

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**FİZİK ANABİLİM DALI**



**ŞEBEKEYE BAĞLI FOTOVOLTOİK ÇATI SİSTEMİNİN PERFORMANS**  
**ANALİZİ**

**GAMZE GÖKDAĞ ÇAYIR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Jüri Üyeleri :** Prof. Dr. Orhan ZEYBEK (Tez Danışmanı)  
Prof. Dr. Halil GÜLER  
Dr. Öğr. Üyesi Ali ÇETİN

**BALIKESİR, OCAK - 2026**

## **ETİK BEYAN**

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Çatı Sisteminin Performans Analizi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

**Gamze GÖKDAĞ ÇAYIR**

## ÖZET

**ŞEBEKEYE BAĞLI FOTOVOLTOİK ÇATI SİSTEMİNİN PERFORMANS ANALİZİ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**GAMZE GÖKDAĞ ÇAYIR**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**FİZİK ANABİLİM DALI**  
**(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ORHAN ZEYBEK)**  
**(EŞ DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ TUĞRUL AKYOL)**  
**BALIKESİR, JANUARY - 2026**

Bu çalışmada, Balıkesir ili Altıeylül ilçesinde yer alan 10,751 MWp gücündeki Balıkesir Organize Sanayi Bölgesinde bulunan Yarış Kabin San. Tic. ve A.Ş' bünyesinde yer alan güneş enerji santralinin (GES) enerji performansı, gerçek işletme ve saha verileri esas alınarak değerlendirilmiştir. Bu sistemde monokristal fotovoltaik modüller ve çoklu invertör mimarisi kullanılarak tasarlanmıştır. Sistem performansının değerlendirilmesi amacıyla PVsyst yazılımı kullanılarak ayrıntılı bir simülasyon modeli oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar 2025 yılına ait günlük ve aylık gerçek üretim verileri ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon çalışmalarında meteorolojik veri kaynağı olarak Meteonorm veri tabanı kullanılmış; global yatay ışınım, ortam sıcaklığı ve modül eğim açıları modele dâhil edilmiştir. Performans değerlendirmesinde, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından tanımlanan performans göstergeleri esas alınmış; özellikle IEC 61724 standardı kapsamında tanımlanan performans oranı (PR), spesifik enerji üretimi (kWh/kWp) ve sistem kayıpları analiz edilmiştir. Ayrıca modül ve invertör performansları, ilgili IEC 61215 ve IEC 62109 standartlarında belirtilen teknik kriterler çerçevesinde değerlendirilmiştir. Gerçek üretim verilerinin analizi sonucunda, simülasyon sonuçları ile ölçülen değerler arasında oluşan farkların; sıcaklık etkileri, invertör verim kayıpları, çatı montajına bağlı geometrik kısıtlar ve kısmi gölgeleme etkilerinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, ilgili standartlarda tanımlanan kabul edilebilir performans sınırları içerisinde kaldığını ve sistemin öngörülen performans değerlerine yakın sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Bu çalışmanın, IEC standartları çerçevesinde büyük ölçekli endüstriyel çatı tipi fotovoltaik sistemlerin performans değerlendirilmesine yönelik çalışmalara teknik bir referans oluşturması ve benzer uygulamalara yol gösterici olması amaçlanmaktadır.

**ANAHTAR KELİMELER:** Fotovoltaik sistemler, performans oranı, PVsyst simülasyonu, şebekeye bağlı çatı tipi FV sistemleri

## **ABSTRACT**

### **PERFORMANCE ANALYSIS OF A GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC ROOF SYSTEM**

**MSC THESIS**

**GAMZE GÖKDAĞ ÇAYIR**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**PHYSICS**

**(SUPERVISOR: PROF. DR. ORHAN ZEYBEK )**

**(CO-SUPERVISOR: ASSİST. PROF. DR. TUĞRUL AKYOL)**

**BALIKESİR, JANUARY - 2026**

In this study, the energy performance of the solar power plant (SPP) located within Yarış Kabin San. Tic. ve A.Ş., situated in the Balıkesir Organised Industrial Zone with a capacity of 10,751 MWp in the Altıeylül district of Balıkesir province, was evaluated based on actual operational and field data. This system was designed using monocrystalline photovoltaic modules and a multi-inverter architecture. A detailed simulation model was created using PVSyst software to evaluate the system performance, and the results obtained were compared with the actual daily and monthly production data for 2025. The MeteorNorm database was used as the meteorological data source for the simulation studies; global horizontal irradiance, ambient temperature, and module tilt angles were included in the model. The performance evaluation was based on the performance indicators defined by the International Electrotechnical Commission (IEC); in particular, the performance ratio (PR), specific energy production (kWh/kWp) and system losses defined in the IEC 61724 standard were analysed. Furthermore, module and inverter performance was evaluated within the framework of the technical criteria specified in the relevant IEC 61215 and IEC 62109 standards. Analysis of actual production data revealed that the differences between simulation results and measured values stemmed from temperature effects, inverter efficiency losses, geometric constraints associated with roof mounting, and partial shading effects. The findings indicate that the system remains within the acceptable performance limits defined in the relevant standards and produces results close to the anticipated performance values. This study aims to serve as a technical reference for performance evaluation studies of large-scale industrial rooftop photovoltaic systems within the framework of IEC standards and to guide similar applications.

**KEYWORDS:** Photovoltaic systems, performance ratio, PVSyst simulation, grid-connected rooftop PV systems

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>vi</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Güneş Enerjisi ve Kullanımı .....	1
1.2 Güneş Enerjisi .....	3
1.3 Güneş Enerjisinin Kullanımı .....	4
1.4 Tezin Amacı .....	7
<b>2. FOTOVOLTAİK TEKNOLOJİSİNİN TEMELLERİ</b> .....	<b>9</b>
2.1 Fotovoltaik (FV) Teknolojisi .....	9
2.2 FV Etki.....	10
2.3 FV Hücre.....	12
2.4 Güneş Enerjisi Sisteminin Ana Parçaları .....	13
2.4.1 Modül .....	13
2.4.2 Akü .....	17
2.4.3 Regülatör (Şarj kontrol cihazı) .....	20
2.4.4 Yükler .....	22
2.4.5 Elektrik Konektörleri ve Kontrolörleri .....	22
2.5 Dünyada FV Sistemler .....	24
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>27</b>
3.1 Güneş Enerji Santralının Tanıtımı .....	27
3.2 Panel ve İnvörtör İçin String Uyum Hesapları.....	28
3.3 Şebekeye Bağlı FV Sistemlerin Performans Göstergeleri .....	33
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI</b> .....	<b>35</b>
4.1 PVsyst Programı İle FV Güç Santralının Modellenmesi .....	35
4.2 Performans Analizi Sonuçları .....	35
<b>5. GENEL SONUÇLAR</b> .....	<b>45</b>
<b>6. KAYNAKLAR</b> .....	<b>47</b>
<b>7. ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>51</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1: Güneş FV panelleri ve güneş termal ısıtma sistemleri.....	4
Şekil 1.2: (a) Evlerde, (b) Fabrikalarda FV sisteminin kullanımı .....	5
Şekil 2.1: FV etki yani güneş ışığı enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü .....	9
Şekil 2.2: FV'de enerji dönüşüm süreci.....	10
Şekil 2.3: Basit bir FV hücrenin şematik gösterimi .....	12
Şekil 2.4 FV modüller .....	12
Şekil 2.5 Güneş panellerinin türleri.....	13
Şekil 2.6 Akü enerji depolama sistemleri.....	16
Şekil 2.7 En yaygın enerji depolama bataryası .....	18
Şekil 2.8 Güneş enerjisi regülatörlerinin türleri .....	20
Şekil 2.9 Güneş paneli konektörleri türleri. ....	21
Şekil 3.1: Yarış Kabin GES Santrali .....	26
Şekil 3.2: İnvvertörün verimli çalıştığı akım-gerilim grafiği.....	28
Şekil 3.3: İnvvertör-Panel-String Detayı .....	30
Şekil 3.4: Panel İnvvertör String Uyumu Hesapları .....	31
Şekil 3.5: Panel-İnvvertör Yerleşim Uygulama Örnekleri.....	32
Şekil 4.1: PVsyst Analizi Birinci Adım Verileri.....	34
Şekil 4.2: PVsyst Analizi İkinci Adım Verileri .....	35
Şekil 4.3: PVsyst Analizinde Üçüncü Adım Verileri .....	35
Şekil 4.4: PVsyst Analizinde Dördüncü Adım Verileri .....	36
Şekil 4.5: PVsyst Analizinde Genel Sonuçlar .....	38
Şekil 4.6: PVsyst Analizi Sonrası Elde Edilen Şebekeye Bağlı FV Sistemin Yıllık Enerji Kayıpları Diyagramı .....	39
Şekil 4.7: Santral Aylık Enerji Üretimi (kWh).....	40
Şekil 4.8: PVsyst Analizi Aylık Üretim Verileri (kWh) .....	40
Şekil 4.9: GES Gerçek Üretim ve PVsyst Analizi Üretim Verilerinin Karşılaştırılması ....	41

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Tablo 3.1:</b> Santralde kullanılan FV panellerin teknik özellikleri .....	27
<b>Tablo 3.2:</b> İntvertör Teknik Özellikleri.....	27
<b>Tablo 3.3:</b> Düşük ve Yüksek Sıcaklıkta Stringlerin Akım ve Gerilim Hesaplama Formülleri .....	31

## KISALTMALAR

<b>FV</b>	: Fotovoltaik
<b>GES</b>	: Güneş enerji Santrali
<b>IEC</b>	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
<b>PVsys</b>	: Photovoltaic Systems Software
<b>PHP</b>	: Köprü Metni Ön işlemcisi
<b>AJAX</b>	: Asenkron Java Script ve Genişletilebilir İşaretleme Dili
<b>HTML</b>	: Hiper Metin gibi açıklayıcı diller İşaretleme
<b>CSS</b>	: Basamaklı Stil Sayfaları
<b>HD</b>	: Yüksek Çözünürlük
<b>FHD</b>	: Tam Yüksek Çözünürlük
<b>UHD</b>	: Ultra Yüksek Definition
<b>BOS</b>	: Temel işletim sistemi
<b>SAM</b>	: Sistem Danışma Modeli
<b>HIT</b>	: İçsel İnce Tabakalı Heterojonksiyon
<b>DC</b>	: Doğru Akım
<b>AC</b>	: Alternatif Akım
<b>NMOT</b>	: Nominal modül çalışma sıcaklığı
<b>LDR</b>	: Işığa bağımlı direnç

## SEMBOLLER

$E_{DC}$	: Üretilen doğru akım enerjisi
$E_{AC}$	: Üretilen alternatif akım enerjisi
$I_{dc}$	: Akım değeri (Doğru akım için)
$I_{ac}$	: Akım değeri (Alternatif akım için)
$T_{rp}$	: Raporlama dönemi
$N$	: Bir tesisin bir aydaki çalışma günü sayısını göstermektedir.
$P_{ac}$	: Alternatif akım güç değeri
$V_{ac}$	: Alternatif akım gerilimi
$V_{dc}$	: Doğru akım gerilimi
$Y_a$	: Dizi verimi
$P_{pv}$	: Fv sistemde üretilen güç değeri
$Y_f$	: Nihai verim
$Y_r$	: Referans verimi
$\eta_{pv}$	: Modül verimliliği veya enerji verimliliği
$G_i$	: Küresel ışınım
$A_m$	: Modülün alanı
$\eta_{inv}$	: İnvvertör verimliliği
$\eta_{pvsys}$	: Fotovoltaik sistemin verimliliği
$PR$	: Performans oranı
$CF$	: Kapasite faktörü
$L_c$	: Dizi yakalama kaybı
$L_{ct}$	: Düzeltilmiş yakalama kaybı
$L_s$	: Sistem kaybı
$\eta$	: Verim

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmamın tüm aşamalarında bilgi birikimi ve deneyimleriyle bana rehberlik eden, her zaman desteğini hissettiren ikinci danışmanım Balıkesir Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü sayın Dr. Öğr. Üyesi Tuğrul Akyol'a; süreç boyunca yardımlarını ve desteğini esirgemeyen, her zaman yanımda olan değerli hocam Prof. Dr. Orhan Zeybek'e katkı ve desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım. Çocuklarımıza sabırla emek veren, sevgiyle büyüten ve her aşamada yanımda olan, desteklerini ve fedakârlıklarımı hiçbir zaman esirgemeyen değerli eşime, annelere ve babamlara, eşimin çok kıymetli ailesine en içten teşekkürlerimi sunar, kendilerine duyduğum minnettarlığı ve sevgiyi ifade etmek isterim. Aileme, bu süreç boyunca gösterdikleri büyük anlayış, destek ve sabır için ayrıca teşekkür ederim. Bunun yanı sıra, ikinci ailem olarak gördüğüm Yarış Kabini yönetimine ve değerli çalışma arkadaşlarıma da en içten teşekkürlerimi sunarım. Üstün gayret ve özveriyle birlikte çalıştığım, mesleki ve kişisel anlamda önemli bilgi ve deneyimler edindiğim Yarış Fabrikası'na katkı ve desteklerinden dolayı en içten saygı ve hürmetlerimi arz ederim.

**Balıkesir 2026**

**Gamze GÖKDAĞ ÇAYIR**

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Güneş Enerjisi ve Kullanımı

Nüfus arttıkça enerji talebi de artmaktadır. Enerji, teknolojik ve ekonomik kalkınma açısından kritik bir öneme sahip olmakla birlikte, yenilenemeyen kaynaklara dayalı üretimin sürdürülmesi uzun vadede ciddi sorunlara yol açabilmektedir. Buna karşılık, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı enerji verimliliğinin artırılmasına katkı sağlamakta; aynı zamanda hava kirliliğinin ve karbon emisyonlarının azaltılması yoluyla çevreye duyarlı ve sürdürülebilir bir enerji tüketimini desteklemektedir. Dünyamız, enerji güvenliği, dayanıklılık ve sürdürülebilirlik için acil ihtiyaçtan kaynaklanan bir enerji dönüşümü sürecinden geçiyor. Uygun fiyatlı, güvenilir, yerel düşük karbonlu enerji kaynakları her zamankinden daha kritik hale gelmiş olup yenilenebilir enerji kaynakları, çeşitlilik içeren enerji karışımında önemli bir rol oynamaktadır. Fosil veya nükleer yakıtlar dışındaki kaynaklardan elde edilen enerji, bu iki kaynağın karakteristik özelliği olan çevresel etkiler ve yenilenebilirlik konusundaki endişelerden büyük ölçüde muaftır. Her bir alternatif kaynak, biz onu kullansak da kullanmasak da sürekli olarak enerji sağlar.

Dikkate alınması gereken alternatif kaynaklardan biri güneş enerjisidir. Güneş, yaklaşık 5 milyar yıl sonra termonükleer füzyonu durana kadar enerji yaymaya devam edecektir. Dünya sistemine giren güneş enerjisinin yaklaşık %33'ü atmosferi ısıtır ve rüzgârların ve dalgaların hareket etmesine katkıda bulunur. Dünya yüzeyine ulaşan enerjinin %70'i denize düşer ve okyanus yüzeyinden buharlaşma nedeniyle okyanus akıntılarını ve atmosferdeki su buharının dolaşımının büyük bir kısmını harekete geçirir [1].

Güneş, her gün kullandığımız enerjinin neredeyse tamamının kaynağıdır. Odun, petrol, parafin, hidroelektrik ve hatta gıdalardan elde ettiğimiz enerji dolaylı olarak güneşten kaynaklanmaktadır. Güneş enerjisi bitkiler tarafından yakalanır ve depolanır. Bu enerjiyi odun yakarken veya gıda tüketirken kullanılır. Güneş ayrıca, hidroelektrik enerjisini elde ettiğimiz nehirleri dolduran yağmur döngülerine de güç sağlar. Petrol, binlerce yıl önce güneşten enerji toplayan bitki ve hayvanların fosilleşmiş kalıntılarında oluşur Güneş enerjisi, güneş tarafından yayılan radyant enerjidir ve insan kullanımı için termal veya elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Yenilenebilir bir enerji kaynağıdır, yani kömür veya doğal gaz gibi sınırlı fosil yakıtların aksine, doğal olarak yenilenir ve asla tükenmez [1,2]. Güneş enerjisi; yenilenebilir, sürdürülebilir ve çevre dostu bir enerji kaynağı olmasının yanı

sıra fosil yakıt kullanımının azaltılmasına önemli katkılar sağlamaktadır. Ayrıca güneş enerjisi, su ısıtma uygulamaları, ısıtma sistemleri ve elektrik enerjisi üretimi gibi çeşitli alanlarda kullanılabilir. Uygun maliyeti ve ölçeklenebilir yapısı sayesinde güneş enerjisi, enerji dönüşüm süreçlerinde stratejik bir rol üstlenmektedir. Elektrik santrali ölçeğindeki güneş enerjisi projeleri, diğer birçok yenilenebilir enerji teknolojisine kıyasla çok daha hızlı bir şekilde inşa edilip faaliyete geçirilebilir.

Temelinde, güneş enerjisi fotovoltaik (FV) etki yoluyla güneş ışığının elektriğe dönüştürülmesine dayanır. Güneş ışığı (foton adı verilen enerji paketlerinden oluşan) silikon gibi belirli malzemelere çarptığında, elektronlar atom yörüngelerinden çıkar. Bu elektron akışı daha sonra yakalanabilir ve evlere, iş yerlerine ve elektrik şebekesine güç sağlamak için elektrik akımına dönüştürülebilir.

FV paneller ve konsantre güneş enerjisi (KGE) sistemleri gibi güneş enerjisi teknolojileri, güneşin bol enerjisini temiz ve sürdürülebilir bir şekilde kullanmamızı sağlar. İklim değişikliği ve fosil yakıtların tükenmesi konusundaki endişeler artarken, güneş enerjisinin yan etkileri konusunda bazı endişeler olsa da, güneş enerjisi yenilenebilir enerjiye geçiş için çözümün önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Özellikle güneş enerjisi, üreticilerin elektrik faturalarını önemli ölçüde azaltabilir.

Güneş enerjisi teknolojilerinin üç ana türü vardır: FV sistemleri, KGE sistemleri ve pasif güneş enerjisi ısıtma/soğutmadır [3].

FV etki sistemlerinin güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürmesini sağlayan temel süreçtir. FV sistemlerinde, silikon gibi yarı iletken malzemelerden yapılmış güneş pilleri güneş ışığından fotonları emer ve bu fotonlar atomlardan elektronları koparır. Bu, bir elektron akışı oluşturur ve bir invertör tarafından yakalanıp kullanılabilir elektriğe dönüştürülebilir bir elektrik akımı yaratır [4]. FV paneller en yaygın güneş enerjisi teknolojisidir. FV etkiyle güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştüren yarıiletken malzemelerden yapılmış çok sayıda güneş hücresinden oluşurlar [5]. FV paneller çatıların üzerine veya büyük ölçekli güneş enerjisi çiftliklerine kurulabilir. 2022 itibarıyla, silikon bazlı FV paneller küresel güneş enerjisi pazarının %95'inden fazlasını oluşturmaktadır [6].

