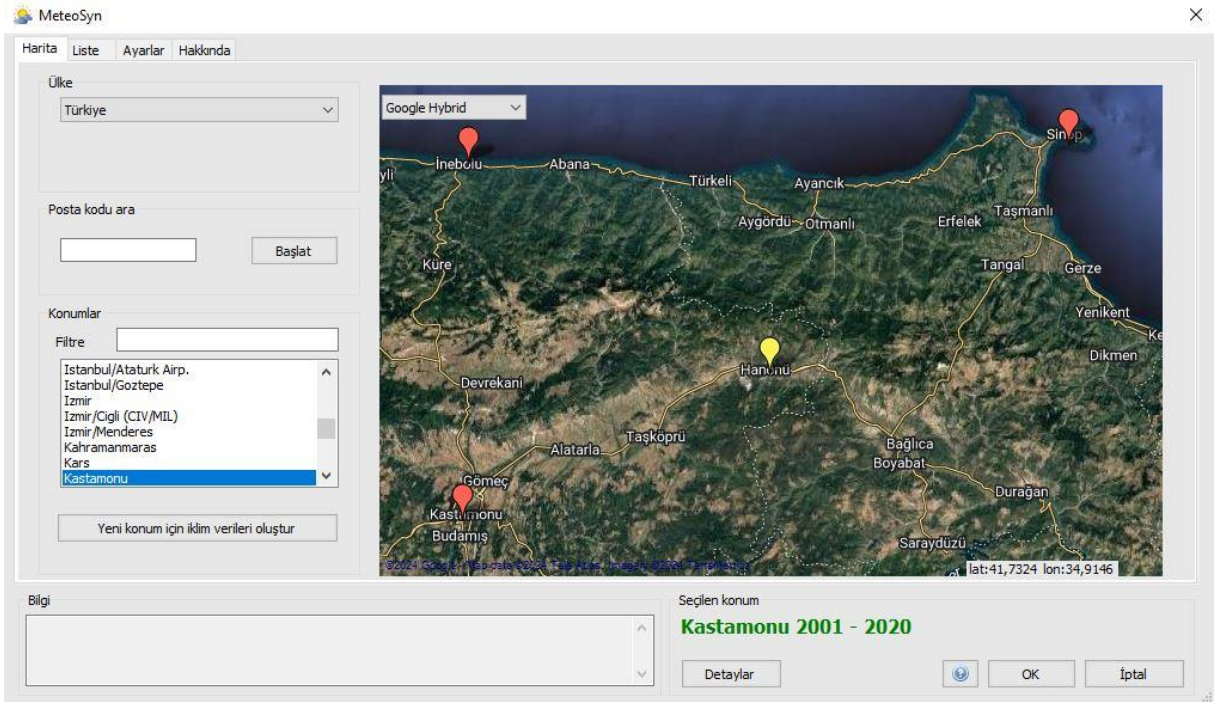
AC Şebekesi

Gerilim (N-L1): 230 V
Faz Adeti: 3-fazlı
cos φ: 1
Maksimum Güç Sınırlaması: Hayır

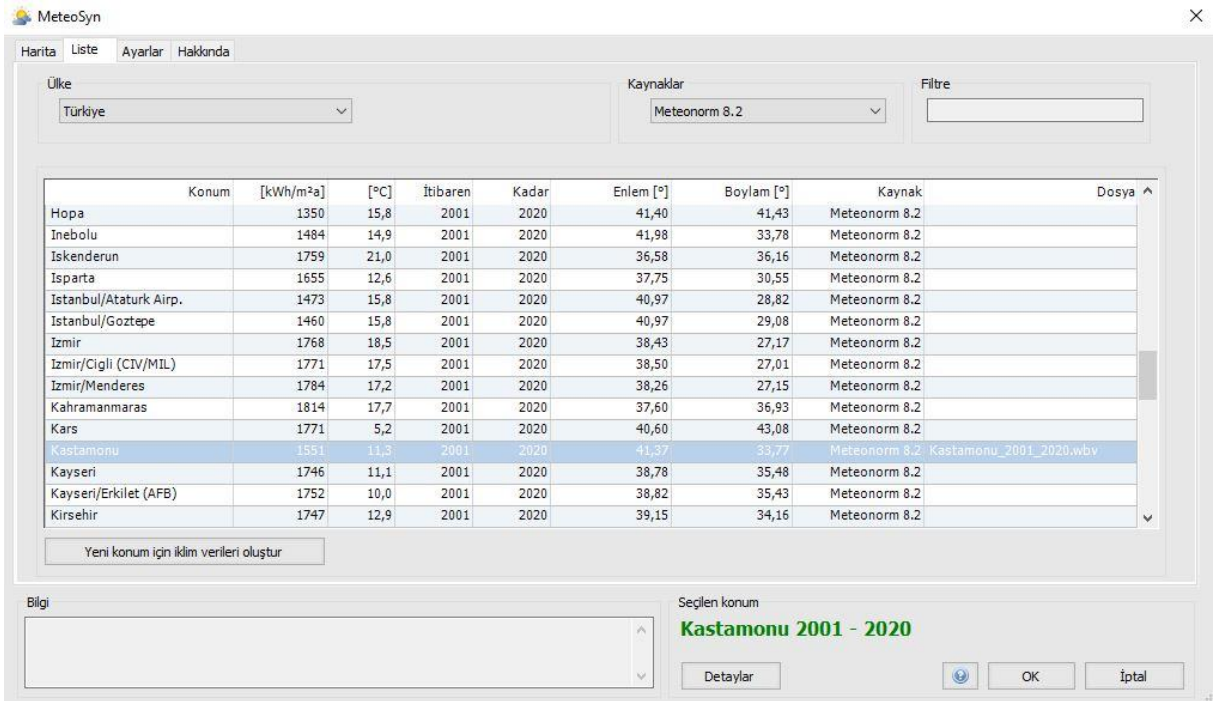
Şekil 4.7 Sistem Tipi, İklim ve Şebeke



Şekil 4.8 Seçili koordinatlara göre bilgi ekranı



Şekil 4.9 Harita üzerinde konum işaretlenmesi



Şekil 4.10 PVSOL Meteonorm veritabanı

3D Tasarım bölümünde, “Düzenle” kısmından tasarım bölümü açılmaktadır. Şekil 4.11’de gösterildiği üzere açılan menüden, Harita Bölümünden gerçek tesis konumu harita üzerinden

seçilmiş ve tesisin kuş bakışı görünümü harita arayüzlerinden biri seçilerek tasarım ekranına aktarılmıştır.

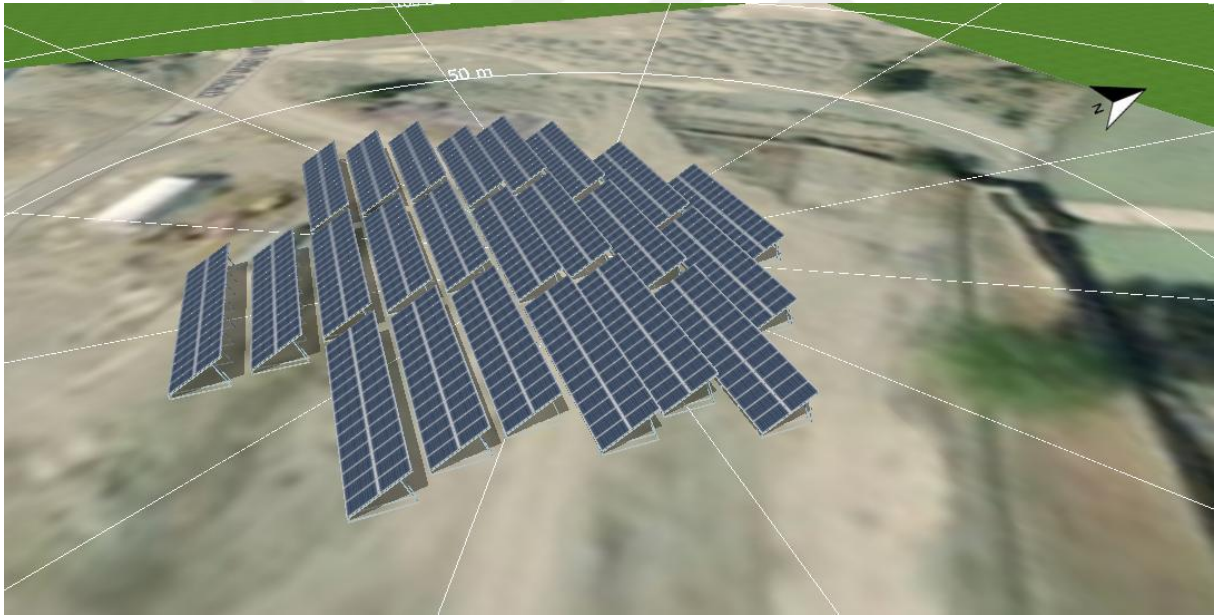


Şekil 4.11 3D Tasarım

Sonrasında, kurulmuş olan tesisin gerçek köşe koordinatlarına uygun şekilde boş arazi üzerinde seçim yapılmış ve üç boyutlu şekli oluşturulmuştur. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te, sistem tasarımı 3 boyutlu olarak gerçek formuna ulaştırılmış ve panellerin kurulu sistemdeki eğim değerini yansıtacak şekilde yerleşimi yapılmıştır.



Şekil 4.12 Tasarım güney yönünden görünüm



Şekil 4.13 Tasarım yandan görünüş

Kurulumu yapılmış olan Hanönü Güneş Enerji Santrali'nde, Alfa Solar şirketinin A3S72M400 model 400 Wp gücünde monokristal güneş paneli kullanılmıştır. PVSOL programında bu marka ve model birebir olmadığı için eşdeğer olarak Şekil 4.14'te görüldüğü üzere CW Enerji firmasına ait, "CWT400-72PM-BC" marka model 400 W'lık monokristal panel tipi seçilmiştir.

Program tarafından seçimi yapılan panele ait teknik veriler Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de gösterilmektedir.

CW Enerji Müh. Ticaret ve San. Ltd. Şti. - CWT400-72PM-BC [Dikey]

Modül Montajı

Dikey Modül Sayısı: 2

Modül Aralığı - yatay: 0,005 m

Modül Aralığı - dikey: 0,005 m

Alt kenar yüksekliği: 0,300 m

Yerleşim Yönu

Varsayılan kenar

Referans Kenarı: Kenar 1

Hesapla

Monte Açısı: 30,00°

Referans kenarına hizalama: 0,00°

Yerleştirme

Diğer parametreler

Hesapla

Sıra Derinliği: 3,441 m

Montaj Destek Ağırlığı: 1,000 m

Sıra aralıklandırılması: 4,441 m

Alan Kullanım Oranı: 0,895

Yeniden başlat

Varsayılan Olarak Kaydediniz

Şekil 4.14 Montaj sisteminin düzenlenmesi

Elektrik verileri

Hücre tipi: Monokristalli Si

Hücre sayısı: 72

By-pass diyotların sayısı: 3

V için bypass diyodu başına kayıp voltaj: 1

Entegre güç iyileştiricisi: seçim yok

☐ Yarım hücre modülü

☐ Sadece trafo eviricileri uygundur

☒ Kısa kenarlara dik hücre dizileri

Şekil 4.15 Panel elektriksel verileri

STC'da bulunan I/V parametreleri	
MPP Gerilimi [V]	41.1
MPP Akımı [A]	9.75
Açık Devre Gerilimi [V]	49.83
Kısa Devre Akımı [A]	10.38
Dengelenmeden önce açık devre gerilimindeki artış (%)	0
Nominal Çıkış [kW]	400
Dolum Faktörü (%)	77.47
% Olarak verimlilik	20.06

Şekil 4.16 Panel akım ve gerilim karakteristikleri

Düşük ışıktaki I / V özellikleri	
☐ Standart düşük ışık performansı	
Model	PV*SOL Modeli
Parlaklık(zayıf ışık) W/m ²	200
V cinsinden MPP Voltajı (düşük ışık)	39.524
A cinsinden MPP Akımı (düşük ışık)	2.011
V cinsinden Açık Devre Voltajı (düşük ışık)	46.621
A cinsinden Kısa Devre Akımı (düşük ışık)	2.089
% Cinsinden Doldurma Faktörü (düşük ışık)	81.61
% Olarak bağlı verimlilik (düşük ışık)	99.17

Şekil 4.17 Panel akım ve gerilim karakteristikleri (düşük ışıktaki)

Ek Parametreler	
mV/K için Voc Sıcaklık Katsayısı	☐ mV/K -134.5
%/K için Voc Sıcaklık Katsayısı	☒ %/K -0.27
mA/K için Isc Sıcaklık Katsayısı	☐ mA/K 4.2
%/K için Isc Sıcaklık Katsayısı	☒ %/K 0.04
%/K için Pmpp Sıcaklık Katsayısı	-0.36
Açı düzeltme faktörü (IAM) [%]	99
Makimum Sistem Gerilimi [V]	1000
İki yüzlü faktör [%]	0

Şekil 4.18 Panele ilişkin ek parametreler

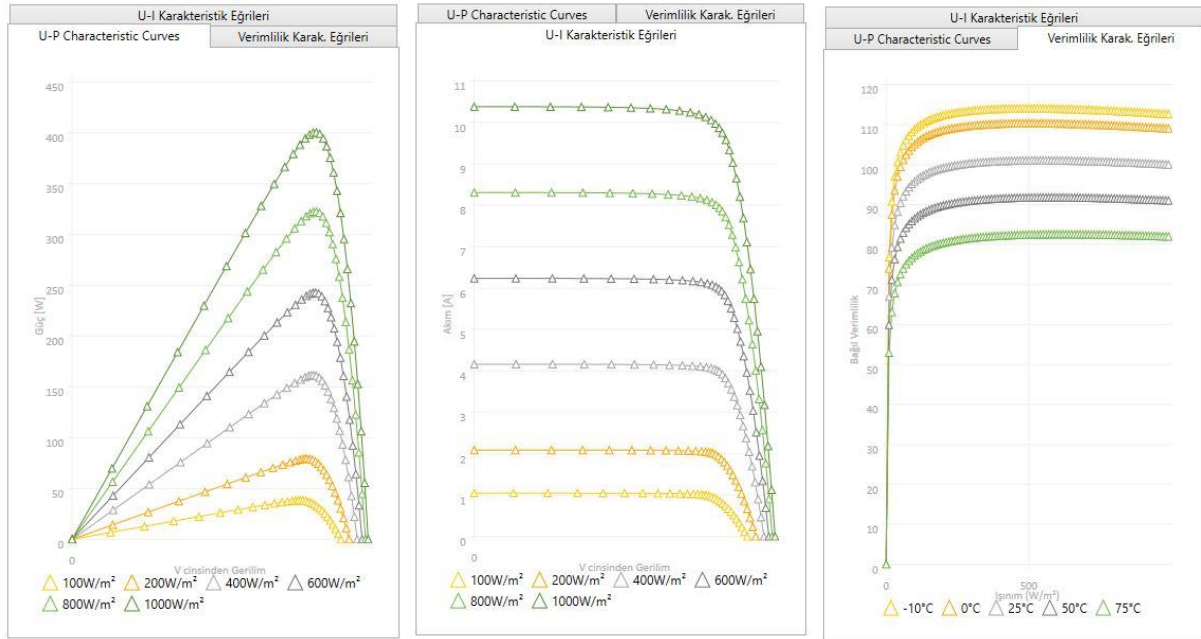
İsim	Sürüm	Kullanıcı kimliği	% Olarak verimlilik	Hücre tipi	Nominal Çıkış [kW]	MPP Gerilimi [V]	MPP Akımı [A]	Genişlik [mm]	Yükseklik [mm]
CWT400-72PM-B	1		20,06	Monokristalli Si	400	41,1	9,75	1007	1984

Şekil 4.19 Panel detay

Boyutlar

Genişlik [mm]	1007
Yükseklik [mm]	1984
M ² cinsinden yüzey	2
Derinlik [mm]	40
Çerçeve genişliği [mm]	35
Ağırlık [kg]	22

Şekil 4.20 Panel boyutları



Şekil 4.21 Panel verim grafikleri

Fotovoltaik sistem tasarımının gerçekleştirilmesi ile birlikte yapılan ayarlamalara dair bilgilerin yer aldığı bir bilgi ekranı görüntülenmektedir.