KGE sistemleri ise aynalar veya lensler kullanarak geniş bir alandaki güneş ışığını küçük bir alana yoğunlaştırır. Yoğunlaştırılan güneş ışığı, bir alıcıyı çok yüksek sıcaklıklara ısıtır ve bu da geleneksel bir buhar türbini veya sterling motorunu çalıştırarak elektrik üretir [7]. KGE sistemleri, güneş ışınımını bir alıcı üzerinde yoğunlaştırmak amacıyla aynalar veya lensler kullanmakta olup, söz konusu alıcı güneşten elde edilen ısı enerjisiyi toplamaktadır. Bu termal enerji daha sonra geleneksel bir buhar türbini veya ısı motoru aracılığıyla elektrik üretmek için kullanılır [8]. KGE tesisleri genellikle daha büyüktür ve kamu hizmeti ölçeğindeki uygulamalar için daha uygundur.

Pasif güneş enerjisiyle ısıtma ve soğutma teknolojileri, güneş enerjisini binaları ısıtmak ve soğutmak için kullanır, böylece mekanik ısıtma ve klima sistemlerine olan ihtiyacı azaltır [9]. Örnekler arasında, kışın güneş enerjisini emen ve yazın yansıtan stratejik olarak tasarlanmış pencereler, duvarlar ve zeminler sayılabilir.

## 1.2 Güneş Enerjisi

Güneş enerjisinin bilimsel temelleri 19. yüzyılda atılmıştır. 1839 yılında Fransız fizikçi Becquerel, iletken bir çözelti içerisinde metal elektrotlardan oluşan bir hücre üzerinde yürüttüğü deneyler sırasında FV etkiyi - güneş pillerinin temel çalışma prensibini - keşfetmiştir. Becquerel, hücrenin ışığa maruz bırakılması durumunda üretilen elektrik miktarının arttığını gözlemlemiş ve bu bulgu, ilk FV hücrenin tanımlanmasına olanak sağlamıştır. 1883 yılında, Amerikalı mucit Fritts selenyum kullanarak ilk modern güneş pilini yaptı. 1954 yılında Chapin, Fuller ve Pearson, Bell Labs'ta yaklaşık %6 verimlilikle silikon FV hücresini geliştirdiklerinde FV teknolojisi doğdu [10]. Bu, güneş enerjisini emip günlük elektrikli cihazları çalıştırmak için yeterli güce dönüştürebilen ilk güneş hücresiydi. Günümüzde, Dünya'nın yörüngesinde dönen uydular ve uzay araçları güneş enerjisiyle çalışmaktadır.

Güneş enerjisi, güneşteki nükleer füzyon reaksiyonları tarafından yani güneşteki hidrojen gazının helyuma dönüşmesi sırasında oluşturulur ve güneş tarafından radyant enerji şeklinde üretilir. Elektromanyetik veya radyant enerjinin hareketi, enine dalgalar üretir. Elektromanyetik enerjinin frekansı ve dalga boyuna göre, radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi, görünür, ultraviyole x-ışınları ve gama ışınları sınıflandırılır. Bu güneş enerjisi grupları “elektromanyetik spektrum” olarak adlandırılır. Sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan güneş enerjisi, Dünya'ya ulaşan güneş ışınımından elde

edilmektedir. Güneş enerjisinin kullanımı sera gazı emisyonu oluşturmadığından çevre dostu ve temiz bir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Dünya yüzeyine ulaşan güneş enerjisinin çok küçük bir kısmının dahi, insanlığın mevcut toplam enerji tüketimini karşılayabilecek potansiyele sahip olduğu bilinmektedir.

Dünyadaki en temel enerji kaynağı olan güneş, aynı zamanda sürdürülebilir ve tükenmez bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmektedir. Her yıl güneşten yaklaşık  $1,5 \times 10^{15}$  MW/s düzeyinde enerji elde edilmektedir. Bu enerji miktarı, insanlığın yıllık toplam enerji tüketiminin yaklaşık 28.000 katına karşılık gelmektedir [11]. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre, Dünya'ya yalnızca 90 dakika boyunca ulaşan güneş ışınımı, küresel ölçekte bir yıllık enerji ihtiyacını karşılayabilecek potansiyele sahiptir. Başka bir ifadeyle, güneş enerjisi teorik olarak tüm insanlığın enerji gereksinimini karşılayabilecek düzeydedir. Bu potansiyelin etkin biçimde değerlendirilebilmesi için, güneş enerjisinden daha verimli yararlanılmasına yönelik yatırımların artırılması büyük önem taşımaktadır.

Türkiye, coğrafi konumu nedeniyle güneş enerjisi potansiyeli açısından dünya genelinde üst sıralarda yer almaktadır. Güneş enerjisinin değerlendirilmesinde; güneş ışınımının yoğunluğu, geliş açısı, verimlilik açısından uygun sıcaklık koşulları ve güneşlenme süresi temel belirleyici parametreler arasında bulunmaktadır. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Kurumu verilerine göre, Türkiye'de ortalama günlük güneşlenme süresi yaklaşık 7,5 saat, yıllık toplam güneşlenme süresi ise 2.640 saat olarak belirlenmiştir. Aynı kaynağa göre, Türkiye'nin ortalama günlük toplam güneş radyasyonu  $3,6$  kWh/m<sup>2</sup>, yıllık toplam güneş radyasyonu ise  $1.311$  kWh/m<sup>2</sup> düzeyindedir [12]. Coğrafi konumu nedeniyle Türkiye, yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Bu potansiyel kullanılarak, düşük maliyetle elektrik üretilebilir ve ısıtma ve sıcak su gibi ihtiyaçlar karşılanabilir.

### **1.3 Güneş Enerjisinin Kullanımı**

Güneş enerjisi, güneşten gelen enerjiyi elektriğe dönüştürerek çalışır. Güneşten elde edilen ve kullanımımıza sunulan iki tür enerji vardır: elektrik ve ısı. Her ikisi de, konutların çatıları ile kırsal alanlarda geniş araziler üzerinde kurulu “güneş enerjisi çiftlikleri” arasında değişen boyutlarda güneş panelleri kullanılarak üretilir. Bu nedenle, güneş enerjisini talebe göre kullanmak faydalıdır. Şekil 1.1'de gösterildiği gibi, güneş enerjisi, iki farklı teknoloji kullanılarak elde edilir: termal güneş teknolojisi ve FV güneş teknolojisi.



**Şekil 1.1:** Güneş FV panelleri ve güneş termal ısıtma sistemleri

Termal güneş enerjisi teknolojilerini kullanan sistemler, güneş ışınımını ısı enerjisine dönüştürerek ısı üretmektedir. Elde edilen bu ısı enerjisi, doğrudan su ısıtma uygulamalarında kullanılabilir gibi elektrik enerjisi üretiminde de değerlendirilebilmektedir. FV teknoloji kapsamında ise, yarı iletken malzemeler aracılığıyla güneş ışınımını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.

Güneş enerjisinin uygulama alanları, 1970'li yıllardan itibaren kullanılmaya başlanmasıyla birlikte zaman içerisinde giderek genişlemiş ve çeşitlenmiştir. Şekil 1.2'de evlerde ve fabrikalarda yaygın olarak kullanılan FV sistemlerini göstermektedir. En bilinen uygulamalar hesap makineleri ve saatlerdir. Bunların dışında güneş enerjisi aşağıdaki alanlarda da kullanılmaktadır:

- Binaların elektrik enerjisi gereksiniminin karşılanması,
- Binalar ve seralarda ısıtma ile sıcak su temininin sağlanması,
- Soğutma, kurutma ve su damıtma uygulamaları,
- Bahçe, yol ve sokak aydınlatma sistemleri,
- Işık sinyal sistemlerinin enerjisini sağlamak,
- Cep telefonlarını ve bazı taşınabilir teknik cihazları şarj etmek,
- Çocuklar için güneş enerjisiyle çalışan oyuncak arabalar,
- Güneş ocakları adı verilen yoğunlaştırıcı sistemlerle yemek pişirmek,
- Güneş enerjisi kuleleri ile yapay uydular.

(a)



(b)



**Şekil 1.2:** (a) Evlerde, (b) Fabrikalarda FV sisteminin kullanımı

Güneş enerjisi santralleri, çevrenin korunmasına katkı sağlamak ve temiz enerji üretimini mümkün kılmak açısından önemli bir rol üstlenmektedir. Isı ve elektrik enerjisine yönelik gereksinimler, güneş enerjisi santralleri aracılığıyla etkin bir şekilde karşılanabilmektedir. Güneş enerjisi sistemlerinin kurulum biçimi ise uygulama alanına bağlı olarak farklılık göstermekte olup; kiremitli çatı, düz çatı ve arazi (tarla) gibi çeşitli yüzeylere uygun şekilde tasarlanabilmektedir. Örneğin, panellerin kiremitli çatılara kurulduğu alan güneş ışığına en fazla maruz kalan alan olmalıdır. Çatılarda, panele eklenen üçgen ayaklarla ışık verimli bir şekilde emilmelidir. Panel tarlaya kurulursa, tel örgü ile çevrilmelidir. Bu teller, bir güç iletim hattı bağlandığında topraklama sağlayacaktır. Ayrıca, panellerde kullanılan DC/AC bağlantı kutularının su geçirmez nitelikte olması gerekmektedir. Bununla birlikte, kablo girişlerinin bu kutulara alt kısımdan yapılması, çevresel etkilere karşı koruma açısından önem arz etmektedir.

Güneş enerjisinin en önemli avantajlarından biri, yenilenebilir ve tükenmez bir enerji kaynağı olmasıdır. Güneş parlamaya devam ettiği sürece, neredeyse sınırsız bir güneş enerjisi kaynağına erişilebilir. Bu da onu kömür ve doğal gaz gibi sınırlı fosil yakıtlara karşı sürdürülebilir bir alternatif haline getiriyor. Güneş enerjisinin birçok avantajı vardır.

Bu kapsamda elde edilen başlıca kazanımlar aşağıda sıralanmaktadır:

- Yenilenemeyen enerji kaynaklarının tüketiminin ve karbondioksit emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlamaktadır.
- Güneş enerjisi sistemlerine sahip yapıların ekonomik değerini artırmaktadır.
- Özellikle kırsal bölgelerde elektrik enerjisi üretiminin daha kolay ve erişilebilir hâle gelmesine olanak tanımaktadır.
- Devlet tarafından sübvans edilen güneş enerjisinin bakım maliyetleri düşüktür ve tüm maliyetler devreye alındıktan sonra açıkça hesaplanabilir.
- Bir yandan doğal kaynakların bozulması, diğer yandan ise yakıtın pahalı olması.
- Modüller, regülatörler ve piller gibi güneş enerjisi sistemi bileşenlerinin üretiminde teknolojinin ilerlemesi, fırsatlar yaratmaktadır.

Güneş enerjisinin dezavantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Güneş enerjisinden yararlanma, doğal olarak yalnızca gündüz saatleriyle sınırlıdır.
- Bulutlu hava koşullarında yeterli verimliliğin sağlanabilmesi için özel nitelikli güneş panellerinin kullanımı gerekebilmektedir.
- Güneş panellerinin kurulumu için gerekli olan yeterli büyüklükte ve dayanıklılıkta alanların temin edilmesi her zaman kolay olmayabilmektedir.

Güneş enerjisinin gelecekteki potansiyeli çok büyüktür ve tahminler, önümüzdeki on yıllarda bu enerjinin benimsenmesi ve kullanımı konusunda hızlı bir büyüme olacağını göstermektedir. Güneş enerjisi endüstrisi, araştırmacılar ve üreticilerin daha verimli ve uygun maliyetli güneş enerjisi teknolojileri geliştirmek için çaba göstermesiyle sürekli olarak gelişmektedir. İnovasyonun kilit alanlarından biri, güneş enerjisinin elektriğe dönüştürülebilir miktarını doğrudan etkileyen güneş pili verimliliğinin artırılmasıdır.

#### **1.4 Tezin Amacı**

Dünya daha temiz ve daha yeşil enerji çözümlerine doğru ilerlerken, güneş panelleri hem ev sahipleri hem de işletmeler için popüler bir seçim haline gelmiştir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, Balıkesir ili Organize Sanayi Bölgesi (OSB) sınırları içerisinde yer alan Yarış Kabini Güneş Enerji Santralinin (GES) enerji performansı, gerçek saha verileri esas alınarak değerlendirilmiştir. Performans analizinde, IEC 61724 FV Sistem Performansı Standardı'nda tanımlanan parametreler temel alınmıştır. Bu parametreler arasında enerji çıkışı, dizi verimi, nihai verim, referans verimi, FV modül verimliliği,

invertör verimliliği, sistem verimliliği, dizi yakalama kaybı ve sistem kaybından oluşan enerji kaybı, performans oranı ve kapasite faktörü yer almaktadır.

Bu tez çalışmasında řu hesaplamalar yapılmıştır:

- Panel - invertör sayılarını belirledikten sonra kısa devre hesapları
- Primer teçhizat hesapları
- Röle koordinasyon ve selektivite hesapları
- YG-AG iletken kablo hesapları
- Verimliliği büyük oranda etkileyen AC-DC kablolar için güç kaybı ve gerilim düşümü hesapları
- Çatı statik analizleri
- Topraklama ve yıldırımdan korunma hesapları yapılmıştır.

## 2. FOTOVOLTAİK TEKNOLOJİSİNİN TEMELLERİ

### 2.1 Fotovoltaik (FV) Teknolojisi

Güneş enerjisi, güneşten gelen enerjiyi elektriğe dönüştürerek çalışır. Güneşten elde edilen ve kullanımımıza sunulan iki tür enerji vardır: elektrik ve ısıdır.

Güneş radyasyonu, güneş tarafından yayılan elektromanyetik ışınımı ifade etmektedir. Dünya yüzeyinin her noktası yıl boyunca belirli bir düzeyde güneş ışınımına maruz kalmakla birlikte, herhangi bir konuma ulaşan güneş radyasyonu miktarı coğrafi ve meteorolojik koşullara bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Güneş enerjisi teknolojileri, bu ışınımı yakalayarak kullanılabilir enerji formlarına dönüştürmeyi amaçlamaktadır.

Genellikle güneş kaynağı veya güneş ışığı olarak adlandırılan güneş radyasyonu, güneş tarafından yayılan elektromanyetik ışınımı tanımlayan genel bir kavramdır. Güneş radyasyonu, çeşitli teknolojik yöntemler aracılığıyla toplanabilmekte ve ısı ile elektrik enerjisi gibi yararlı enerji formlarına dönüştürülebilmektedir. Bununla birlikte, söz konusu teknolojilerin belirli bir bölgede teknik olarak uygulanabilirliği ve ekonomik açıdan sürdürülebilir biçimde işletilmesi, o konumdaki mevcut güneş radyasyonu potansiyeline doğrudan bağlıdır.

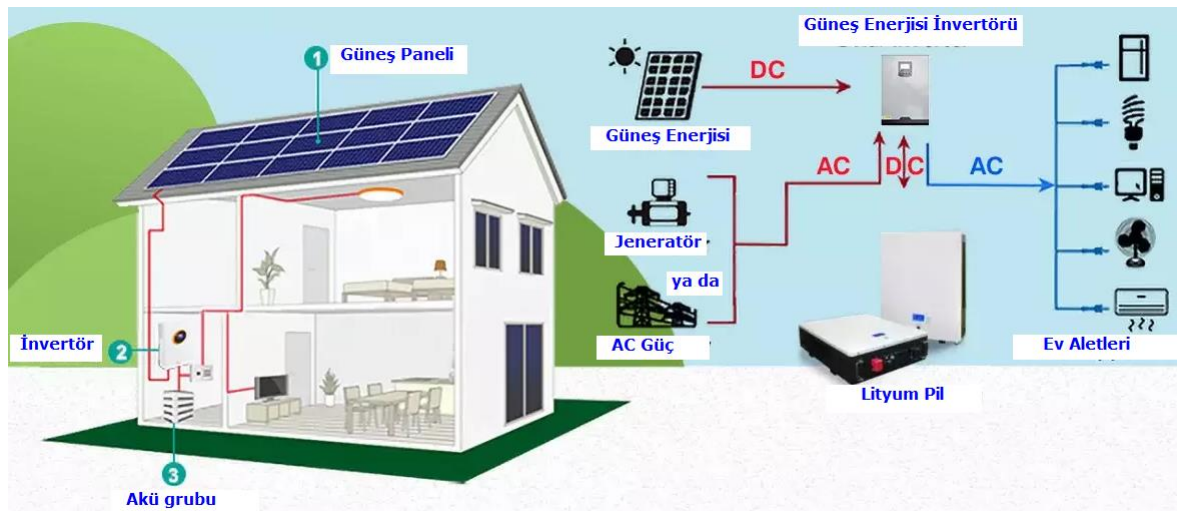
Yaklaşık bir buçuk saatlik süre içerisinde Dünya yüzeyine ulaşan güneş ışınımı miktarı, küresel ölçekte bir yıllık enerji tüketimini karşılayabilecek potansiyele sahiptir. Güneş enerjisi teknolojileri, FV paneller ya da güneş ışınlarını yoğunlaştıran optik sistemler (aynalar) aracılığıyla güneş ışınımını elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Elde edilen elektrik enerjisi, doğrudan enerji üretiminde kullanılabilirdiği gibi, pillerde veya ısı depolama sistemlerinde depolanabilmektedir.

Güneş ışınımının bir güneş paneli yüzeyine ulaşmasıyla birlikte, ışımandan gelen enerji panel bünyesindeki FV hücreler tarafından soğurulmaktadır. Bu enerji, hücre içerisinde mevcut olan iç elektrik alanının etkisiyle hareket eden elektrik yüklerinin oluşmasına neden olmakta ve böylece elektrik akımı meydana gelmektedir. FV malzemeler ve aygıtlar, güneş ışınımını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme prensibiyle çalışmaktadır. Tek bir FV aygıt hücre olarak adlandırılmakta olup, bir FV hücresi genellikle küçük boyutlarda olmakta ve tipik olarak yaklaşık 1–2 watt güç üretebilmektedir [13]. Bu hücreler, farklı yarıiletken

malzemelerden imal edilmekte ve çoğunlukla insan saçının kalınlığının yaklaşık dörtte biri kadar ince bir yapıya sahip olmaktadır. Hücreler, uzun süreli dış ortam koşullarına dayanıklılık sağlamak amacıyla cam ve/veya plastikten oluşan koruyucu katmanlar arasına yerleştirilmektedir. FV teknolojiler - yaygın olarak güneş panelleri olarak adlandırılmaktadır - yarı iletken malzemeler aracılığıyla güneş ışınımını soğurarak elektrik enerjisine dönüştüren sistemler vasıtasıyla enerji üretimini mümkün kılmaktadır. Güneş pilleri olarak bilinen bu cihazlar daha sonra birbirine bağlanarak modül veya panel olarak bilinen daha büyük enerji üretim birimleri oluşturur. Güneş panelleri genellikle silikon veya başka bir yarı iletken malzemeden yapılır ve cam kaplamalı metal bir panel çerçevesine monte edilir. Bu malzeme güneş ışığının fotonlarına (çok küçük enerji paketleri) maruz kaldığında elektronlar serbest bırakılır ve elektrik yükü üretilir.

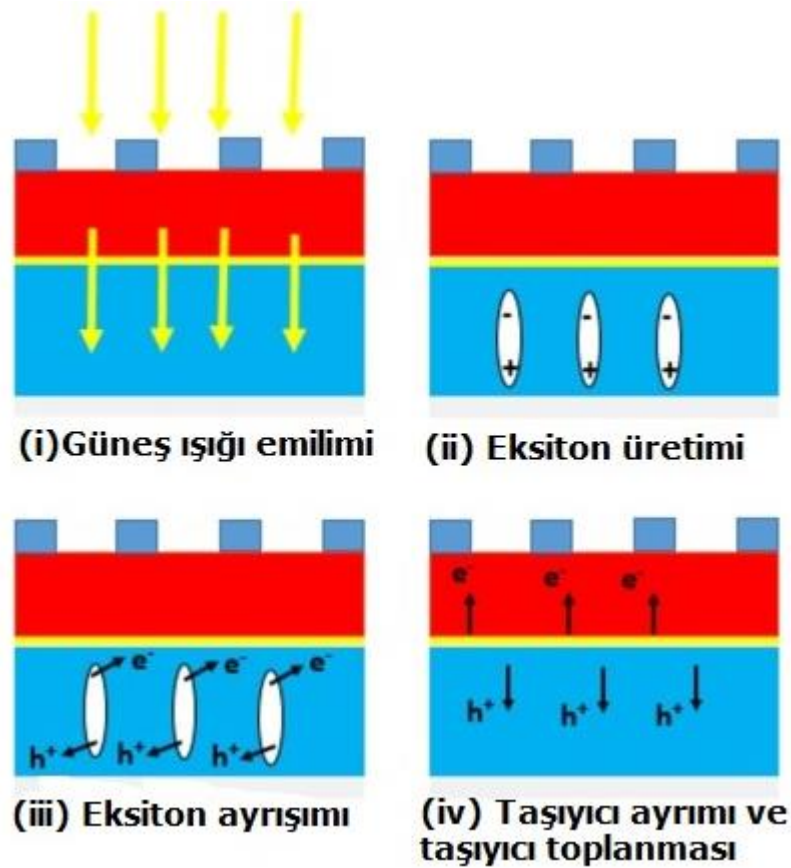
## 2.2 FV Etki

Güneş ışığı FV güneş panellerine düştüğünde, doğru akım (DC) şeklinde elektrik üretilir. DC daha sonra güneş invertörü tarafından alternatif akıma (AC) dönüştürülür. AC, cihazları normal duvar prizlerine taktığınızda kullanılan elektrik akımı türüdür. Bağlantı sürecini daha iyi anlamak için, şebekeden bağımsız bir güneş enerjisi sisteminin kablo şeması Şekil 2.1’de gösterilmiştir [14]. Güneş şarj kontrol cihazı, pilin şarj durumunu yönetmekten sorumlu olan güneş enerjisi panellerine bağlanır. Pil tarafından üretilen doğru akım, güneş invertörü aracılığıyla alternatif akıma dönüştürülür. Son olarak, invertörün alternatif akım çıkışı ev aletlerine güç sağlar.



Şekil 2.1: FV etki yani güneş ışığı enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü

Güneş enerjisi panellerinin nasıl bağlanacağını anlamak, şebekeden bağımsız bir ev güneş enerjisi sistemi için çok önemlidir. İnvvertörleri ve yeterli sayıda güneş enerjisi panelini doğru şekilde bağlayarak, elektrik üretim verimliliği artırılabilir ve güneş enerjisi kaynaklarından en iyi şekilde yararlanılabilir. Sistemin önemli bir bileşeni olan invertör, tüm güneş enerjisi sisteminin normal çalışması için hayati öneme sahiptir. Şebekeden bağımsız bir güneş enerjisi sistemi seçerken, her bir bileşenin işlevini ve bağlantı yöntemini anlamak, sistemin istikrarlı çalışmasını sağlayarak ev aletlerinize güvenilir temiz enerji sağlar. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi, güneş ışığı bir güneş paneline çarptığında, FV etkisiyle elektrik yükü oluşur. FV’lerin çalışması, güneş ışığı hücrenin üzerine düştüğünde ve ardından emici tabakada emilerek serbest taşıyıcılar ürettiğinde hücre içinde voltaj/akım oluşumunu ifade eden FV etkiye dayanır [15].



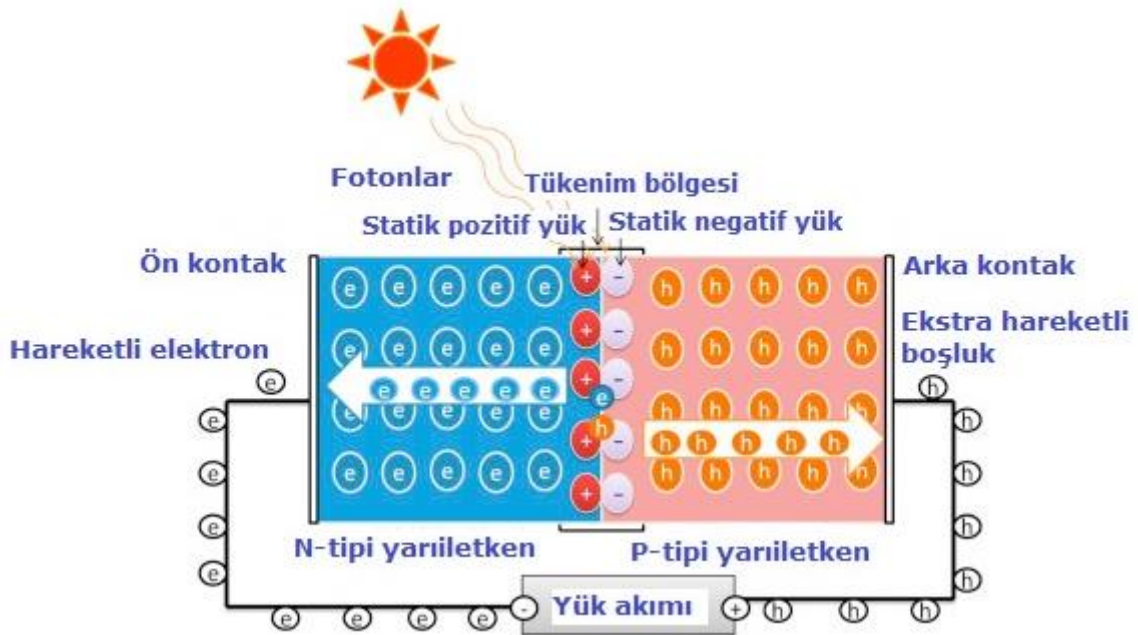
Şekil 2.2: FV’de enerji dönüşüm süreci

FV hücresi, FV etki nedeniyle serbest yük taşıyıcıları üreten bir elektronik cihazdır. Hücrenin içindeki p-n bağlantısı, eksitonun serbest yük taşıyıcılarına ayrışmasını kolaylaştıran bir dahili potansiyel oluşturur. FV tekniği ile güneş enerjisinin kullanılması

Şekil 2.3'de gösterilmiştir. FV etki, güneş ışığı hücrenin üzerine düştüğünde ve ardından emici tabakada emilerek serbest taşıyıcılar ürettiğinde hücre içinde voltaj/akım oluşmasını ifade eder [16]. FV hücresi, FV etki nedeniyle serbest yük taşıyıcıları üreten bir elektronik cihazdır. Hücre içindeki p - n bağlantısı, eksitonun serbest yük taşıyıcılarına ayrışmasını kolaylaştıran yerleşik bir potansiyel oluşturur. FV tekniği ile güneş enerjisinin kullanılması Şekil 2.3'de gösterilmiştir.

### 2.3 FV Hücre

FV etkisi, FV hücresinin emilen güneş ışığı enerjisini elektriğe dönüştürdüğü bir süreçtir. FV sistemi, çevre güvenliği açısından faydaları olan sıfır karbondioksit emisyonu ile çalışır. Nanomateriyaller tarafından emilen foton enerjisi, atomlardaki elektronlara aktarılır. Şekil 2.3'de FV hücresinin çalışmasını resimli olarak göstermektedir. İki farklı p-n yarıiletken tabaka birbirine temas ettiğinde, n- ve p-tipi yarı iletken tabakalar arasında bir elektrik potansiyeli oluşur. Elektronlar birleşme noktasında dolaşır ve p-tipi yarı iletkene atlayarak arkasında statik pozitif yük bırakır. Aynı anda, delikler de bağlantı noktasını geçerek statik negatif yük bırakır. Bu serbest elektronlar ve delikler birleşerek kaybolur. Belirli bir seviyede, p-n bağlantı noktasında, yük taşıyıcıların göç etme olasılığının olmadığı bir tükenme bölgesi oluşur. Bu ayrılmış statik pozitif ve negatif yükler, tükenme bölgesi boyunca bir elektrik alanı oluşturur. Bu yerleşik elektrik alanı, akımı harici bir devreye yönlendirmek için gereken kuvveti veya voltajı sağlar.



Şekil 2.3: Basit bir FV hücresinin şematik gösterimi

Güneşten gelen foton enerjisi yarıiletken tabaka tarafından emildiğinde, malzemenin elektronlarına aktarılır. Elektronlar, iletim bandına geçmek için yeterli enerjiyi elde ederler ve bu da valans bandında bir “boşluk” bırakır. Valans elektronları, yarı iletken malzemenin atomlarındaki normal konumlarından kaçır ve elektrik akımı veya akımın bir parçası olur. Bu voltaj, elektronların negatif uca, boşlukların ise pozitif yöne doğru hareket etmesine neden olur. Yeterli miktarda güneş enerjisi olduğunda, yani emilen foton enerjisi FV hücresinde kullanılan malzemelerin bant aralığı enerjisinden daha büyük olduğunda, atomlar çarpışır ve serbest elektronlar göç etmeye başlar, böylece elektrik akımı oluşur.

Sonuç olarak, FV'lerin çalışması, güneş ışığı hücrenin üzerine düştüğünde ve ardından emici tabakada emilerek serbest taşıyıcılar ürettiğinde hücre içinde voltaj/akım oluşumunu ifade eden FV etkiye dayanır. FV hücresi, FV etki nedeniyle serbest yük taşıyıcıları üreten bir elektronik cihazdır. Hücrenin içindeki p-n bağlantısı, eksitonun serbest yük taşıyıcılarına ayrışmasını kolaylaştıran bir dâhili potansiyel oluşturur [17].

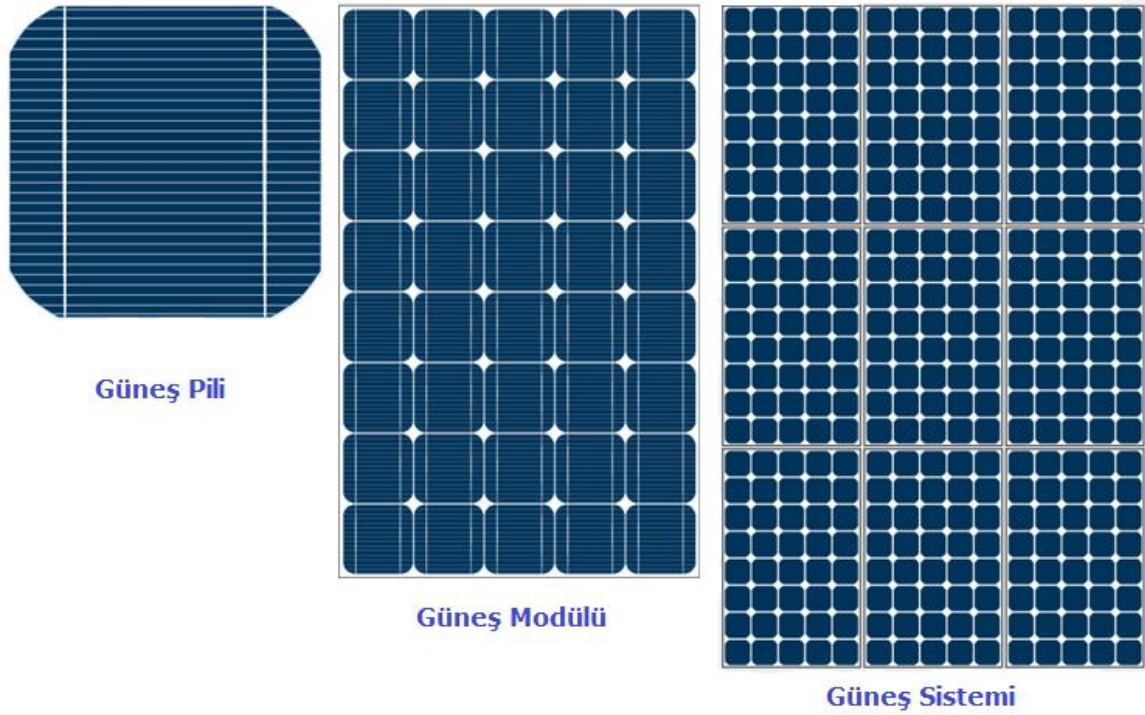
## **2.4 Güneş Enerjisi Sisteminin Ana Parçaları**

### **2.4.1 Modül**

FV modüller, güneş pillerinden oluşan bir mozaikten oluşur. FV modül, güneş ışığını DC elektriğe dönüştüren paketlenmiş bir tertibattır. Modülün boyutu, kullandığımız yükün boyutu ve kullanım süresine göre belirlenir. Birden fazla yarı iletken hücreyi, çatılara, zemin montajlarına veya araçlara monte edebileceğiniz dayanıklı bir üniteye birleştirir. Ayrıca coğrafi konum ve hava koşullarına da bağlıdır [18].

Genellikle güneş paneli olarak adlandırılan FV modül, sisteminiz için kullanılabilir voltaj ve akım sağlamak üzere seri ve/veya paralel olarak elektriksel olarak bağlanmış birçok FV hücresi içerir. Her hücre, fotonlar serbest elektronlar oluşturduğunda küçük bir voltaj üreten yarıiletken bir malzemedir -genellikle kristal silikondur; hücrelerin birleştirilmesi, bu voltaj ve akımı invertörler, piller veya DC yükleri için pratik seviyelere çıkarır. Genel olarak modüllerin bilinen isimleri: güneş paneli = güneş modülü = FV modülü = FV paneli = panel = modül = FV paneller. Genellikle güneş modülü ve FV modülü terimleri birbirinin yerine kullanılır. Her ikisi de aynı fiziksel birimi ifade eder: güneş ışığını elektriğe dönüştürmek için bir araya getirilmiş, lamine edilmiş ve çerçevelenmiş çok sayıda FV hücredir. FV modül ifadesi daha kesin ve teknik bir terimdir. Endüstri standartları, veri sayfaları ve sertifikalar

belgeleri, FV süreci, yani ışığın elektriğe dönüştürülmesini doğrudan ifade ettiği için FV modülünü tercih eder [18].



**Şekil 2.4:** FV modüller

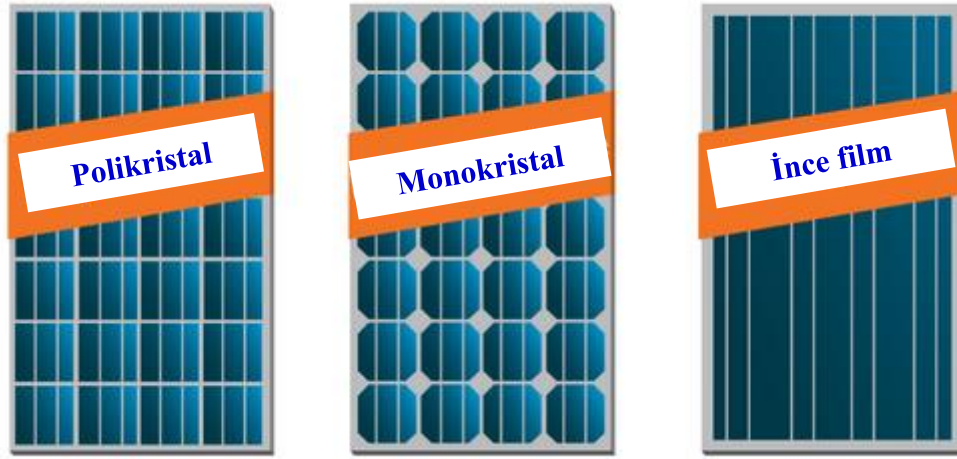
Genellikle güneş paneli olarak adlandırılan FV modül, sisteminiz için kullanılabilir voltaj ve akım sağlamak üzere seri ve/veya paralel olarak elektriksel olarak bağlanmış birçok FV hücresi içerir. Her hücre, fotonlar serbest elektronlar oluşturduğunda küçük bir voltaj üreten yarıiletken bir malzemedir -genellikle kristal silikondur; hücrelerin birleştirilmesi, bu voltaj ve akımı invertörler, piller veya DC yükleri için pratik seviyelere çıkarır. Genel olarak modüllerin bilinen isimleri: güneş paneli = güneş modülü = FV modülü = FV paneli = panel = modül = FV paneller. Genellikle güneş modülü ve FV modülü terimleri birbirinin yerine kullanılır. Her ikisi de aynı fiziksel birimi ifade eder: güneş ışığını elektriğe dönüştürmek için bir araya getirilmiş, lamine edilmiş ve çerçevelenmiş çok sayıda FV hücredir. FV modül ifadesi daha kesin ve teknik bir terimdir. Endüstri standartları, veri sayfaları ve sertifika belgeleri, FV süreci, yani ışığın elektriğe dönüştürülmesini doğrudan ifade ettiği için FV modülünü tercih eder [18].

Üreticiler, modülleri Standart Test Koşulları altında (örneğin, 1000 W/m<sup>2</sup> ışık şiddeti, 25°C hücre sıcaklığı) tepe gücü ile derecelendirir. Göreceğiniz derecelendirmeler (350 W veya

430 W gibi) bu koşullar altında maksimum DC çıkışını temsil eder ve dizilerin boyutlandırılmasına ve üretimin tahmin edilmesine yardımcı olur [19].

### Güneş FV modül türleri:

FV sistemlerde yaygın olarak kullanılan üç tür güneş paneli vardır: (1) monokristal, (2) polikristal ve (3) amorf ince film. Her panel türünün avantajları ve dezavantajları vardır. Bu panel türleri arasındaki temel farklar, maliyetleri ve verimlilikleridir. Şekil 2.5'te FV modül çeşitleri görülmektedir.