4.2.1 PVSOL Simülasyonu Sonucunda Elde Edilen Tahmini Üretim Değerleri

PVSOL programı kullanılarak yapılan simülasyon sonucunda, sisteme ait veriler saatlik, günlük, aylık ve yıllık raporlar halinde elde edilebilmektedir. Şebekeye bağlı (on-grid) sistemde, şebekeye aktarılan toplam enerji miktarı ve şebeke performans oranları analiz edilmiştir. Simülasyonda hesaplanan tahmini değerler, sistemin gerçek üretim performansı ile kıyaslanmıştır. Sistem tasarımında, ilk adım olan sistem türünün belirlenmesi sonrasında genel yapının planlanması ve düzenlenmesi büyük önem taşımaktadır. Şekil 4.22’de tasarlanan ve uygulamaya alınan sistemin genel özellikleri detaylandırılmıştır.

Modül verileri	CWT400-72PM-BC
Üretici	CW Enerji Müh. Ticaret...
FV Modül sayısı	690
PV jeneratör çıkışı	276 kWp
Eğim	30°
Yerleşim Yönü	180°
Montaj Türü	Arazi Kurulumu

Şekil 4.22 Şebekeye bağlı PV sistem genel tasarımı

PVSOL yazılımına göre sistemin yıllık elektrik üretimi 332.372 kWh olarak öngörülmüştür. Şekil 4.23’te görüldüğü üzere sistem performansı % 67,78 olarak belirlenmiştir. En yüksek elektrik üretiminin temmuz ayında, en düşük üretimin ise aralık ayında gerçekleşeceği tahmin edilmektedir.

PV sistemi	
PV jeneratör çıkışı	276,00 kWp
Yıllık Özgül Kazanç	1.203,88 kWh/kWp
Sistem kullanım oranı (PR)	67,78 %
Gölgelemeden dolayı oluşan kazanç kaybı	27,0 %
Izgara Dışa Aktarma	332.372 kWh/Yıl
İlk yıl içindeki şebeke beslemesi (Modülün performans düşüşü dahil)	332.372 kWh/Yıl
Bekleme Konumundaki Tüketim (İnvertörler)	104 kWh/Yıl
Önlenen CO ₂ emisyonu	156.167 kg/yıl

Şekil 4.23 PVSOL simülasyon sonuçları

Açık alan (Harita Bölümü)-Alan Güney

PV jeneratör çıkışı	276,00 kWp
PV jeneratör yüzeyi	1.378,54 m ²
Modül Üzerine Düşen Toplam Işınım	1757,19 kWh/m ²
Modülde Yansımaz Küresel Radyasyonu	1772,90 kWh/m ²
Sistem kullanım oranı (PR)	67,80 %
PV jeneratör enerjisi (AC şebekesi)	332374,41 kWh/Yıl
Yıllık Özgöl Kazanç	1204,26 kWh/kWp

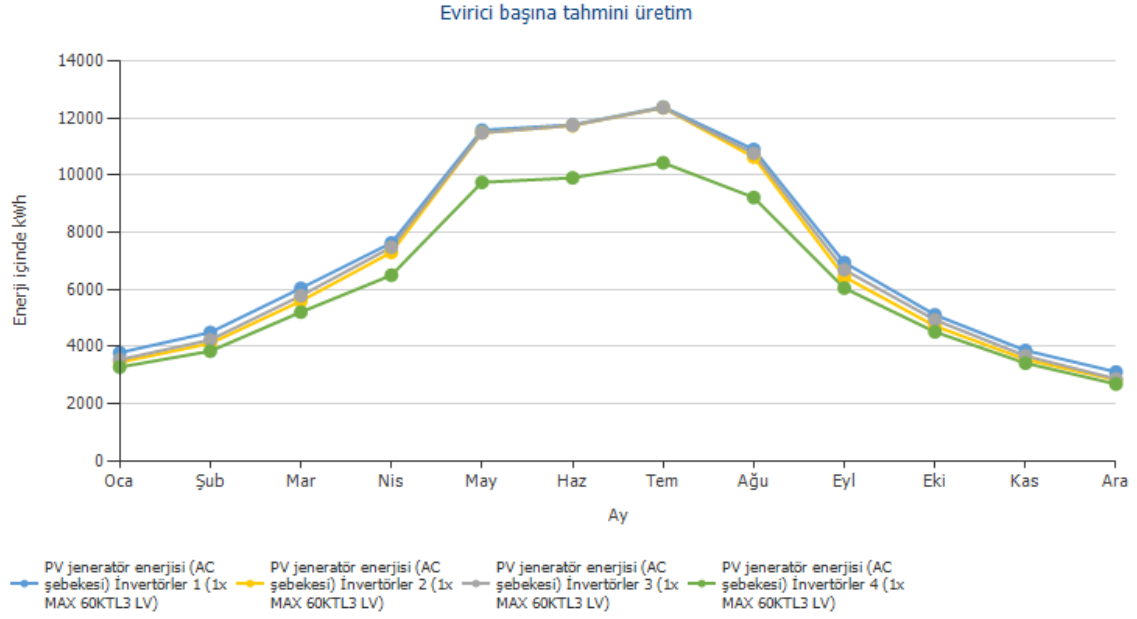
Şekil 4.24 Genel sistem sonuçları

Şekil 4.24'te PV sisteme ait simülasyon sonuçları gösterilmiştir. Şekil 4.25'te genel sistem sonuçları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, modülün ilk yıl performans düşüşü hesaba katıldığında, sistemin yıllık toplam 332.372 kWh elektrik üretebileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, inverterlerin yıllık bekleme modunda 104 kWh elektrik tüketeceği tespit edilmiştir.



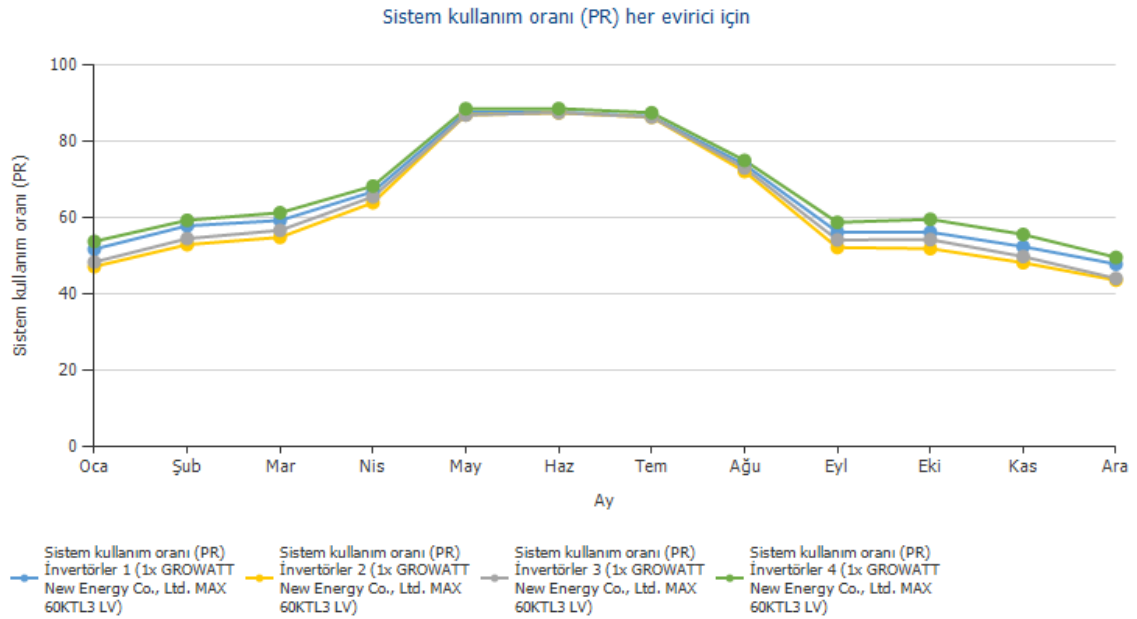
Şekil 4.25 PVSOL tasarım sonucu bulunan aylık üretim tahmini (kWh)

Programın sunmuş olduğu bir diğer veri olan evirici başına üretim grafiği Şekil 4.26'da gösterilmiştir.



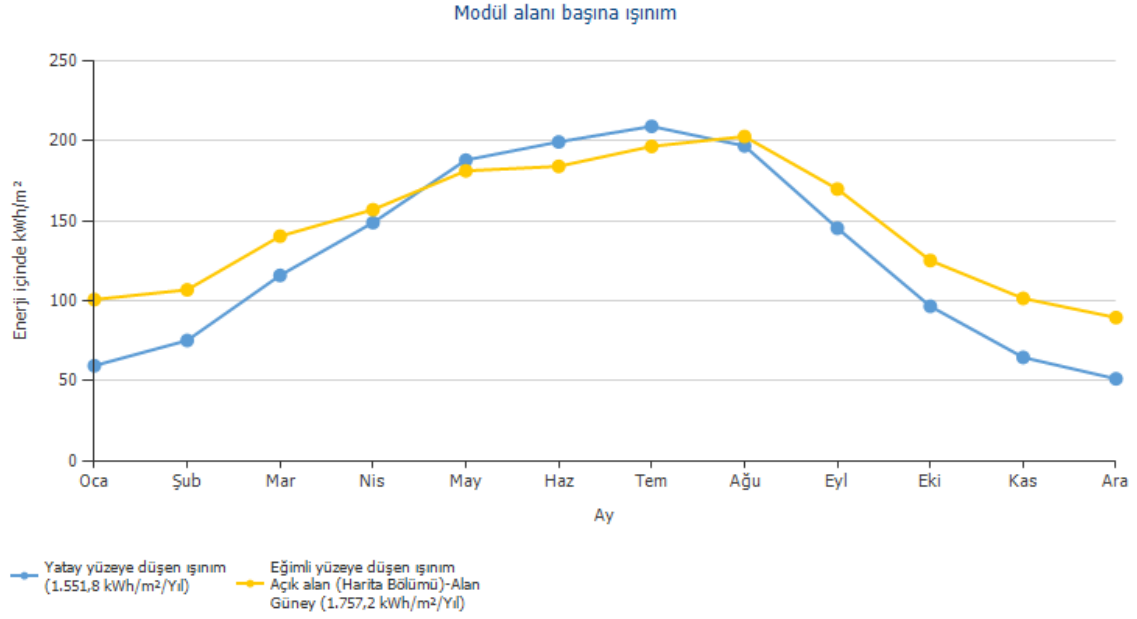
Şekil 4.26 Evirici başına tahmini üretim

Yazılımdan elde edilen ay bazında üretim performans oranı değişim grafiği Şekil 4.27’de gösterilmiştir.



Şekil 4.27 Aylara göre performans oranı değişimi

Programdan elde edilen tesise ait yatay yüzeye düşen ışınlam ile eğimli yüzeye düşen ışınlam verisi Şekil 4.28’de gösterilmiştir.

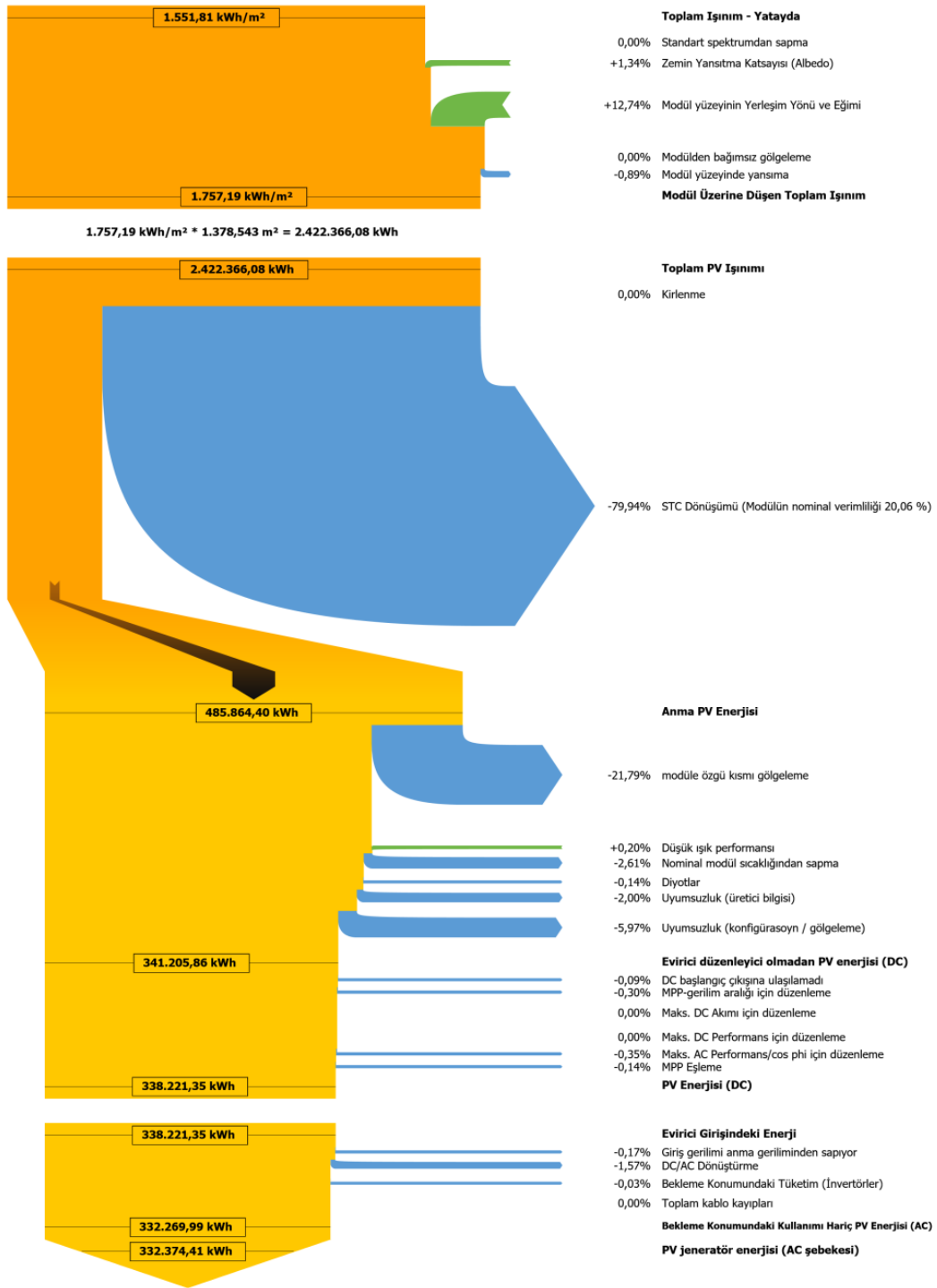


Şekil 4.28 Modül alanı başına ışıınım

Şekil 4.29’da sistemin kayıp özeti ile Şekil 4.30’da sisteme ait kayıp diyagramı gösterilmiştir. Sistemin yatay düzlemdeki küresel ışıınım miktarı 1551,8 kWh/m² olarak ölçülmüştür. Kollektör yüzeyine düşen etkili ışıınım ise 1757, 2 kWh/m²’dir. Bu ışıınım, bir fotovoltaik panelin yüzeyine ulaştığında, elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Ancak bu süreçte çeşitli kayıplar meydana gelmektedir. Bu kayıplar; % 2,61 oranında sıcaklık kaynaklı kayıplar, % 21,79 oranında gölgelenme kaynaklı kayıplar ve % 2 oranında mismatch kayıpları olarak hesaplanmıştır.