Şekil 2.5: Güneş panellerinin türleri

- Monokristal Modüller (Monokristal silikon): Yüksek verimlilikleri ve üstün performanslarıyla bilinirler ve bu özellikleri sayesinde alanın sınırlı olduğu konut ve ticari tesisler için mükemmeldirler. Tek bir sürekli kristalden oluşan silikon hücrelerden oluşan plakalar. Tek tip koyu renklidirler ve geleneksel ticari teknolojiler arasında en verimli olanlardır (verimlilik oranları %18 ile %22 veya daha fazladır). Daha yüksek verimlilikleri sayesinde aynı alanda daha fazla enerji üretirler, bu da onları alanın sınırlı olduğu durumlarda (örneğin küçük çatılar) ideal hale getirir. Watt başına maliyeti biraz daha yüksek olma eğilimindedirler, ancak mükemmel performans ve dayanıklılık sunarlar.

- Polikristal silikon: Birden fazla kristalden oluşan silikon hücreler kullanılır (hücrede mavimsi taneler olarak görülebilir). Monokristal silikondan daha az verimlidirler (tipik verimlilik yaklaşık %16 ila %18), ancak biraz daha ucuz olma eğilimindedirler. Daha iyi maliyet-fayda oranı nedeniyle önceki yıllarda çok popülerdi, ancak bugün fiyat farkı azaldığı için mono paneller pazarı domine etmektedir. Buna rağmen, polikristal paneller, alanın sorun olmadığı ve başlangıç maliyetlerini düşürmek istediğiniz projelerde avantajlı olabilir.

- İnce Film: Geleneksel kristal silikon hücreleri kullanmayan çeşitli teknolojileri kapsarlar. Örnekler: amorf silikon (a-Si), kadmiyum tellür (CdTe) ve CIGS (bakır indiyum galyum selenyum). Bu levhalar, cam veya plastik üzerine çok ince tabakalar halinde biriktirilmiş hücrelere sahiptir, bu da daha hafif ve bazen esnek panellerle sonuçlanır. Genel olarak, verimlilikleri daha düşüktür (%10 ila %14) ve daha hızlı bozulurlar, ancak cepheler, hafif hesaplamalar veya mimari entegrasyon gibi belirli uygulamalarda yararlı olabilirler. Konut pazarında, çok yaygın değildirler.

- N-Tipi TOPCon çift yüzlü modüller, gelişmiş hücre teknolojisini kullanarak panelin her iki tarafından güneş ışığını yakalarken olağanüstü güç çıkışı sağlar.

### **Güneş FV Modüllerinin En Önemli Özellikleri:**

- Yüksek Enerji Dönüşüm Verimliliği: Modern FV modülleri %18 ila %23 arasında değişen verimlilik oranlarına sahiptir, bu da her metrekareden daha fazla güç elde ettiğiniz anlamına gelir. Bu yüksek verimlilik, çatı alanı sınırlı olduğunda özellikle faydalıdır.

- Dayanıklılık ve Uzun Ömür: En yüksek kaliteli modüller, yağmur, rüzgâr, kar veya aşırı sıcaklık gibi her türlü hava koşuluna dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Çoğu, 30 yıllık sağlam bir performans garantisi ile birlikte gelir ve uzun vadeli yatırımınız konusunda size gönül rahatlığı sağlar.

- Gelişmiş Hücre Teknolojisi: PERC, Half-cut ve TOPCon hücreleri gibi yenilikler, güç kayıplarını en aza indirmeye yardımcı olur. Ayrıca, çift yüzlü modüller her iki taraftan da enerji elde edebilir, bu da verimlerini önemli ölçüde artırır.

- Düşük Bakım Gereksinimleri: Bu sistemler genellikle sadece ara sıra temizlik gerektirir. Bazıları uzaktan izleme özellikleri de sunarak performansı gerçek zamanlı olarak takip etmenizi sağlar.

- Sertifikalı Kalite ve Güvenlik Standartları: Modüllerin küresel kalite standartlarını karşıladığından emin olmak için IEC veya UL sertifikalarına sahip olup olmadığını kontrol edin. Saygın güneş paneli üreticileri ayrıca doğrusal güç garantisi sunarak yıllar boyunca tutarlı bir verim sağlar.

Yüksek Enerji Dönüşüm Verimliliği: Modern FV modülleri %18 ila %23 arasında değişen verimlilik oranlarına sahiptir, bu da her metrekareden daha fazla güç elde edildiği anlamına gelir. Bu yüksek verimlilik, çatı alanı sınırlı olduğunda özellikle faydalıdır.

#### **Güneş panelinin ana bileşenleri:**

- FV hücreler: Işığı elektriğe dönüştüren küçük yarı iletken tabakalar (genellikle monokristal veya polikristal silikon). Panelin “kalbi”dir.
- Temperli cam: Hücreleri darbelere ve neme karşı korurken güneş ışığını geçiren şeffaf ön tabakadır.
- EVA ve arka tabaka: Hücreleri sızdırmaz hale getiren, elektrik yalıtımını ve sızıntıya karşı korumayı garanti eden plastik kapsülleme tabakalarıdır.
- Alüminyum çerçeve: Panelin etrafındaki, mekanik destek sağlayan ve çatıya veya desteklere sabitlenmesini kolaylaştıran yapıdır.
- Bağlantı kutusu: Panelin sisteme güvenli bir şekilde bağlanmasını sağlayan, çıkış terminallerinin (pozitif ve negatif kablolar) ve akım yönetimi için diyotların bulunduğu arka taraftaki modüldür.

#### **2.4.2 Akü**

Akü, üretilen elektrik enerjisini depolayan bir cihazdır. Akünün boyutu, kullandığımız yükün boyutu ve kullanım süresine göre belirlenir. Ayrıca coğrafi konum ve hava koşullarına da bağlıdır. Akü enerji depolama sistemi, elektrik enerjisini depolamak için aküler kullanan bir sistemdir. Akü enerji depolama sistemleri, elektriği çok esnek bir şekilde depolayabilen ve serbest bırakabilen sabit akümülatörler olarak bilinir. Tasarımlarına ve boyutlarına bağlı olarak, çok farklı şekillerde kullanılabilir ve ticarileştirilebilirler. Enerji endüstrisinde, akü enerji depolama sistemleri şebekedeki enerji arz ve talebini dengelemek, yardımcı hizmetler sağlamak ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu sağlamak gibi çeşitli amaçlarla kullanılır. Şekil 2.6’de akü enerji depolama sistemleri görülmektedir [20].

#### **Akü enerji depolama sistemlerinin ana bileşenleri [20]:**

- Güç elektroniği: Bu bileşen, temel olarak gerektiğinde farklı güç ve voltajlarda alternatif veya doğru akım üreten güç dönüştürücülerden oluşur. Bir yandan, sağlanan gücü bataryaları şarj edebilecek şekilde dönüştürür. İkinci olarak, depolanan enerjiyi ilgili şebeke veya makineler, soğuk hava depoları veya elektrikli otomobiller için şarj istasyonları gibi diğer yükler tarafından doğrudan kullanılacak elektriğe dönüştürür.



30 kVA akü depolama



90 kVA akü depolama



500 kW/250 kWh akü depolama

Şekil 2.6: Akü enerji depolama sistemleri

- Akü yönetim sistemi: Akü yönetim sistemi, akünün şarj ve deşarjını kontrol eder. Bir yandan akü sistemini, diğer yandan şebekeyi veya yükü koruyarak aküye giren veya çıkan akımın optimum olmasını sağlar.
- Ölçüm ve iletişim: Bu bileşen, akü enerji depolama sistemlerine giren ve çıkan enerjiyi ölçer ve bu bilgiyi şebeke operatörüne veya diğer kuruluşlara iletir.
- Piyasa katılımı için modüller: Bu bileşenler, pil depolama sistemini akü enerji depolama sistemlerininin getirildiği enerji piyasasına bağlar. Akü yönetim sistemine ne zaman ne kadar elektrik depolaması veya serbest bırakması gerektiğini bildirir. Akü depolama sistemi toptan piyasada arbitraj işlemleri için kullanılıyorsa, bu sinyaller elektrik fiyatlarını analiz eden ve tahmin eden yazılımdan gelir. Bir akü enerji depolama sistemleri yardımcı hizmetler sağlıyorsa, iletim sistemi operatörünün kontrol odasından aktivasyon sinyalini alan tüccar tarafından kullanılan yüksek güvenli bir iletişim cihazı aracılığıyla etkinleştirilir.

Akü depolama teknolojileri: Piyasada çeşitli depolama teknolojileri mevcuttur. Hepsinin ortak özelliği, enerjiyi elektrokimyasal olarak depolamalarıdır. Ancak, teknolojik farklılıklar farklı güçlü ve zayıf yönleri de beraberinde getirir. Akü teknolojisinin seçimi, belirli uygulama ve piyasa koşullarına bağlıdır [21].

- Lityum iyon aküler: Depoladıkları enerjinin yaklaşık %95'ini veya daha fazlasını serbest bıraktıkları için uzun bir kullanım ömrü ve yüksek verimliliğe sahiptir. Ancak, belki de en göze çarpan özelliği, yüksek hacimsel enerji yoğunluğudur; mevcut diğer hiçbir akü teknolojisi, bu kadar küçük hücrelerde daha fazla enerji depolayamaz. Bu nedenle, şu anda elektrikli araçlarda ve cep telefonlarında neredeyse yeri doldurulamazlar. Şekil 2.7'de lityum iyon aküleri görülmektedir [22].



**Şekil 2.7:** En yaygın enerji depolama bataryası

- Sodyum iyon aküler: Yapısı lityum iyon akülere benzerdir, ancak sodyum iyon aküler daha az veya hiç kritik hammadde gerektirmez ve çalıştırılması daha güvenlidir. Enerji yoğunluğu (hacimsel ve gravimetrik) lityum iyon akülerinkinden biraz daha düşüktür. Bu nedenle, e-mobiliteden çok sabit uygulamalar için daha uygundur. Sodyum iyon aküler, lityum rakiplerinden zaten daha ucuz olduğundan, Çinli otomobil şirketleri, menzil fiyat kadar önemli olmadığına elektrikli otomobillerde bu teknolojiyi kullanmaktadır. Seri üretim henüz başlangıç aşamasında olduğundan, sodyum iyon akülerin maliyetlerinin daha da düşmesi beklenmektedir [23].

- Kurşun-asit aküler: Bu aküler, onlarca yıldır çeşitli uygulamalarda kendilerini kanıtlamışlardır ve bugün hala yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bunun bir nedeni, düşük fiyatları ve hammaddelerinin kritik öneme sahip olmaması ve kolayca temin edilebilmesidir. Ancak kurşun aküler, benzer lityum iyon akülerden önemli ölçüde daha ağır ve daha büyüktür. Ayrıca, modern lityum iyon akülerden daha kısa ömürlüdürler (şarj ve deşarj döngüleri ile ölçülür) ve verimlilikleri daha düşüktür (yaklaşık %80).

- Sodyum-kükürt aküler: NaS aküler çok güvenilir, kullanımı güvenli ve uzun ömürlü olarak kabul edilir. Üstelik yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler. Ancak, nispeten pahalı olmaları ve özel çalışma koşulları gerektirmeleri nedeniyle, özellikle büyük ölçekli enerji depolamaya uygundur.

- (Redoks) akış aküleri: Lityum iyon akülerin aksine, akış aküleri enerji depolamak için sıvı elektrolitler kullanır. Bir başka özel özelliği ise, elektrolitlerin elektrik enerjisini kimyasal enerjiye ve tersini dönüştüren gerçek hücrenin dışındaki tanklarda bulunmasıdır. Bu nedenle, ilgili uygulama için mükemmel konfigürasyonu elde etmek üzere güç kapasitesi ve kapasite neredeyse bağımsız olarak seçilebilir.

#### **2.4.3 Regülatör (Şarj kontrol cihazı)**

Regülatör, güneş enerjisi sisteminin beyni olup, ana görevi bataryayı ve yükü yönetmektir. Güneş şarj kontrol cihazı (regülatör olarak da bilinir), geleneksel bir akü şarj cihazıyla aynıdır. İşlevi, akünün etkili bir şekilde şarj edilmesini veya daha da önemlisi aşırı yüklenmemesini sağlamak için güneş şarj sürecini yönetmektir. Şarj kontrol cihazı veya şarj regülatörü, temel olarak akülerin aşırı şarj olmasını önlemek için kullanılan bir voltaj ve/veya akım regülatörüdür. Güneş panellerinden gelen ve aküye giden voltaj ve akımı düzenler.

Standart bir akü şarj cihazında olduğu gibi, çeşitli akü türleri desteklenmektedir. Normalde, emilim ve şarj voltajları seçilebilir. Ayrıca, zaman aralıkları ve akım da genellikle ayarlanabilir. DC bağlantılı güneş şarj kontrol cihazları, yıllardır neredeyse tüm sınırlı ölçekli şebekeden bağımsız güneş enerjisi santrallerinde kullanılmaktadır. Lityum-demir-fosfat piller için idealdir. Piller tamamen şarj olduğunda, kontrol cihazı günün geri kalanında önceden belirlenmiş yaklaşık 13,6 V şarj voltajında kalır.

Özetle, bir güneş şarj kontrol cihazı, güneş panellerinden gelen enerjiyi hem güç sistemine hem de akü sistemine dağıtır. Akü grubu neredeyse dolduğunda, kontrol cihazı akımın akışını azaltarak tam şarj seviyesinde kalmak için gereken voltajı korur ve akünün ömrünü uzatır. Burada önemli olan terim “korur”dur. Güneş şarj kontrol cihazı, akımı kontrol ederek aküyü korur. Aküler genellikle bir sistemin en pahalı bileşeni olduğundan, güneş şarj kontrol cihazı onları aşırı şarj ve yetersiz şarjın zararlı etkilerinden korur.

Şekil 2.8’de güneş enerjisi regülatörlerinin türleri görülmektedir: Yaygın olarak kullanılan iki tür güneş enerjisi regülatörü vardır: PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) ve MPPT (Maksimum Güç Noktası Takibi).



**Şekil 2.8:** Güneş enerjisi regülatörlerinin türleri

- PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) regülatörleri: PWM regülatörleri daha uygun fiyatlıdır ve pil şarj olurken güneş panellerinden gelen akımı kademeli olarak azaltarak aşırı şarjı önler. Ancak, daha pahalı olan ancak fazla voltajı kullanılabilir akıma dönüştürebilen MPPT regülatörlerinden daha az verimlidirler.

- MPPT (Maksimum Güç Noktası Takibi) regülatörleri/kontrolörleri: MPPT regülatörleri, güneş panellerinin en fazla güç ürettiği nokta olan güneş paneli dizisinin maksimum güç noktasını (MPP) takip edebilir. MPP'yi takip ederek, MPPT regülatörleri değişen hava koşullarında bile güneş panellerinden elde edilen enerji miktarını optimize edebilir.

Modern güneş şarj kontrol cihazları, performansı artırmak için sıcaklığı ölçebilir ve akü şarjını buna göre düzenleyebilir. Bu, sıcaklık ayarı olarak bilinir. Soğuk koşullarda daha yüksek voltajda, sıcak koşullarda ise daha düşük voltajda şarj eder.

Güneş şarj kontrol cihazı genellikle tüm güneş enerjisi santralının kalbi ve beyni olarak görülür. Tüm çalışma koşullarında uzun süreli akü ömrü sağlar ve önemli yükleri kontrol eder. Güneş şarj kontrol cihazı, güneş enerjisiyle çalışan bir voltaj ve akım regülatörüdür. Şebekeden bağımsız ve hibrit şebekeden bağımsız uygulamalarda, FV dizilerinden gelen güç girişini düzenleyerek elektrik yüklerini çalıştırmak ve pilleri şarj etmek için optimum güç çıkışı sağlamak amacıyla kullanılırlar. Güneş şarj dönüştürücüler, genellikle güneş şarj regülatörleri olarak da adlandırılır.

#### 2.4.4 Yükle

Yükler, üretilen elektrik enerjisini ışık, lambalar, radyo ve TV aracılığıyla bilgi gibi diğer biçimlere dönüştüren FV cihazlardır. AC ve DC yükleri, FV tarafından üretilen gücü tüketen cihazlar (ışıklar veya radyolar gibi) ve bileşenlerdir (su pompaları ve mikrodalga tekrarlayıcılar gibi).

#### 2.4.5 Elektrik Konektörleri ve Kontrolörleri

Bunlar, bileşenleri birbirine bağlayan ve bileşenleri ve insan dâhil elektrik tesisatını koruyan parçalardır. Kontrolörler ayrıca cihazları çalıştırmamızı sağlar. Güneş paneli konektörleri, güneş panelleri ile FV sisteminin diğer bileşenleri (invertörler, şarj kontrol cihazları ve aküler gibi) arasında güvenli ve güvenilir bağlantılar kurmak için tasarlanmış özel elektrikli cihazlardır. Temel işlevleri, güneş panelleri tarafından üretilen elektriğin verimli bir şekilde aktarılmasını kolaylaştırarak enerjinin sistem genelinde sorunsuz bir şekilde akmasını sağlamaktır.



**Şekil 2.9:** Güneş paneli konektörleri türleri

Konektörler, tek tek güneş panellerini birbirine bağlayarak bir dizi oluşturur ve elektrik akımının iletilmesini sağlar. Paneller tarafından üretilen enerjinin invertörlere veya akü depolama sistemlerine etkili bir şekilde yönlendirilmesini sağlarlar.

Güneş enerjisi sisteminizin güvenliğini ve verimliliğini korumak için, güneş panelleri ve invertörler için uygun kablolama prosedürleri gereklidir. Güneş panelleri ve invertörleri kablolarken aşağıdaki kurallara uyulmalıdır:

- Kabloların doğru boyutlandırılması: Güneş paneli kurulumunda kullanılacak kabloların boyutunu seçerken sistemin voltajı ve akımı (amperajı) dikkate alınmalıdır.
- Uygun kablo türlerini kullanılması: Dış mekan ve güneş enerjisi kullanımları göz önünde bulundurularak üretilmiş kabloları seçin. Kablolar, yerel iklim koşullarına dayanıklı ve güneş ışığına karşı dirençli olmalıdır. İletkenliği ve uzun ömrü nedeniyle, bakır iletkenler güneş enerjisi sistemlerinde sıklıkla kullanılır.
- Gerilim düşüşünün azaltılması gerekir: Kablo uzunluğu boyunca önemli bir gerilim kaybı olduğunda, bu duruma gerilim düşüşü denir. Gerilim kaybını azaltmak için güneş panelleri ile invertör arasındaki mesafeye uygun kablo çapları seçin. Daha büyük kablo çapları genellikle daha az direnç ve daha az gerilim kaybı sağlar.
- İyi kablo yönetimi kullanılması: Kabloların doğru şekilde düzenlendiğinden ve sabitlendiğinden emin olun. Kabloları fiziksel hasarlardan ve hava koşullarından korumak için kablo kanalları veya borular kullanın. İyi bir kablo yönetimi, gelecekteki bakım ve sorun giderme işlemlerine de yardımcı olur.
- Üreticinin talimatları izlenmeli: Güneş panelleri ve invertörlerini kablolarken daima üreticinin talimatlarına ve önerilerine başvurulması gerekir. Elektrik bağlantıları, topraklama ve sistem tasarımı konusunda birçok üreticinin belirli özellikleri ve önerileri olabilir.
- Doğru konektörleri kullanılması: Güneş panellerin ve güneş enerjisi uygulamaları için üretilmiş invertörler için uygun konektörlerin seçilmesi gerekir.
- Doğru topraklamanın uygulaması: Elektrik arızalarına karşı koruma ve güvenliğin sağlanması, iyi bir topraklamaya bağlıdır. Güneş panellerini, invertörleri ve diğer sistem parçalarını bağlamak için topraklama prosedürleriyle birlikte bir topraklama elektrot sistemi kullanılabilir.
- Aşırı akım korumasının uygulanması: Kabloları ve bileşenleri yüksek akımlardan korumak için sigorta veya devre kesici gibi aşırı akım koruma cihazlarına takılması gerekir. Bu cihazların, sistemin akım değerine göre doğru boyutta olması gerekir.