Toplam Işınım - Yatayda	1.551,81 kWh/m²	
Standart spektrumdan sapma	0,00 kWh/m ²	0,00 %
Zemin Yansıtma Katsayısı (Albedo)	20,79 kWh/m ²	1,34 %
Modül yüzeyinin Yerleşim Yönü ve Eğimi	200,30 kWh/m ²	12,74 %
Modülden bağımsız gölgeleme	0,00 kWh/m ²	0,00 %
Modül yüzeyinde yansıma	-15,70 kWh/m ²	-0,89 %
Modül Üzerine Düşen Toplam Işınım	1.757,19 kWh/m²	
	1.757,19 kWh/m ²	
	x 1378,543 m ²	
	= 2.422.366,08 kWh	
Toplam PV Işınımı	2.422.366,08 kWh	
Kirlenme	0,00 kWh	0,00 %
STC Dönüşümü (Modülün nominal verimliliği 20,06 %)	-1.936.501,68 kWh	-79,94 %
Anma PV Enerjisi	485.864,40 kWh	
modüle özgü kısmı gölgeleme	-105.876,45 kWh	-21,79 %
Düşük ışık performansı	751,28 kWh	0,20 %
Nominal modül sıcaklığından sapma	-9.933,48 kWh	-2,61 %
Diğerler	-521,84 kWh	-0,14 %
Uyumsuzluk (üretici bilgisi)	-7.405,68 kWh	-2,00 %
Uyumsuzluk (konfigürasyon / gölgeleme)	-21.672,36 kWh	-5,97 %
Evirici düzenleyici olmadan PV enerjisi (DC)	341.205,86 kWh	
DC başlangıç çıkışına ulaşamadı	-304,01 kWh	-0,09 %
MPP-gerilim aralığı için düzenleme	-1.020,71 kWh	-0,30 %
Maks. DC Akımı için düzenleme	0,00 kWh	0,00 %
Maks. DC Performans için düzenleme	0,00 kWh	0,00 %
Maks. AC Performans/cos phi için düzenleme	-1.179,88 kWh	-0,35 %
MPP Eşleme	-479,90 kWh	-0,14 %
PV Enerjisi (DC)	338.221,35 kWh	
Evirici Girişindeki Enerji	338.221,35 kWh	
Giriş gerilimi anma geriliminden sapıyor	-559,68 kWh	-0,17 %
DC/AC Dönüştürme	-5.287,26 kWh	-1,57 %
Bekleme Konumundaki Tüketim (İnvertörler)	-104,42 kWh	-0,03 %
Toplam kablo kayıpları	0,00 kWh	0,00 %
Bekleme Konumundaki Kullanımı Hariç PV Enerjisi (AC)	332.269,99 kWh	
PV jeneratör enerjisi (AC şebekesi)	332.374,41 kWh	

Şekil 4.29 Kayıp özeti

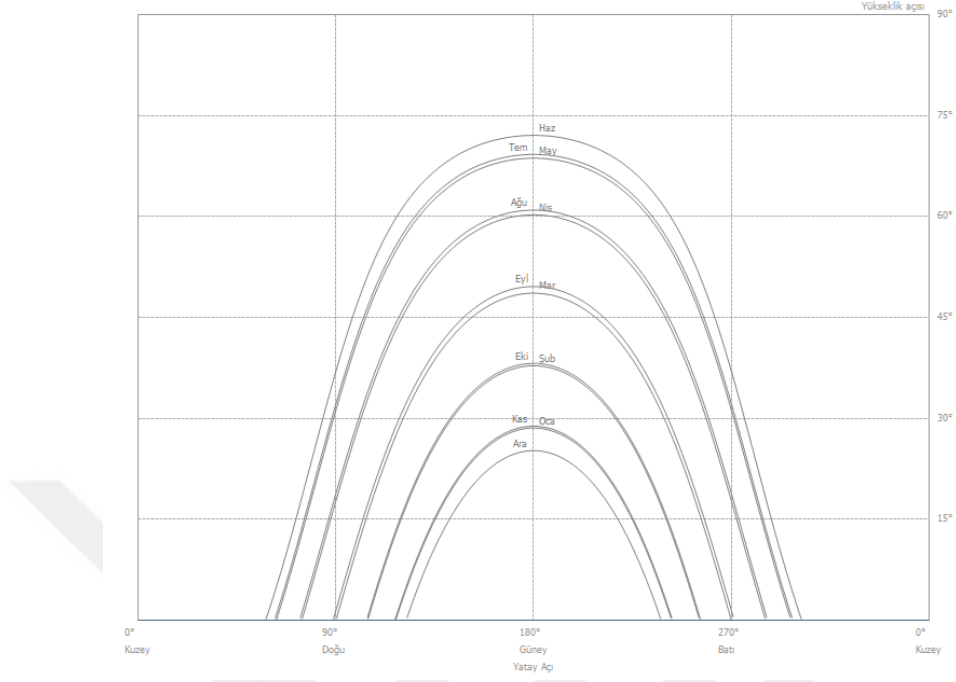


Yakınlaştır (CTRL + Mouse Teker)

Şekil 4.30 Kayıp Diyagramı

Güneşin paneller üzerindeki hareketi, bir ufuk çizgisi meydana getirmektedir. Bu hareketin yanı sıra, gerçekleştiği yükseklik açısı da ufuk çizgisinin şekillenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 4.31’de görüldüğü üzere, simülasyon programı her ay için ayrı ayrı ufuk çizgileri oluşturmuştur. Şekil 4.31’de verilen grafik analiz edildiğinde, kış aylarında ufuk

çizgisinin yükseklik açısının en düşük seviyelerde, yaz aylarında ise en yüksek seviyelerde olduğu fark edilmektedir.



Şekil 4.31 Ufuk Çizgisi

Şekil 4.32’de güneş enerjisi santraline ait enerji akış diyagramı sunulmuştur. Sistem, şebekeye toplamda 1.131.143 kWh enerji aktarmaktadır. Öte yandan, şebekedeki inverterler bekleme modunda 119 kWh enerji tüketmektedir.



Şekil 4.32 Enerji akış diyagramı

4.3 PVSYST SİMÜLASYON PROGRAMI İLE TASARIMI

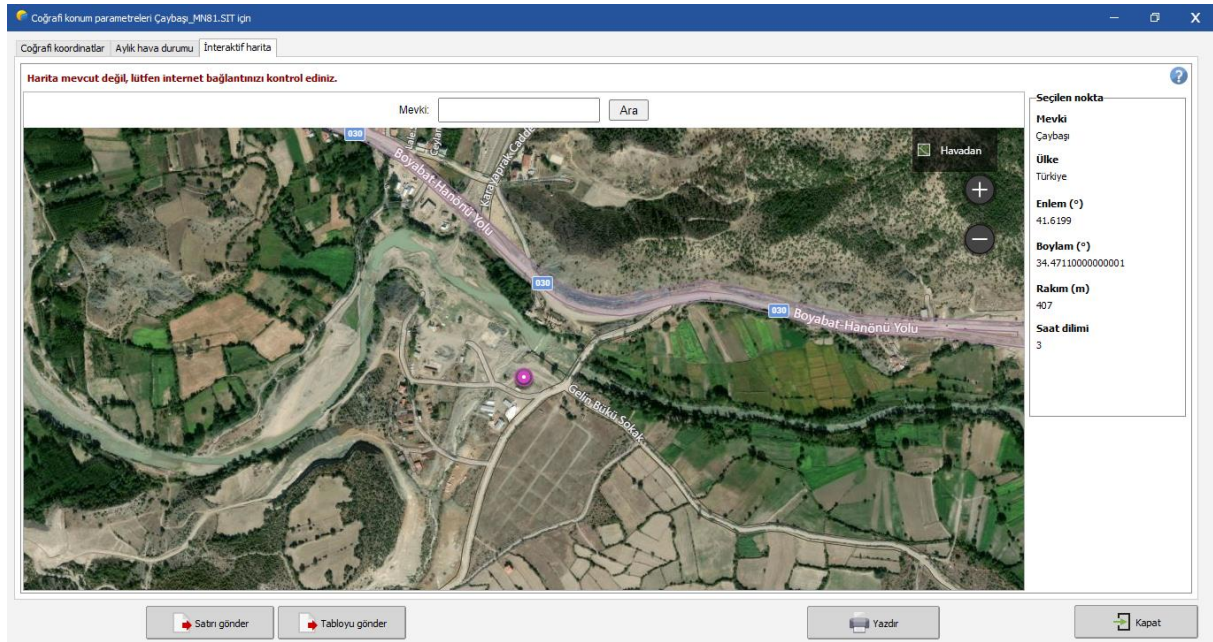
Şekil 4.33’te PVsyst simülasyon programının açılış ekranı gösterilmiştir. Ekranın alt bölümünde “Varyant” kısmında yürütülen çalışmaya dair ayarlamaların başlıkları görülmektedir. Sırası ile “Ana parametreler” ve “Opsiyonel” başlıkları altında bulunan

ayarlamalar yapıldıktan sonra solda bulunan “Simülasyon” sekmesi ile çalışma sonuçlandırılmaktadır.

Sonuç özeti	
Sistem tipi	38 sahne tanımlanmadı, gölgelermesiz
Sistem üretimi	0.00 MWh/yıl
Üretilebilir	0.00 kWh/kWp/yıl
Performans oranı	0.00
Normalize üretim	0.00 kWh/kWp/gün
Dizi kayıpları	0.00 kWh/kWp/gün
Sistem kayıpları	0.00 kWh/kWp/gün

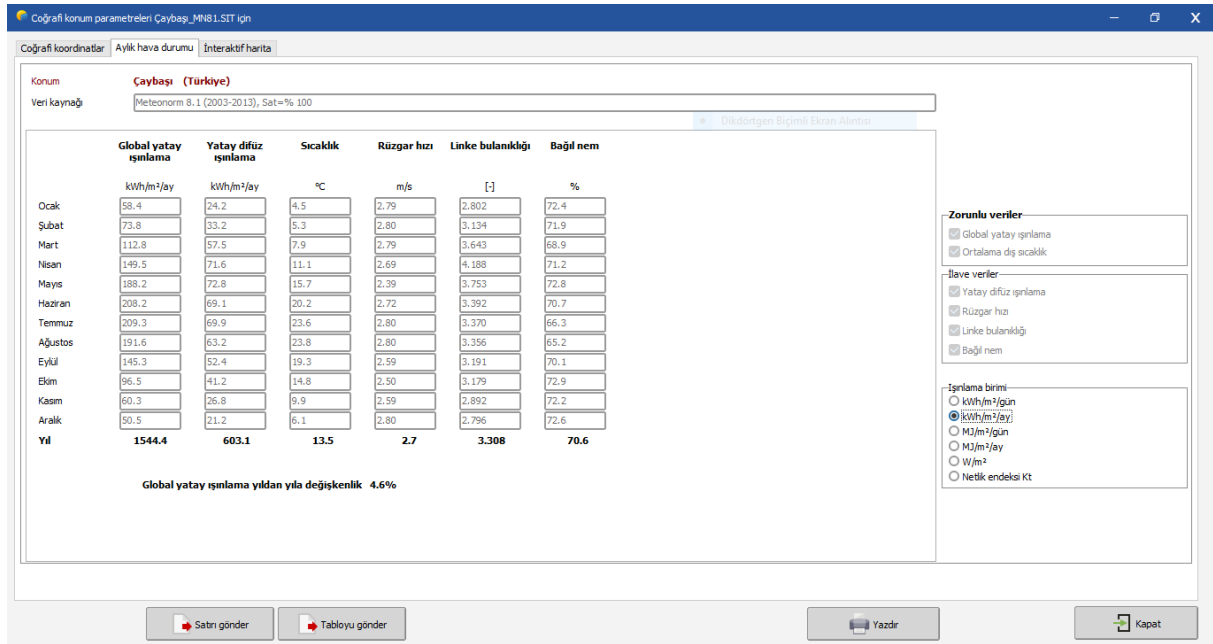
Şekil 4.33 PVSYST Giriş Ekranı

İlk tesisin kurulacağı yerin belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 4.34’te santral konumunun seçilme aşaması gösterilmiştir. Mevcutta kurulu olan Hanönü Güneş Enerji Santrali’nin konumu, harita üzerinden seçim yapılarak veya enlem ve boylam bilgileri eklenerek simülasyon üzerinde tanımlanır.



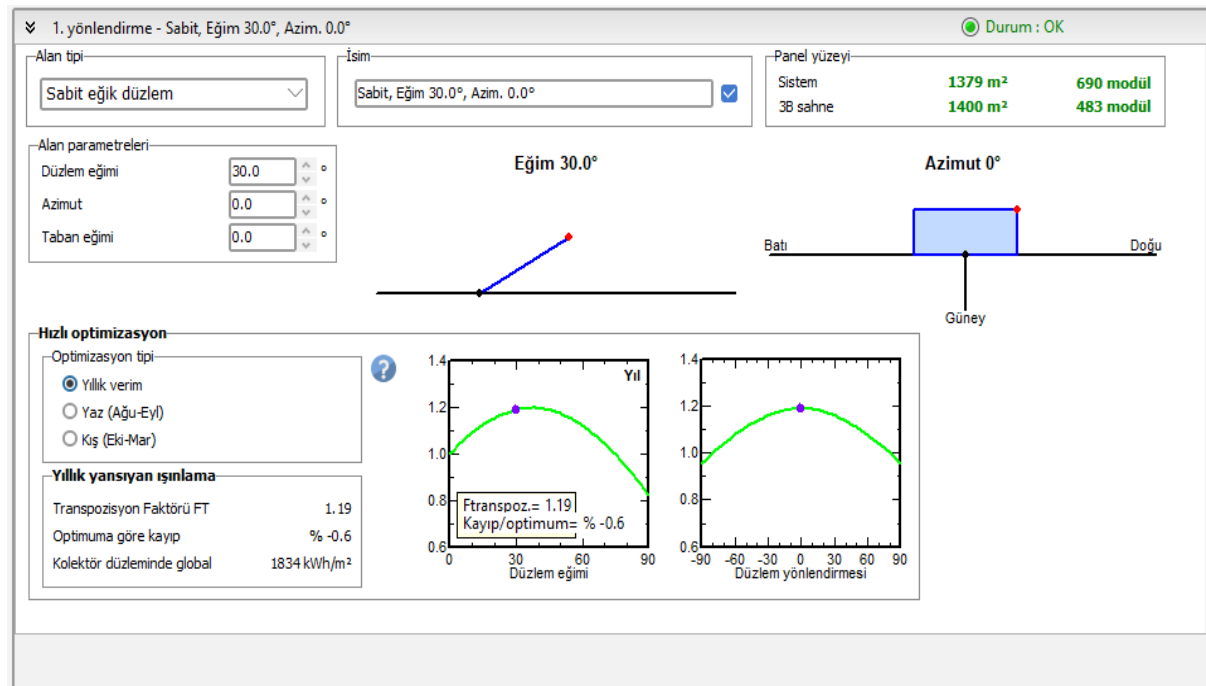
Şekil 4.34 Hanönü GES Konumunun seçilmesi

Çevrimiçi haritadan konum bilgisi girildikten sonra konum adı yazılır. Coğrafi koordinatların bulunduğu alanda, konumun enlem, boylam, yükseklik ve saat dilimi yazılım üzerinden otomatik olarak belirlenir. Yazılımın sağ kısmında ise kullanılacak meteorolojik veritabanı seçimi yapılır. PVSOL yazılımının sonuçlarını PVsyst yazılımıyla karşılaştırmak amacıyla Meteonorm meteorolojik veritabanı tercih edilmiştir. Meteonorm veritabanına ait aylık veriler Şekil 4.35’te gösterilmiştir.