## 2.5 Dünyada FV Sistemler

Güneş pilleri veya FV cihazların ilk uygulamaları 1958'de uzayda başladı. Amerika Birleşik Devletleri ve eski Sovyetler Birliği tarafından gerçekleştirilen neredeyse tüm uzun süreli uzay görevleri FV ile güçlendirildi. Bunlar arasında Venüs, Ay, Mars ve Jüpiter'in yanından geçen uçuş görevleri, ilk iletişim uyduları ve Skylab insanlı uzay istasyonu yer almaktadır. 1973'teki ilk petrol ambargosundan bu yana küresel enerji sahnesinde yaşanan dramatik olayların etkisiyle ve Amerika Birleşik Devletleri ve diğer ülkelerdeki önemli özel ve kamu

yatırımlarıyla, FV, gelecekteki elektrik üretim karışımını etkileyebilecek potansiyele sahip, en umut verici yenilenebilir enerji teknolojilerinden biri haline gelmiştir [18].

FV'nin karasal kullanımı istikrarlı bir şekilde artmaktadır. 1983 yılına kadar, dünya çapında 50.000.000 adet küçük amorf silikon cihazlı hesap makinesi kullanılmaktaydı; sadece Amerika Birleşik Devletleri'nde 5000 ev ve 200'den fazla su pompası FV ile çalıştırılıyordu; Kaliforniya, Hesperia yakınlarındaki 1 MW ARC0 Solar merkezi istasyon tesisi faaliyete geçmişti ve yine Kaliforniya'da bulunan 6,5 MW Carrisa Plains istasyonu planlama aşamasının son safhalarına gelmişti. Günümüzde, FV'ye olan ilgi artarak devam etmektedir [24]. Bu gelişmelerden sonra FV'nin maliyetleri yirmi kattan fazla azaldı ve verimliği ise neredeyse üç katına çıktı. Bu iki yönlü ilerleme ve ufukta görünen gelişmeler, FV'nin çok sayıda uygulamaya sahip, uygulanabilir ve önemli bir enerji teknolojisi olarak geleceği için umut vericidir.

1988 yılında ABD'de, elektrik şebekesine bağlı toplam 11 MW kurulu güce sahip 219 adet FV sistemi tespit edilmiştir [25]. Bunların tümü 1978-1988 döneminde kurulmuştur. 5 kW'ın üzerindeki kurulumların çoğu federal, eyalet veya elektrik şebekesi demonstrasyon projeleriyle ilgilidir. Her ikisi de özel sektör tarafından finanse edilen iki önemli istisna vardır: 1982 yılında kurulan 1,0 MW (nominal) Hesperia-Lugo projesi ve 1984 yılında kurulan 6,5 MW (nominal) Carrisa Plains projesi; her ikisi de Kaliforniya'dadır. Daha büyük kurulumların çoğunun işletme performansı ve deneyimleri literatürde iyi bir şekilde belgelenmiştir [26].

Güney Kore hükümeti ve teknolojisinin desteğiyle Namangan bölgesinde inşa edilen şebekeye bağlı 130 kW FV enerji santrali, 2015 yılında faaliyete geçmiştir [27]. FV enerji santrali, farklı üreticilerin dört tip modül ve üç tip invertöründen oluşmaktadır. Bu pilot FV sisteminin temel amaçlarından biri, elektrik ve iklim ortamının enerji üretimine etkisini araştırarak FV endüstrisini teşvik etmektir. Bu çalışmada [27] yazarlar, Solarius FV yazılımı ile 130 kW'lık FV santrali simüle etmiş ve sonuçları Kore tarafının sunduğu referans değerlerle karşılaştırmıştır. Modül dizilerinin eğim ve azimut değerlerini değiştirerek FV sisteminin güç çıkışı özellikleri de tahmin edilmiştir. Yazarlar [27], simülasyon yazılımının FV santral tasarımı ve doğrulaması için yararlı olabileceğini kabul etmişlerdir. Bir yıllık dönemde şebekeye bağlı Namangan 130 kW elektrik santralinin elektrik enerjisi üretim verimlerinin analizine dayanarak, Kasım, Aralık ve Ocak gibi kış mevsiminde elektrik

üretiminin yaklaşık %80'e varan önemli bir düşüş gösterdiği ortaya konmuştur. Çalışma sonuçlarının analizi, gerçek enerji üretim değerlerinin simülasyon sonuçlarındaki değerlerden %10'dan fazla sapmasının, elektrik şebekesindeki artan yük nedeniyle meydana gelen sorunlardan (kesinti, aşırı gerilim ve düşük gerilim) kaynaklanabileceğini göstermiştir.

Farklı meteorolojik veritabanları kullanılarak FV sisteminin performansını simüle etmek ve incelemek için çok sayıda çalışma yapılmıştır [28]. 7,2 kWp gücünde bir santralin dinamik modeli geliştirmiş ve bu sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır [29]. Çalışmalarında monokristal FV modülü kullanılmış ve model TRANSYS'te geliştirilmiştir. Sonuçlarına göre, radyasyon modeli ve hava durumu veri tabanı sırasıyla %5 ve %11'e varan farklar vermiştir.

250Wp FV sisteminin modeli Molina ve Espejo tarafından geliştirilmiştir [30]. Bu çalışmayı gerçekleştirmek için FV simülasyon ve değerlendirme aracı (PVSET 1.0) kullanılmıştır ve sonuçlar MATLAB/Simulink modeli ile doğrulanmıştır. Çalışma sonuçları, PVSET modelinin sonuçlarının MATLAB Simulink modeli ile iyi bir uyum içinde olduğunu göstermiştir.

Başka bir çalışmada [25], PVLIB Python simülasyonu kullanılarak bir binaya uygulanan FV sistemin simüle edilmiş performansını değerlendiriyor ve kuzey Hindistan'da kurulu mevcut bir FV sistemle karşılaştırıyor. Simülasyon sonuçları, simüle edilen sistem için %16,87 FV modül verimliliği, %96,52 invertör verimliliği, %16,28 sistem verimliliği, %88,45 performans oranı, %21,15 kapasite kullanım faktörü ve 9253,2 kWh/yıl yıllık enerji üretimi göstermektedir. Bu değerlerin tümü, ölçülen değerlere kıyasla biraz daha yüksektir. Binaya uygulanan FV sistemin ekonomik ve çevresel değerlendirmeleri de karşılaştırılmış ve karbon azaltma verimliliği ve sürdürülebilir kalkınma doğrulanmıştır [31]. Simülasyon sonuçları, hava durumu veri setinin değişkenliği nedeniyle bazı kısa vadeli performans farklılıkları olmakla birlikte, binaya uygulanan FV sistemin saha performansına oldukça yakın olduğu görülmüştür. Özet olarak, FV performans değerlendirmesine yönelik çalışmalar çeşitli simülasyon araçları kullanılarak yapılmıştır [32-35]:

- PVsyst yaygın kullanılan bir FV sistem simülasyon yazılımıdır ve birçok çalışmada model doğrulama için referans olarak kullanılmıştır [32]. PVsyst sonuçları gerçek ölçümlere oldukça yakın bulunmuştur; özellikle gerilim değerlerinde sapma %1'in altındadır.

- MATLAB/Simulink modülleri (Simscape, SimPowerSystems) FV hücre davranışının modellenmesinde kullanılmaktadır [33]. MATLAB/Simulink modeli daha genel bir matematiksel yaklaşım kullandığından, güç değerinde yaklaşık %4 sapma gözlemlenmiştir.
- Gerçek ölçüm ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırıldığı çalışmalar, simülasyon modellerindeki parametre hassasiyetine dikkat çekmektedir [34]. Sapmaların temel nedeni, hücre sıcaklığı ve ışıyım değişkenliğini simülasyon modellerinde tam yansıtamamak olarak değerlendirilmiştir [35].

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1 Güneş Enerji Santralinin Tanıtımı

Performans analizi yapılan Balıkesir OSB de Yarış Kabin San. Tic. A.Ş. ait 10,751 MWp gücündeki Yarış Kabin Enerji Santrali (GES), Balıkesir ili Altıeylül İlçesi Gaziosmanpaşa Mahallesiinde, 39,58° enlem ve 27,84° boylam koordinatlarında yer almaktadır. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi, yaklaşık 90 dönümlük bir çatı alanına kurulan santral, 545 Wp gücünde toplam 19728 adet monokristal half-cut FV panelden oluşmaktadır. Santralde üretilen enerji ile Yarış Kabin San. Tic. A.Ş. nin yıllık elektrik ihtiyacının yaklaşık %125,86’lık bölümü karşılanmaktadır. FV paneller santral sahasına 1096 adet string düzeninde, eğim açıları 8° ve yüzey azimut açıları 4 farklı yön olduğu için 68°, -113°, 56°, -124° olacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 3.1: Yarış Kabin GES santrali

Santralde 50 kW gücünde 156 adet invertör bulunmaktadır. Santralde kullanılan FV panel ve invertörlerin özellikleri Tablo 3.1 ve 3.2’de verilmiştir

**Tablo 3.1:** Santralde kullanılan FV panellerin teknik özellikleri

Marka/model	Daxler / M10-144-HC
Nominal Güç	540 Wp
Ölçüler	2279 x 1134 x 35 mm
Ağırlık	28,9 kg
Isc Sıcaklık Katsayısı	0,05 %/° C
Kısa Devre Akımı(Isc)	13,86 A
Max Güç Noktası(Impp)	13,04 A
Çalışma Sıcaklığı	-40° C- +85° C
Voc Sıcaklık Katsayısı	-0,27 %/° C
Açık devre Voc	49,82 V
Vmpp	41,84 V
Pmax Sıcaklık Katsayısı	-0,35 %/° C

**Tablo 3.2:** İnvörtör teknik özellikleri

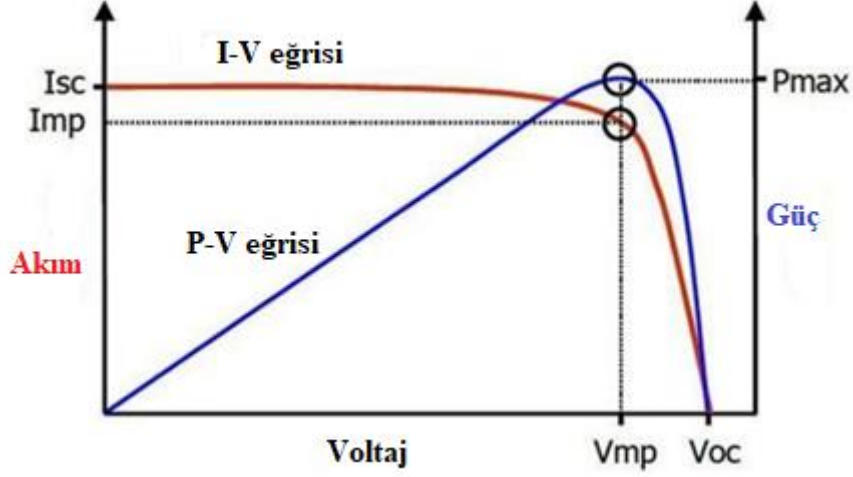
İnvörtöre Giriş	
MPPT Çalışma Voltaj Aralığı	200 V -1000 V
Maksimum Giriş Gerilimi	1100 V
MPPT Başına Maksimum Akım	30 A
Nominal MPP Gerilimi	600 V
Input Sayısı	8
MPPT Sayısı	4
İnvörtörden Çıkış	
Frekans	50-60 Hz
Şebeke Gerilimi	400 V
Nominal AC Gücü	50 kVA
Maksimum AC Gücü	55 kVA
Nominal AC Akımı	72,2 A
Maksimum AC akımı	79,98 A

8MWe kurulu gücü olan fabrikaya kayıplarda göz önünde bulundurularak 1,344 katında 10,751 MWp gücünde santral tasarlandı. İnvörtörler 8MW'e ye göre sınırlandırıldı.

### 3.2 Panel ve İnvörtör İçin String Uyum Hesapları

Projenin yapılacağı lokasyonda ölçülen maksimum ortam sıcaklığından yola çıkılır. Panel teknik özelliklerine göre maksimum FV panel sıcaklığı belirlenir. Seri bağlı FV panellerin oluşturacağı çalışma gerilimi değeri, kullanılacak olan invörtörün MPPT çalışma gerilimi aralığında kalıp kalmadığı ve invörtörün en verimli çalıştığı çalışma gerilimi değerine yakınlığına bakılır.

Ölçülen minimum ortam sıcaklığında ise, seri bağlı FV modüllerin oluşturacağı açık devre gerilimi değerinin, invertörün maksimum gerilim değerini geçmeyeceği kontrol edilerek kaç adet FV panelin seri bağlanacağına karar verilir. Şekil 3.2’de invertörün verimli çalıştığı akım-gerilim grafiği görülmektedir.



Şekil 3.2: İntertörün verimli çalıştığı akım - gerilim grafiği

Bir invertör için string ve panel sayıları hesaplandı. Öncelikle kullanacağımız panel ve invertörün teknik özellikleri açıklandı. Formüllerde yerine koyacağımız gerekli değerler aşağıdaki gibidir:

<b>Panel-Daxler</b>		M10-144-HC;
<b>Panel Gücü(Panel)</b>	=	540 W <sub>p</sub>
<b>V<sub>mp</sub></b>	=	41,84 V
<b>I<sub>mp</sub></b>	=	13 A
<b>V<sub>oc</sub> Sıcak Katsayısı</b>	=	-0,27 %/° C
<b>İntertör</b>		Huawei SUN2000-50KTL-M3
<b>AC Gücü(P<sub>ac</sub>)</b>	=	50.000 W
<b>Maksimum DC Voltaj</b>	=	1100 V
<b>MPPT Aralığı</b>	=	200 V – 1000 V
<b>MPPT Sayısı</b>	=	4
<b>MPPT Maksimum Akım</b>	=	30 A
<b>DC/AC</b>		güç oranının 1,34 olması istendi.

$$\begin{aligned} \text{Toplam DC Güç} &= \text{AC Güç} \times \text{DC/AC} \\ \text{Toplam DC Güç} &= 50.000 \text{ w} \times 1,34 = 67.000\text{W} = 67\text{kWp} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Panel Sayısı} &= \text{Toplam DC Güç} / \text{Panel Gücü} \\ \text{Panel Sayısı} &= 67.000 / 540 = 124,1 \text{ pratikte } 124 \text{ panel} \\ &\text{kullandı.} \end{aligned}$$

#### **Seri Panel Sayısı (Gerilim Hesabı):**

$$\text{Voc}_{\text{soğuk}} = \text{Voc}_{\text{STC}} \times [1 + (|\text{katsayı}| \times \Delta T)]$$

Düşük sıcaklıkta metenom verilerine göre Balıkesir için  $-5^{\circ}\text{C}$  alındı:

$$\begin{aligned} \Delta T &= 25 - (-5) = 30^{\circ}\text{C} \\ \text{Voc}_{\text{soğuk}} &= 50 \times [1 + (0,0027 \times 30)] = 54 \text{ V} \\ \text{Panel}_{\text{sayısı}} &\leq \text{Max}_{\text{DC}} \text{ Voltaj} / \text{Voc}_{\text{soğuk}} \\ 1100 \text{ V} / 54 \text{ V} &= 20,3 \text{ Maksimum Seri Panel Sayısı} \end{aligned}$$

#### **MPPT Gerilim Kontrolü:**

$$\begin{aligned} \text{String Vmp} &= \text{Panel Sayısı} \times \text{Vmp} \\ 20 \times 41,8 &= 836 \text{ V MPPT } 200 \text{ V} - 1000 \text{ V Çalışma Voltaj} \\ &\text{Aralığında} \end{aligned}$$

#### **Paralel String (Akım Hesabı):**

$$\begin{aligned} \text{Tek string akımı} & \\ \text{I}_{\text{string}} &\approx \text{Imp} \approx 13 \text{ A} \end{aligned}$$

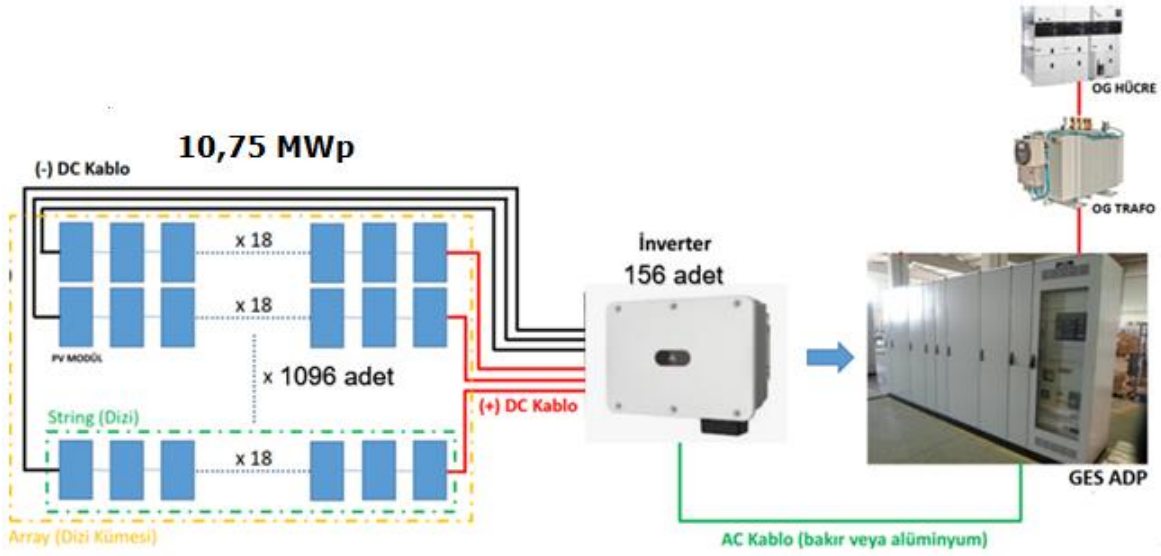
#### **MPPT Limiti:**

$$\begin{aligned} \text{I}_{\text{MPPT}_{\text{max}}} &= 30 \text{ A} \\ \text{Paralel string sayısı} &\leq \text{I}_{\text{MPPT}_{\text{max}}} / \text{I}_{\text{string}} \\ 30/13 &= 2,3 \text{ Her MPPT ye maksimum 2 string} \end{aligned}$$

#### **Sonuç:**

Bir invertörde 4 MPPT vardır, her MPPT de 2 string olmalıdır, her stringte de maksimum 20 panel olmalıdır. Bir invertörde toplam maksimum 124 panel olmalıdır. Yarış Kabin

Güneş Enerji Santralinde 156 adet invertör için 18 adet panellerden oluşan 1096 adet string kullanıldı. Şekil 3.3’de invertör-panel-string detayı görülmektedir.