Şekil 4.35 Hanönü GES meteonorm aylık meteorolojik veriler

Program çalıştırıldığında yönlendirme yönetimi bölümü gelmektedir. Şekil 4.36’da santraldeki panellerin yerleşim yönlerinin, azimut açı değerlerinin ve panel eğimlerinin değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.36 Hanönü Ges yönlendirme yönetimi ekranı

Sistem seçiminde, tesiste kullanılan panel ve inverterin marka ve güç değerleri ile her azimut yönündeki string sayıları tanımlanmıştır. Şekil 4.37’de yer alan PV modül seçimi ekranından PVSOL simülasyon programında veritabanından seçimini yaptığımız CW Enerji firmasının CWT400 – 72PM – BC model panel tipi seçilmiştir. Ardından tekrar PVSOL programından seçimini yaptığımız Growatt New Energy marka MAX60KTL3LV model invertör seçimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.38’de inverter seçimi ekranı gösterilmektedir. Bu bölümde son olarak Şekil 4.39’da gösterilen dizi boyutlandırılması yapılarak seri modül sayısı ve zincir sayıları girilerek bir sonraki aşamaya geçilmiştir.

Şekil 4.37 PV modül seçimi

Şekil 4.38 İnvertör seçimi

Şekil 4.39 Dizi boyutlandırması

Termal kayıp faktörü etkisinin girişi yapıldığı ve seçimlerin görüldüğü ekran Şekil 4.40’da gösterilmiştir.

Alan termal kayıp faktörü

Termal kayıp faktörü $U = U_c + U_v \cdot \text{Rüzgar hızı}$

Sabit kayıp faktörü U_c W/m²K

Rüzgar kayıp faktörü U_v W/m²K m/s

Yapıya göre varsayılan değer

☐ Hava sirkülasyonlu "Serbest" modüller

☐ Kubbe

☒ Arka hava kanallı yarı entegre

☐ Arka yalıtımlı entegre

Şekil 4.40 Termal Kayıp Faktörü Giriş Ekranı

Şekil 4.41’de omik kayıplar giriş ekranı gösterilmiştir. Omik kayıplar giriş ekranında, ortalama DC gerilim düşümü değeri, inverter ile GES AGP arasındaki kablo cinsi (Cu/Al), kablo kesiti ve ortalama metraj değerleri girilerek kablo kayıpları hesaplanmıştır. Paneller ile inverter arasındaki elektrik aktarımında kullanılan DC kablolarında gerilim düşümü oluşmakta olup, bu düşüm ortalama % 1,5 olarak hesaplanmıştır. Panellerin çevresinde olabilecek engeller (ağaç, bina, duvar, çit gibi) nedeniyle panellerin yüzeyine gölge düşmesi halinde, panel junction box’taki bypass diyotları devreye girerek sadece gölgeli alanı devreden çıkarmaktadır. Bu işlem sonucunda 0,7 V’luk bir diyot gerilimi kadar gerilim düşümü oluşmaktadır. Tesise ait tek hat şemasında belirtildiği üzere, inverter ile GES AGP arasında 3x95 mm² kesite sahip alüminyum kablo kullanılmış ve ortalama kablo uzunluğu 100 metre olarak tanımlanmıştır.

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

DC devre: alan için omik kayıplar

Tanımlama modu

☐ Global kablolu direnci mΩ ☐ Hesaplanmış

☒ STC’de kayıp oranı % ☒ Varsayılan

Seri diyotun gerilim düşüşü V ☒ Varsayılan

İnvertörden sonra AC kayıpları

AC devre: invertör ’den enjeksiyon noktasına (invertör başına)

☒ AC devresinin omik kaybını tanımla

☒ invertör başına

☐ tüm sistem

İnvert. den enjek. te uzunluk m Kablo kesiti

STC’de kayıp oranı %

STC: $P_{ac} = 67.9 \text{ kW}$, $V_{ac} = 400 \text{ V}$ Tri, $I = 98.1 \text{ A}$

STC’de gerilim düşüşü V (% 1.41)

☐ Bakır

☒ Alü

☐ Bir veya daha fazla OG trafosu kullanılır

☐ YG trafo kullan

Şekil 4.41 Omik Kayıplar Giriş Ekranı

String içerisindeki paneller arasında gerilim ve akım gibi faktörlerden kaynaklanan uyumsuzluk kayıpları % 2 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, panelde oluşan ilk ışıınım ile birlikte meydana gelen LID (Light Induced Degradation) kayıpları, panelin teknik verilerine göre % 3 olarak tanımlanmıştır. Şekil 4.42’de LID ve gerilim uyumsuzluk kayıplarına ait ekran görüntüsü verilmiştir.

The screenshot displays a software interface with a tabbed menu at the top. The active tab is 'Modüllerin kalitesi - LID - Uyumsuzluk'. Below the tabs, there are four main sections:

- Modüllerin kalitesi**: Contains a 'Modül verim kaybı' field set to 2.00% with a 'varsayılan' (default) label and a help icon. A red note below states: 'Modül etkin verimliliğinin üreticinin belirttiği özelliklere göre sapması.'
- Modül uyumsuzluk kaybı**: Contains a 'Mpp'deki güç kayıpları' field set to 2.00% with a 'varsayılan' label and a checked checkbox. A 'Detaylı hesaplama' button is below.
- LID - "light Induced degradation"**: Contains a 'LID kayıp faktörü' field set to 3.0% with a 'varsayılan' label and a help icon. A red note below states: 'Kristalin silikon modüllerinin ilk çalışma saatlerinde STC imalat flaş testi değerlerine göre degradasyonu.'
- Zincir gerilim uyumsuzluğu**: Contains a 'Mpp'deki güç kayıpları' field set to 1.50% with a 'varsayılan' label and an unchecked checkbox. An 'Ayrıntılı araştırma' button is below.

Şekil 4.42 Modül, LID ve gerilim uyumsuzluğu kayıpları

Fotovoltaik santraldeki panellerin çevresinde yer alan baca, kuş pislikleri, kirli gazlar gibi çevresel faktörler, panelde oluşabilecek verimli ışıınım yoğunluğunu azaltmaktadır. Işıınımın bu nedenler ile seyrelmesi, santralin üretebileceği enerji miktarının azalmasına yol açmaktadır. Bu etki Şekil 4.43’de görüldüğü üzere yıllık % 3 oranında bir kayıp olarak tanımlanmıştır.

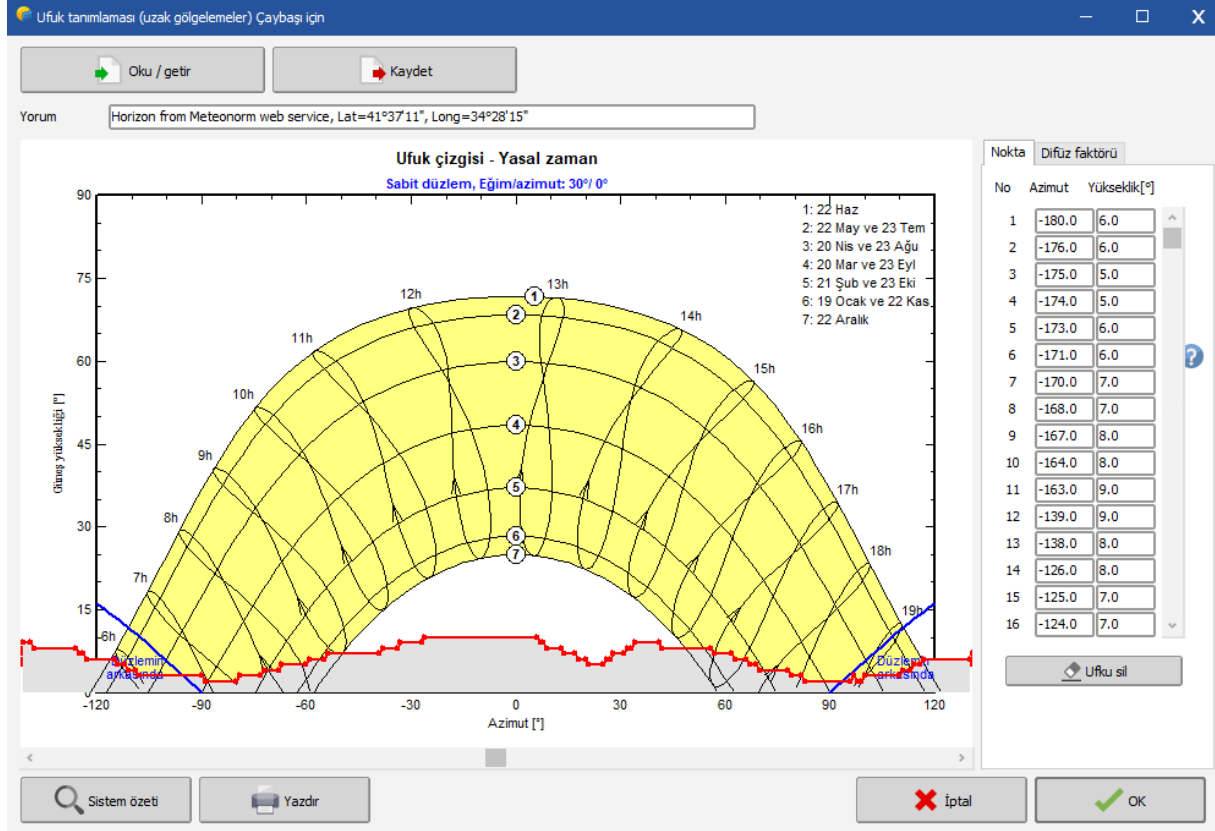
The screenshot displays a software interface with a tabbed menu at the top. The active tab is 'Modüllerin kalitesi - LID - Uyumsuzluk'. Below the tabs, there is one main section:

- Yıllık kirlenme faktörü**: Contains a 'Yıllık kayıp faktörü' field set to 3.0% with a 'Varsayılan' (default) label and a checked checkbox. Below this is an unchecked checkbox labeled 'Aylık değerli belirle'.

Şekil 4.43 Kirlenme kayıplarının tanımlanması

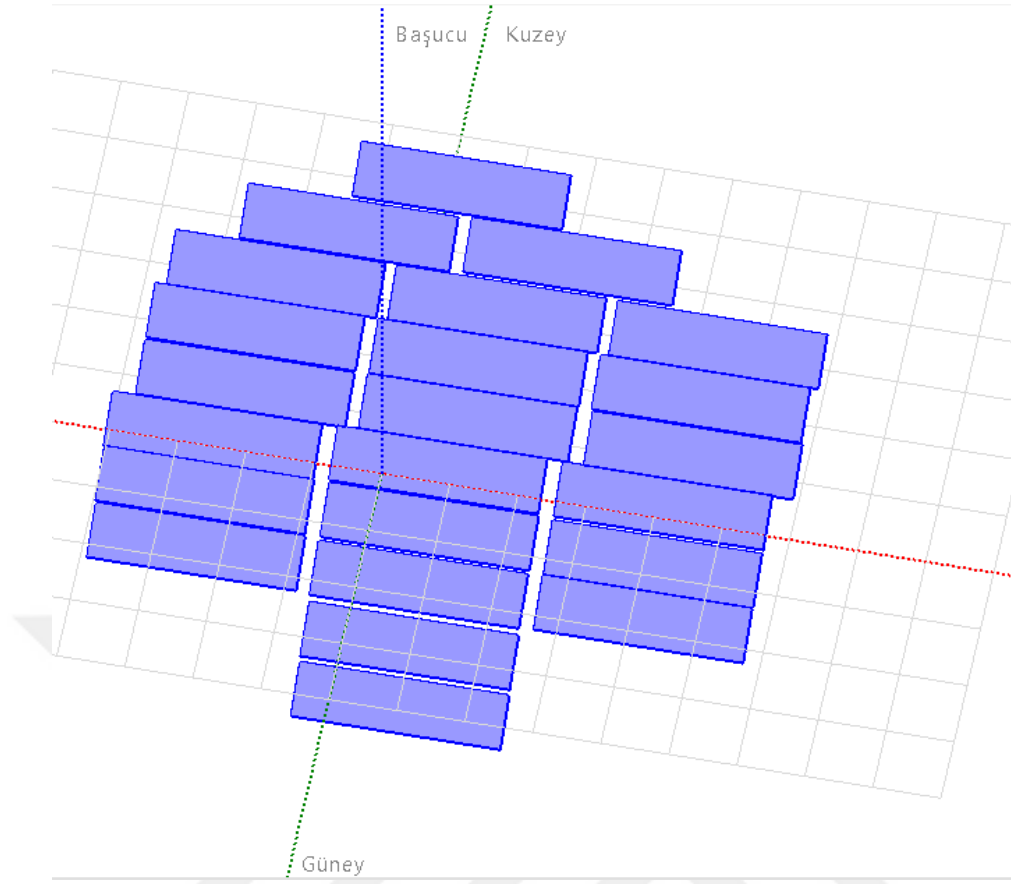
Ana parametreler bölümünde bulunan “Öz tüketim” ile “Depolama” kısımları olmayacağından bu kısımlar atlanmıştır. Sonrasında “Ufuk” bölümü gelmektedir. Şekil 4.44’te sistemin ufuk

tanımlaması gösterilmiştir. Ufuk bölümünün sol üst kısmında yer alan “Oku/getir” sekmesinden tesisin konumuna göre ufuk çizgisi grafiği, güneş yüksekliği ile azimut açısı simülasyonu çalışmaya dahil edilmiştir.



Şekil 4.44 Ufuk tanımlaması

Güneş enerji sistemlerinde bir panelin veya panel grubunun gölgelenmesi, panelin ve dizi çıkışının üretim parametrelerinin düşmesine sebep olmaktadır. Bu durum, üretilebilecek elektrik enerjisi kapasitesini büyük oranda etkilemektedir. Gölgelemeyi kaynaklanan enerji kaybını belirlemek amacıyla, güneş panellerinin ve gölgelenmeye neden olabilecek etkenlerin çizimi yapılmalıdır. Şekil 4.45’de kurulu santralin 3 boyutlu gölgelenme sahnesi verilmiştir. Bu çalışmada tesis etrafında gölgelenmeye sebebiyet verecek herhangi bir yapı vs. bulunmamaktadır.



Şekil 4.45 Hanönü GES 3 boyutlu gölgeleme sahnesi

Simülasyon programında bütün bilgiler ve kayıpların girilmesiyle yazılım hesaplamaları yaparak tesisin aylık/yıllık enerji üretimini, verim oranını ve tesiste oluşabilecek kayıplar rapor olarak alınmıştır.

4.3.1 PVSYST Simülasyonu Sonucunda Elde Edilen Tahmini Üretim Değerleri

Kurulu olan Hanönü Güneş Enerji Santrali'nin gerçek verileri girilerek PVsyst simülasyon programında simüle edilmiş ve gerçek veriler ile karşılaştırılabilecek parametre değerlerine ulaşılmıştır. Şekil 4.46'da gösterildiği üzere programın "Varyant" bölümünde bulunan ve simülasyona hazır halde olan "Simülasyonu yürüt" kısmından program çalıştırılmıştır.

Ana parametreler	Opsiyonel	Simülasyon
☒ Yönlendirme	☒ Ufuk	▶ Simülasyonu yürüt
☒ Sistem	☒ Yakın gölgelemeler	⚙ İleri simülasyon
☒ Detaylı kayıplar	☒ Modül düzeni	📊 Rapor
☒ Öz tüketim	☒ Enerji yönetimi	📈 Detaylı sonuçlar
☒ Depolama	☒ Ekonomik değerlendirme	

Şekil 4.46 Simülasyon başlatma ekranı

Şekil 4.47’de santralin aylık üretim değerleri gösterilmiştir. İlk olarak, 276 kWp kapasiteli fotovoltaik sistemin yıllık toplam enerji üretimi 364,65 MWh olarak hesaplanmıştır. Meteonorm verilerine bağlı olarak, tesisin yer aldığı Kastamonu’nun Hanönü ilçesi için yatay düzlemde yıllık küresel ışıınım miktarı ise 1544,4 kWh/m² olarak belirlenmiştir. Güneş paneline düşen toplam ışıınım 1791,7 kWh/m², panele düşen toplam ışıınımdan etkin enerjiye dönüşebilen küresel ışıınım 1665,7 kWh/m² olarak hesaplanmıştır. Bu etkin ışıınım verilerine dayanarak, fotovoltaik diziden üretililecek yıllık toplam DC enerji 381,96 MWh, enerji nakil hattına aktarımı yapılabilecek yıllık toplam AC enerji ise 364,65 MWh’dir. Santralin performans oranı % 74 seviyelerinde hesaplanmıştır. Ayrıca, enerji nakil hattına aktarımı sağlanabilecek en yüksek enerji değerinin, 39,23 MWh ile Haziran ayında gerçekleşeceği öngörülmüştür.

Bilanço ve genel sonuçlar

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR oran
Ocak	58.4	24.17	4.49	98.2	90.9	22.05	21.51	0.793
Şubat	73.8	33.23	5.28	106.6	99.4	24.00	23.42	0.796
Mart	112.8	57.55	7.85	137.2	128.1	30.42	29.66	0.783
Nisan	149.5	71.56	11.07	163.4	151.9	35.54	34.67	0.769
Mayıs	188.2	72.85	15.73	187.2	173.9	39.59	38.59	0.747
Haziran	208.2	69.13	20.22	198.8	185.0	41.30	39.23	0.715
Temmuz	209.3	69.93	23.62	203.2	189.2	41.61	37.04	0.661
Ağustos	191.6	63.21	23.76	204.5	191.2	41.93	37.62	0.667
Eylül	145.3	52.41	19.31	174.7	163.5	36.72	35.81	0.743
Ekim	96.5	41.20	14.75	132.3	123.9	28.52	27.82	0.762
Kasım	60.3	26.82	9.88	96.8	88.4	20.93	20.42	0.764
Aralık	50.5	21.20	6.05	88.8	80.4	19.36	18.87	0.770
Yıl	1544.4	603.26	13.55	1791.7	1665.7	381.96	364.65	0.737

Açıklama

GlobHor Global yatay ışınlama

DiffHor Yatay difüz ışınlama

T_Amb Çevre sıcaklığı

GlobInc Kolektöre yansıyan global

GlobEff IAM ve gölgeleme için düzeltilmiş etkin Global

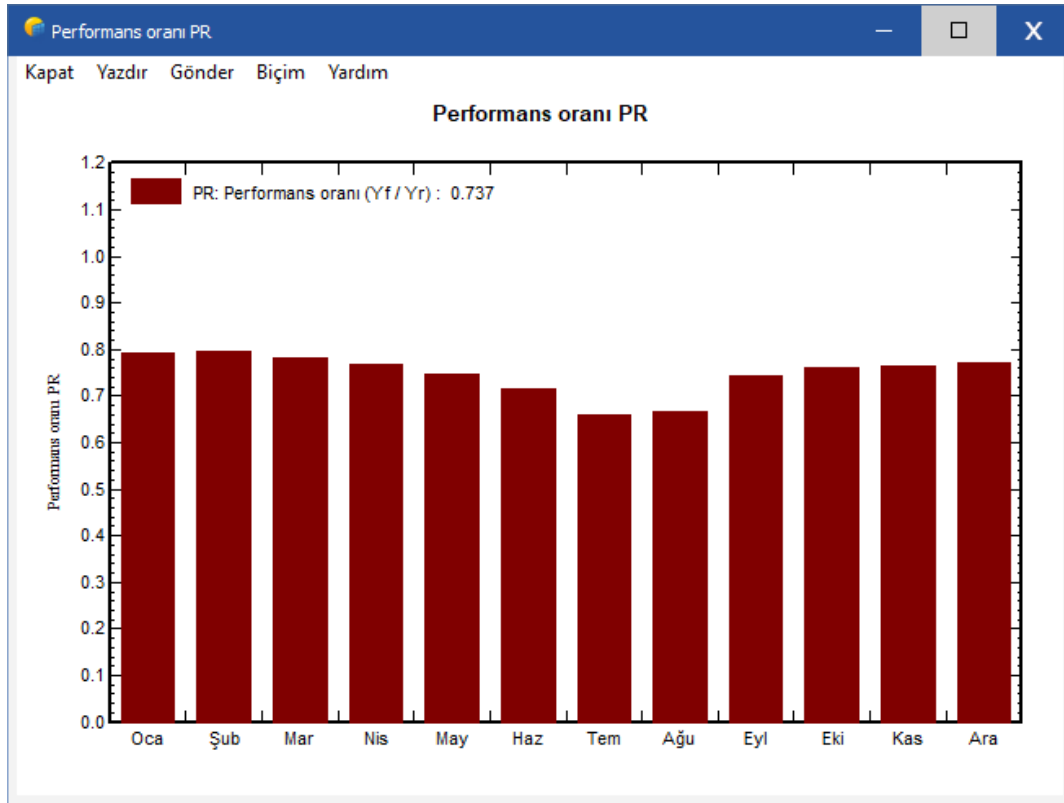
EArray Dizin çıkışında etkin enerji

E_Grid Şebekeye enjekte edilen enerji

PR Performans oranı

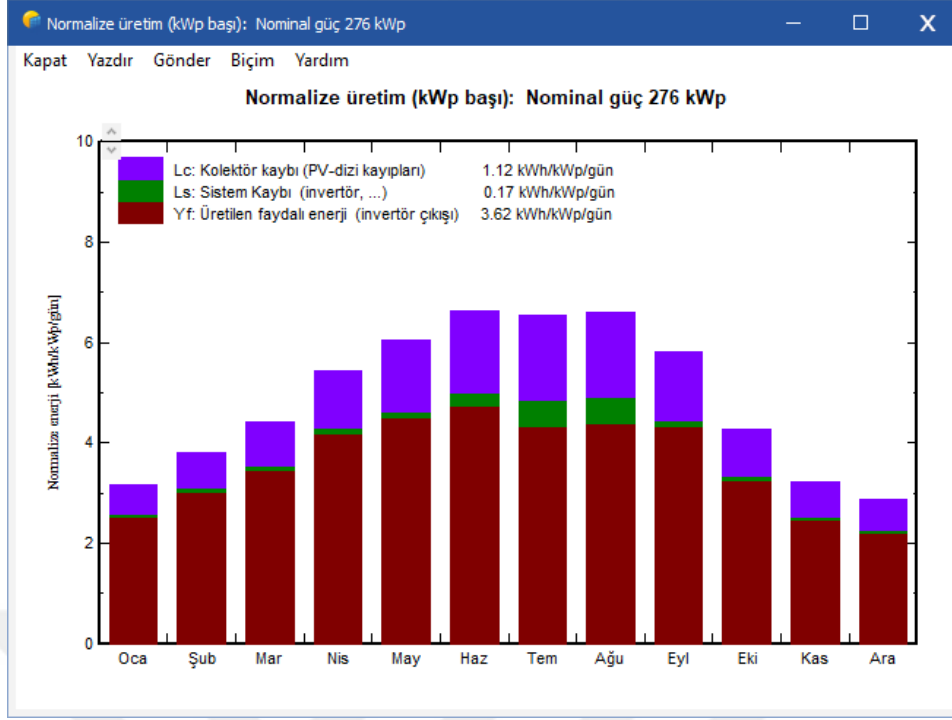
Şekil 4.47 Santralin aylık üretim değerleri

Şekil 4.48’de santralin performans oranı grafiği gösterilmiştir. Santralin performans oranı % 73,7 olarak belirlenmiş ve aylık bazda sunulmuştur. Spesifik verim ise 1321 kWh/kWp/yıl olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.48 Performans Oranı Grafiği

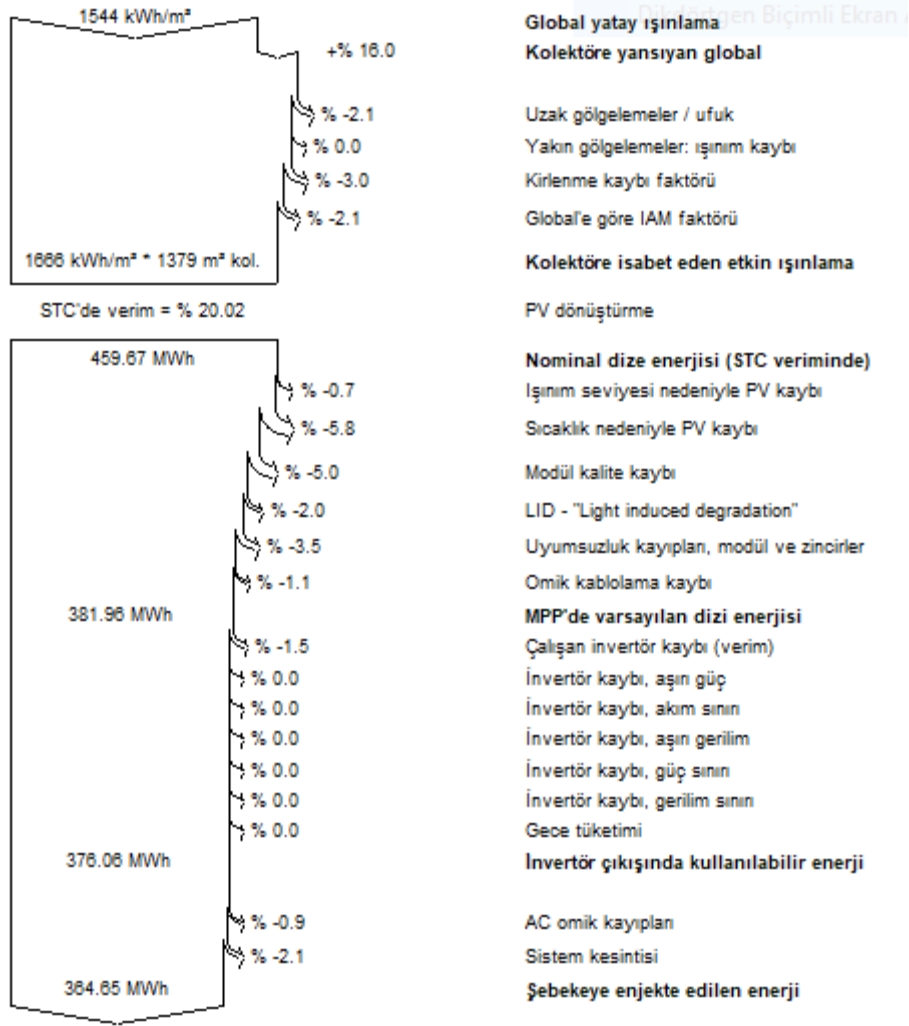
Şekil 4.49’da normalize üretim grafiği gösterilmiştir. Normalize üretim grafiğinde, L_c değeri 1,12 kWh/kWp/gün olarak belirlenmiş olup, bu değer santralin toplam işletme kayıplarını veya fotovoltaik dizi yakalama kayıplarını ifade etmektedir. L_s ise sistemdeki evirici kaybı olup, 0,17 kWh/kWp/gün’dür. Y_f , (üretilebilen etkin enerji değeri) ise 3,62 kWh/kWp/gün olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.49 Normalize Üretim Grafiği

Üretim tesisinde çeşitli kayıplar yaşanabilmektedir. Bu kayıplar, sistem performansını etkileyen faktörler olarak değerlendirilir. Şekil 4.50’de detaylı bir şekilde yıllık bazda santrale ait sistem kayıp diyagramı verilmiştir.

"Yeni simülasyon varyantı" için kayıplar diyagramı - yıl



Şekil 4.50 Tesis kayıp şeması

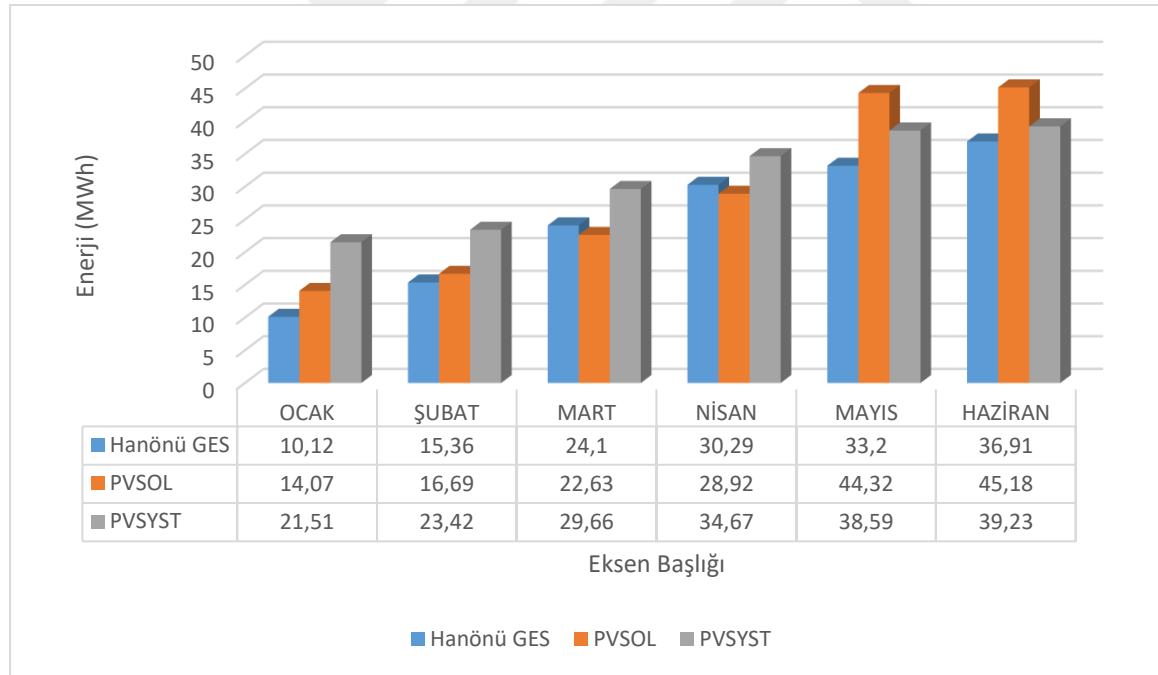
Yatay düzlemde yıllık küresel ışınlam değeri 1544 kWh/m² olup, kolektör üzerinde elde edilen faydalı ışınlam ise 1666 kWh/m²'dir. Bu faydalı ışınlam, güneş paneli veya dizisinin yüzey alanına ulaştığında elektrik enerjisine dönüştürülür. Fotovoltaik dönüşüm sonucunda, standart test koşullarında (STC) nominal enerji üretimi 459,67 MWh olarak hesaplanmıştır. FV dizisinin STC'deki verimliliği % 20,02'dir. Maksimum güç noktası (MPP) koşullarında yıllık dizi enerjisi 381,96 MWh'dir.