**Şekil 3.3:** İntertör-panel-string detayı

Şekil 3.4’te görüldüğü gibi panel-invertör uyumu sorgulamada formüllerden oluşan bir program geliştirildi. Programda panel ve invertör teknik bilgilerini, meteonorm ve PVgis gibi programlardan faydalanılarak en düşük ve en yüksek sıcaklıkları girildikten sonra, panel - invertör uyumlu mu sorusunun cevabı da verilerek bir invertörün maksimum üretim gücü hesaplanmıştır. Panel - invertör uyumu sorgularken maksimum ve minimum sıcaklıkta panelin ürettiği akım ve gerilim değerleri Tablo 3.3’teki formüllere göre hesaplanıp invertörün maksimum akım gerilim değerlerini geçiyor mu, uyumlu mu kontrol edilmiştir. Uygulama santralinde 1 invertör için 18 panel, 7 string bilgileri ve panel invertör teknik bilgileri girildiğinde hesaplanan gerilim ve akım değerleri invertör akım ve değerlerini geçmediği için uyumlu olduğunu gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasında şu hesaplamalar yapılmıştır:

- Panel - invertör sayılarını belirledikten sonra kısa devre hesapları
- Primer teçhizat hesapları
- Röle koordinasyon ve selektivite hesapları
- YG-AG iletken kablo hesapları
- Verimliliği büyük oranda etkileyen AC-DC kablolar için güç kaybı ve gerilim düşümü hesapları
- Çatı statik analizleri

- Topraklama ve yıldırımdan korunma hesapları yapılmıştır. Şekil 3.5'te uygulama örneklerini görülmektedir.

**Tablo 3.3:** Düşük ve yüksek sıcaklıkta stringlerin akım ve gerilim hesaplama formülleri

En Yüksek Sıcaklıkta String ( $V_{mpp}$ ) Değeri	$(1 - (((\text{En Yüksek Sıcaklık } (+^{\circ}\text{C}) - \text{Standart Test Sıcaklığı } (+^{\circ}\text{C})) \times V_{oc} \text{ Sıcaklık Katsayısı}) / 100)) \times V_{mpp} \times 1 \text{ String Panel Sayısı}$
En Yüksek Sıcaklıkta String ( $V_{oc}$ ) Değeri	$((1 - (((\text{En Yüksek Sıcaklık } (+^{\circ}\text{C}) - \text{Standart Test Sıcaklığı } (+^{\circ}\text{C})) \times V_{oc} \text{ Sıcaklık Katsayısı}) / 100)) \times V_{oc} \times 1 \text{ String Panel Sayısı})$
En Düşük Sıcaklıkta String ( $V_{mpp}$ ) Değeri	$(1 + (((\text{En Düşük Sıcaklık } (-^{\circ}\text{C}) + \text{Standart Test Sıcaklığı } (+^{\circ}\text{C})) \times V_{oc} \text{ Sıcaklık Katsayısı}) / 100)) \times V_{mpp} \times 1 \text{ String Panel Sayısı}$
En Düşük Sıcaklıkta String ( $V_{oc}$ ) Değeri	$(1 + (((\text{En Düşük Sıcaklık } (-^{\circ}\text{C}) + \text{Standart Test Sıcaklığı } (+^{\circ}\text{C})) \times V_{oc} \text{ Sıcaklık Katsayısı}) / 100)) \times V_{oc} \times 1 \text{ String Panel Sayısı}$
En Yüksek Sıcaklıkta String ( $I_{mpp}$ ) Değeri	$(1 + (((\text{En Yüksek Sıcaklık } (+^{\circ}\text{C}) - \text{Standart Test Sıcaklığı } (+^{\circ}\text{C})) \times I_{sc} \text{ Sıcaklık Katsayısı}) / 100)) \times I_{mpp} \times 1 \text{ invertör için String Sayısı}$
En Yüksek Sıcaklıkta String ( $I_{sc}$ ) Değeri	$(1 + (((\text{En Yüksek Sıcaklık } (+^{\circ}\text{C}) - \text{Standart Test Sıcaklığı } (+^{\circ}\text{C})) \times I_{sc} \text{ Sıcaklık Katsayısı}) / 100)) \times I_{sc} \times 1 \text{ invertör için String Sayısı}$

PANEL için STRİNG UYUMU HESAPLARI					
Rated Power ( $P_{mpp}$ )	Rated Current ( $I_{mpp}$ )	Rated Voltage ( $V_{mpp}$ )	S.Circuit Current ( $I_{sc}$ )	O.Circuit Voltage ( $V_{oc}$ )	Serileme Panel Sayısı (ad.)
540	13,04	41,84	13,86	49,82	18
Voltage Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Current Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	Power Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	En Düşük Sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )	En Yüksek Sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )	Standart Test Sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )
0,27	0,05	0,35	-5	60	25
En Yüksek Sıcaklıkta String ( $V_{mpp}$ ) Değeri	=	681,95	V		Toplam String Sayısı (1INV için)
En Yüksek Sıcaklıkta String ( $V_{oc}$ ) Değeri	=	812,02	V		7
En Düşük Sıcaklıkta String ( $V_{mpp}$ ) Değeri	=	793,79	V		
En Düşük Sıcaklıkta String ( $V_{oc}$ ) Değeri	=	945,19	V		
En Yüksek Sıcaklıkta String ( $I_{mpp}$ ) Değeri	=	92,88	A	1 INV için ( $P_{mpp}$ ) Değeri	
En Yüksek Sıcaklıkta String ( $I_{sc}$ ) Değeri	=	98,72	A	68040	W

İNVERTER için STRİNG UYUMU HESAPLARI				
Min. MPP Voltage ( $V_{mpp}$ )	Max. MPP Voltage ( $V_{mpp}$ )	Max. DC Input Voltage ( $V_{dc}$ )	Max. PV Input Current ( $I_{mpp}$ )	Max. Short Circuit Current ( $I_{sc}$ )
200	1000	1100	120	160

PANEL ve İNVERTER UYUMU GÖSTERGELERİ					
En Yüksek Sıcaklıkta String ( $V_{mpp}$ ) Uyumu	=	681,95	>	200	✓
En Düşük Sıcaklıkta String ( $V_{mpp}$ ) Uyumu	=	793,79	<	1000	✓
En Düşük Sıcaklıkta String ( $V_{oc}$ ) Uyumu	=	945,19	<	1100	✓
En Yüksek Sıcaklıkta String ( $I_{mpp}$ ) Uyumu	=	92,88	<	120	✓
En Yüksek Sıcaklıkta String ( $I_{sc}$ ) Uyumu	=	98,72	<	160	✓

**Şekil 3.4:** Panel invertör string uyumu hesapları



**Şekil 3.5:** Panel - invertör yerleşim uygulama örnekleri

### 3.3 Şebekeye Bağlı FV Sistemlerin Performans Göstergeleri

Şebekeye bağlı FV sistemlerin performansı, sistemin tasarım kalitesini, işletme verimliliğini ve enerji üretim başarısını değerlendirmek amacıyla kullanılan çeşitli performans göstergeleri ile ifade edilir. Bu göstergeler, uluslararası kabul görmüş IEC 61724 standardı çerçevesinde tanımlanmış olup, farklı sistemlerin karşılaştırılmasına ve zaman içindeki performans değişimlerinin izlenmesine olanak tanır.

Performans değerlendirmesinde kullanılan temel göstergelerden biri referans verim (Reference Yield,  $Y_r$ )'dir. Referans verim, panel düzlemine gelen toplam güneş ışınımının, standart referans ışınım değerine ( $1 \text{ kW/m}^2$ ) oranı olarak tanımlanır. Bu gösterge, sistemin bulunduğu konuma ve iklim koşullarına bağlı olarak teorik olarak elde edilebilecek enerji potansiyelini ifade eder ve birimi  $\text{kWh/kWp}$ 'dir.

Bir diğer önemli gösterge sistem verimi (Final Yield,  $Y_f$ )'dir. Sistem verimi, FV sistemin şebekeye verdiği toplam AC enerjisinin, sistemin kurulu DC gücüne oranı olarak tanımlanır. Bu gösterge, sistemin gerçek işletme koşullarında ne kadar enerji ürettiğini ortaya koyar ve  $\text{kWh/kWp}$  birimiyle ifade edilir.

Performans oranı (Performance Ratio, PR), şebekeye bağlı FV sistemlerin en kritik performans göstergelerinden biridir. PR, sistem veriminin referans verime oranı olarak hesaplanır ve sistemin güneş ışınımından bağımsız olarak ne kadar verimli çalıştığını gösterir. Bu oran; sıcaklık, inverter verimi, kablo kayıpları, gölgeleme, kirlenme ve diğer sistem kayıplarını kapsayan bütünsel bir performans ölçütüdür. İyi tasarlanmış ve düzgün

işletilen bir şebekeye bağlı FV sistemde PR değeri genellikle %75 ile %85 arasında, çok iyi sistemlerde ise %85'in üzerinde olur.

Kapasite faktörü (Capacity Factor, CF), sistemin bir yıl boyunca tam gücünde çalıştığı varsayımıyla fiili üretimi arasındaki oranı ifade eder. Bu gösterge, FV sistemin yıl boyunca ne ölçüde etkin kullanıldığını ortaya koyar. Türkiye koşullarında şebekeye bağlı FV sistemler için kapasite faktörü genellikle %15 ile %22 arasında değişmektedir.

Performans değerlendirmesinde ayrıca spesifik üretim göstergesi kullanılır. Spesifik üretim, birim kurulu güç başına yıllık üretilen enerji miktarını ifade eder ve kWh/kWp·yıl birimiyle belirtilir. Bu değer, sistemin bulunduğu coğrafi bölgenin güneşlenme potansiyelini ve sistem tasarımının başarısını yansıtır. Türkiye'de bu değer genellikle 1.400-1.700 kWh/kWp·yıl aralığındadır.

Bir diğer önemli performans göstergesi kullanılabilirlik (availability) oranıdır. Kullanılabilirlik, sistemin çalışır durumda olduğu sürenin toplam zamana oranını ifade eder. Bakımı düzenli yapılan ve izleme sistemleriyle takip edilen şebekeye bağlı FV sistemlerde kullanılabilirlik oranı genellikle %98'in üzerindedir.

Bunlara ek olarak, sistem performansını etkileyen kayıplar da performans analizinin önemli bir parçasıdır. Bu kayıplar; panel sıcaklık kayıpları, inverter verim kayıpları, DC ve AC kablo kayıpları, gölgeleme, kirlenme (soiling) ve inverter güç sınırlaması (clipping) gibi bileşenlerden oluşur. Toplam sistem kayıpları iyi tasarlanmış bir FV sistemde genellikle %15–%25 aralığında gerçekleşir.

Sonuç olarak, şebekeye bağlı FV sistemlerin performans göstergeleri, sistemin teknik başarısını, enerji üretim potansiyelini ve işletme kalitesini değerlendirmek için vazgeçilmez araçlardır. Bu göstergeler sayesinde farklı sistemlerin karşılaştırılması, arıza ve verim düşüşlerinin tespiti ve uzun vadeli enerji üretim analizleri güvenilir bir şekilde yapılabilmektedir.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1 PVsyst Programı İle FV Güç Santralının Modellenmesi

PVsyst analizi, bir güneş enerjisi santralının (GES) üretimini, kayıplarını ve performansını bilgisayar ortamında simüle eden profesyonel bir fizibilite ve tasarım analizidir. PVsyst analizi, bir güneş enerjisi santralının daha kurulmadan önce bilgisayar ortamında modellenmesi ve bu model üzerinden yıllık enerji üretiminin, kayıplarının ve genel performansının hesaplanmasıdır. Amaç, santralin gerçek hayatta nasıl davranacağını mümkün olduğunca doğru tahmin etmektir. Bu nedenle PVsyst, yalnızca bir “üretim hesabı” değil, aynı zamanda teknik uygunluk ve risk analizidir.

### 4.2 Performans Analizi Sonuçları

Analizin ilk adımı meteorolojik veridir. Bir GES’in ne kadar elektrik üreteceği, o bölgeye gelen güneş ışınımına ve sıcaklığa doğrudan bağlıdır. PVsyst bu aşamada Meteonorm, NASA veya PVGIS gibi veri tabanlarından uzun yıllar ortalamasına dayanan ışınım ve sıcaklık verilerini kullanır. Bu veriler saatlik veya aylık olarak programa girilir. Böylece sistem, yazın yüksek sıcaklıkların panel verimini düşürmesini veya kışın düşük ışınımı dikkate alır. Yanlış veya iyimser meteoroloji verisi kullanılırsa, tüm analiz hatalı olur. Yarış Kabin GES Santrali için ilk adımda girilmesi gereken enlem, boylam, rakım, hava durumu bilgileri programa Şekil 4.1’te görüldüğü gibi girilmiştir.

Proje özeti				
<b>Coğrafi konum</b>	<b>Konum</b>		<b>Proje ayarları</b>	
Kabaklı	Enlem	39.58 °N	Albedo	0.20
Turkey	Boylam	27.84 °E		
	Rakım	219 m		
	Saat dilimi	UTC+3		
<b>Hava durumu verileri</b>				
Gökköy				
Meteonorm 8.0 (2005-2013), Sat=% 100 - Sentetik				

Şekil 4.1: PVsyst analizi birinci adım verileri

İkinci adımda sistemin elektriksel tasarımı yapılır. Burada kullanılacak panelin marka ve modeli, panel gücü, sıcaklık katsayıları, invertörün modeli, MPPT aralıkları, maksimum DC gerilimi ve akım sınırları Şekil 4.2’te görüldüğü gibi tanımlanır. Panellerin kaçlı stringler halinde bağlanacağı, bir MPPT’ye kaç string gideceği bu aşamada girilir. PVsyst, bu

bilgilerle string gerilimlerinin soğuk ve sıcak hava koşullarında invertör sınırları içinde kalıp kalmadığını kontrol eder. Yani panel–invertör uyumu burada matematiksel olarak doğrulanır.

Kolektör alanının özellikleri				Kolektör alanının özellikleri			
<b>Alan #4 - Alt alan #4</b>				<b>PV modül</b>			
Yönlendirme	#4			Üretici	DAXLER	Invertör	Üretici
Eğim/Azimut	8/-124 °			Model	WM10-144-HC	Model	SUN2000-100KTL-M1-400VAc
PV modül sayısı	1090 birim	Invertör sayısı	97 * MPPT 17% 16.2 birim	(Kullanıcı tarafından belirlenen parametreler)			
Nominal (STC)	1030 kWp	Toplam güç	808 kWac	birim gücü	545 Wp	birim gücü	50.0 kWac
Modül	105 Zincir x 18 Seri			PV modül sayısı	19728 birim	Invertör sayısı	180 birim
<b>İşletme şartlarında (50°C)</b>		Çalışma gerilimi	200-1000 V	Nominal (STC)	10.75 MWp	Toplam güç	8000 kWac
Pmpp	931 kWp	Maks güç (≈30°C)	55.0 kWac	<b>Alan #1 - PV dizisi</b>			
U mpp	671 V	Nom. güç oranı (DC:AC)	1.27	Yönlendirme	#1	Invertör sayısı	32 * MPPT 17% 5.3 birim
I mpp	1388 A			Eğim/Azimut	7/68 °	Toplam güç	267 kWac
<b>Alan #5 - Alt alan #5</b>				<b>Alan #2 - Alt alan #2</b>			
Yönlendirme	#3			Yönlendirme	#2		
Eğim/Azimut	8/56 °			Eğim/Azimut	8/-113 °		
PV modül sayısı	7398 birim	Invertör sayısı	350 * MPPT 17% 58.3 birim	PV modül sayısı	576 birim	Invertör sayısı	32 * MPPT 17% 5.3 birim
Nominal (STC)	4032 kWp	Toplam güç	2917 kWac	Nominal (STC)	314 kWp	Toplam güç	267 kWac
Modül	411 Zincir x 18 Seri			Modül	32 Zincir x 18 Seri		
<b>İşletme şartlarında (50°C)</b>		Çalışma gerilimi	200-1000 V	<b>İşletme şartlarında (50°C)</b>		Çalışma gerilimi	200-1000 V
Pmpp	3646 kWp	Maks güç (≈30°C)	55.0 kWac	Pmpp	284 kWp	Maks güç (≈30°C)	55.0 kWac
U mpp	671 V	Nom. güç oranı (DC:AC)	1.38	U mpp	671 V	Nom. güç oranı (DC:AC)	1.18
I mpp	5434 A			I mpp	423 A		
<b>Alan #6 - Alt alan #6</b>				<b>Alan #3 - Alt alan #3</b>			
Yönlendirme	#4			Yönlendirme	#3		
Eğim/Azimut	8/-124 °			Eğim/Azimut	8/56 °		
PV modül sayısı	7398 birim	Invertör sayısı	350 * MPPT 17% 58.3 birim	PV modül sayısı	1890 birim	Invertör sayısı	99 * MPPT 17% 16.5 birim
Nominal (STC)	4032 kWp	Toplam güç	2917 kWac	Nominal (STC)	1030 kWp	Toplam güç	825 kWac
Modül	411 Zincir x 18 Seri			Modül	105 Zincir x 18 Seri		
<b>İşletme şartlarında (50°C)</b>		Çalışma gerilimi	200-1000 V	<b>İşletme şartlarında (50°C)</b>		Çalışma gerilimi	200-1000 V
Pmpp	3646 kWp	Maks güç (≈30°C)	55.0 kWac	Pmpp	931 kWp	Maks güç (≈30°C)	55.0 kWac
U mpp	671 V	Nom. güç oranı (DC:AC)	1.38	U mpp	671 V	Nom. güç oranı (DC:AC)	1.25
I mpp	5434 A			I mpp	1388 A		
<b>Total PV gücü</b>		<b>Invertör toplam gücü</b>					
Nominal (STC)	10752 kWp	Toplam güç	8000 kWac				
Toplam	19728 modül	Invertör sayısı	180 birim				
Modül yüzeyi	50985 m <sup>2</sup>	Nom. güç oranı	1.34				

Şekil 4.2: PVsyst analizi ikinci adım verileri

Şekil 4.3'te görüldüğü gibi üçüncü aşama mekanik yerleşim ve gölgelemedir. Panellerin eğim açısı, baktığı yön, sıra aralıkları ve varsa çevredeki engeller tanımlanır. Arazi projelerinde sıra arası mesafeler, çatı projelerinde ise parapetler, bacalar veya komşu binalar gölgeleme unsuru olarak modele eklenir. PVsyst, yıl boyunca güneşin konumunu hesaplayarak bu gölgelerin hangi saatlerde ve ne kadar süreyle panel üzerine düştüğünü simüle eder. Bunun sonucunda gölgelemenin yıllık üretimi yüzde kaç azalttığını hesaplanır. Bu, özellikle arazi GES'lerde çok kritik bir adımdır.

Genel parametreler		
<b>Şebekeye bağlı sistem</b>	<b>Bina üzerinde</b>	<b>Ufuk</b>
<b>Kolektör düzleminin yönlendirmesi</b>	<b>Kullanılan modeller</b>	Ufuk tanımlanmadı
<b>Yönlendirme</b>	Transpozisyon	
Sabit düzlemler	Perez	
Eğim/azimut	Difüz	Perez, Meteorom
	Circumsolar	ayn
<b>Yakın gölgelemeler</b>	<b>Kullanıcı ihtiyaçları</b>	
Gölgelemesiz	Sınırsız yükleme (şebeke)	

Şekil 4.3: PVsyst analizinde üçüncü adım verileri

Dördüncü aşama kayıp analizidir. PVsyst'in en güçlü olduğu kısım burasıdır. Program, güneşten panele gelen teorik enerjiden başlayarak, şebekeye verilen gerçek enerjiye kadar geçen tüm kayıpları tek tek hesaplar. Panel üzerindeki optik kayıplar, sıcaklık nedeniyle oluşan verim düşüşü, panel tolerans farklarından kaynaklanan uyumsuzluk (mismatch) kaybı, DC kablolardaki direnç kayıpları, invertör dönüşüm kayıpları, AC taraftaki kayıplar ve varsa trafodaki kayıplar ayrı ayrı gösterilir. Bu kayıplar genelde yüzde olarak ifade edilir ve toplam sistem kaybı ortaya çıkar. İyi tasarlanmış bir santralde bu toplam kayıp genellikle %14 ile %20 arasında olur. Şekil 4.4'te PVsyst analizinde dördüncü adım verileri görülmektedir.

Dizi kayıpları								
<b>IAM kayıp faktörü</b>								
Yansımaya etkisi (IAM): Özelleştirilmiş profil								
0°	25°	45°	60°	65°	70°	75°	80°	90°
1.000	1.000	0.995	0.962	0.936	0.903	0.851	0.754	0.000

DC kablolama kaybı			
Global kablolama direnci	0.39 mΩ		
Kayıp oranı	0.7 STC'de%		
<b>Alan #1 - PV dizisi</b>		<b>Alan #2 - Alt alan #2</b>	
Global alan direnci	13 mΩ	Global alan direnci	13 mΩ
Kayıp oranı	0.8 STC'de%	Kayıp oranı	0.8 STC'de%
<b>Alan #3 - Alt alan #3</b>		<b>Alan #4 - Alt alan #4</b>	
Global alan direnci	4.0 mΩ	Global alan direnci	4.0 mΩ
Kayıp oranı	0.8 STC'de%	Kayıp oranı	0.8 STC'de%
<b>Alan #5 - Alt alan #5</b>		<b>Alan #6 - Alt alan #6</b>	
Global alan direnci	1.0 mΩ	Global alan direnci	1.0 mΩ
Kayıp oranı	0.8 STC'de%	Kayıp oranı	0.8 STC'de%

Sistem kayıpları	
<b>Sistemin kullanılamazlığı</b>	
Zaman oranı	0.3 %
	1.0 gün,
	3 dönemler

AC kablolama kaybı	
<b>İnv. çıkışından enjeksiyon noktasına</b>	
Invertör gerilimi	400 Vac tri
Kayıp oranı	0.1 STC'de%
<b>Invertör: SUN2000-100KTL-M1-400Vac</b>	
Kablo kesiti (160 İnv.)	Bakır 160 x 3 x 300 mm <sup>2</sup>
Ortalama kablo uzunluğu	35 m

Şekil 4.4: PVsyst analizinde dördüncü adım verileri

Bu hesapların sonucunda program yıllık enerji üretimini verir. Bu değer genelde kilovat-saat (kWh) olarak ifade edilir ve aylık dağılımı da gösterilir. PVsyst analizinin en önemli çıktılarından biri de performans oranıdır (PR). PR, santralin teorik olarak üretebileceği enerji ile gerçekte ürettiği enerji arasındaki oranı gösterir. Güneşlenme ve kurulu güce göre normalize edildiği için farklı projeleri karşılaştırmakta kullanılır. Genel olarak %75–85 arası PR iyi kabul edilir, yüzde 85'in üzeri ise çok iyi bir tasarımı gösterir. PVsyst analiz sonuçlarına göre sistemin yıllık toplam AC enerji üretimi 13563 MWh olarak hesaplanmış, buna karşılık birim kurulu güç başına düşen spesifik üretim değeri 1261 kWh/kWp olarak elde edilmiştir. Simülasyon sonucunda hesaplanan PR %77,12 olup, bu değer PVsyst literatüründe iyi tasarlanmış şebekeye bağlı FV sistemler için öngörülen aralıklar ile uyumludur. Şekil 4.5'te PVsyst analizi genel sonuçları görülmektedir.

PVsyst yazılımı tarafından oluşturulan kayıplar diyagramı, FV sistemde güneş ışınımının panele ulaşmasından itibaren şebekeye verilen elektrik enerjisine kadar geçen süreçte meydana gelen tüm enerji kayıplarını kademeli olarak göstermektedir. Diyagram, yıllık toplam yatay güneş ışınımı ile başlamakta ve sırasıyla optik, elektriksel ve sistemsel kayıplar dikkate alınarak şebekeye verilen net enerji miktarı ile sonlanmaktadır.

Analiz sonuçlarına göre sistemdeki kayıplar; gölgeleme, optik kayıplar, sıcaklık kaynaklı kayıplar, dizi seviyesindeki elektriksel kayıplar, invertör dönüşüm kayıpları ve AC iletim kayıplarından oluşmaktadır. Özellikle sıcaklık kaynaklı kayıpların toplam kayıplar içerisindeki payı belirgin olup, bu durum bölgenin iklim koşulları ile ilişkilendirilmektedir. İntertör ve AC tarafındaki kayıpların ise modern ekipman kullanımı sayesinde sınırlı düzeyde kaldığı görülmektedir.

Tüm bu kayıpların birleşik etkisi sonucunda sistemin yıllık PR %77,12 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, literatürde raporlanan benzer şebekeye bağlı FV sistemlerin performans değerleri ile uyum göstermektedir. Şekil 4.6'da PVsyst analizi sonrası elde edilen şebekeye bağlı FV sistemin yıllık enerji kayıpları diyagramı görülmektedir.

## Genel sonuçlar

### Sistem üretimi

Üretilen enerji

13563 MWh/yıl

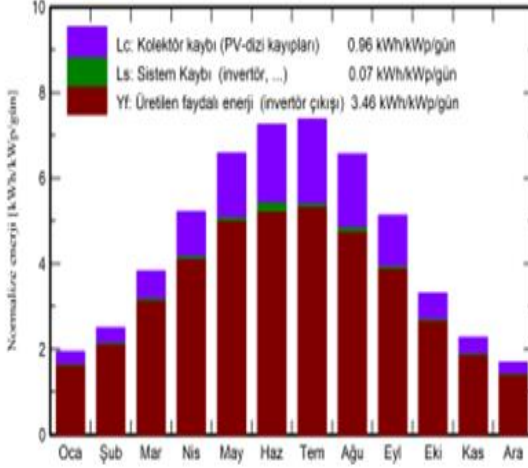
Üretilen enerji

1261 kWh/kWp/yıl

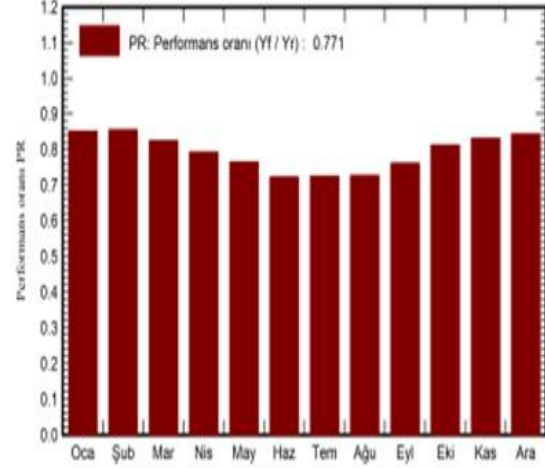
Performans oranı PR

77.12 %

### Normalize üretim (kWp başı)



### Performans oranı PR



### Bilanço ve genel sonuçlar

	GlobHor kWh/m <sup>2</sup>	DiffHor kWh/m <sup>2</sup>	T_Amb °C	GlobInc kWh/m <sup>2</sup>	GlobEff kWh/m <sup>2</sup>	EArray MWh	E_Grid MWh	PR oran
Ocak	60.5	27.30	4.18	60.1	56.2	560	550	0.851
Şubat	70.6	39.17	5.57	70.1	67.0	656	644	0.855
Mart	119.3	53.58	8.81	118.7	114.6	1071	1053	0.825
Nisan	157.2	65.26	12.21	156.4	152.1	1355	1334	0.793
Mayıs	204.6	80.49	17.78	204.0	199.1	1703	1677	0.765
Haziran	218.2	79.39	22.83	217.6	212.5	1762	1691	0.723
Temmuz	229.2	74.80	26.52	228.6	223.4	1810	1783	0.725
Ağustos	204.1	64.94	26.46	203.4	198.5	1624	1590	0.727
Eylül	154.4	48.66	20.90	153.8	149.2	1280	1260	0.762
Ekim	102.9	48.75	15.47	102.4	98.0	910	894	0.813
Kasım	68.6	32.02	9.55	68.2	64.0	621	610	0.832
Aralık	53.0	25.75	5.38	52.6	48.8	487	477	0.844
Yıl	1642.8	640.13	14.70	1635.8	1583.5	13839	13563	0.771

### Açıklama

GlobHor Global yatay ışınlama

EArray Dizinin çıkışında etkin enerji

DiffHor Yatay difüz ışınlama

E\_Grid Şebekeye enjekte edilen enerji

T\_Amb Çevre sıcaklığı

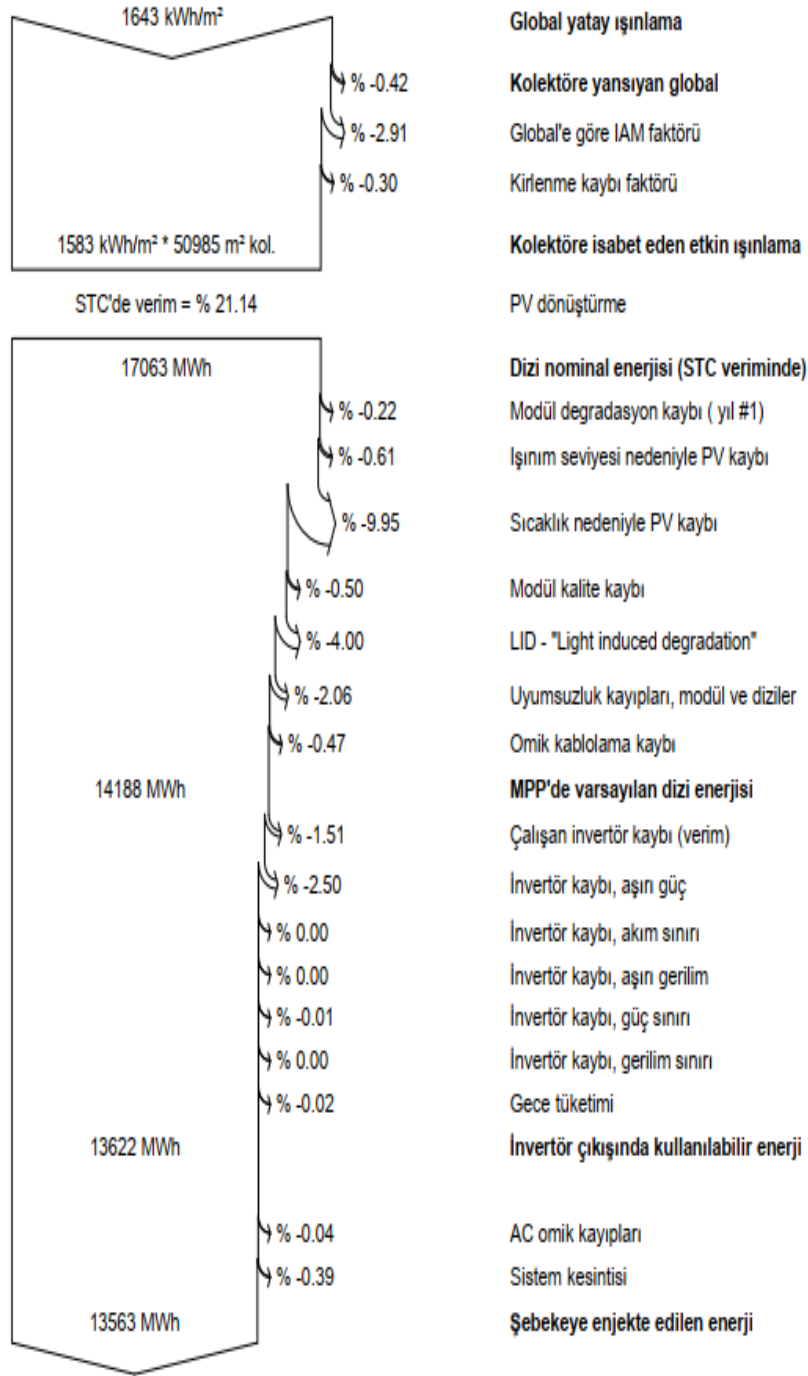
PR Performans oranı

GlobInc Kolektöre yansıyan global

GlobEff IAM ve gölgeleme için düzeltilmiş etkin Global

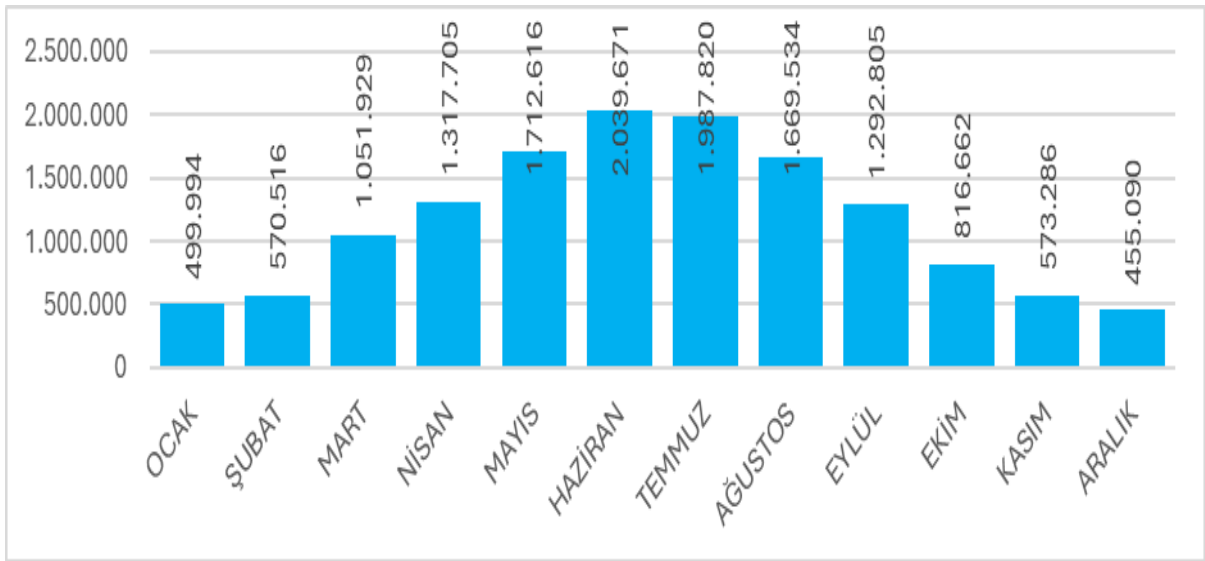
Şekil 4.5: PVsyst analizinde genel sonuçlar

## Kayıplar diyagramı



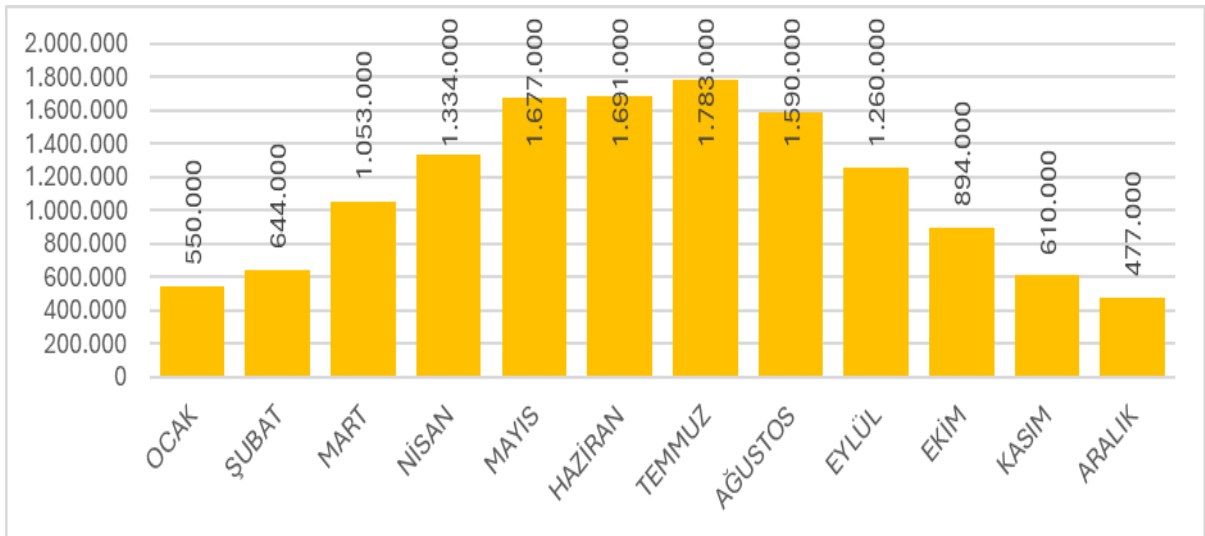
**Şekil 4.6:** PVsyst analizi sonrası elde edilen şebekeye bağlı FV sistemin yıllık enerji kayıpları diyagramı

Sonuç olarak, PVsyst simülasyonları incelenen FV sistemin teknik tasarım açısından uygun olduğunu ve öngörülen işletme koşulları altında istikrarlı bir performans sergileyeceğini göstermektedir. Elde edilen simülasyon sonuçlarının, çalışmanın ilerleyen aşamalarında gerçek üretim verileri ile karşılaştırılarak sistem performansının doğruluğunun değerlendirilmesi mümkün olacaktır. Bu çalışma kapsamında invertörün arayüzünden alınan 2025 yılı aylık enerji üretim verileri kullanılmıştır. Kullanılan bu veriler Şekil 4.7’de verilmiştir.



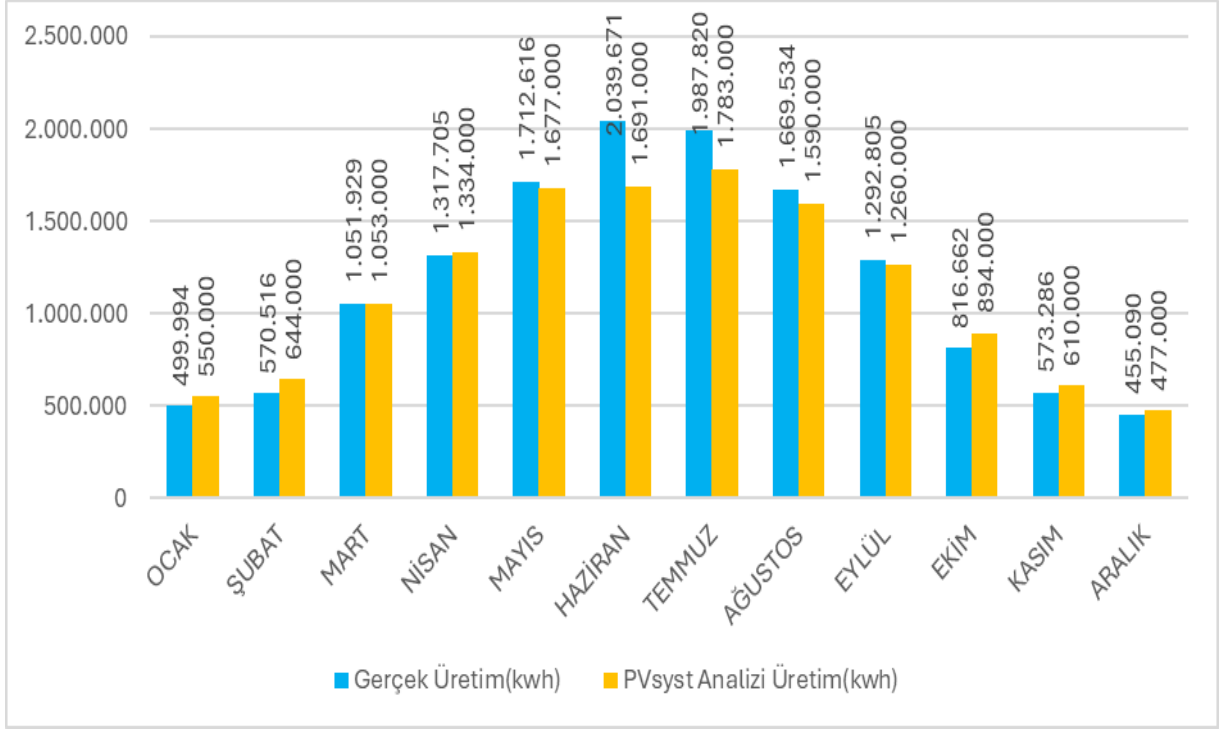
**Şekil 4.7:** Santral aylık enerji üretimi (kWh)

PVsyst programı ile FV Santralin aylara göre belirlenmiş yıllık üretim tahmini 13.563.000 kWh/yıldır. Analize göre üretim verileri Şekil 4.8’de verilmiştir.



**Şekil 4.8:** PVsyst analizi aylık üretim verileri (kWh)

Analiz ve gerçek üretim verilerinin karşılaştırılmış halleri Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9: GES gerçek üretim ve PVsyst analizi üretim verilerinin karşılaştırılması

Grafikler incelendiğinde kış aylarında üretimlerin düşük, yaz aylarında ise üretim miktarlarının yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sebebi güneşlenme süreleri ve panel yüzeylerine etkiyen ışınım miktarları ile ilgilidir. Analizlerde kullanılan meteorolojik veriler, PVsyst programında TMY (Typical Meteorological Year) verisi olarak tanımlanan uzun dönemli gözlemlerden türetilmiştir. PVsyst simülasyonları, Global Horizontal Irradiation (GHI) ve güneşlenme süresi (Sunshine Duration) gibi parametreleri yatay düzlemde kullanmakta ve sistemin potansiyel üretimini bu verilere göre hesaplamaktadır. Bu değerler, ilgili bölgenin uzun yıllar ortalama iklim koşullarını temsil eder ve kısa dönemli meteorolojik değişkenlikleri içermez. Gerçek üretim verileri ise ölçüm yapılan dönemin doğrudan inverter ve SCADA kayıtları ile elde edilmiştir. PVsyst model çıktıları ile gerçek veriler arasındaki sapmalar, yıllar arası ışınım farklılıkları, bulutluluk, atmosferik saydamlık ve difüz ışınım bileşenlerinin değişkenliğinden kaynaklanmaktadır. Özellikle güneşlenme süresi, PVsyst’te belirlenen eşik değer üzerinden tanımlandığı için parçalı bulutlu günlerde analiz ve ölçüm değerleri arasında fark oluşabilir; buna karşın toplam GHI daha kararlı bir dağılım sergiler.

Elde edilen sonuçlar, PVsyst simülasyonları ile gerçek ölçüm verilerinin genel olarak uyumlu olduğunu göstermektedir. Gözlemlenen farklar, FV performans analizi literatüründe kabul edilen belirsizlik sınırları içinde yer almakta olup, PVsyst modelinin gerçek sistem üretimini güvenilir şekilde temsil ettiğini doğrulamaktadır.

Şekil 14'e göre 2025 yılında gerçek üretim 13.987.627 kWh enerji üretilmiştir. PVsyst analizine göre de 13.563.000 kWh enerji üretimi öngörülmüştür. Analiz programı kullanılarak hesaplanan yıllık enerji üretimi ile sistemden elde edilen gerçek üretim değerleri arasında yaklaşık %3.13 oranında bir fark gözlemlenmiştir. Bu farkın temel nedeni, analiz çalışmalarında kullanılan meteorolojik verilerin uzun dönemli (20–30 yıl) iklim ortalamalarına dayanması, gerçek üretim verilerinin ise yalnızca ilgili yılın gerçek hava koşullarını yansıtmasıdır. Yıl içindeki bulutluluk, atmosferik koşullar ve ışınım dağılımındaki doğal değişkenlik, uzun dönem ortalamalardan sapmalara neden olabilmektedir.

Buna ek olarak, analiz programlarında kullanılan sıcaklık, sistem kayıpları ve ekipman verimlerine ilişkin varsayımlar ideal veya ortalama koşulları temsil ederken, gerçek sistem işletmesinde panel sıcaklığı artışları, inverterlerin gerçek çalışma verimleri, kablo ve bağlantı kayıpları ile kirlenme gibi etkenler üretimi sınırlı ölçüde etkileyebilmektedir. Ayrıca enerji ölçüm sistemlerindeki veri toplama yöntemleri, sayaç hassasiyetleri ve zaman aralıkları da küçük ölçekte farklar oluşturabilmektedir.

Tüm bu etkenler birlikte değerlendirildiğinde, analiz sonuçları ile gerçek üretim arasındaki %3 seviyesindeki fark, literatürde FV sistem modellemeleri için kabul edilen belirsizlik aralığının oldukça altında olup, kullanılan analiz yönteminin ve modelleme yaklaşımının gerçek sistem performansını yüksek doğrulukla temsil ettiğini göstermektedir.

## 5. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada, Balıkesir ili Altıeylül ilçesinde kurulu bulunan şebekeye bağlı çok yönlü çatı tipi FV enerji santralının yıllık performansı, simülasyon ve gerçek üretim verileri esas alınarak değerlendirilmiştir.

İncelenen sistemin enerji üretim potansiyeli PVsyst yazılımı kullanılarak modellenmiş ve elde edilen simülasyon sonuçları 2025 yılına ait günlük ve aylık ölçüm verileri ile karşılaştırılmıştır.

2025 yılına ait gerçek üretim verileri incelendiğinde, sistemin toplam yıllık enerji üretiminin 13.988 MWh olduğu belirlenmiştir. Aynı sistem için PVsyst yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon sonucunda yıllık üretim 13.563 MWh olarak hesaplanmıştır.

Gerçek üretimin simülasyon değerine kıyasla %3,13 oranında daha yüksek olması, kullanılan simülasyon parametrelerinin muhafazakâr seçildiğini ve sistemin sahada beklenenin üzerinde performans sergilediğini göstermektedir.

Gerçek üretim verilerine göre hesaplanan spesifik üretim değeri 1301 kWh/kWp·yıl olup, PVsyst simülasyonunda elde edilen 1261 kWh/kWp·yıl değerinden daha yüksektir. Bu durum, düşük eğim açılarının yaz aylarında üretimi artırması ve sistemde gölgeleme kayıplarının bulunmaması ile açıklanabilir.

Performans oranı açısından değerlendirildiğinde, gerçek sistem için hesaplanan PR değeri %79,5 olup, PVsyst simülasyonunda elde edilen %77,1 değerinden yüksektir. Bu sonuçlar, kurulu FVçatı sisteminin yüksek verimle çalıştığını ve tasarım aşamasında yapılan inverter boyutlandırmasının uygun olduğunu ortaya koymaktadır.

Elde edilen sonuçlar, uygun sistem tasarımı, doğru ekipman seçimi ve etkin işletme koşulları altında büyük ölçekli endüstriyel çatı tipi FV sistemlerin öngörülen enerji üretim hedeflerine yakın performans sergileyebildiğini göstermektedir. Ayrıca PVsyst yazılımı ile gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarının, gerçek üretim verileri ile yüksek düzeyde uyumlu sonuçlar verdiği ve sistem performansının ön değerlendirilmesinde güvenilir bir araç olduğu ortaya konulmuştur.

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulguların, IEC standartları çerçevesinde gerçekleştirilecek benzer FV sistem performans analizlerine katkı sağlaması ve endüstriyel çatı uygulamalarında tasarım ve işletme süreçlerine teknik bir referans oluşturması beklenmektedir.

Gelecek çalışmalarda, daha uzun dönemli ölçüm verilerinin değerlendirilmesi ve farklı çatı geometrileri ile sistem konfigürasyonlarının karşılaştırmalı olarak incelenmesi önerilmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] **Camacho, E.F., Berenguel, M., Rubio, F.R., and Martínez, D.** (2012). Solar Energy Fundamentals. In: Control of Solar Energy Systems. Advances in Industrial Control. Springer, London.  
[https://doi.org/10.1007/978-0-85729-916-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-0-85729-916-1_1).
- [2] **Fahrenbruch, A. and Bube, R.** (2012) Fundamentals of Solar Cells: Photovoltaic Solar Energy Conversion. Elsevier. e-kitap.  
<https://play.google.com/books/reader?id=eh7H-9cz-IoC&pg=GBS.PA1&hl=tr>.
- [3] **Desideri, U. and Campana, P.E.** (2014). Analysis and comparison between a concentrating solar and a photovoltaic power plant. *Applied Energy*, 113 (422- 433).  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.046>.
- [4] **Zahedi, A.** (2006). Solar photovoltaic (PV) energy; latest developments in the building integrated and hybrid PV systems. *Renewable Energy*, 31(5), 711-718.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.007>.
- [5] **Dambhare M. V., Butey, B., and Moharil, S. V.** (2021). Solar photovoltaic technology: A review of different types of solar cells and its future trends. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1913 012053.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1913/1/012053>.
- [6] **Ballif, C., Haug, F.J., Boccad, M., Verlinden, P.J., and Hahn, G.** (2022). Status and Perspectives of Crystalline Silicon Photovoltaics in Research and Industry. *Nat. Rev. Mater.* 7, 597–616.  
<https://doi.org/10.1038/s41578-022-00423-2>.
- [7] **Lovegrove, K. and Pye, J.** (2012). Fundamental principles of concentrating solar power (CSP) systems. *Concentrating Solar Power Technology*, (16-67).  
<https://doi.org/10.1533/9780857096173.1.16>.
- [8] **González-Roubaud, E., Pérez-Osorio, D., and Prieto, C.** (2017). Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: Steam vs. molten salts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 133- 148.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.084>
- [9] **Chan, H. Y., Riffat, S. B., and Zhu J.** (2010). Review of passive solar heating and cooling Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 781-789.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.030>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [10] **Gautam, V., Khatoon, S., and Jalil, M.F.** (2024). History of solar PV system and its recent development. *Photovoltaic Systems Technology*. Wiley, New Jersey, 1–26.
- [11] **Armaroli, N. and Balzani, V.** (2012). *Powering Planet Earth: Energy Solutions for the Future* (New Jersey, USA: John Wiley and Sons), 2-16.
- [12] Yenilenebilir Enerjiye Farklı Bakışlar. (2022). Ed. Yavuz, S., Karabulut, T, Nobel Yayınevi, Ankara, ss.1-19.
- [13] **AlShemmary, E. N. A., Kadhom, L. M., and Al-Fahham, W. J.** (2013). Information Technology and Stand-alone Solar Systems in Tertiary Institutions. *Energy Procedia*, 36, 369 – 379.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.042>.
- [14] <https://hysunpower.com/products/home-use-solar-power-system> adresine 23.07.2025 tarihinde erişildi.
- [15] **Ramalingam, K. and Indulkar, C.** (2017). Solar energy and photovoltaic technology. In *Distributed Generation Systems*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands; pp. 69–147.
- [16] **Rehman, F., Syed, I. H., Khanam, S., Ijaz, S., Mehmood, H., Zubair, M., Massoud, Y., and Mehmood, M. Q.** (2023). Fourth-generation solar cells: a review. *Energy Advances*, 2, 1239–1262.  
<https://doi.org/10.1039/D3YA00179B>.
- [17] **Deb, D. and Bhargava, K.** (2022). Chapter 2 - Thin-film photovoltaics, Ed.(s): Dipankar Deb., D, Bhargava K., *Degradation, Mitigation, and Forecasting Approaches in Thin Film Photovoltaics*, Academic Press, pp. 19-37.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823483-9.00013-9>.
- [18] **Mustafa, R. J., Gomaa, M. R., Al-Dhaifallah, M., and Rezk, H.** (2020). Environmental Impacts on the Performance of Solar Photovoltaic Systems. *Sustainability*, 12, 608, 1-17.  
<https://doi.org/10.3390/su12020608>.
- [19] **Srivastava, U., Arya, R., and Vishwakarma, S.** (2021). Optimization of Efficiency of Solar PV by Cleaning Mechanism: A Review. *Smart Moves Journal Ijoscience*, 7(2), 30-34.  
<https://doi.org/10.24113/ijoscience.v7i2.384>.
- [20] **Atcitty, S., Neely, J., Ingersoll, D., Akhil, A., and Waldrip, K.** (2013). Battery Energy Storage System. In: Chakraborty, S., Simões, M., Kramer, W. (eds) *Power Electronics for*

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

*Renewable and Distributed Energy Systems*. Green Energy and Technology. Springer, London.

[https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5104-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5104-3_9).

[21] **Poullikkas, A.** (2013). A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 778-788,

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.017>.

[22] **Pathak, K. and Gupta, A. R.** (2018). Battery Energy Storage System. 4th International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology (CICT), Ghaziabad, India, 1-9.

<https://doi.org/10.1109/CICT.2018.8480377>.

[23] **Šimić, Z., Topić, D., Knežević, G., and Pelin, D.** (2021). Battery energy storage technologies overview. *International journal of electrical and computer engineering systems*, 12 (1), 53-65.

<https://doi.org/10.32985/ijeces.12.1.6>.

[24] **Jieb, Y. A. and Hossain, E.** (2022). Photovoltaic Systems Fundamentals and Applications. Springer International Publishing, USA.

<https://doi.org/10.1007/978-3-030-89780-2>.

[25] **Jewel, W. and Ramakumar, R.** (1988). The history of utility-interactive photovoltaic generation, *IEEE Trans. Energy Conversion*, 3(3), 583-588.

[26] **Bigger, J. E. and Kem, Jr. E. C.** (1990). Early applications of photovoltaics in the electric utility industry, *Conf. Record, 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 2, 856-860.

[27] **Matchanov, N. A., Kim, O. S., Akhadov, J. Z., Rasakhodzhaev, B. S., Butunbaev, B. N., Malikov, M. A., Saidov D. Sh. and Bobojonov, K. A.** (2021). Study of Namangan 130 kW Photovoltaic System Simulation and Analysis of One-Year Power Generation Results. *Applied Solar Energy*, 57(3), 223–232.

<https://doi.org/10.3103/S0003701X21030051>.

[28] **Zalasinski, M., Szczepanik, T., and Dobosz, P.** (2025). A Machine Learning System for Energy Forecasting with Feature Importance Analysis. In: Paszynski, M., Barnard, A.S., Zhang, Y.J. (eds) Computational Science – ICCS 2025 Workshops. ICCS 2025. Lecture Notes in Computer Science, vol 15910. Springer, Cham.

[https://doi.org/10.1007/978-3-031-97567-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-97567-7_3).

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [29] **Quesada, B., Sánchez, C., Cañada, J., Royo, R., and Payá, J.** (2011). Experimental results and simulation with TRNSYS of a 7.2 kWp grid-connected photovoltaic system. *Applied Energy*, 88(5), 1772-1783.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.011>.
- [30] **Molina, M. G. and Espejo, E. J.** (2014). Modeling and simulation of grid-connected photovoltaic energy conversion systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(16), 8702-8707.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.048>.
- [31] **Shukla, A., Yadav, S. K., Yadav, D., Singh, J., Singh, R. B., Hasnain, S. M. M., and Zairov, R.** (2025). Measured and simulated energy, economics and environmental (3E) performance of a building applied solar PV (BAPV) system using advanced open-source simulation software, *Unconventional Resources*, 7, 100199.  
<https://doi.org/10.1016/j.unres.2025.100199>.
- [32] **Huld, T., Friesen, G., Skoczek, A., Kenny, R. P., Sample, T., Field, M., and Dunlop, E. D.** (2011). A power-rating model for crystalline silicon PV modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(12):3359-3369.  
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.07.026>.
- [33] **Salmi, T., Bouzguenda, M., Gastli, A., and Masmoud, A.** (2012). MATLAB/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2(2), 213-218.  
<https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/148462>.
- [34] **Mohanty, P., Bhuvanewari, G., Balasubramanian, T., and Kaur, D. N.** (2014). MATLAB based modeling to study the performance of different MPPT techniques used for solar PV system under various operating conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 581-593.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.001>.
- [35] **Huld, T. and Amillo, A. M. G.** (2015). Estimating PV Module Performance over Large Geographical Regions: The Role of Irradiance, Air Temperature, Wind Speed and Solar Spectrum. *Energies*, 8(6), 5159-5181.  
<https://doi.org/10.3390/en8065159>.

## 7. ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Gamze GÖKDAĞ ÇAYIR  
Doğum tarihi ve yeri : 04.05.1990 - ERZURUM  
e-posta : gmzzz\_10@hotmail.com

### Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü / Fizik	2026
Y. Lisans (Tezsiz)	Balıkesir Üniversitesi / İş Sağlığı ve Güvenliği	2022
Lisans	Balıkesir Üniversitesi / Fen Edebiyat Fakültesi / Fizik	2012
Lise	Kırklareli Anadolu Lisesi	2008