Çalışma sürecinde oluşabilecek muhtemel kayıplar arasında; % 5,8 oranında sıcaklıktan kaynaklanan kayıplar, % 1,1 oranında omik kayıplar, % 0,9 oranında AC kayıplar, % 0 oranında gölgelenme kayıpları (gölgelenme olmadığı için) ve % 2 oranında panel LID (Işınlama

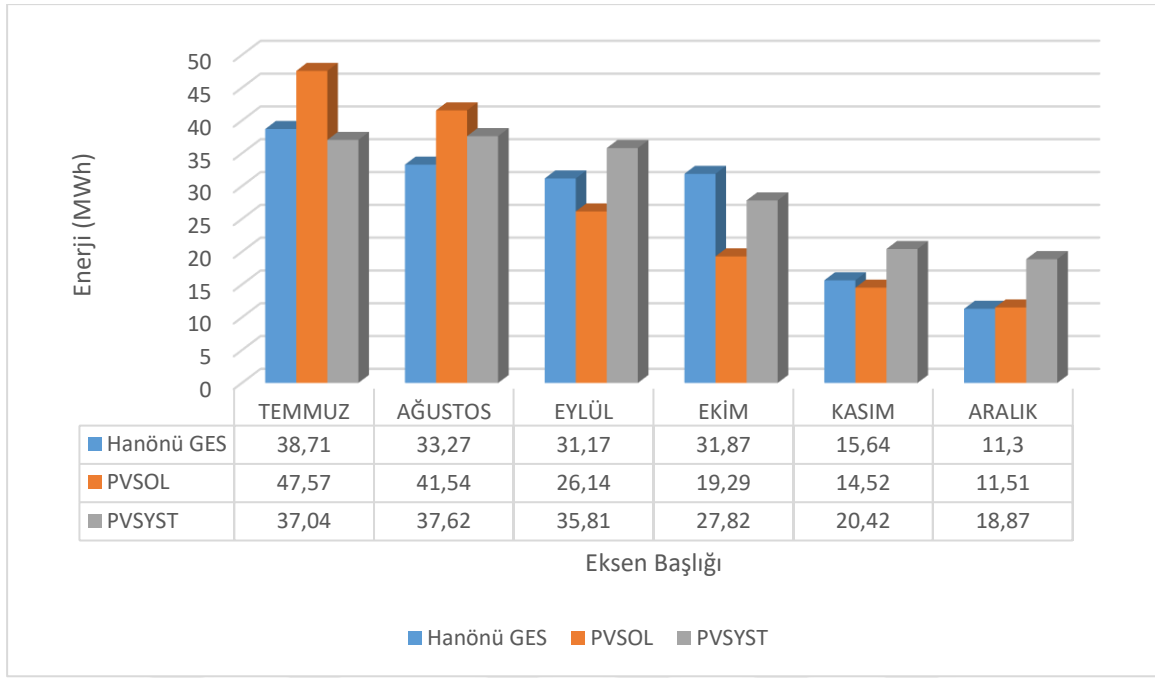
İndüklenen Degradasyon) kayıpları belirlenmiştir. Evirici çıkışında yıllık mevcut enerji 376,06 MWh olup, bu enerji enerji nakil hattına aktarımı sağlanmaktadır. Ancak AC direnç kayıpları ve muhtemel sistemsel kesintiler nedeniyle, yıl bazında şebeke hattına aktarılan enerji miktarı 364,65 MWh olarak hesaplanmıştır.

4.4 GERÇEK ÜRETİM VERİLERİ İLE SİMÜLASYON PROGRAMINDAN ELDE EDİLEN SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Hanönü (Kastamonu) Güneş Enerji Santrali'nin enerji üretimine 2021 yılı Temmuz ayında başlaması ile 2023 yılı Ekim ayına kadar olan süreçte, aylık enerji üretimi kayıtları SCADA sistemine düzenli olarak kaydedilmiştir. Bu verilere ait aylık ortalama değerleri hesaplanarak, aynı dönem için yapılan simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Tesisin yılın ilk 6 ayına ait gerçek üretim verileri ve simülasyon sonuçlarından elde edilen verilerin karşılaştırılması Şekil 4.51'de, yılın son 6 ayına ait verilerin karşılaştırılması ise Şekil 4.52'de gösterilmiştir.



Şekil 4.51 Yılın İlk 6 Ay Üretim Verileri Karşılaştırma Grafiği



Şekil 4.52 Yılın Son 6 Ay Üretim Verileri Karşılaştırma Grafiği

Tesise ait ay bazında gerçek üretim verileri ile simülasyon sonuçlarının bu verilere olan yüzdesel yaklaşımları ifade eden Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Simülasyon sonuçları ile gerçek üretim değerleri arasındaki aylık yüzdesel farklar

Aylar	PVSOL	PVSYST
Ocak	39%	112,5%
Şubat	8,7%	52,5%
Mart	-6,1%	23,1%
Nisan	-4,5%	14,5%
Mayıs	33,5%	16,2%
Haziran	22,4%	6,3%
Temmuz	22,9%	-4,3%
Ağustos	24,9%	13,1%
Eylül	-16,1%	14,9%
Ekim	-39,5%	-12,7%
Kasım	-7,2%	30,6%
Aralık	1,9%	67%

Elektrik enerjisi üretim değerlerinin Ocak ayına ait karşılaştırmasında Hanönü GES enerji üretim santralının gerçek değerine en yakın değer olarak 14,07 MWh enerji değeri ile PV*SOL programı ile bulunmuştur. Bu değer gerçek enerji üretim değerinin 3,95 MWh üzerinde hesaplanmıştır. PVSyst programından elde edilen enerji üretim değeri ise 21,51 MWh değeri ise gerçek üretim değerinden oldukça uzak kalmıştır.

Elektrik enerjisi üretim değerlerinin Şubat ayına ait karşılaştırmasında Hanönü GES enerji üretim santralının gerçek değerine en yakın değer olarak 16,69 MWh enerji değeri ile PV*SOL programı ile bulunmuştur. Bu değer gerçek enerji üretim değerinin 1,33 MWh üzerinde hesaplanmıştır. PVSyst programından elde edilen enerji üretim değeri ise 23,42 MWh değeri ile gerçek üretim değerinden oldukça uzak kalmıştır.

Elektrik enerjisi üretim değerlerinin Mart ayına ait karşılaştırmasında Hanönü GES enerji üretim santralının gerçek değerine en yakın değer olarak 22,63 MWh enerji değeri ile PV*SOL programı ile bulunmuştur. Bu değer gerçek enerji üretim değerinin 1,47 MWh altında hesaplanmıştır. PVSyst programından elde edilen enerji üretim değeri ise 29,66 MWh değeri ise gerçek üretim değerinden oldukça üzerinde kalmıştır.

Elektrik enerjisi üretim değerlerinin Nisan ayına ait karşılaştırmasında Hanönü GES enerji üretim santralının gerçek değerine en yakın değer olarak 28,92 MWh enerji değeri ile PV*SOL programı ile bulunmuştur. Bu değer gerçek enerji üretim değerinin 1,37 MWh altında hesaplanmıştır. PVSyst programından elde edilen enerji üretim değeri ise 34,67 MWh değeri ise gerçek üretim değeri arasında 4,38 MWh'lık bir elektrik enerjisi farkı oluşmuştur.

Elektrik enerjisi üretim değerlerinin Mayıs ayına ait karşılaştırmasında Hanönü GES enerji üretim santralının gerçek değerine en yakın değer olarak 38,59 MWh enerji değeri ile PVSyst programı ile bulunmuştur. PV*SOL programından elde edilen enerji üretim değeri ise 44,32 MWh değeri ise gerçek üretim değeri arasında 11,12 MWh'lık bir elektrik enerjisi farkı oluşmuştur.

Elektrik enerjisi üretim değerlerinin Haziran ayına ait karşılaştırmasında Hanönü GES enerji üretim santralının gerçek değerine en yakın değer olarak 39,23 MWh enerji değeri ile PVSyst programı bulunmuştur. PV*SOL programından elde edilen enerji üretim değeri ise 47,57 MWh değeri ise gerçek üretim değeri arasında 8,86 MWh'lık bir elektrik enerjisi farkı oluşmuştur.

Elektrik enerjisi üretim değerlerinin Temmuz ayına ait karşılaştırmasında Hanönü GES enerji üretim santralının gerçek değerine en yakın değer olarak 37,04 MWh enerji değeri ile PVSyst

programı bulunmuştur. PV*SOL programından elde edilen enerji üretim değeri ise 47,57 MWh değeri ise gerçek üretim değeri arasında 8,86 MWh'lık bir elektrik enerjisi farkı oluşmuştur.

Elektrik enerjisi üretim değerlerinin Ağustos ayına ait karşılaştırmasında Hanönü GES enerji üretim santralinin gerçek değerine en yakın değer olarak 37,62 MWh enerji değeri ile PVsyst programı bulunmuştur. PV*SOL programından elde edilen enerji üretim değeri ise 41,54 MWh değeri ise gerçek üretim değeri arasında 8,27 MWh'lık bir elektrik enerjisi farkı oluşmuştur.

Elektrik enerjisi üretim değerlerinin Eylül ayına ait karşılaştırmasında Hanönü GES enerji üretim santralinin gerçek değerine en yakın değer olarak 35,81 MWh enerji değeri ile PVsyst programı bulunmuştur. PV*SOL programından elde edilen enerji üretim değeri ise 26,14 MWh değeri ile gerçek üretim değerinden oldukça aşağıda kalmıştır.

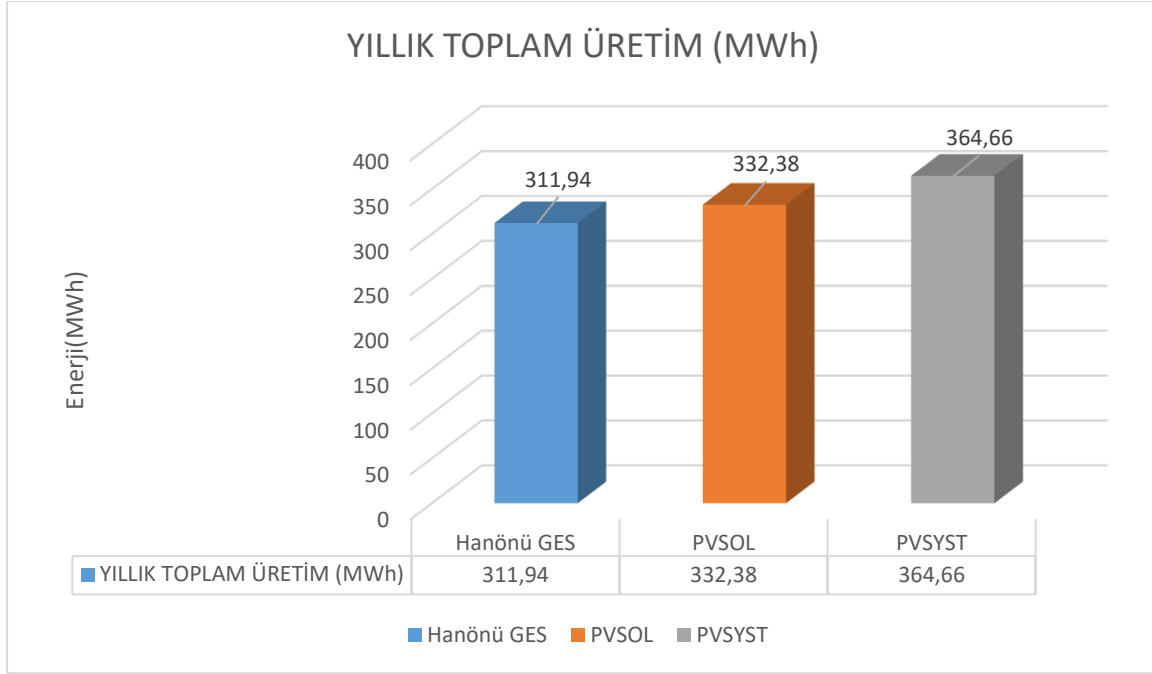
Elektrik üretim değerlerinin Ekim ayına ait kıyaslamasında Hanönü GES üretim değerine en yakın 27,82 MWh ile PVsyst programı olmuştur. Bu değer gerçek üretim değerinin 4,05 MWh altında kalmıştır. PV*SOL programından elde edilen 19,29 MWh enerji üretim değeri gerçek üretim değerinin oldukça altında kalmıştır.

Elektrik üretim değerlerinin Kasım ayına ait kıyaslamasında Hanönü GES üretim değerine en yakın 14,52 MWh ile PV*SOL programı olmuştur. Bu değer gerçek üretim değerinin 1,12 MWh altında kalmıştır. PVsyst programından elde edilen 20,42 MWh enerji üretim değeri gerçek üretim değerinin oldukça üstünde kalmıştır.

Elektrik üretim değerlerinin Aralık ayına ait kıyaslamasında Hanönü GES üretim değerine en yakın 11,51 MWh ile PV*SOL programı olmuştur. Bu değer gerçek üretim değerinin 0,21 MWh üzerindedir. PVsyst programından elde edilen 18,87 MWh enerji üretim değeri gerçek üretim değerinin oldukça üstünde kalmıştır.

Ay bazında enerji üretim değerleri karşılaştırıldığında, panele düşen güneş ışınım açısında azalma ve güneşlenme süresinde kısalma gerçekleşen sonbahar ve kış aylarında, PVsyst yazılımının simülasyon sonuçlarının gerçek verilerden sapma gösterdiği, buna karşılık PV*SOL yazılımının simülasyon sonuçlarından daha doğru tahminler elde edildiği görülmüştür. Yaz aylarında ise panele düşen güneş ışınım açısında ve güneşlenme süresinde artış olmasıyla birlikte, PVsyst yazılımının simülasyon sonuçları gerçek enerji üretimi sonuçlarına oldukça yakın sonuçlar elde etmiştir. PV*SOL simülasyon programı ise bu aylarda gerçekten uzak sonuçlar verdiği görülmektedir.

Şekil 4.53’de yıl boyunca üretilen toplam enerji miktarı gösterilmiştir. Ayrıca tesisin gerçek üretim verileri ile simülasyon sonuçlarının yıllık bazda yüzdesel farkları Çizelge 4.3’te gösterilmiştir.



Şekil 4.53 Yıllık Toplam Üretim Miktarları

Çizelge 4.3 Simülasyon sonuçları ile gerçek üretim değerleri arasındaki yıllık toplam yüzdesel farklar

	PVSOL	PVSYST
Yıllık toplam üretim farkı	6,55%	16,9%

Aynı girdilere sahip iki farklı simülasyon yazılımı ile yapılan tasarımlardan edinilen yıllık enerji üretimi sonuçları ile gerçek enerji üretimi sonuçları kıyaslandığında % 6.55 hata payı ile PV*SOL, reel üretim verisine göre daha isabetli sonuçlar elde etmiştir. PVsyst yazılımı ise % 16,9 sapma oranı ile gerçek değerlere daha uzak sonuçlar elde etmiştir. Üretim değerleri arasındaki farklar hem rakamsal hem de yüzdesel olarak ele alınmıştır.

4.5 KURULU SİSTEMİN TEKNO-EKONOMİK PERFORMANSI

Güneş enerji santrali yatırımının maliyet analizi ve geri dönüş süresi hesaplaması, projeyi ekonomik açıdan değerlendirmek için hayati önem taşımaktadır. Bu tür analizler, yatırımın ne

kadar sürede kendini amorti edeceğini ve uzun vadede ne kadar kazanç sağlayacağını net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Belediyenin elektrik enerjisi tüketim sarfiyatını, GES santralinden üretilerek şebekeye aktarılan elektrik enerji ile mahsuplaşma yöntemi kullanılarak azaltmayı amaçlamaktadır ve bu doğrultuda çalışmalara devam etmektedir.

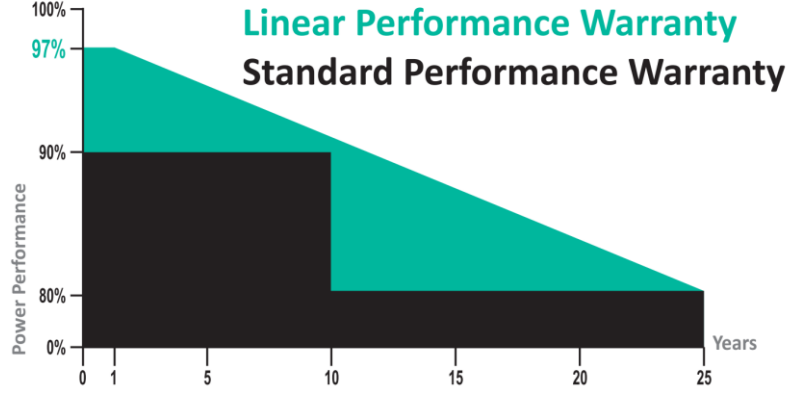
Arazi tipi bir projede, yatırımın toplam maliyeti aşağıda belirtilen kalemlere dağılmaktadır. Yatırımın yaklaşık % 85 - % 90'ını santralin kurulum maliyeti oluştururken, % 5'i sistem bağlantı giderlerine, % 5 - % 10'u arazi alımına ve % 1 - % 3'ü öngörülemeyen harcamalara ayrılmaktadır. Çizelge 4.4'te fotovoltaik santral kurulum maliyetine dahil olan detaylı bileşenler sunulmuştur (Haydaroğlu, 2017).

Çizelge 4.4 PV ekipmanlarının yatırım tutarı içindeki oranları

Ekipman Adı	Yatırım Miktarı İçerisindeki Oran
Fotovoltaik Panel	% 45 - % 50
Elektriksel Malzemeler	% 10 - % 15
İnverter	% 5 - % 10
İnşaat Malzemeleri	% 10 - % 15
İşçilik	% 5 - % 15

Fotovoltaik güneş enerji santrallerinin yatırım maliyetlerinin yanı sıra, sistemin işletme giderleri de dikkate alınarak amortisman süresi hesaplanmalıdır. Yıllık işletme giderleri; % 35- % 40 oranında bakım ve onarım masrafları, % 35 - % 40 oranında personel giderleri, % 25 - % 30 oranında sistem kullanım ücretleri, % 5 - % 10 oranında sigorta maliyetleri ve % 0.5 - % 1 oranında öngörülemeyen giderlerden oluşmaktadır. Fotovoltaik sistemler çoğunlukla 25 yıllık bir kullanım süresine sahip olarak değerlendirilse de panel ve inverter teknolojilerindeki ilerlemelerle birlikte bu süre daha da uzayabilmektedir (Haydaroğlu, 2017)

Kristal yapıya sahip fotovoltaik panellerin veriminde, üretildikleri ilk yıldan sonra % 2 - % 3, takip eden yıllarda ise yıllık % 0.7 - % 1 arasında değişen oranlarda bir azalma gözlenebilir. Bu çalışmada kullanılan güneş panellerine ait Şekil 4.54'te belirtilen veri formunda, panellerin ilk yıl veriminin % 3, sonraki her yıl ise % 0.7 oranında azalacağı belirtilmiştir. Yapılacak tüm hesaplamalarda bu verim kaybı dikkate alınmıştır (Alfasolar Enerji, 2024).



Şekil 4.54 Alfa Solar firmasına ait solar panelin yıllara göre performans grafiği (Alfasolar Enerji, 2024)

Fotovoltaik güneş enerjisi santralının toplam yıllık geliri üzerinden mali analizi yapılarak kurulu olan tesisin geri dönüşüm süresi hesaplanmıştır. İlk olarak yatırıma ait projenin gelir ve giderlerinin mali hesaba dahil edilmesi gerekir. Tüm bunlar hesaba katılarak projenin amortisman süresi (mali geri dönüşüm süresi) belirlenmelidir.

Santralin ilk üretim yılında % 3 panel performans düşüklüğü ile 311,940 MWh elektrik üretimi gerçekleştirdiği santrale ait SCADA sisteminden elde edilmiştir. Bu üretimin, mevcut piyasa koşullarında 5.27 TL/kWh üzerinden satılması ile, yıllık toplam gelir 1,643,923.8 TL olarak hesaplanmıştır. Ancak, her enerji santralinde olduğu gibi, güneş enerji santralının de düzenli bakım ve işletme giderleri bulunmaktadır. Bu maliyet, genellikle yıllık gelirin % 2'si civarında hesaplanmaktadır ve bu ise ilk yıl için yaklaşık 32,878.48 TL olarak tahmin edilmiştir. Bu durumda, ilk yıl için net gelir, toplam gelirden bakım giderleri düşüldükten sonra 1,611,045.32 TL olarak ortaya çıkmaktadır.

Yıllık Gelir:

$$Yıllık\ Gelir = 311,940 * 5.27 = 1,643,923.8\ TL \quad (1.1)$$

Yıllık Bakım Giderleri:

$$Bakım\ Giderleri = 1,643,923.8 * 0.02 = 32,878.48\ TL \quad (1.2)$$

Net Yıllık Gelir:

$$Net\ Gelir = 1,643,923.8 - 32,878.48 = 1,611,045.32\ TL \quad (1.3)$$

Santralin ilk kurulum maliyeti hesabı yapıldığında 2.360.032,30 TL olarak hesaplanmış ancak bu değerin günümüze göre değerlendirmesi hesaplara dahil edilmesi gerekmektedir. Bu hesabın yapıldığı Nisan 2021 ila Kasım 2024 arasında Yİ-ÜFE (Yurtiçi Tüketici Fiyat Endeksi) oranı %581'dir (Yİ-ÜFE, 2024). Yaklaşık maliyet hesabı günümüze uyarlandığında 13.711.787,67 TL olarak hesaplanmıştır. Bu yatırımın geri dönüş süresi, net yıllık gelir kullanılarak hesaplanabilir. Geri dönüş süresi, toplam yatırım maliyetinin yıllık net gelire bölünmesiyle hesaplanır ve bu durumda yaklaşık 8.51 yıl olarak bulunmuştur. Bu süre, yatırımcı için oldukça makul bir değer olarak kabul edilebilir ve projenin uzun vadede ekonomik olarak sürdürülebilir olduğunu göstermektedir.

Geri Dönüş Süresi (Amortisman):

$$Geri Dönüş Süresi = \frac{Ilk Yatırım Maliyeti}{Net Yıllık Gelir} = \frac{13,711,787.67}{1,611,045.32} = 8.51 \text{ yıl} \quad (1.4)$$

Santralin ekonomik ömrü genellikle 25 yıl olarak kabul edilir. Bu süre boyunca, toplam net gelir hesaplanırken panel veriminin % 0.7 oranında her geçen yıl düşmesi de hesaba katılarak toplamda 37,067,713.2 TL gelir elde edilmesi beklenmektedir. Bu toplam gelirden ilk yatırım maliyeti çıkarıldığında, 25 yıllık süreçte net karın 18,823,281.6 TL (2024 yılı fiyatlamasına göre) olduğu görülmektedir. Bu, projenin uzun vadede oldukça karlı bir yatırım olduğunu kanıtlamaktadır.

Kar Hesabı:

Santralin 25 yıl boyunca çalıştığı varsayılarak toplam gelir ve toplam kar miktarı hesaplanırsa;

$$Toplam Gelir = Net İlk Yıl Geliri * \frac{1 - r^n}{1 - r} \quad (1.5a)$$

$$Toplam Gelir = 1,611,045.32 * \frac{1 - 0.993^{25}}{1 - 0.993} = 37,067,713.2 \text{ TL} \quad (1.5b)$$

$$Toplam Kar = Toplam Gelir - İlk Yatırım Maliyeti \quad (1.6a)$$

$$Toplam Kar = 37,067,713.2 - 13,711,787.67 = 23,355,925.53 \text{ TL} \quad (1.6b)$$

İlk 8.51 yılda yatırım maliyeti karşılanırken, bu noktadan sonra elde edilen gelir tamamen kâr olarak değerlendirilir.

Sonuç olarak söz konusu GES projesi, geri dönüş süresi ve uzun vadeli karlılık oranları ile dikkat çekmektedir. Sağlıklı bir finansal planlama ve bakım yönetimi ile yatırımcılar, çevre dostu enerji üretimi yaparken aynı zamanda yüksek ekonomik kazançlar sağlayabilirler.

Sistemdeki sera gazı analizi:

Bir güneş enerji santralinin fosil yakıtlar yerine kullanılması, sera gazı salınımının önemli ölçüde azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Bu azaltımı hesaplamak için bazı varsayımlar ve ortalama değerler kullanılmaktadır.

Fosil yakıtlarla üretilen elektriğin karbon salınımı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

- Dünya genelinde, fosil yakıt kaynaklı elektrik üretiminde ortalama karbon salınımı 0.92 ton CO₂/MWh olarak kabul edilmektedir. Bu değer kömür gibi yüksek karbon salımlı kaynaklarda daha yüksek, doğalgaz gibi nispeten daha temiz kaynaklarda ise daha düşük olmaktadır.
- Güneş enerjisi ise elektrik üretimi sırasında sıfır karbon salınımına sahiptir.

Kurulan GES santrali yılda **311.94 MWh** elektrik üretmektedir. Eğer bu enerji fosil yakıtlarla üretilmiş olsaydı, ortaya çıkacak karbon salınımı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\text{Yıllık CO}_2 \text{ Emisyonu} = \text{Yıllık Üretim} * \text{Emisyon Faktörü} \quad (1.7a)$$

$$\text{Yıllık CO}_2 \text{ Emisyonu} = 311.94 \text{ MWh} * 0.92 \text{ ton CO}_2/\text{MWh} = 287 \text{ ton CO}_2 \quad (1.7b)$$

Bu durumda, güneş enerjisi kullanılarak yılda **287 ton CO₂** salınımı önlenmiş olmaktadır. Santral ömrü boyunca (25 yıl), toplamda azaltılan sera gazı salınımı ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\text{Toplam CO}_2 \text{ Azaltımı} = \text{Toplam Üretim} * \text{Emisyon Faktörü} \quad (1.8a)$$

$$\text{Toplam CO}_2 \text{ Azaltımı} = [311.94 * \frac{1 - 0.993^{25}}{1 - 0.993}] * 0.92 \text{ ton CO}_2/\text{MWh} \quad (1.8b)$$

$$\text{Toplam CO}_2 \text{ Azaltımı} = 7,177.27 * 0.92 \text{ ton CO}_2 / \text{MWh} = 6603 \text{ ton CO}_2 \quad (1.8c)$$

Sistemin tekno-ekonomik faydası özetlenecek olursa;

- **6,603 ton CO₂** azaltımı, yaklaşık **300,000 ağacın** bir yılda soğurduğu karbon miktarına eşittir.
- Bu miktar, bir aracın ortalama olarak **49 milyon kilometre boyunca üreteceği CO₂** salınımını önlemeye denktir.

Güneş enerji santrali, fosil yakıtlardan kaynaklanan yaklaşık **287 ton/yıl CO₂ salınımını önleyerek** çevreye büyük bir katkı sağlamaktadır. 25 yıllık proje ömrü boyunca toplamda **6,603 ton CO₂** emisyonu engellenmiş olacaktır. Bu, sürdürülebilir enerji projelerinin yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda çevresel faydalarını da güçlü bir şekilde ortaya koymaktadır.





BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Dünya genelinde fosil yakıtların tükenme hızı ve çevreye olan olumsuz etkileri, ülkeleri enerji politikalarını gözden geçirerek yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmeye teşvik etmektedir. Benzer şekilde, ülkemizde de yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi giderek artmaktadır. Bu doğrultuda, yenilenebilir enerji projelerinin desteklenmesi ve geliştirilmesi amacıyla devlet teşvikleri sürdürülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları incelendiğinde, ülkemizin coğrafi koşulları ve yüksek enerji potansiyeli sayesinde en geniş kullanım alanına sahip kaynağın güneş enerjisi olduğu görülmektedir. Güneş enerjisi, temiz bir enerji türü olmasının yanı sıra, amortisman süresi değerlendirildiğinde ekonomik bir seçenek olarak da öne çıkmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, temiz enerji üretimine katkıda bulunmak ve çevresel zararları azaltmak amacıyla Kastamonu ili Hanönü ilçesi Bağdere Mevkii'nde, 276 kWp kapasiteli devlet destekli bir enerji sistemi kurulmuştur. Sistem, şebeke bağlantılı (on-grid) bir yapı olarak tasarlanmıştır. Şebeke bağlantılı sistemin tercih edilmesinin temel nedeni, şebeke bağlantısız sistemlere kıyasla daha ekonomik ve verimli olmasıdır.

Ekonomik bir değerlendirme yapıldığında, şebeke bağlantısız sistemlerde ek olarak depolama ekipmanlarına (örneğin, aküler ve akü şarj denetleyicileri) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ekipmanlar, kurulum maliyetlerini arttırmakta ve dolayısıyla sistemin amortisman süresini uzatmaktadır. Ayrıca, depolanan enerjinin şebekeye aktarımı sırasında meydana gelen enerji kayıpları, sistemin genel verimliliğini düşürmektedir. Bu nedenlerden dolayı, şebeke bağlantılı sistemler daha uygun bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Hanönü Güneş Enerji Santrali'nde kullanılan paneller, monokristal yapıda olup, Alfa Solar tarafından üretilen A3S72M400 model paneller tercih edilmiştir. Bu paneller, 72 hücreli ve 400 Wp gücündedir. Simülasyon programlarında söz konusu teknik özelliklere sahip paneller

bulunmaması nedeniyle, yine yerli üretim olan ve benzer teknik verilere sahip CW Enerji firmasının CWT400-72PM-BC model panelleri kullanılmıştır.

Santralde, toplamda 690 adet monokristal panel yerleştirilmiştir. En yüksek verimliliği sağlamak adına, montaj sırasında panellerin eğim açısı 30° , yüzey azimut açısı ise 0° olarak ayarlanmıştır. Sistemde, arızaların tüm sistemi etkilememesi için dizi inverter yapısı tercih edilmiştir. Bu sistem, 1 adet 60 kW ve 3 adet 72 kW nominal güce sahip inverter ile çalışmakta ve toplam 240 kWe AC güç üretmektedir. PV panellerin toplam kurulu gücü ise 276 kWp'tir.

Tamamlanan şebeke bağlantılı güneş enerji sistemi için PVsyst ve PVSOL simülasyon yazılımları kullanılarak, sistemin bir yıl boyunca üretebileceği elektrik enerjisi değerleri tahmini olarak hesaplanmıştır.

Sayısal veriler dikkate alındığında, bu tez kapsamında yürütülen çalışmada yapılan analiz ve karşılaştırmalar sonucunda aşağıdaki değerlendirmeler elde edilmiştir.

- Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün verilerinden elde edilen bilgilere göre; Kastamonu ili Hanönü ilçesi Bağdere mevkiisi için günlük ortalama radyasyon değeri $4,05 \text{ kWh/m}^2$, yıllık toplam radyasyon değeri ise $1.479,50 \text{ kWh/m}^2$ 'dir. PV*SOL simülasyon programı sonucunda $1.551,81 \text{ kWh/m}^2$, PVsyst simülasyon programı sonucunda ise 1.544 kWh/m^2 yıllık toplam radyasyon değeri elde edilmiştir.

- Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün verilerinden elde edilen bilgilere göre Kastamonu ili Hanönü ilçesi Bağdere mevkiisi için yıllık ortalama sıcaklık değeri $16,9^\circ \text{C}$ 'dir. PV*SOL simülasyon programı sonucunda $11,3^\circ \text{C}$, PVsyst simülasyon programı sonucunda ise $13,55^\circ \text{C}$ yıllık ortalama sıcaklık değeri elde edilmiştir.

- Üretim santralinin bir yıl boyunca şebekeye aktardığı toplam elektrik enerjisi miktarı 311,94 MWh olarak kaydedilmiştir. PV*SOL simülasyon programı sonucunda 332,38 MWh, PVsyst simülasyon programı sonucunda ise 364,66 MWh değerinde yıllık şebekeye verilebilecek elektrik enerjisi öngörülmüştür.

- Simülasyon programlarında santral tasarımlarına dair performans yüzdesi PV*SOL simülasyon programında % 67,8 oranında, PVsyst simülasyon programı sonucunda ise % 73,7 olarak hesaplanmıştır. Reel üretim sonuçlarına kıyasla doğruluk oranları ise PV*SOL programı için % 93,45 oranında, PVsyst programı için % 83,1 oranında tespit edilmiştir.

- Kurulumu tamamlanan sistem modüler bir yapıya sahip olması, talep doğrultusunda ek paneller ve inverterler eklenerek güç kapasitesinin artırılmasına olanak tanımaktadır.
- Sistemin faaliyete geçmesiyle elde edilen SCADA ölçüm verileri, simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, PVSOL yazılımının gerçek verilerle daha uyumlu sonuçlar sağladığı tespit edilmiştir.

Simülasyon yazılımları, enerji üretim tahminlerinde oldukça başarılı sonuçlar verebilmektedir. Bu yazılımlardaki tahminlerin doğruluk oranı büyük ölçüde kullanılan meteorolojik veri tabanlarına bağlıdır. Bu çalışmada kullanılan yazılım ve veri tabanları, Kastamonu il ve ilçelerinde kurulması planlanan güneş enerji santralleri (GES) için uygun seçenekler sunmaktadır. Simülasyonlar, sahada meydana gelebilecek arızaların veya mühendislik hatalarının tespitinde kullanılabilir. Ayrıca, sahada kullanılacak panel tipinin seçimi, panellere uygun inverter tasarımı, panel eğim açısının optimizasyonu ve gölge etkilerinin azaltılması gibi konularda öneriler sunarak, tesisin enerji üretim kapasitesinin maksimum düzeye çıkarılmasına yardımcı olabilir.

Araştırma sonucunda ortaya çıkan farklılıkların birden fazla nedeni olabilir. En yüksek fark değeri ocak ayında görülmüştür. Bu farkın nedeni, simülasyon programlarının panel üzerinde aralık ayında meydana gelebilecek yağış, karlanma, tozlanma gibi etkileri yeterince değerlendirememiş olmasıdır. Bu nedenle, ocak ayında beklenen üretim ile gerçek üretim arasındaki fark yükselmiştir.

Işınım yoğunluğu ile çevre sıcaklığındaki yükselme ya da düşüşlerin, performans oranları üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu ve bu sebeple bu etkenlerin üretim verimliliğini şekillendiren en kritik unsurlar arasında bulunduğu belirlenmiştir.

PV*SOL ve PVsyst simülasyon yazılımlarının veri tabanlarında, farklı paneller ve inverterlere ilişkin teknik özellikler bulunmaktadır. Teknik detayları veri tabanında bulunmayan ekipmanlar, manuel veri girişleriyle programa dahil edilebilir. Ancak, paneller ve inverterler haricindeki malzemeler (DC ve AC kablolar, saha dağıtım panoları, transformatörler vb.) için gereken teknik değerler, bu tür programların veri tabanlarında yer almadığı gibi, manuel olarak eklenmesi de mümkün değildir.

Bu simülasyon yazılımlarında, iletken türü, akım taşıma kapasiteleri ve trafo kademeleri gibi parametreler varsayılan değerler üzerinden hesaplanmaktadır. Bu durum, gerçek ölçümlerle

simülasyon sonuçları arasında farklılıklara yol açmaktadır. Santral kurulumunda, panel ve inverter dışındaki diğer malzemelerin seçiminde oluşabilecek farklılıklar, simülasyon yazılımlarının öngördüğü kayıplar ile gerçek üretim kayıpları arasında tutarsızlıkların ortaya çıkmasını olağan hale getirmektedir. Bu nedenle, gerçekleşen kayıpların simülasyonda hesaplananlardan daha yüksek veya düşük olması beklenebilir.

Gerçekte panellerin üzerinde mevsimsel etkilerden kaynaklanan kar birikimi, tozlanma, yağmur gibi çevresel faktörler, panel yüzeyine gelen ışınların geliş ve yansıma açılarını doğrudan etkilemektedir. Bu durum, simülasyon yazılımlarının öngördüğü teorik değerlerle karşılaştırıldığında farkların oluşmasına yol açmıştır. Söz konusu çevresel olaylar, panel yüzeyindeki ışık emilimini azaltarak enerji üretiminde kayıplara neden olmuş ve bu kayıplar simülasyonların tahmin ettiği değerlerden farklılıklar göstermiştir.

Bu çalışma ile, Kastamonu bölgesinde gelecekte kurulması planlanan bir fotovoltaik (FV) sistem için simülasyon çalışmalarının PV*SOL yazılımı ile gerçekleştirilmesi önerilmektedir. PV*SOL programı, yerel koşullar ve sistem bileşenlerine uygun detaylı analiz yapma imkanı sunmaktadır. Bu durum tahmin edilen enerji üretim değerlerini daha güvenilir hale getirmektedir. Bununla birlikte fotovoltaik bir tesisin detaylı analizlerinde, özellikle gölgeleme kayıplarını hesaplayabilme özelliği ve üç boyutlu modelleme yeteneği sayesinde PVsyst simülasyon programı da tercih edilebilir. Bu özellikler, kurulacak GES tesisinin konumlandırılmasında, optimizasyonunda ve çevresel etkilerinin enerji üretimine olan katkılarının doğru değerlendirilmesinde büyük avantajlar sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- Aktacir M A ve Yeşilata B** (2011) Harran Üniversitesi Kampüs İçi Fotovoltaik Sistem Uygulamaları. *Tesisat Mühendisliği*, 111: 41-46.
- Aldudak M** (2018) Economic analysis and efficiency evaluation of PV systems in different cities of Turkey. *Yüksek Lisans Tezi*, Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri İşletim ve Teknolojiler Ana Bilim Dalı, İstanbul, 94 s.
- Alfa Solar.** (31.06.2023) *Alfa Solar Enerji*. Adres: <https://alfasolarenerji.com/>
- Alsadi S. and Khatib T** (2018) Photovoltaic Power Systems Optimization Research Status: A Review of Criteria, Constrains, Models, Techniques, and Software Tools. *Applied Sciences*, 8(10): 1761.
- Bali S** (2015) Güneş Enerjisi Sektöründe Kullanılan Bilgisayar Destekli Benzetim Programları; PV*SOL Expert Programı İncelemesi. *VIII. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 15-16.10.2015, Adana, 127-132.
- Blazev A S** (Ed.) (2011) *Photovoltaics for Commercial and Utilities Power Generation*, 1st edition, ISBN: 9788770229098, River Publishers, New York, 101-104.
- Bouzguenda M, Al Omair A, Al Naeem A, Al Muthaffar M and Ba Wazir O** (2014) Design of an off-grid 2 kW solar PV system. *9th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 25-27.03.2014, Monte-Carlo, Monaco pp.1-6.
- Çelebi G** (2002) Bina Düşey Kabuğunda Fotovoltaik Panellerin Kullanım İlkeleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17(3): 17-33.
- Demiryürek H K** (2020) Lebit Enerji Güneş Santralinin Pvsyst Programı ile Analizi. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 9 (3): 1351-1363.
- Dondariya C, Porwal D, Awasthi A, Shukla A K, Sudhakar K, S R, M M and Bhimte A** (2018) Performance simulation of grid-connected rooftop solar PV system for small households: A case study of Ujjain, India. *Energy Reports*, 4: 546-553.
- Elibol E, Özmen Ö T, Tutkun N, Köysal O** (2017). Outdoor performance analysis of different PV panel types. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 651-661.

- Fisher B, Ghosal K, Riley D, Hansen C, King B and Burroughs S** (2014) Field performance modeling of Semprius CPV systems. *40th IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, pp.759-765.
- Fotovoltaik hücreler.** (21.12.2023) *Solar Energy Technologies Office*. Adres: <https://www.energy.gov/eere/solar/articles/pv-cells-101-primer-solar-photovoltaic-cell>
- Fotovoltaik sistemler ekipmanları.** (29.11.2024) *Güneş Sistemleri*. Adres: <http://www.gunessistemleri.com/fotovoltaikekipman.php>
- Freeman J, Whitmore J, Blair N and Dobos A P** (2014) Validation of multiple tools for flat plate photovoltaic modeling against measured data. *40th IEEE Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, pp.1932-1937.
- Güneş enerjisi** (12.19.2023) *T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Enerji İşleri Genel Müdürlüğü*. Adres: <https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes>
- Güneş enerjisi** (13.10.2023) *T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Bilgi Merkezi*. Adres: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes>
- Güneş enerjisi potansiyeli.** (12.12.2023) *GEPA*. Adres: <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/pages/37.aspx>
- Haselhuhn R and Hemmerle C** (2012) *Fotovoltaik sistemler*. 1st edition, ISBN: 9786056296802 Editörler: Çatakli, M., Çatakli Enerji Eğitim Yayıncılık, İstanbul, 3-12.
- Haydaroglu C** (2017) Dicle Üniversitesi Güneş Enerjisi Santralinin Performans Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 95 s.
- IEA.** (2022). Yenilenebilir Enerji Raporu, *International Energy Agency Publications*, 2022: 26-27.
- IEA** (2023) Yenilenebilir Enerji Raporu, *International Energy Agency Publications*, 2023: 50-51.
- İnverter çeşitleri ve özellikleri.** (30.11.2024) *SB Solar*. Adres: <https://sbsolar.com.tr/invertor-cesitleri-ve-ozellikleri>
- İşler Y S** (2020) Şebeke bağlantılı, depolamalı fotovoltaik güneş enerjisi sistemleri için performans analizi ve verim artırılması. *Doktora Tezi*, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 217 s.
- Karamanav M** (2007) Güneş enerjisi ve güneş pilleri. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 88 s.
- Kastamonu meteorolojik verileri.** (29.11.2023) *Meteoroloji Genel Müdürlüğü*. Adres: <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A&m=KASTAMONU>

- Keskin E** (2012) Türkiye İklim Koşullarında Fotovoltaik Güç Sistemlerinin Tasarımı ve Maliyet Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 114 s.
- Kınalı M Y** (2019) Güneş enerjisi simülasyon programlarının gerçek verilerle doğruluk analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya, 216 s.
- Kırnapcı S ve Pamuk N** (2024) Hanönü (Kastamonu) Güneş Enerjisi Santralının Farklı Simülasyon Programları ile Tasarımı ve Elektrik Enerjisi Üretim Sonuçlarının Değerlendirilmesi. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 7(3), 529-538.
- Küresel elektriksel veriler.** (15.12.2023) *International Energy Agency*: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/monthly-electricity-statistics>
- Küresel enerji üretim istatistikleri.** (15.12.2023) *IRENA*. Adres: <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Statistics-Time-Series>
- Martinez Plaza D, Abdallah A, Figgis B W, Mirza T** (2015) Performance improvement techniques for photovoltaic systems in Qatar: Results of first year of outdoor exposure. *Energy Procedia*, 77, 386-396.
- Milosavljević D D, Kevkić T S and Jovanović S J** (2022) Review and validation of photovoltaic solar simulation tools/software based on case study. *Open Physics*, 20(1): 431-451.
- Oluklulu Ç** (2001) Güneş enerjisinden etkin olarak yararlanmada kullanılan fotovoltaik modüller, boyutlandırılmaları ve mimaride kullanım olanakları üzerine bir araştırma. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 142 s.
- Özyiğit F Y** (2019) Sivas il merkezi ve ilçelerinde güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretiminin ekonomik fizibilitesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 172 s.
- Pavlovic T M, Milosavljevic D D, Pirsl D S** (2013) Simulation of photovoltaic systems electricity generation using homer software in specific locations in Serbia. *Thermal Science* 2013, 17(2): 333-347.
- PVsyst programı bilgileri.** (01.10.2023) PVsyst Web Site. Adres: <https://www.pvsyst.com/>
- Rahman M M, Hasanuzzaman M, Abd Rahim N** (2017) Effects of operational conditions on the energy efficiency of photovoltaic modules operating in Malaysia. *Journal of Cleaner Production*, 143, 912-924.
- RECS** (10.06.2024) *Global Renewable Energy Statistics 2023*. Adres: <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023>
- REN21** (11.06.2024) *Global Status Report 2023*. Adres: https://www.ren21.net/gsr-2023/modules/global_overview/

- Santhakumari R and Sagar N** (2019) Çevresel etkiler ve enerji dönüşümü. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110(1): 83-100.
- Strachan J** (2005) Operation and maintenance field experience for Off-grid residential photovoltaic systems. *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, 13(1):67 – 74.
- Şarj Kontrol Cihazı.** (29.11.2024) *Arden Enerji*: Adres: <http://www.ardenenerji.com/>
- Şimşek S** (2018) Fotovoltaik sistemlerde verimliliği etkileyen faktörlerin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 147 s.
- Tanesab J** (2019) PV sistemlerinin performans analizi. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105(1): 499-508.
- Tozlu C** (2004) Muğla Üniversitesinde kurulu şebekeye bağlı fotovoltaik güç sistemlerinin performans analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Muğla Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla, 114 s.
- Umar S, Bora N, Banerjee R ve Panwar R** (2018) Farklı PV Güç Simülasyon Yazılımlarının Karşılaştırılması: 1 MW Şebeke Bağlantılı PV Güneş Enerjisi Santralinin Performans Analizi Üzerine Bir Vaka Çalışması. *Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 5 (2): 123-134.
- Yadav P** (2015) Simulation and Performance Analysis of a 1 kWp Photovoltaic System Using PVsyst. *Proceedings*, pp.358-363.
- YEKDEM** (15.10.2023) *Enerji Ajansı*. Adres: <https://enerjiajansi.com.tr/yekdem-nedir/>
- Yıldız İ and MacEachern C** (2018) Comprehensive Energy Systems, 1.2 Historical Aspects of Energy. *Elsevier*, 24-48.
- Yİ-ÜFE** (11.12.2024) *TÜİK DATA*. Adres: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Yurt-Ici-Uretici-Fiyat-Endeksi-Kasim-2024-53696>

ÖZGEÇMİŞ

Sefa Kırnacı, ilkokul ve ortaokul eğitimini Zonguldak'ta tamamladıktan sonra Mehmet Çelikel Anadolu Lisesi'nden mezun olmuş, 2010 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başlamış ve 2016 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl Zonguldak'ta faaliyet gösteren Demir Madencilik firmasında yeraltı elektrik mühendisi olarak çalışmaya başlamış ve burada yaklaşık iki yıl görev almıştır. 2018 yılında İller Bankası Kastamonu Bölge Müdürlüğü'nde elektrik mühendisi olarak çalışmaya başlayan Kırnacı, bu görevini halen sürdürmektedir. Akademik kariyerine devam eden Kırnacı, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans yapmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır.