



GÜNEŞ ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİM TESİSLERİNDE VERİM ARTIRIMI

**2024
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**

Bülent AKAY

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Engin GEDİK**

**GÜNEŞ ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİM TESİSLERİNDE VERİM
ARTIRIMI**

Bülent AKAY

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Engin GEDİK**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Temmuz 2024**

Bülent AKAY tarafından hazırlanan “GÜNEŞ ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİM TESİSLERİNDE VERİM ARTIRIMI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Engin GEDİK
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 31/07/2024

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Prof. Dr. Ali Ethem GÜREL (DÜ)
Üye : Prof. Dr. Engin GEDİK (KBÜ)
Üye : Prof. Dr. Muhammet KAYFECİ (KBÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Bülent AKAY

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GÜNEŞ ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİM TESİSLERİNDE VERİM ARTIRIMI

Bülent AKAY

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Engin GEDİK

Temmuz 2024, 67 sayfa

Güneş enerjisi tesisleri artan ihtiyaçlar ve özellikle fosil yakıtların neden olduğu kirlilik sebebiyle geleceğin sürdürülebilirlik projeleri ve küresel ısınmayı engellemeye yönelik yerel ve uluslararası strateji planlarının vazgeçilmez halini almıştır. Bu sistemlerin performansını artırmaya yönelik yenilikçi stratejiler ve bu eylemlerin analizi birçok farklı disiplin açısından incelenmekte ve geliştirilmektedir. Sürdürülebilir enerji çözümlerine yönelik taleplerin artması daha verimli güneş teknolojilerinin gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu tez çalışmasının temel amacı ise güneş enerji sistemlerindeki enerji verimliliğini artırmak amacıyla fotovoltaik sistemlerin panel türlerinin, konfigürasyonlarının ve entegrasyon tekniklerinin belirlenmesidir. Ayrıca bu çalışma, güneş enerjisi teknolojisindeki potansiyel ilerlemelere dair iç görüler sunmakta ve güneş enerjisi üretim tesislerinin verimliliğini artırmak için pratik uygulamalar önererek güneş enerji sistemleri alanına katkıda bulunmaktadır. Bu kapsamda farklı kullanım alanlarına ve parametrelerine sahip olan

güneş enerji santrallerinin verimlilik analizleri incelenmiştir. Çeşitli çevresel koşullar altında mono-kristalin ve poli-kristalin silikon paneller dahil farklı fotovoltaik panellerin etkinliğine değinilmiştir. Açık optimizasyonu ve izleme sistemleri gibi teknikler verimlilik üzerindeki etkilerini belirlemek için analiz edilmiştir. Bu optimizasyonların performans sonuçları ise teorik ve deneysel yaklaşımlar kullanılarak araştırılmıştır. Ayrıca, artırılmış fotovoltaik verimliliğin geniş kapsamlı sonuçları sadece sistem verimliliği açısından değil, ayrıca sera gazı emisyonlarının azaltılması ve güneş enerjisinin ekonomik uygulanabilirliğinin artırılması kapsamında da araştırılmıştır.

Anahtar Sözcükler : Güneş enerjisi, yenilenebilir enerji, fotovoltaik, optimizasyon, verimlilik.

Bilim Kodu : 92802

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

EFFICIENCY IMPROVEMENT IN SOLAR ENERGY ELECTRICITY GENERATION PLANTS

Bülent AKAY

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Energy Systems Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Engin GEDİK

July 2024, 67 pages

Due to the increasing needs and the pollution caused by fossil fuels, solar energy facilities have become indispensable for future sustainability projects and local and international strategy plans aimed at preventing global warming. Innovative strategies to enhance the performance of these systems and the analysis of these actions are being examined and developed from various disciplinary perspectives. The growing demand for sustainable energy solutions highlights the necessity for more efficient solar technologies. The primary aim of this thesis is to determine the types, configurations, and integration techniques of photovoltaic systems to enhance energy efficiency in solar energy systems. Additionally, this study provides insights into potential advancements in solar energy technology and contributes to the field of solar energy systems by proposing practical applications to increase the efficiency of solar energy production facilities. In this context, efficiency analyses of solar energy

systems with different applications and parameters have been examined. The effectiveness of different photovoltaic panels, including monocrystalline and polycrystalline silicon panels, under various environmental conditions has been addressed. Techniques such as angle optimization and tracking systems have been analyzed to determine their impact on efficiency. The performance results of these optimizations have been investigated using both theoretical and experimental approaches. Moreover, the broad implications of increased photovoltaic efficiency have been explored not only in terms of system efficiency but also in the context of reducing greenhouse gas emissions and increasing the economic viability of solar energy.

Key Words : Solar energy, renewable energy, photovoltaic, optimisation, efficiency.

Science Code : 92802

TEŞEKKÜR

Öncelikle bu çalışmada emek ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Engin GEDİK'e teőekkürü bir borç bilirim. Diğer yandan Prof. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK hocama ve diğer emeği geçen tüm değerli hocalarıma sonsuz minnettarlığımı bildirmek isterim. Eğitim hayatıma çok büyük destekleri olan ve bugüne gelmemde çok büyük emeği olan çok değerli ablam Sabiha AKAY'a, aileme ve eőime çok teşekkür ederim. Eğitim hayatım boyunca ilkokuldan bugüne kadar katkı sunan tüm eğitimci hocalarıma ayrıca Őükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	5
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
BÖLÜM 3	12
FOTOVOLTAİK PANEL SİSTEMLERİNE AİT GENEL BİLGİLER.....	12
3.1. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER.....	12
3.1.1. Şebekeye Bağlı Sistemler.....	13
3.1.2. Şebekeden Bağımsız Sistemler	13
3.1.3. Karma Sistemler.....	14
3.2. FOTOVOLTAİK ETKİ.....	15
3.3. GENEL YARIİLETKEN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ	16
3.4. P-TİPİ FOTOVOLTAİK PANELLERİ	17
3.5.N-TİPİ FOTOVOLTAİK PANELLERİ	18
3.6. P VE N-TİPİ TİCARİ SİLİKON PANELLERİN KARŞILAŞTIRILMASI .	18
3.7.GES GENEL DEVRE ŞEMASI BİLGİLERİ.....	19
3.8. FOTOVOLTAİK PİLLERİN I-V KARAKTERİSTİĞİ	20

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 4.....	22
FOTOVOLTAİK SİSTEM BİLEŞENLERİ.....	22
4.1. PV PANELLER	23
4.1.1. Silikon Paneller.....	24
4.1.2. Czochralski Yöntemi ve Tek Kristal Silikon Paneller.....	25
4.1.3. Amorf Silikon Paneller	26
4.1.4. Galyum Arsenit Paneller (GaAs).....	27
4.1.5. Kadmiyum Tellürid (CdTe).....	27
4.1.6. Bakır İndium Diselenid (CuInSe ₂).....	27
4.2. INVERTER	27
4.3. AKÜ	28
4.4. ŞARJ REGÜLATÖRLERİ.....	28
4.5. FOTOVOLTAİK PANELLER İÇİN PERFORMANS KRİTERLERİ	29
4.5.1. Sıcaklık Etkisi.....	29
4.5.2. Yüzey Boyutları, Temizliği ve Gelen Işığın Yansıma-Emilim Durumları.	30
BÖLÜM 5.....	32
GÜNEŞ PANELLERİNDE VERİMLİLİK ARTTIRICI MEKANİZMALAR	32
5.1. AÇI OPTİMİZASYONU VE ÖNEMLİ PARAMETRELER.....	32
5.1.1. Deklinasyon açısı (δ)	32
5.1.2. Saat açısı (ω).....	34
5.1.3. Enlem açısı (θ).....	34
5.1.4. Zenit açısı (θ_z).....	34
5.1.5. Yükseklik açısı (α).....	35
5.1.6. Azimut açısı (ψ).....	35
5.1.7. Panel eğim açısı (β)	35
5.1.8. Optimum panel eğim açısı (β_{opt}).....	35
5.2. AÇI DEĞİŞİMİNE YÖNELİK TEK GÜNEŞ PİLİ DENEY VE SONUÇLARI	35
5.3. PARALEL BAĞLI GÜNEŞ PİLLERİ İLE YAPILAN DENEY	37
5.4. GÜNEŞ TAKİP SİSTEMLERİYLE (TRACKER) FOTOVOLTAİK PANEL VERİMİ ATTIRMA.....	38

	<u>Sayfa</u>
5.4.1. Aktif Takip Sistemi	41
5.4.2. Pasif Takip Sistemi	43
5.4.2. Bulanık Mantık Kullanılarak Verimlilik Arttırmaya Yönelik Tasarım ..	44
5.4.3. Basit Aynalama ve Soğutma Kullanılarak Sistem Verimliliğini Arttırma	44
5.5. IŞINIM ETKİSİ.....	46
5.6. ÇİFT TARAFLI (BIFACIAL) PV PANELİ	47
5.7. GPS TABANLI ÇİFT EKSEN ARDUINO GÜNEŞ TAKİP SİSTEMİ	48
5.8. HALF-CUT GÜNEŞ PANELİ KULLANIMI	49
5.9. PV PANEL TEMİZLİĞİ.....	50
5.10. SICAKLIĞIN VERİME ETKİSİ	51
BÖLÜM 6	53
ÖRNEK GES ANALİZLERİ	53
BÖLÜM 7	60
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	60
KAYNAKLAR	62
ÖZGEÇMİŞ	67

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması.....	2
Şekil 1.2. (a) Dünyadaki yenilenebilir enerji kaynakları, (a) Türkiye'deki yenilenebilir enerji kaynakları.	4
Şekil 2.1. PV sistemlerin sosyal ve çevresel göstergeleri.	8
Şekil 2.2. PV sistemlerin sosyal ve çevresel göstergeleri.	8
Şekil 2.3. Olumsuzluklar ve çözüm önerileri.	9
Şekil 2.4. Ülkelerin 2017 ve 2018 yılı güneş enerji kaynaklı elektrik üretim miktarları.	10
Şekil 2.5. Küresel elektrik üretimindeki sektör payları.	11
Şekil 3.1. GES genel şeması.....	12
Şekil 3.2. Şebekeye bağlı PV sistem şematığı.....	13
Şekil 3.3. Şebekeden bağımsız PV sistem şematığı.	14
Şekil 3.4. Karma enerji hasat sistemleri.	15
Şekil 3.5. (a) İletken malzemelerin enerji band aralıkları, (b) Yarı iletken Malzemelerin band aralıkları, (c) Yalıtkan malzemelerin band aralıkları.	17
Şekil 3.6. FV pilinin I-V karakteristiği.....	20
Şekil 4.1. PV panel sistemi bağlantı şeması.	22
Şekil 4.2. PV panel türleri.	23
Şekil 4.3. Farklı malzemelerin PV etkinlik karşılaştırması.	24
Şekil 4.4. Czochralski prosesinin temsili bir gösterimi.....	25
Şekil 4.5. Czochralski yöntemi üretim aşamaları şeması.	26
Şekil 4.6. Inverter devre şemasının temsili gösterimi.	28
Şekil 4.7. Güneş pilinin akım gerilim ve gücünün sıcaklığa bağlı olan değişimi. .	30
Şekil 5.1. Deklinasyon açısının bir PV panel üzerindeki şematik gösterimi.....	33
Şekil 5.2. Deklinasyon açısının yıllık değişim eğrisi.	33
Şekil 5.3. Açı deney şeması.....	36
Şekil 5.4. Akım-gerilim değerleri.....	37
Şekil 5.5. Paralel bağlı güneş pilleri için deney şematığı.....	37
Şekil 5.6. Paralel bağlı güneş pilleri için akım gerilim sonuçları.....	38

Şekil 5.7.	Sabit sistem ile güneş izleyici sistem arasında olan üretilen güç farkı. .39
Şekil 5.8.	İzleme sistemlerinin dağılımı.40
Şekil 5.9.	Çalışma prensiplerine göre izleme sistemlerinin dağılımı.41
Şekil 5.10.	Doğu-Batı eksenli takip sistemi.42
Şekil 5.11.	Çift eksenli takip sistemi.42
Şekil 5.12.	Kuzey- Güney eksenli izleme sistemi.43
Şekil 5.13.	Pasif takip sistemi modellemesi.43
Şekil 5.14.	Bulanık mantık tabanlı kontrol sistemi entegre edilmiş tasarım örneği. 44
Şekil 5.15.	Ayna kullanımının verimliliğe etkisi.....45
Şekil 5.16.	Soğutmanın verimliliğe etkisi.46
Şekil 5.17.	Çift yüzlü (bifacial) güneş paneli.48
Şekil 5.18.	Half-cut hücre teknolojisinin yapısal kıyaslaması.49
Şekil 5.19.	Mersin ilinde yer alan AKY Teknoloji GES'inin; (a) kirlı ve (b) temiz yüzey durumlarına ait görseller.....51
Şekil 5.20.	PV panellerin sıcaklığa bağılı olarak akım-gerilim düşüşü grafiğı (SS). 52
Şekil 6.1.	Mersin iline AKY Teknoloji firması için kurulumu yapılan GES'in temsili gösterimi.54
Şekil 6.2.	Mersin iline AKY Teknoloji firması için kurulumu yapılan GES'in; (a) toplam güç ve çevresel fayda değerleri, (b) yıllık enerji eğilimi ve (c) günlük gelir eğilimi.54
Şekil 6.3.	Mersin iline Çetintaş Çelik A.Ş. firması için kurulumu yapılan GES'in temsili gösterimi.55
Şekil 6.4.	Mersin iline Çetintaş Çelik A.Ş. firması için kurulumu yapılan GES'in; (a) toplam güç ve çevresel fayda değerleri, (b) yıllık enerji eğilimi ve (c) günlük gelir eğilimi.56
Şekil 6.5.	Kahramanmaraş iline Lidaş A.Ş. için kurulumu yapılan GES'in temsili gösterimi.57
Şekil 6.6.	Kilis ilinde Yağız Plastik A.Ş. için kurulumu yapılan GES'in temsili gösterimi.58
Şekil 6.7.	Kilis ilinde Yağız Plastik A.Ş. için kurulumu yapılan GES'in; (a) anlık güç üretimi ve (b) kümülatif enerji üretim değerleri.....58
Şekil 6.8.	Ardahan ilinde Hanak Belediyesi için kurulumu yapılan GES'in temsili gösterimi.....59

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. P ve N tipi panellerin karşılaştırılması.....	18
Çizelge 5.1. Mersin ilinde yer alan AKY Teknoloji GES'ine ait PV panelin teknik bilgileri.....	50
Çizelge 5.2. Mersin ilinde yer alan AKY Teknoloji GES'inin kirli ve temiz yüzey durumlarına ait çalışma verileri.	50
Çizelge 7.1. Mersin ilinde yer alan AKY Teknoloji GES'i ile Çetintaş Çelik Sanayi GES'inin performans karşılaştırması.....	60

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

AC	: alternatif akım
CdTe	: kadmiyum tellür
CuInSe ₂	: bakır indium diselenid
DC	: doğru akım
GaAs	: galyum arsenit
I	: akım (A)
J _{sc}	: kısa devre akım yoğunluğu (A/cm ²)
N	: pil sayısı (adet)
P	: güç (W)
T	: sıcaklık (°C)
V	: gerilim (V)
V _{oc}	: açık devre voltajı (V)
W _p	: fotovoltaiik kapasite
W _h	: saatlik enerji miktarı
δ	: deklinasyon açısı (°)
ω	: saat açısı (°)
Ø	: enlem açısı (°)
θ _z	: zenit açısı (°)
α	: yükseklik açısı (°)
ψ	: azimut açısı (°)
β	: panel eğim açısı (°)
β _{opt}	: optimum panel eğim açısı (°)

Alt İndis

p : paralel

s : seri

KISALTMALAR

CVD : kimyasal buhar biriktirme

CPV : konsantre fotovoltaik teknolojisi

CSP : konsantre güneş enerji sistemleri

GES : güneş enerji sistemleri

PV : fotovoltaik

BÖLÜM 1

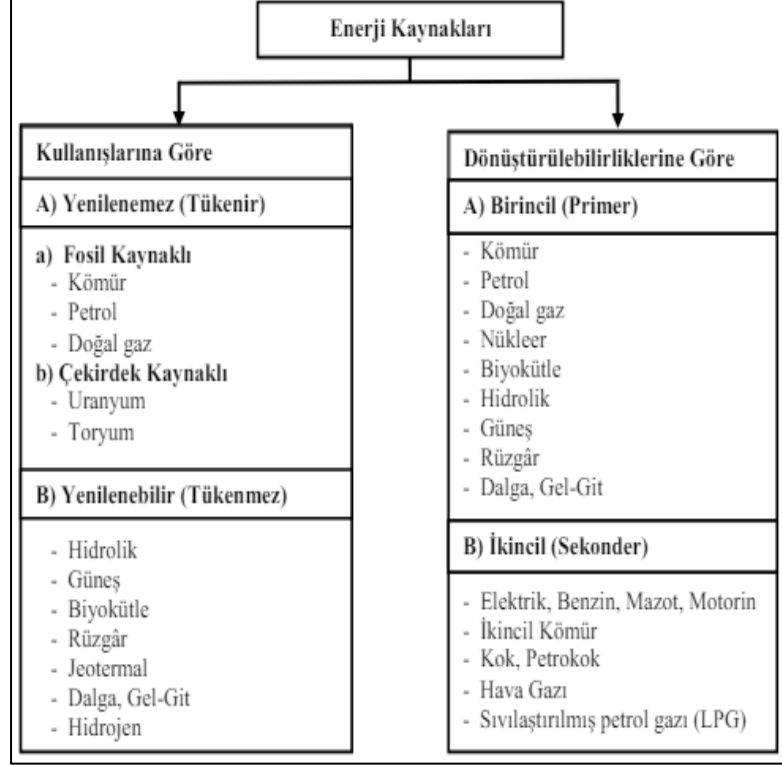
GİRİŞ

Enerji kaynakları birincil ve ikincil enerji kaynakları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Birincil enerji kaynakları bir işleme ve kimyasal bir değişime uğramayan direkt kullanılabilen enerji kaynaklarıdır. Bunlar dünyanın kendi ekosisteminden ötürü varolan (güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal, biyokütle vb.) ve yeraltı zenginliklerinden oluşan (kömür, petrol, doğalgaz vb.) enerji kaynaklarıdır. Birincil enerji kaynaklarından üretilen ve sentezlenen tüm enerji kaynakları ise ikincil enerji kaynakları olarak adlandırılmaktadır. Bu enerji kaynaklarına motorin, benzin, kok kömürü ve LPG örnek olarak gösterilebilir.

Bunların haricinde enerji kaynakları yenilebilir ve yenilenemeyen enerji kaynakları olarak da adlandırılır. Tükenme durumu olan her türlü enerji kaynağı yenilenemez enerji kaynağı olarak adlandırılabilir. Bunların en çok bilinenleri kömür, petrol ve doğalgaz gibi kaynaklar aynı zamanda nükleer enerji kaynakları da bunlara örnek olarak gösterilebilir. Diğer yandan, hidrolik, güneş, rüzgâr, jeotermal, biyokütle, dalga ve gelgit, hidrojen gibi kaynaklar yenilenebilir enerji kategorisinde değerlendirilir [1]. Enerji kaynaklarına ilişkin yapılan tüm gruplandırmalar Şekil 1.1’de özetlenmiştir.

Nüfusun artması, toplumların yaşam standartlarının yükselmesi ve teknolojinin ilerlemesi, dünya genelinde enerji talebini sürekli olarak artırmaktadır. Bu artan ihtiyacı karşılamak için, sınırlı rezervlere sahip yenilenemez enerji kaynaklarının dikkatli bir şekilde kullanılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarına daha geniş çapta başvurulması gerekmektedir [2]. Diğer yandan, yenilenebilir enerji kaynakları küresel sera gazı emisyonlarını azaltmaya ve iklim değişikliğiyle mücadeleyle yönelik mevcut girişimlerin önemli bir bileşeni olarak gelişim göstermektedir.

Dünya fosil yakıtlardan uzaklaşmanın önemini kabullendikçe yenilenebilir enerji sürdürülebilir bir geleceğin oluşturulmasında kritik bir öneme sahip hale gelmiştir.



Şekil 1.1. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması.

Enerji kaynaklarının kritik pozisyonu artan nüfusla beraber dramatik bir şekilde daha da önemli hale gelmektedir. Dünya nüfusunun artış hızı üstel bir biçimde katlanarak artmaktadır. Günümüzde dünyadaki insan nüfusunun 8 milyarı geçtiği tahmin edilmektedir ve bu sayı her geçen gün daha da hızlanarak artmaktadır. Bunun devletler ve büyük şirketler de çok iyi ve ince bir şekilde analiz etmektedir.

Büyüyen enerji ihtiyaçları sonucunda mevcut enerji üreten santraller yetersiz kalmaktadır. Fotovoltaik (PV) enerji sistemleri, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürerek gerekli enerjiyi üretme imkânı sağlamaktadır ve bu sistem prensibi daha çevreci, maliyet etkin ve kullanıcı dostu bir çözüm sunmaktadır. PV enerji sistemleri genellikle güneş panelleri, piller, şarj kontrol cihazları ve dönüştürücülerden oluşmaktadır ve genel yapısı itibarıyla şebekeye bağlı ve şebekeye bağlı olmayan olmak üzere iki farklı şekilde kurulmaktadır. Şebekeye bağlı sistemler, güneş ışığının olmadığı vakitlerde kesintisiz enerji sağlamak için sıkça kullanılmaktadır [3].

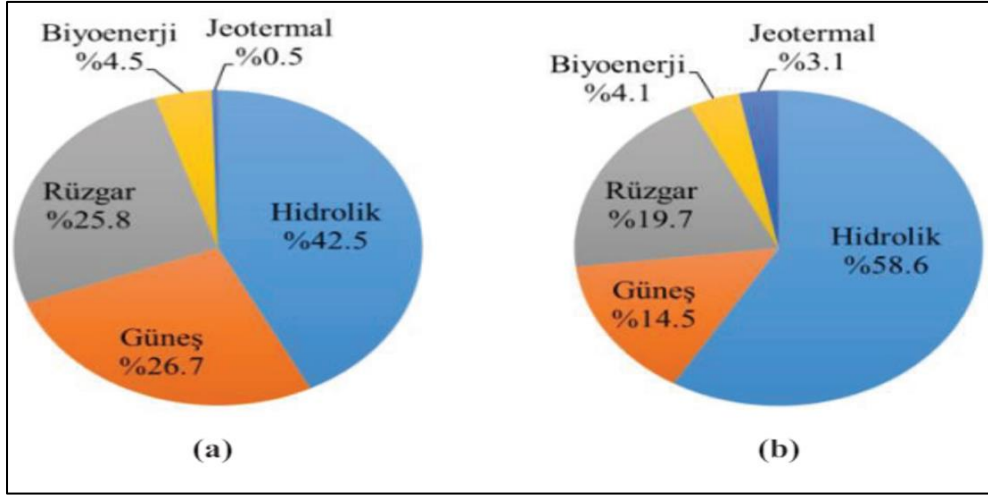
Şebekeye bağı olmayan sistemler taşınır sistemler için daha uygun olup, bunların birlikte kullanıldığı hibrit sistem örnekleri de bulunmaktadır [4].

Ülkemizin enerji üretim kaynakları incelendiğinde hidroelektrik enerji kaynaklarının ön planda olduğu ve son yıllarda artan baraj yatırım projeleri hidroelektrik enerji kaynaklarının en fazla kullanılan enerji kaynağı olmasındaki temel faktördür. Barajlarda üretilen elektrik enerjisi endüstri ve kamunun elektrik enerji miktarının birçoğunu karşılamaktadır.

Ülkemizde, rüzgâr ve jeotermal enerji kaynaklarından yararlanma potansiyeli çok yüksek olmasına rağmen enerji ihtiyacımızın %90'dan fazlasını fosil yakıtlardan sağlamaktayız. Bu hususa bağı olarak çevre kirliliği ve yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili genel bir değerlendirme amacıyla ele alınan bir çalışmada değerli sonuçlar ortaya çıkmıştır ve bu sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir [5].

- Hidroelektrik enerji sistemlerinin artırılması
- PV sistemler, rüzgâr enerjisi rüzgâr ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve teşvik edilmesi
- Tasarruf bilinci kazandırılmalı
- Yasal düzenlemelerin bu tarz projeleri attıracak ve teşvik edecek şekilde düzenlenmesi

Yukarıda ele alınan hususlar dikkate alındığında güneş, rüzgâr, hidrolik, jeotermal ve biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynakları, sürdürülebilir bir enerji geleceği için kritik önem taşımaktadır [6]. Bu tarz projelerin artırılması sadece önemli yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip ülkemiz açısından değil ayrıca dünya açısından da önem arz etmektedir. Bu bağlamda hem dünyada hem de ülkemizdeki yenilenebilir enerji kaynaklarının oransal dağılımları Şekil 1.2'de verilmiştir.



Şekil 1.2. (a) Dünyadaki yenilenebilir enerji kaynakları, (a) Türkiye'deki yenilenebilir enerji kaynakları [7].

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu çalışma, güneş enerjisi sistemlerindeki enerji verimliliğini artırmayı hedeflemektedir. Bu bağlamda, PV sistemlerin panel türleri, konfigürasyonları ve entegrasyon tekniklerinin optimize edilmesi üzerine odaklanmaktadır. Ayrıca, güneş enerjisi teknolojisindeki potansiyel ilerlemeleri değerlendirmekte ve güneş enerjisi üretim tesislerinin verimliliğini artırmak amacıyla pratik uygulamalar önermektedir. Bu şekilde, güneş enerji sistemleri (GES) alanına önemli katkılar sunmayı ve enerji üretimi kaynaklı çevresel etkilerin azaltılmasını amaçlamaktadır. Bu bölüm içerisinde, güneş kaynaklı enerji üretim sistemlerinde yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara detaylı olarak yer verilmiştir.

Bu bağlamda; Eke [8], şebekeye bağlı PV enerji sistemlerinin tasarımını ve verimlilik optimizasyonunu inceleyen bir araştırma gerçekleştirmiştir. Didim’de Elektrik İşleri Etüt İdaresi tarafından kurulan 3,8 kWp kapasiteli PV sistemi bu çalışmanın temelini oluşturmuştur. Bu sistemde yapılan optimum performans analizleri ve simülasyonlarla elde edilen verileri gerçek verilerle kıyaslamıştır. Araştırma sonuçlarına göre, PV sisteminin sabit eğim açısının iyileştirilmesiyle yıllık elektrik üretiminde %1,25, mevsimsel eğim açısı ayarlamasıyla ise %6,7’ye varan artış sağlanabileceği belirlenmiştir. Taşkın ve Vardar [9], enerji üretimini tüketim noktasına taşıma hedefiyle bir güneş enerjisi sistemi kurmuşlardır. Bu çalışmada, PV-Sol programını kullanarak sekiz farklı senaryo geliştirmişlerdir. Senaryolar a, b, c ve d’de paneller, iyi bir arka havalandırma ile bina çatısına monte edilmiştir; e ve f senaryolarında ise panellerin toplam eğimi 23° olacak şekilde ayarlanmıştır. Her senaryoda paneller, binanın yapısından dolayı 160° güney-doğu yönüne dönük olarak yerleştirilmiştir. G ve h senaryolarında ise panellerin tam optimum koşullar için toplam eğimi 23° ve tam güney yönünde 180° olacak şekilde konumlandırılmıştır. Tüm senaryolar kapsamında, kurulu güç ve yıllık enerji üretimi

hesaplanmış, en yüksek enerji üretiminin Temmuz ayında, en düşük enerji üretiminin ise Ocak ayında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, dikey konumlandırılmış panellerin yatay konumlandırılmış panellere kıyasla şebekeye aktarılan toplam güç oranının (kWh/kWp) daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ceylan [10], şebeke dışı bir PV sistem tasarlamış ve bu sistemin simülasyonlarını gerçekleştirmiştir. PV-Sol programını kullanarak yaptığı tasarım ve simülasyon çalışmalarında, beş farklı çatı alanına yayılan toplam 385 modül içeren sistemler oluşturmuştur. Simülasyon sonuçlarına göre, PV sistemin yıllık olarak 88.642 kWh elektrik enerjisi üretebileceği ve sistemin performans oranının %79,8 olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca, tasarlanan sistemle baz aldığı yapının yıllık elektrik tüketiminin yaklaşık %25'ini karşılayabileceği sonucuna varmıştır. Tanış [11], yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yaptığı bir çalışmada, Elazığ'da bulunan ve 1.036,8 kWp kurulu güce sahip bir güneş enerjisi santralini üretimini incelemiştir. Bu çalışmada, PVSyst yazılımını kullanarak santralin üretim analizini yapmış ve gerçekleştirilen simülasyonlarla elde edilen verileri, tesisin gerçek enerji ölçümleriyle karşılaştırmıştır. Analiz sonucunda, simüle edilen enerji ile gerçek durumda ölçülen enerji arasında sadece %4.52'lik bir fark olduğunu ve bu sonucun uyumlu olduğunu tespit etmiştir. Kınalı [12], güneş enerjisi üretim tesislerinin performanslarını değerlendiren bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, gerçek üretim verileri ile PVSyst, PVSOL ve PVGIS gibi piyasada yaygın olarak kullanılan simülasyon programlarının sonuçları karşılaştırılmıştır. Konya ve Karaman'da 250 kW ile 1 MW arasında değişen kurulu güçlere sahip üç farklı arazi tipi güneş enerjisi santralini ölçülen değerleri, bu simülasyon programlarının tahminleriyle kıyaslanmıştır. Yapılan analiz sonucunda, tüm parametreler dikkate alındığında en doğru tahmini %2,3'lük hata payı ile PVSOL Meteororm'un yaptığı belirlenmiştir. Özcan ve İzgi [13], farklı güneş paneli teknolojilerinin performanslarını karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada, mono-kristal, poli-kristal ve ince film olmak üzere üç farklı PV teknoloji kullanılarak kurulan 1 MW kapasiteli şebekeye bağlı bir PV santralin aylık ve yıllık performans analizleri yapılmıştır. PVSyst ve PV-Sol simülasyon araçları ile yapılan simülasyon ve analizler sonucunda, mono-kristal panel teknolojisinin %85'lik performans oranıyla en iyi PV teknolojisi olduğu sonucuna varılmış, poli-kristal panelin performans oranının %72,1 ve ince film panelin performans oranının ise %70 olduğu tespit edilmiştir. Ceylan ve Taşdelen [14], Isparta'daki bir güneş enerji santralini farklı simülasyon programlarıyla enerji

analizini yapmışlardır. PV-Sol, PVGIS, Polysun, Helioscope programları kullanılarak yapılan 1 MW'lık santralin üretim analizlerinde, PV-Sol programının sapma değerinin %7,5 olduğu bulunmuştur. AL-Shagea vd. [15], 5,1 kW'lık sistemin üretim değerlerini simülasyon programlarıyla karşılaştırmışlar. Pvsol, PVsyst ve Gepa programları kullanılarak yapılan analizlerde, PVsyst'e göre %87,5-%91, Gepa'ya göre %96,6-%100 ve Pvsol'a göre %97,3-%98,1 performans yüzdeleri elde edilmiştir. Tokul [16], Amasya'da yüzer tip ve arazi tipi 1 MWp gücündeki enerji santrallerinin karşılaştırmalı analizini yapmıştır. PV-Sol yazılımıyla yapılan simülasyonlarda ideal panel tilt açısının 24° ve ideal azimut açısının kuzeye göre 184° olduğu hesaplanmıştır. Monokristal ve polikristal panellerin performans etkisi de analiz edilmiş ve düşük ışıktaki daha iyi performans gösteren panellerin veriminin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Şimşek ve Uçum [17], düz çatı üzerine farklı yönelim açılına sahip panellerle yapılan simülasyon analizlerinde; 7° yönelim açısının en düşük, 25° yönelim açısının ise en yüksek yıllık enerji üretimi sağladığını bulmuşlardır. Ay ve Pamuk [18], bir yapının ihtiyacı olan enerjiyi güneş enerjisi santralleri kurarak karşılamayı hedeflemişler. Tasarlanan 1.917,44 kWp gücündeki tesislerden yıllık 2.354.885 kWh elektrik üretilebileceği ve en yüksek üretimin haziran ayında olacağı tespit edilmiştir. Ekonomik analize göre tesislerin kendini 4,49 yıl içinde amorti edebileceği hesaplanmıştır.

Diğer yandan PV paneller arazi kullanımı açısından çok yer kaplamaktadır. Aynı zamanda bu bölgesel ekosisteme zarar verebilme ihtimali bulunmaktadır. Su akışının bozulması, ormanlık bölgelerde yapılan paneller için ağaçların kesilmesi gibi olumsuz durumlara sebep olmaktadır [19]. Panelin üretimi, montajı, aynı zamanda yerleştirilmiş panellerin temizlenmesi, tamiri gibi durumlarda birçok kimyasal doğaya karışmaktadır. Ayrıca bu tarz atıklar yangına sebep olabilmektedir [20]. Panelin montaj ve lojistik kısmında olan kazalar da atık oluşumuna neden olmaktadır [21]. Ayrıca görsel açıdan da doğal görüntüyü bozabilme, ev tipi panellerde kötü görüntülere sebep olabilmektedir. Bunu düzeltmek için mimari açıdan çözümler üretilmektedir [22]. Bu kapsamda PV sistemlerin sosyal ve çevresel etkileri Şekil 2.1'de, olumsuz etkileri ise Şekil 2.2'de özetlenmiştir. Bu etkilere yönelik çözüm önerileri ise Şekil 2.3'te verilmiştir.

Gösterg e	Merkezi güneş	Dağınk güneş ısı	Merkezi fotovoltaik güç üretimi	Dağınk fotovoltaik güç üretimi	Güneş ısı elektrik
CO ₂ emisyon tasarruf u	1,4 kg/k Wh veya 840 kg/m ²	1,4 kg/k Wh veya 840 kg/m ²	0,6–1,0 kg/k Wh	0,6–1,0 kg/k Wh	Kombine çevrim tesisiyle karşılaştırıldığında yıllık 688 t/MW
Üretim istihdam ₁ (AB çapında)	4000 iş/yıl	4000 iş/yıl	2–3000 iş/yıl	2–3000 iş/yıl	İşletmede 1 sürekli iş/MW + İnşa için 12-18 ay süresince 10-15 iş/MW
Toplam istihdam	12.000 iş/yıl	12.000 iş/yıl	4–5000 iş/yıl	4–5000 iş/yıl	1000 sürekli iş/1000 MW

Şekil 2.1. PV sistemlerin sosyal ve çevresel göstergeleri [19].

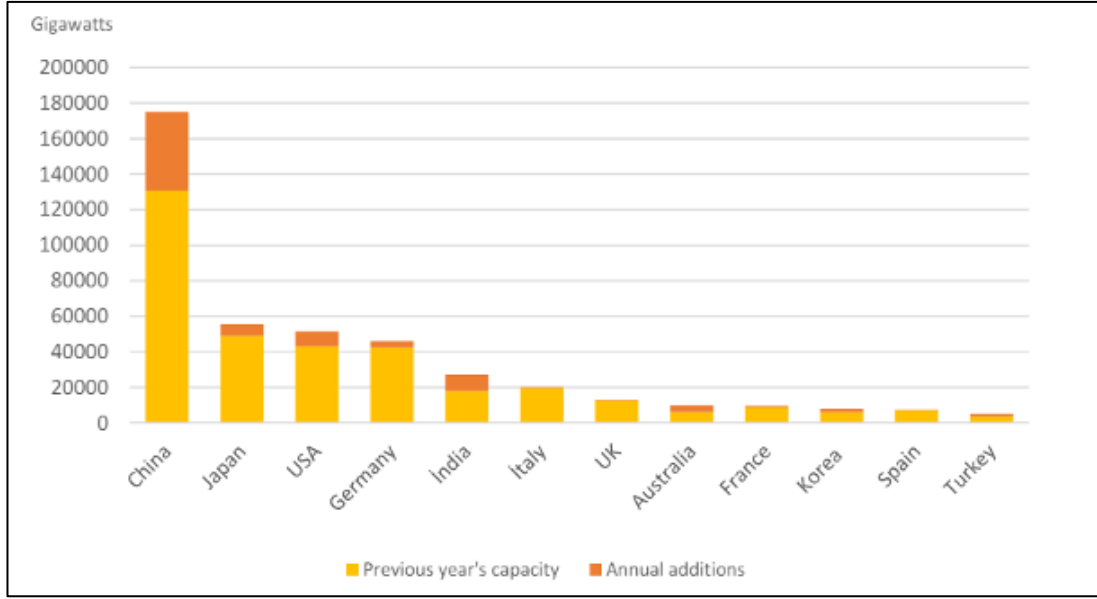
Çevresel problem	Merkezi güneş termali	Dağıtılmış güneş termal	Merkezi fotovoltaik enerji üretimi	Dağıtılmış fotovoltaik enerji üretimi	Güneş termal elektrik
Görsel etki	++	+	++	+	+++
Rutin ve kazara kimyasal salınımı	+	++	+++	+++	++
Arazi kullanımı	++	+	++	+	+++
İş güvenliği ve hijyen	++	++	++	++	+++
Ekosistem üzerindeki etki	+		+		++
Su kaynakları üzerindeki etki	++	+	+	+	+++

Şekil 2.2. PV sistemlerin sosyal ve çevresel göstergeleri [19].

Etkiler	Azaltma teknolojileri/teknikleri
Arazi kullanımı: Merkezi sistemler için geniş alanlara ihtiyaç vardır. Ekilebilir arazinin azaltılması	İzole ve ıssız alanlarda kullanım; Ekolojik ve arkeolojik açıdan hassas alanlardan kaçınılması; Büyük ticari binalara (cepheler, çatılar) entegrasyon; Otoyollarda veya hastanelerin yakınında ses yalıtımı olarak kullanılması.
Görsel müdahale-estetik	Sistemlerin dikkatli tasarımı; Mimari elemanlar olarak binalara entegrasyon; Modern mimaride binaların cephelerinde ayna yerine panel kullanımı.
Ekosistemler üzerindeki etki (büyük PV şemaları için geçerlidir).	Hassas ekosistemlerden ve doğal güzellikteki alanlardan, arkeolojik alanlardan kaçınılması.
Zehirli ve yanıcı malzemelerin kullanımı (modüllerin yapımı sırasında).	Mevcut güvenlik düzenlemelerinin ve iyi uygulamaların benimsenmesiyle potansiyel olarak toksik ve tehlikeli malzemelerin salınımının önlenmesi.
Üretim, kullanım ve imhadan kaynaklanan hafif sağlık riskleri	İyi çalışma uygulamaları (inşaat sırasında koruyucu eldiven, güneş gözlüğü ve kıyafet kullanımı).

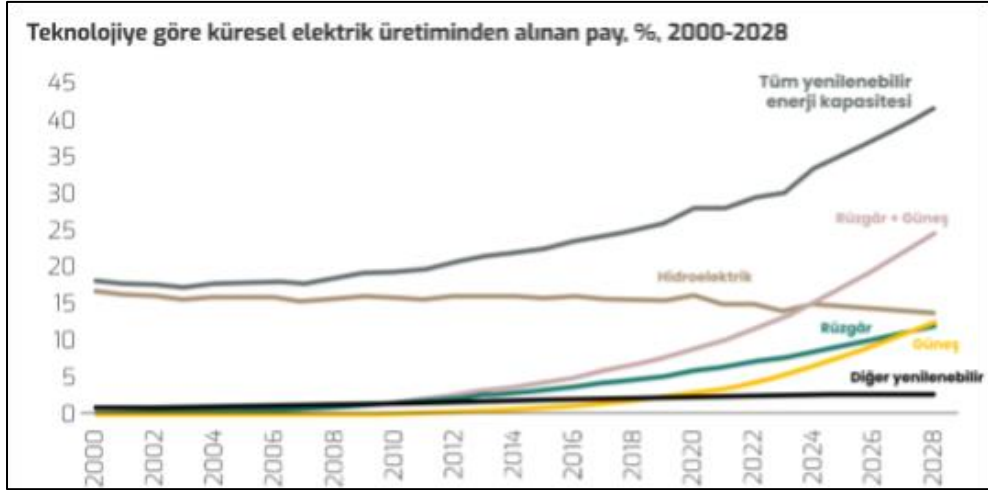
Şekil 2.3. Olumsuzluklar ve çözüm önerileri [19].

Güneş enerjisinden elektrik üretim yönteminin istihdama ve sektörel büyümeye yönelik etkileri incelendiğinde ise sektörün 2014 yılında 3,3 milyon kişi istihdam ettiği tespit edilmiştir. 2018 yılında ise sadece Asya ülkelerinde 3 milyondan fazla PV istihdamı sağlanmıştır ve küresel istihdamın onda dokuzu Asya'da gerçekleşmiştir [23]. Uluslararası kaynaklara göre PV sistemlere yönelik yatırım son yıllarda artış eğilimindedir [4]. Dünyadaki gelişmiş ülkelerinin yatırımları sayesinde 2014'te dünyanın PV sistem kapasitesi 486 GW seviyesine ulaşmıştır. Şirketlerin 2017 yılında sahip olduğu kapasite 94 GW'ye ulaşmıştır ve birçok büyük şirket günümüzde kapasitelerini çok ciddi oranda attırmaya devam etmektedir [24]. Türkiye, PV enerji yatırımında 2017 yılı içerisinde toplam sahip olduğu 3.422 MW kapasiteyi 2018 yılında 5.064 MW seviyesine getirerek dünya ülkeleri sıralamasında 12'inci sıraya yerleşmiş bulunmaktadır [4]. Dünyanın önde gelen ülkelerinin 2017 yılı güneş enerji kaynaklı üretim kapasiteleri ve 2018 yılına ait artış miktarları Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Ülkelerin 2017 ve 2018 yılı güneş enerji kaynaklı elektrik üretim miktarları [25].

Araştırma bulgularına göre, güneş enerjisinin küresel çapta gelişimi ile birlikte 10 milyon kalıcı iş imkânı sağlanabilecektir. Her MWp güneş enerjisi kurulumu için 10 iş imkânı imalat safhasında, 33 iş imkânı ise kurulum safhasında oluşacaktır [26]. Diğer yandan 2023 yılında dünya genelinde yenilenebilir enerji kapasitesi, bir önceki yıla göre %50 oranında artarak 510 GW seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, son 20 yılın en hızlı büyüme oranını temsil etmektedir. Üretim kapasitelerin artmasıyla panel fiyatları da yine aynı oranda azalma eğilimi göstermektedir. Günümüzde üretim kapasitesi 5 sene önceye göre 3 kat artmış durumda olup, uluslararası piyasada gelecek 5 yıl içerisinde de 3 kat daha artış sağlayacağı öngörülmektedir. Fakat piyasaların durumu, üretim hızları, ülkelerin yarı iletken hammadde konularındaki politikaları gibi hususlar nedeniyle bu artışın ancak 2.5 kata kadar olacağı düşünülmektedir [27]. Bu hususlar ele alındığında sektörlerin küresel elektrik üretimindeki payları Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Küresel elektrik üretimindeki sektör payları [25].

Bu tez çalışmasının ana hedefi, güneş enerji sistemlerinde enerji verimliliğini artırmak amacıyla fotovoltaik sistemlerin panel çeşitlerini, konfigürasyonlarını ve entegrasyon tekniklerini araştırmaktır. Ayrıca, bu çalışma güneş enerjisi teknolojisindeki olası ilerlemelere dair iç görüler sağlamakta ve güneş enerjisi üretim tesislerinin verimliliğini artırmak için pratik uygulamalar sunarak güneş enerji sistemleri alanına katkıda bulunmaktadır. Bu bağlamda, farklı kullanım alanlarına ve parametrelere sahip tesislerin verimlilik analizleri yapılmıştır.

BÖLÜM 3

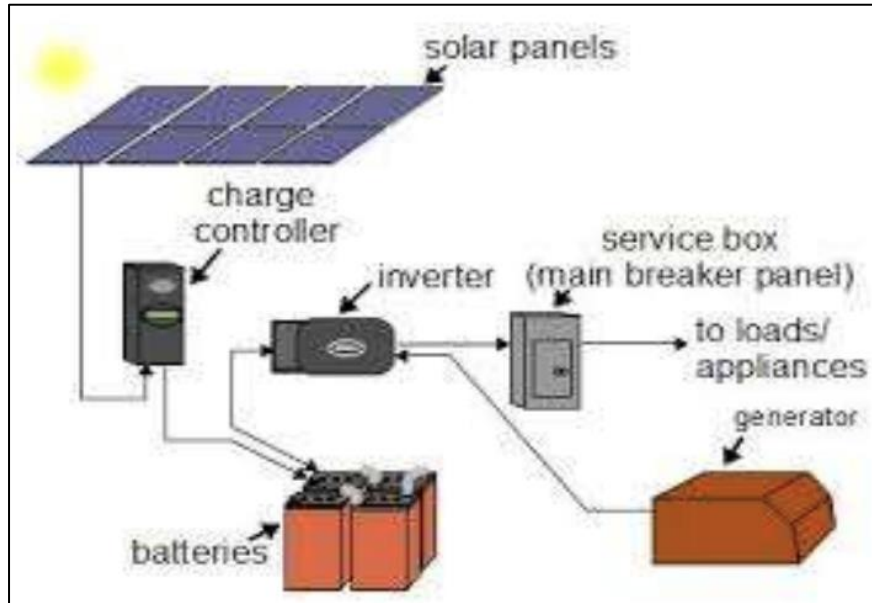
FOTOVOLTAİK PANEL SİSTEMLERİNE AİT GENEL BİLGİLER

Bu bölümde, fotovoltaik sistem tasarımlarına ve sistemin fiziğine yönelik bilgiler yer almaktadır.

3.1. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

PV sistemler hayatın her alanında hatta bazen farkında bile olmadığımız yerlerde bile kullanılabilir. Bunlara hesap makineleri, saatler, sokak lambaları, trafik ışıkları, güneş enerjisi ile çalışan araçlar ve motorlar ile uzay araştırmaları örnek olarak gösterilebilir ve genel şeması Şekil 3.1'de sunulmuştur. PV sistemler 3 ana bölüme ayrılır [4];

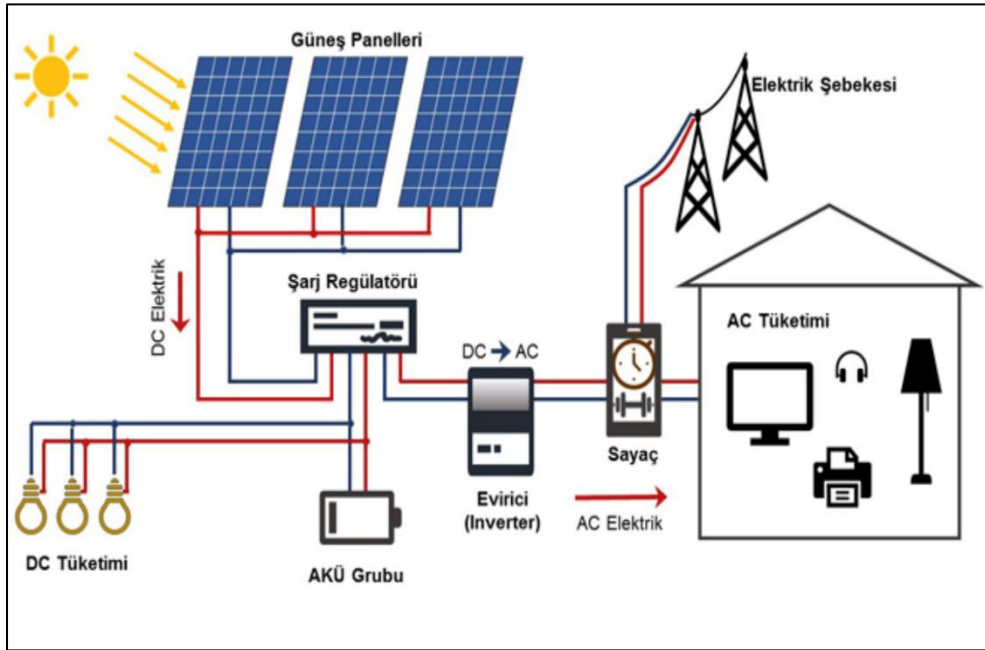
- Şebekeye bağlı olan sistemler
- Şebekeden bağımsız sistemler
- Karma sistemler



Şekil 3.1. GES genel şeması [28].

3.1.1. Şebekeye Bağlı Sistemler

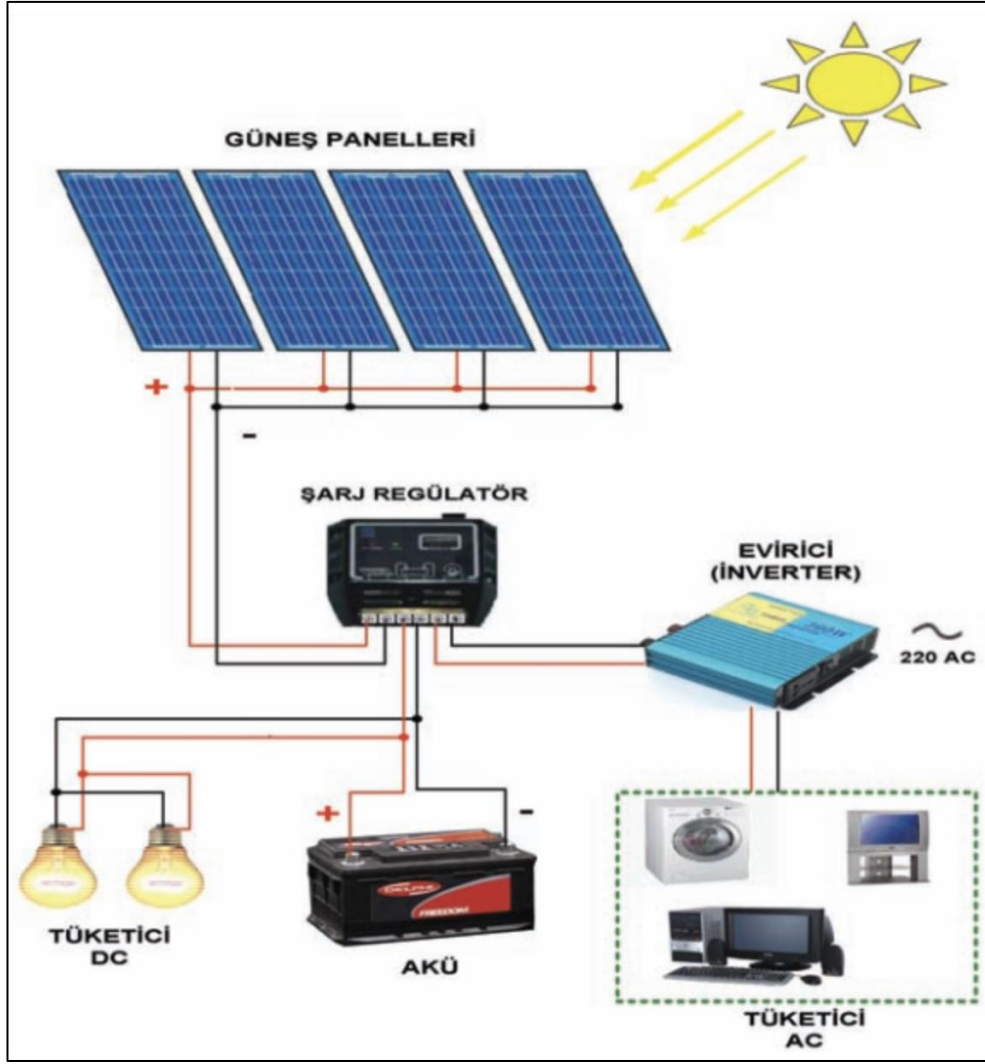
Şebekeye bağlı güneş paneli sistemleri, güneş ışığını PV paneller aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştüren ve bu enerjiyi doğrudan elektrik şebekesine ileten sistemlerdir. Bu sistemlerde üretilen elektrik doğrudan şebekeye aktarıldığı ve şebeke tarafından tüketildiği için enerji üretimi için harici bir enerji deposuna ihtiyaç duyulmaz. Şebekeye bağlı sistemler, yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanarak elektrik üretimini merkezi sistemlere entegre etmek için etkili bir yöntem sunmaktadır. Bu sisteme ait şematik görünüm Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Şebekeye bağlı PV sistem şematiği [29].

3.1.2. Şebekeden Bağımsız Sistemler

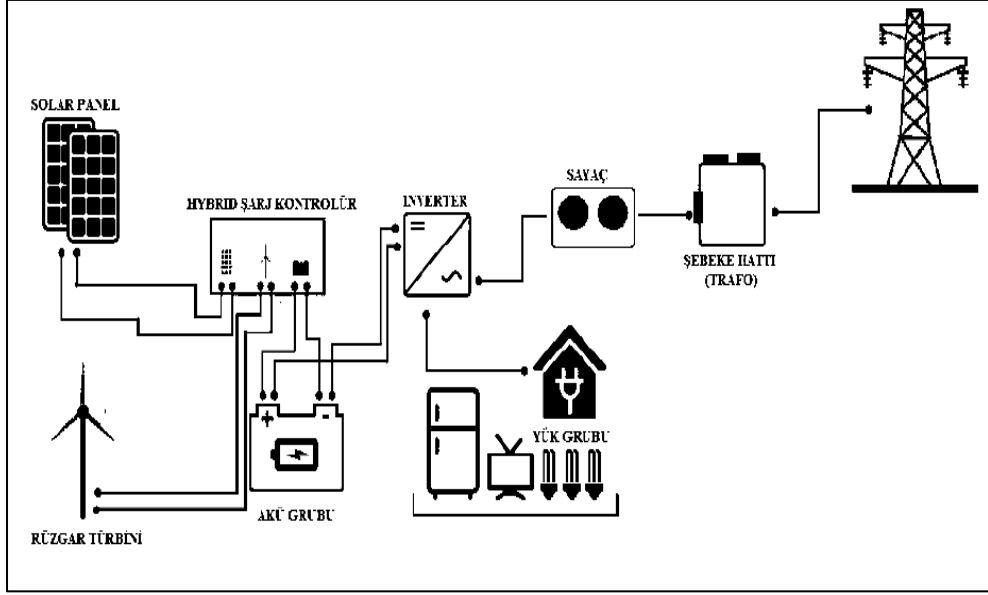
Şebekeden bağımsız güneş paneli sistemleri, birincil elektrik şebekesine bağlı olmaksızın çalışır. Bu sistemler özellikle elektrik şebekesine bağlantının mümkün olmadığı izole, kırsal veya mobil ortamlar için idealdir. Şebekeden bağımsız bir sistem tipik olarak bir veya daha fazla güneş paneli, bir depolama ünitesi (genellikle aküler), bir şarj kontrolörü ve isteğe bağlı olarak güç invertörlerinden oluşmaktadır. Bu sisteme ait şematik bağlantı şeması Şekil 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.3. Şebekeden bağımsız PV sistem şematiği [30].

3.1.3. Karma Sistemler

Yenilenebilir enerji sistemleri olan rüzgâr enerjisi, biyogaz gibi farklı sistemlerle ortak çalışan hibrit sistemler olup, örnek bir sistem görseli Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Karma enerji hasat sistemleri [4].

3.2. FOTOVOLTAİK ETKİ

Işığın bir maddenin elektronları emilmesi olgusu PV etki adı altında incelenir. G. Gers 1887 yılında deneysel gözlemler yardımıyla fotoelektrik etkinin özellikle 2. derece büyüklüğünde ultraviyole radyasyonla ilişkilendirildiğini göstermiştir [31]. Diğer yandan, 1889 yılında D. Thompson ve F. Lenard, ışığın bir vakum içinde metal üzerine yönlendirildiğinde elektronları serbest bırakma kapasitesine sahip olduğunu keşfetmişlerdir. Lenard'ın deneyin devamı, metal yüzeyindeki elektron sayısı ile parlaklık yoğunluğu arasında, her iki miktarın da 1 saniyelik bir süre boyunca eşit olduğu bir eşitlik ortaya koymuştur.

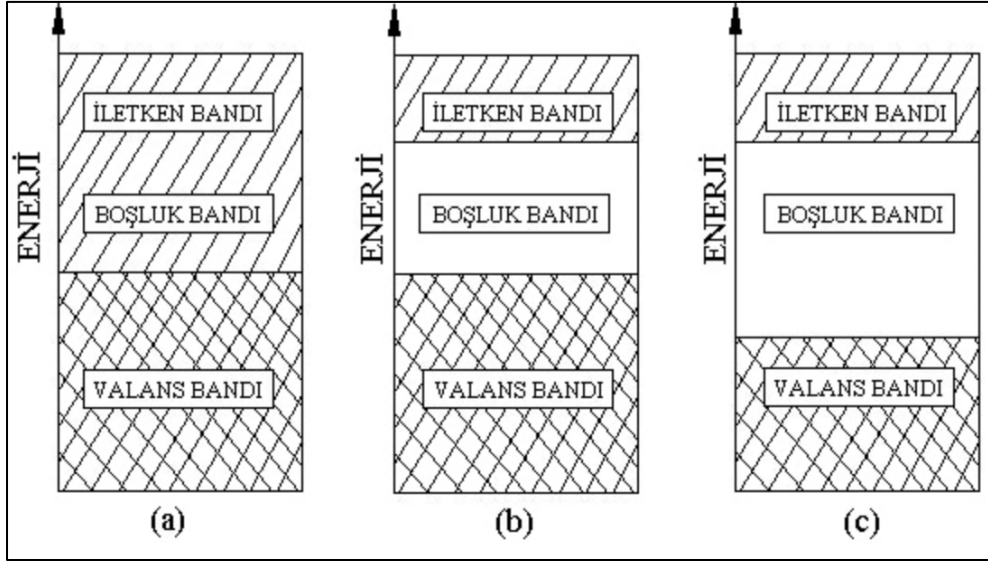
Elektronların enerjisi, genellikle spektrumu olarak bilinen ışığın dalga boyuna bağlıdır. Fotokativite olgusu, belirli koşullar altında gazlarda ve atomlarda meydana gelebilir. Bu senaryoda, fotonlar, yüksek enerjili protonları yörüngelerinden çıkararak dönüşümlere neden olurlar. Bu düzeneğin çalışması için en önemli sistem parçası P-N tipi güneş panel gözeleridir. Güneş panelleri, güneş pillerinin katkılama türüne göre P-tipi ve N-tipi olarak kategorize edilebilir. Güneş pilleri çoğunlukla yarı iletken malzemelerden oluşur ve güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılır. P-tipi ve N-tipi güneş pillerinde kullanılan katkılama prosedürleri, bu hücrelere verimlilik, uzun ömürlülük ve maliyet açısından farklı özellikler sağlar.

Güneş panellerinin genel çalışma prensibi için yarı iletken malzemeler kullanılmaktadır. Bunların en çok bilineni ve en yaygın kullanılanı silikon yapıli güneş panelleridir.

3.3. GENEL YARIİLETKEN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ

Yarı iletkenler, genellikle silikon, germanium veya gallium arsenide gibi malzemelerden yapılmış kristal yapıya sahiptirler. Bu kristal yapı, atomların düzenli bir şekilde dizilmesinden meydana gelir. Kristal yapıdaki atomlar, birbirine bağlıdır ve elektron taşıma yeteneğine sahiptirler. Bu yapı, yarı iletkenlerin belirli elektriksel özelliklerini belirler. Yarı iletkenler saf halde iken, elektriksel iletkenlikleri çok düşüktür. Ancak, belirli koşullar altında (örneğin, sıcaklık veya ışık etkisi altında) elektrik iletkenliği artış gösterebilmektedir. Bunun nedeni, yarı iletkenlerin yapısında bulunan serbest elektronlar veya boşluklar gibi taşıyıcıların hareketine bağlıdır.

Yarı iletkenlerin enerji bant yapısı, kristal yapılarında bulunan elektronların enerji seviyelerini tanımlar. Bu yapı, birbirine bağlı atomların oluşturduğu kristal kafes içindeki elektronların enerji seviyelerinin dağılımını ortaya koymaktadır. Yarı iletkenlerin enerji bant yapısı, temel olarak valans bantı, iletken bantı ve yasak (boşluk) banttan oluşmaktadır ve genel görüntüleri Şekil 3.5'te verilmiştir. Değerlik bandı, katı hal fiziğinde bir malzemedeki atomlara bağlı olan elektronların en yüksek enerji bandını tanımlamak için kullanılan bir terim olup, yarı iletkenlerin en dış elektronlarını barındıran enerji seviyesini ifade eder. Malzemenin iletkenlik nitelikleri bu banttaki elektronlar tarafından belirlenir. Bununla birlikte, valans bandındaki elektronlar madde içinde sınırsızca hareket edemezler ve bu da maddenin yalıtkan özellik göstermesine neden olur. "Boşluk bandı" terimi, bir malzemedeki valans bandı ile iletim bandı arasındaki enerji farkını ifade eder. Bant terimi ise malzemenin iletkenlik özelliklerini yöneten çok önemli bir faktördür.



Şekil 3.5. (a) İletken malzemelerin enerji bant aralıkları, (b) Yarı iletken Malzemelerin band aralıkları, (c) Yalıtkan malzemelerin band aralıkları [32].

Bir malzemenin bant aralığında elektronların bulunmaması, iletkenlik seviyesini ve optik özelliklerini etkilemektedir. İletim bandı, katı hal fiziğinde elektronların serbestçe hareket edebildiği ve elektriği iletebildiği bir malzemedeki enerji bandını tanımlamak için kullanılan bir terim olup, yeterli enerji sağlandığında elektronların valans bandından geçiş yapabildiği bir enerji seviyesidir. Elektronlar iletim bandı içinde sınırsızca hareket etme yeteneğine sahiptir ve dolayısıyla elektrik akımının iletimini kolaylaştırmaktadır. Dolayısıyla, iletim bandı malzemenin elektriksel iletkenlik özelliklerinin belirlenmesinden sorumludur.

3.4. P-TİPİ FOTOVOLTAİK PANELLERİ

P-tipi güneş panelleri, temel yarı iletken malzeme olarak bor gibi üç değerlikli doping elementleri ile geliştirilmiş silikon kullanır. Bu katkılama işlemi, silikonun yapısal matrisinde elektron eksikliğine neden olarak pozitif yüklü “deliklerin” oluşmasına yol açmaktadır. Bu deliklerin yaygınlığı P-tipi güneş pillerinin ayırt edici bir özelliği olup, güneş ışığı P-tipi bir yarı iletkeni aydınlattığında, fotonlar elektronlara enerji aktararak uyarılmalarına ve daha yüksek enerji durumlarına geçerek hareketli hale gelmelerine neden olur. Devre, bu bağlanmamış elektronlar tarafından kat edilerek bir elektrik akımı üretirken aynı zamanda delikler olarak bilinen boşluklar oluşturmaktadır. P tipi

güneş panelleri, N tipi panellere kıyasla daha düşük verimlilik sergileme eğiliminde olmalarına rağmen, tipik olarak daha uygun fiyatlı ve piyasada yaygın olarak benimsenmektedir.

3.5. N-TİPİ FOTOVOLTAİK PANELLERİ

N-tipi güneş panelleri, fosfor gibi beş değerlikli safsızlıklarla silikon katkılama işlemiyle üretilmektedir. Bu doping işlemi, ekstra elektronların artan hareketliliği nedeniyle silikonda bol miktarda elektronla sonuçlanmaktadır. Serbest elektronların bolluğu N-tipi güneş pillerinin doğal bir özelliği olup, güneş ışığı N-tipi bir yarı iletkenin yüzeyini aydınlattığında, serbest elektronlar enerjilenir ve harekete geçerek bir elektrik akımının üretilmesine neden olur. N-tipi güneş panelleri, elektron deliği birleşimini azaltan gelişmiş elektron hareketliliği nedeniyle genellikle üstün verimlilik ve ışık kaynaklı bozulmaya karşı daha fazla direnç sergiler. Bununla birlikte, bu paneller tipik olarak daha yüksek bir fiyat etiketine sahiptir.

3.6. P VE N-TİPİ TİCARİ SİLİKON PANELLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bölüm 3.4 ve 3.5'te verilen her iki panel türünün de özel kullanım ve çevresel koşullara göre değişen kendi avantajları ve dezavantajları vardır. Özellikle N-tipi paneller, P-tipi panellere kıyasla yüksek sıcaklık koşullarında ve düşük ışık koşullarında üstün performansa sahiptir. Ancak, bunların maliyet etkinliğinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu iki panel tipi Çizelge 3.1'de detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 3.1. P ve N tipi panellerin karşılaştırılması.

Sıra No	Özellik	P-tipi Panel	N-tipi Panel
1	Kusurlara karşı tolerans	Düşük	Yüksek
2	Kararlılık	Potansiyel olarak kararsız	Kararlı
3	Yaygın kullanım	Yaygın	Az yaygın
4	Panel kalitesi	Doping seviyesi homojen	Fosfor segregasyonu sebebiyle farklılıklar olabilir.
5	Verimlilik potansiyeli	Daha düşük	Yüksek

Özellikle fosfor dopingi yapılmış olan N tipi paneller P tipi panellerden daha verimlidir [33]. Ancak bu konuda genelleme yapılması her zaman doğru değildir. Yüksek verimli teknolojiler tipik olarak güneş pili cihazlarının yeni tasarımlarını, ışık emiliminin optimizasyonunu, fotojenere taşıyıcıların etkin bir şekilde toplanmasını, fotojenere taşıyıcıların rekombinasyon kayıplarının en aza indirilmesini, elektrot direncinin azaltılmasını ve daha geniş alanları kapsamaktadır. Bu unsurlar, cihazın genel performansını arttırmak ve güneş enerjisinden elektrik üretimini en üst düzeye çıkarmak için kritik öneme sahiptir [34].

3.7. GES GENEL DEVRE ŞEMASI BİLGİLERİ

Güneş paneli tasarlanırken belirli bir çıkış gerilimi elde etmek amacıyla güneş pilleri seri olarak bağlanır. Bu seri bağlantıdaki her bir pil dizisine gerekli akımı sağlamak için, bu diziler yeterli sayıda paralel olarak bağlanır. Bu yapıda, her bir güneş pilinin akım ve gerilimi panelin toplam akım ve gerilimi ile doğrudan ilişkilendirilir. Dolayısıyla, bir panelde yapılan ölçümler, o panelin akımını ve gerilimini yansıtır. Bu ölçümler kullanılarak, paneli oluşturan her bir pilin akım ve gerilimi hesaplanabilir [35].

Eğer panelin akımı I_{panel} , gerilimi de V_{panel} ile ifade edilecek olursa, paralel bağlanan pil sayısı (N_p) ve seri bağlanan pil sayısı (N_s) paneli oluşturan her bir pilin akım ve gerilimi sırasıyla Eşitlik 3.1 ve Eşitlik 3.2 ile hesaplanır [35].

$$I_{\text{pil}} = \frac{I_{\text{panel}}}{N_p} \quad (3.1)$$

$$V_{\text{pil}} = \frac{V_{\text{panel}}}{N_s} \quad (3.2)$$

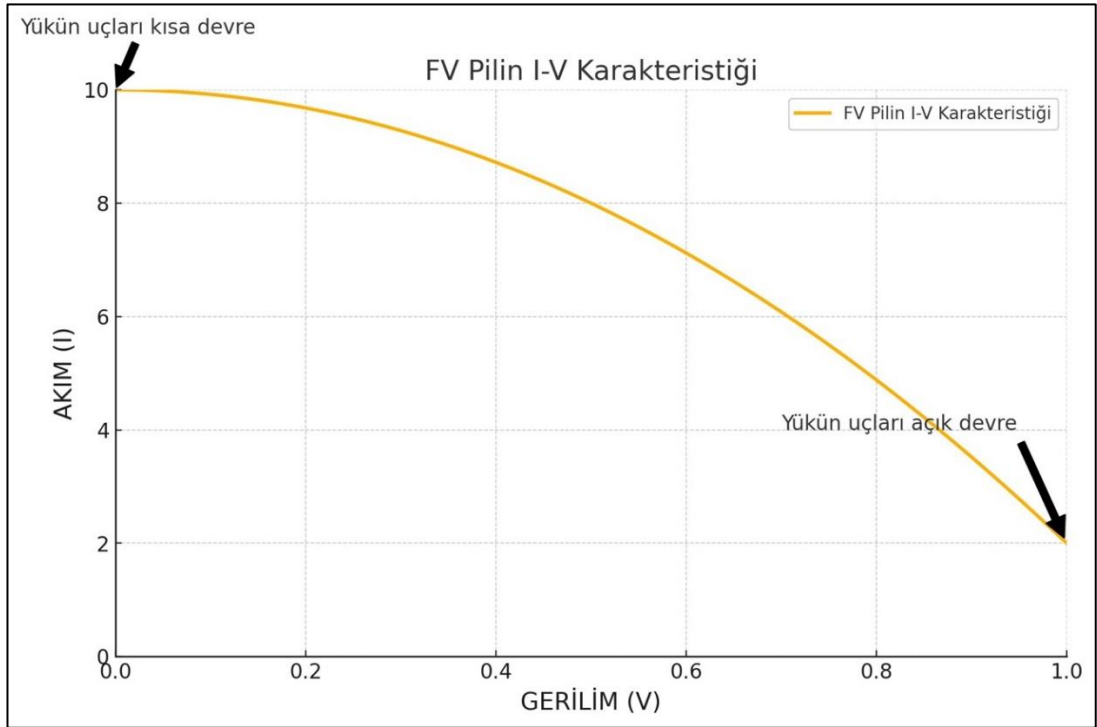
Tasarlanan panelin çıkış gücü ve pil gücü ise sırasıyla Eşitlik 3.3 ve Eşitlik 3.4 yardımıyla hesaplanır [35].

$$P_{\text{panel}} = V_{\text{panel}} \times I_{\text{panel}} \quad (3.3)$$

$$P_{\text{pil}} = \frac{P_{\text{panel}}}{N_s \times N_p} \quad (3.4)$$

3.8. FOTOVOLTAİK PİLLERİN I-V KARAKTERİSTİĞİ

Bir PV hücrenin akım-gerilim (I-V) davranışı Şekil 3.6 ile ifade edilmektedir. Bu karakteristik eğri, çeşitli gerilim seviyelerine karşılık gelen akım değerlerini sergiler ve güneş hücresinin performansının anlaşılması için kritik öneme sahiptir. Pil kısa devre durumundayken; bu nokta, gerilimin sıfır olduğu ve akımın zirvede olduğu bir durumu temsil eder. PV hücrede kısa devreye meydana geldiğinde ise ürettiği tüm akım yüke yönlendirilir ancak hücre boyunca gerilim sıfırlanmaktadır. Bu değer, panelin maksimum akım çıkışını temsil etmektedir.



Şekil 3.6. FV pilinin I-V karakteristiği [35].

Açık devre durumu, akımın akmadığı ve gerilimin en yüksek seviyede olduğu bir durumu ifade etmektedir. Hücre herhangi bir yüke bağlı olmadığında üretilen gerilim

ölçülür. Gerilim, hücrenin fiziksel ve kimyasal yapısına bağlıdır ve en yüksek teorik gerilimi ifade etmektedir. Grafikte gösterildiği üzere akım eğrisi boyunca maksimum değerden sıfır değerine düşerken, yük direncinin azaltılması akımın azalmasına ve gerilimin artmasına neden olmaktadır. Bu deney, yük direncindeki değişikliklerin hücre çıkışı üzerindeki etkisini göstermektedir. Güneş panelleri ve sistemleri tasarlanırken, bu I-V karakteristiklerinin dikkate alınması kritik bir husus olup, panelin çalışma noktasını doğru bir şekilde değiştirmek, sistemin performansını optimize etmek için büyük öneme sahiptir.

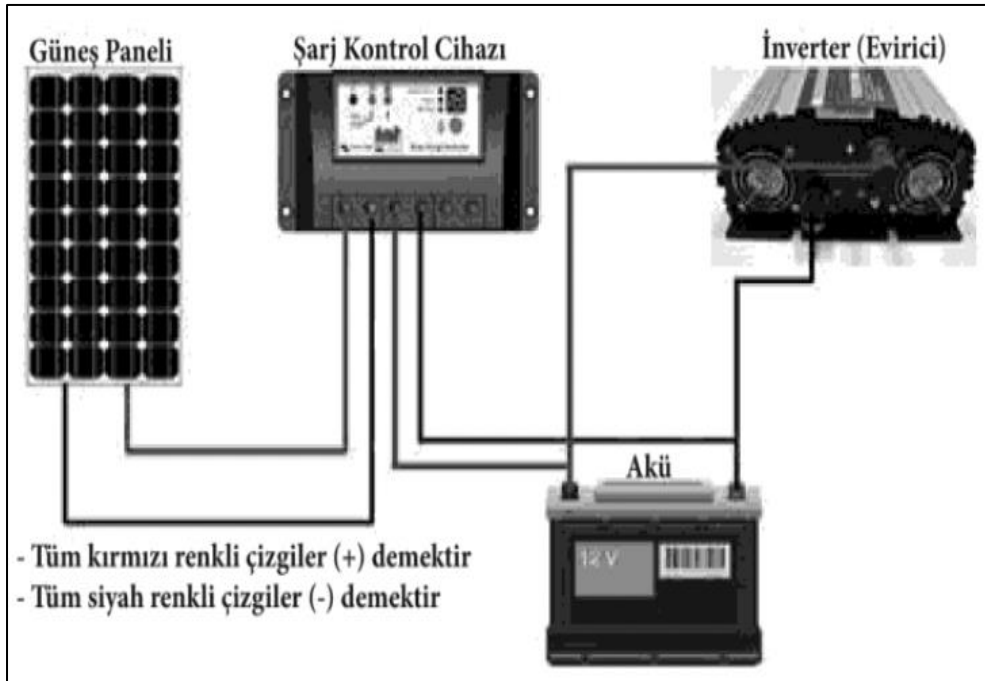
BÖLÜM 4

FOTOVOLTAİK SİSTEM BİLEŞENLERİ

PV sistemler Şekil 4.'deki gibi 4 ana bileşenden oluşur ve bileşenler şunlardır.

- PV paneller
- Akü
- Şarj Regülatörü
- Inverter

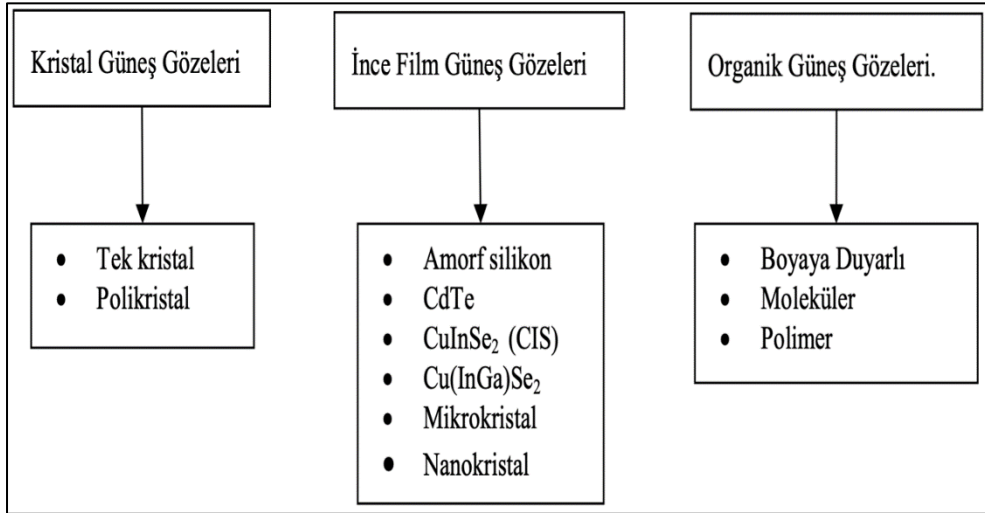
Bu bileşenler şebekeden bağımlı ve bağımsız sistem olup olmasına göre değişkenlik gösterebilmektedir.



Şekil 4.1. PV panel sistemi bağlantı şeması [36].

4.1. PV PANELLER

PV güneş panelleri, fotovoltaikler olarak da bilinen ve doğrudan güneş ışığından elektrik üretebilme yeteneğine sahip cihazlardır ve Şekil 4.2’de sınıflandırılmıştır. PV olarak kısaltılan fotovoltaik terimi, "foto" yani ışık ve "voltaik" yani gerilim anlamına gelen Yunanca kelimelerden türetilmiştir [37]. Bu terimin ortaya çıkışında elektrik akımı üreten makinenin mucidi Alessandro Volta’dan esinlenilmiştir. Güneş hücreleri üretmek için en popüler malzeme, ucuz malzeme maliyeti ile yüksek verimliliği etkili bir şekilde dengeleyen çok kristalli silikon veya tek kristal silikondur. Bunların haricinde Galyum Arsenit (GaAs), Kadmiyum Tellür (CdTe), Bakır İndiyum Diselenid (CuInS₂) ve başka birçok tipleri de bulunmaktadır.



Şekil 4.2. PV panel türleri [37].

PV panel türlerinin kıyaslaması ise Şekil 4.3’te verilmiştir. Bu bilgiler farklı PV teknolojilerinin performans özelliklerine kısa bir genel bakış sunmaktadır. Bu özellikler, PV uygulamalarda çeşitli güneş pili malzemelerinin uygunluğunu ve etkinliğini değerlendirmek için çok önemli ölçütler olan verimlilik, modül verimliliği, açık devre voltajı (Voc) ve kısa devre akım yoğunluğunu (Jsc) kapsamaktadır.

Tek kristal silikon, olağanüstü verimliliği ve kararlılığı ile ünlüdür. Polikristal Silikon (çok kristalli silikon olarak da bilinir), tek kristal silikona kıyasla biraz daha düşük verimliliğe sahip bir silikon türüdür. Bununla birlikte, üretimi daha uygun ve

maliyetlidir. Kadmiyum Tellür (CdTe) yüksek verimliliği ve üretimdeki maliyet etkinliği ile tanınan bir ince film teknolojisidir. CIS/CIGS ise bakır indiyum galyum selenit/sülfür teknolojilerini ifade eder ve maliyet ile verimlilik arasında bir denge kurarken makul düzeyde esneklik sunmaktadır. Hücre verimliliği, standartlaştırılmış test koşulları altında elektrik enerjisine dönüştürülen güneş enerjisi oranını ifade etmektedir. Galyum arsenit hücreler, güneş ışığını elektrığe dönüştürme konusundaki olağanüstü yeteneğini gösteren %29,1'lik maksimum verimliliği göstermektedir. Terminalleri kısa devre ile bağlandığında bir güneş pili tarafından üretilen akım yoğunluğudur. Bahsedilen teknolojiler arasında tek kristal silikon 42,65 mA/cm² ile en yüksek Jsc'yi (kısa devre akım yoğunluğu) sergileyerek daha büyük bir akım çıkışı üretme kabiliyetini işaret etmektedir.

PV teknolojisi	Hücre verimi (%)	Modül verimi (%)	Hücre Voc (Volt)	Hücre Jsc (mA/cm ²)
Tek kristal silikon	26.7 ± %0.5	24.4 ± %0.5	0.7380	42.65
Çok kristal silikon	24.4 ± %0.3	20.4 ± %0.3	0.7132	41.47
Galyum arsenit	29.1 ± %0.6	25.1 ± %0.8	0.9940	23.20
Amorf silikon	14.0 ± %0.4	12.3 ± %0.3	1.9220	9.940
Kadmiyum tellür	21.0 ± %0.4	19.0 ± %0.9	0.8750	30.25
CIS/CIGS	23.35 ± %0.5	19.2 ± %0.5	0.7340	39.58

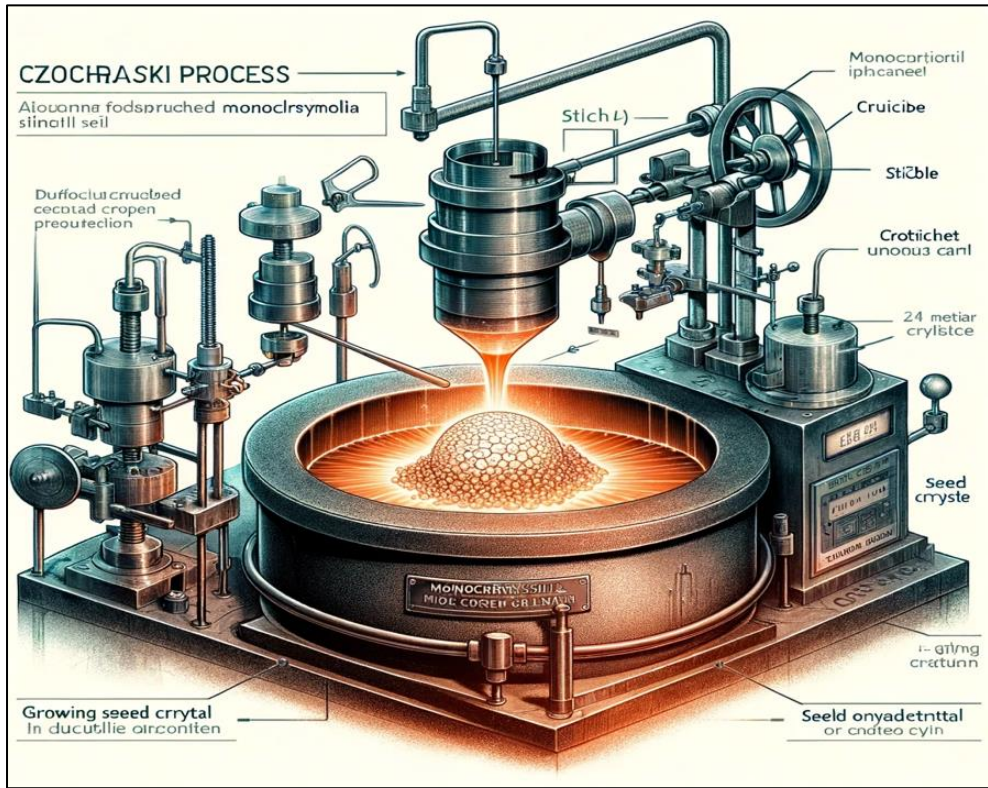
Şekil 4.3. Farklı malzemelerin PV etkinlik karşılaştırması [38].

4.1.1. Silikon Paneller

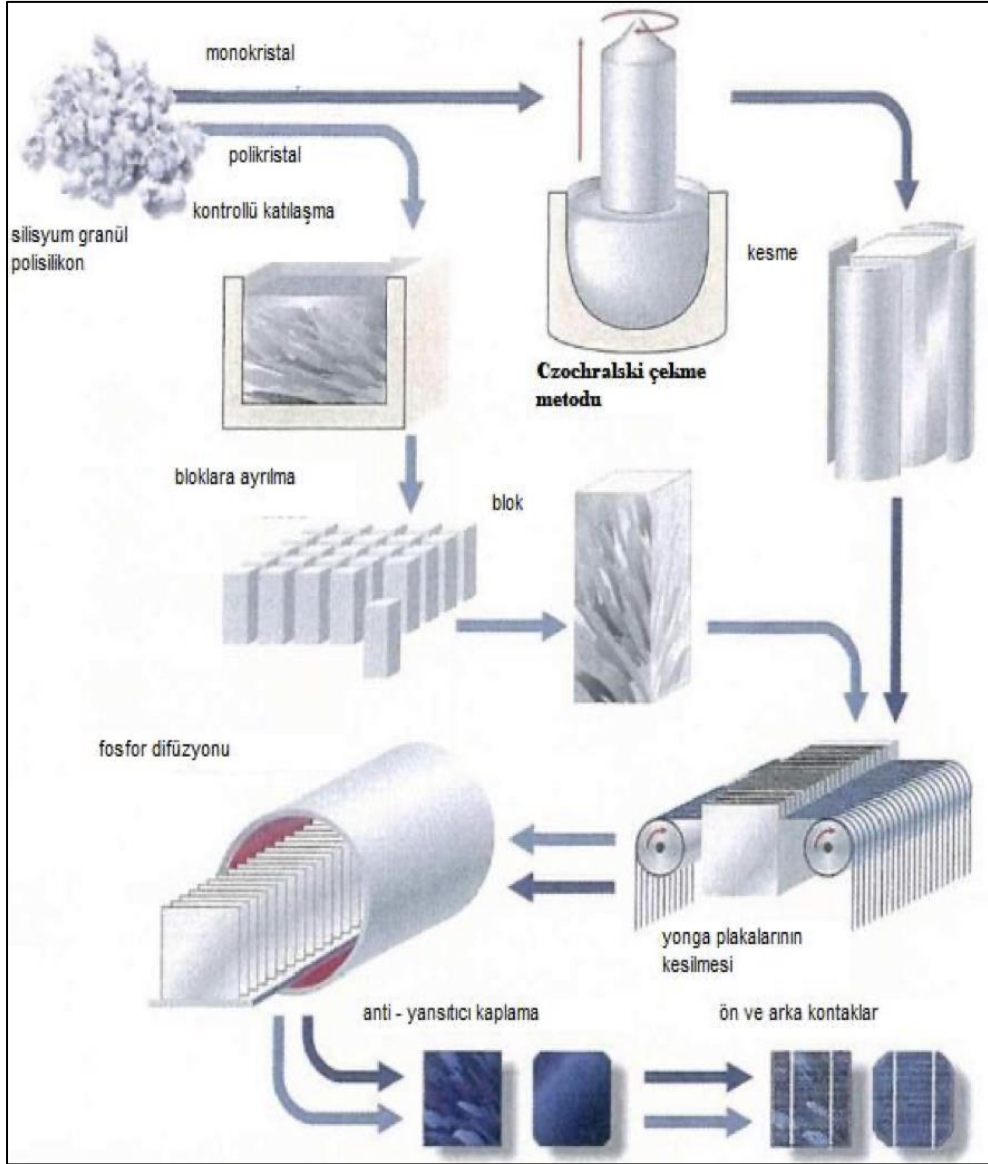
En çok kullanılan panel türü olup, bileşeni olan silisyum doğada en yaygın bulunan elementlerden birisidir ve maliyet açısından da çok avantajlıdır. Kuartzın işlenmesi sonucu, %99 veya daha yüksek bir saflıkta silika ve ardından silisyum elde edilmektedir [39]. Silisyumun yasak bant enerjisi, 0 Kelvin'de 1.21 elektronvolt iken, oda sıcaklığındaki (300 Kelvin) değeri 1.12 elektronvolt olarak ölçülmüştür [40]. P ve N tipi panel türleri tek veya monokristal silikon paneller olarak geçmektedir. Günümüzde genel olarak monokristal silikon panel üretimi üzerine yoğunlaşmıştır [41]. Polikristal silisyum elde edilmesine kadar olan aşamaların her birisi, oldukça enerji gerektiren ve maliyeti yükselten işlemlerdir [40]. Bu yüzden polikristal silikon panel teknolojileri geride kalmıştır. Monokristal büyütme için kimyasal buhar biriktirme (CVD), kesme, yüzdürme yöntemlerine ek olarak daha yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisi Czochralski yöntemidir.

4.1.2. Czochralski Yöntemi ve Tek Kristal Silikon Paneller

Silisyumun eriyik halindeki bir karışımına, döner bir palet benzeri mekanizma ile hem karıştırma hem de kristallendirme ajanı eklenirken yavaşça yüzeye çekilir. Bu süreç, kristallerin monokristal ve yönlendirilmiş biçimde oluşmasını sağlar. Bu yönteme Czochralski prosesi denir ve üretim sürecine yönelik temsili gösterim ve üretim aşamaları sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Bu işlem oldukça yavaş yürütülmekte olup, ısıtma ve saflaştırma aşamaları nedeniyle maliyetlidir. Diğer monokristal üretim yöntemlerinden saf bir malzeme elde edilir. Bunun da nedeni diğer yöntemlerin ingot büyütme süreci nedeniyle, tek kristal silikon malzemesi doğal olarak tane sınırları ve yer değiştirmeler gibi kristal kusurlarını, ayrıca daha az saf kalıplar ve kaplamalardan gelen metal kirleticilerinin oldukça büyük konsantrasyonlarını içermesidir [42]. Aynı şekilde polikristal silikon üretimi de günümüzde yapılabilmektedir. Fakat genel olarak bu yöntem monokristal silikon üretimi için kullanılmıştır.



Şekil 4.4. Czochralski prosenin temsili bir gösterimi [42].



Şekil 4.5. Czochralski yöntemi üretim aşamaları şeması [41].

4.1.3. Amorf Silikon Paneller

Amorf silisyumun rastgele yapılandırılmış moleküler düzeni, malzemenin elektriksel iletimini olumsuz etkilemektedir. Ancak yarı iletken malzemeye %5-%10 oranında hidrojen eklendiğinde, elektriksel özellikler PV dönüşüm için uygun seviyelere ulaştırılabilmektedir [37]. Bu süreçte, hidrojen molekülleri amorf silisyum içindeki tamamlanmamış silikon bağlarını kapatır, yasak bant içinde yer alan izin verilen enerji durumlarının sayısını azaltır [41].

4.1.4. Galyum Arsenit Paneller (GaAs)

Bu tip panellerde %30 seviyelere varan verim elde edilebilmektedir. Bu oran diğer türlerine ortalamalarına göre gayet yüksektir. Genel olarak uzay uygulamalarında kullanılmaktadır. Gündelik hayat uygulamaları açısından pahalıdır ve bu yüzden tercih edilmezler.

4.1.5. Kadmiyum Tellürid (CdTe)

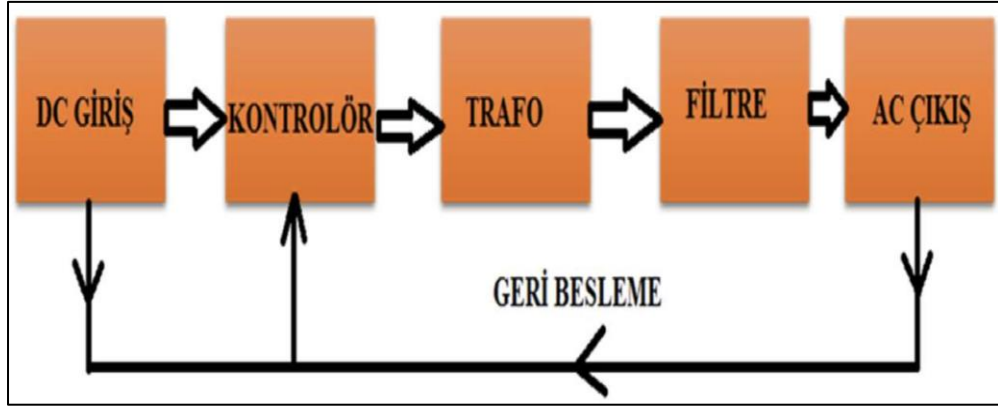
Polikristal olarak üretilmektedir. Bu tip paneller üzerindeki laboratuvar çalışmaları devam etmektedir. Verimlilikleri yüksektir ancak galyum arsenit kadar değildir.

4.1.6. Bakır İndium Diselenid (CuInSe₂)

Polikristal olarak üretilir. Verimlilikleri geleneksel silikon tipi panellere nazaran yüksektir. Üretimi zor ve zaman almasının yanı sıra maliyet açısından pahalı olduğu için tercih edilmezler.

4.2. INVERTER

Inverterler, güneş panelleri gibi kaynaklardan elde edilen doğru akımı (DC) alternatif akıma (AC) dönüştüren aygıtlardır. Bu dönüştürme işlemi, elde edilen elektriği, evlerde ve iş yerlerinde yaygın olarak kullanılan alternatif akımla çalışan cihazlar için uygun hale getirir. Çalışma prensibine yönelik akış diyagramı Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Inverter devre şemasının temsili gösterimi [3].

4.3. AKÜ

Aküler, güneş panelleri tarafından üretilip hemen kullanılmayan elektrik enerjisini depolar. Bu depolama işlemi, güneşin bulunmadığı zamanlarda, özellikle geceleri veya hava koşullarının güneş enerjisi üretimine müsaade etmediği durumlarda sürekli enerji sağlanmasını teşvik etmektedir. Elektrik şebekesi kesintiye uğradığında, aküler kesintisiz bir enerji kaynağı olarak devreye girer ve bu durum, özellikle kritik önem taşıyan medikal cihazlar gibi kritik sistemler için büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, aküler şebeke bağımlılığını azaltmakta ve elektrik kullanımının en yoğun olduğu zamanlarda, aküler birikmiş enerjii şebekeye geri besleyerek zirve yükünü düşürmektedir. Bu, enerji maliyetlerini azaltmaya yardımcı olur ve daha dengeli bir enerji tüketim profili oluşturur. Güneş panellerinde kuru tip olarak bilinen kurşun oksit aküler kullanılmaktadır [43].

4.4. ŞARJ REGÜLATÖRLERİ

Gün boyunca PV panel yüzeyine ulaşan ışınım miktarındaki değişiklikler, akım ve gerilim değerlerinde değişikliklere neden olur. Şarj regülatörü, panelden gelen akımı düzenler ve aküye aktarılmasını sağlar. Akünün dolum durumuna göre, akülerin aşırı şarj olmasını veya fazla deşarj olmasını önlemek için gelen akımı keser. Akünün deşarj derinliği ve devir süresinin korunması akünün ömrünü uzatmada önemli bir faktördür. Regülatör, düzenlenmiş bir DC çıkışı sağlamakta, fazla enerjiyi bir sistemde

depolayabilmekte ve akü voltajını izleyerek şarj seviyesinin çok yüksek veya düşük olmasını engelleyebilmektedir [44].

4.5. FOTOVOLTAİK PANELLER İÇİN PERFORMANS KRİTERLERİ

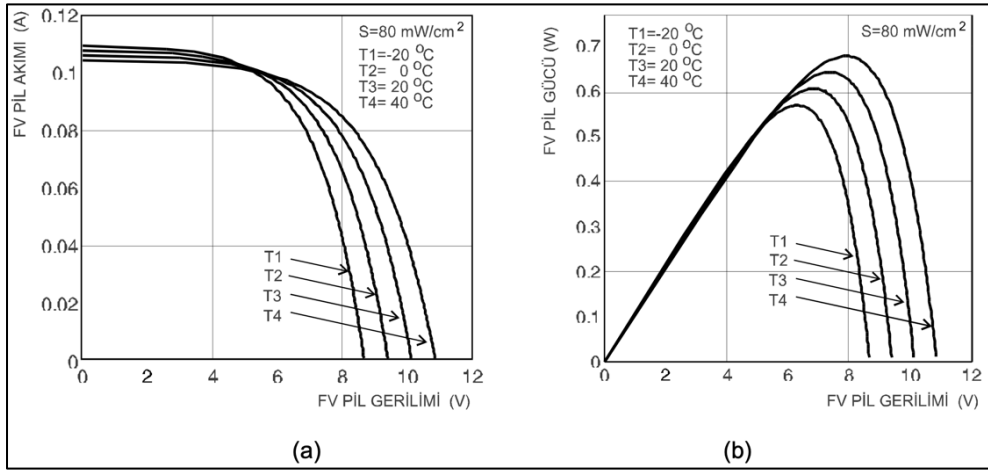
Yönlendirilme, bir güneş panelinin verimi açısından en önemli kriterlerden birisidir. Bunlar için gerçek zamanlı olarak sürekli güneş ışıklarının hareketini izleyen tracking sistemleri bulunmaktadır [45]. Bu yüzden bu detay taşınmazlar için önem taşımaktadır. Konstrüksiyon yapıların panellendirilmesinde cephe ve izleme sistemleri doğru bir şekilde analiz edilip bulunduğu bölgenin eğim açısına göre dizayn edilmedir.

4.5.1. Sıcaklık Etkisi

Gözlemler, güneş panellerinin aşırı ısındığı durumlarda performans kaybına uğradığını göstermektedir. Yapılan araştırmalar, PV panellerin sıcaklığı her 10°C arttığında performanslarının yaklaşık %1 oranında azaldığını ortaya koymuştur. Bu soruna çözüm olarak, panellerin soğutulması, arka yüzeylerinin havalandırılması önerilmektedir [46].

Şekil 4.7’de bir PV güneş panelinin farklı sıcaklık ayarlarındaki ($T_1=-20^{\circ}\text{C}$, $T_2=0^{\circ}\text{C}$, $T_3=20^{\circ}\text{C}$, $T_4=40^{\circ}\text{C}$) anlık akım (I) ve güç (P) çıkışlarını göstermektedir. Şekiller, yüksek sıcaklıkların PV teknolojisinin önemli bir özelliği olan güneş paneli verimliliği üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Güneş panelinin maksimum akım çıkış kapasitesi sıcaklık arttıkça düşmektedir ve en yüksek değerine -20°C 'de elde edilirken en düşük değerine ise 40°C 'de ulaşılmaktadır. Performanstaki düşüşün nedeni, artan sıcaklıkla birlikte taşıyıcı hareketliliğindeki düşüş ve iç dirençteki artıştır. Buna ek olarak, sıcaklık arttıkça güneş panelinin güç çıkışı da orantılı olarak düşmektedir. Sıcaklık arttıkça panelin verimliliği düşer ve bu da üretilebilecek maksimum gücün azalmasına neden olur. Maksimum güç çıkışı -20°C sıcaklıkta elde edilirken, minimum güç çıkışının 40°C sıcaklıkta gerçekleştiği gözlemlenmektedir.

Bu gözlemler, sıcaklık ile güneş panellerinin performansındaki düşüş arasındaki korelasyonu açık bir şekilde göstermektedir. Bu nedenle, özellikle yüksek sıcaklıkların olduğu bölgelerde güneş panellerini soğutma eylemi, verimliliklerini artırmak için çok önemlidir. Sıcaklığın etkilerini dengelemek için, panellerin arka yüzeyinin havalandırılması gibi soğutma tekniklerinin güneş paneli sistemlerinin tasarımına dahil edilmesi tavsiye edilmektedir.



Şekil 4.7. Güneş pilinin akım gerilim ve gücünün sıcaklığa bağlı olan değişimi [35].

4.5.2. Yüzey Boyutları, Temizliği ve Gelen Işığın Yansımaya-Emilim Durumları

Bir panelin boyutu, kesit alanı ve çeşidi ürettiği gücü etkiler. Güneş panellerinin verimliliğini artırmak için, panel yüzeylerine yansıtıcı bir katman eklenerek güneş ışığından daha etkin şekilde faydalanılabilir [47]. Bu nedenle, güneş panelleri farklı yüzey tasarımlarıyla üretilebilir. İstisnasız bütün panel tiplerinde değişmeyen en önemli kriter onun yüzeyinin temizliğidir. Yüzey kirliliği panel verimliliğini dramatik bir şekilde düşürmektedir. Bu durumu engellemek adına yapılan birçok çalışma vardır. Genel olarak yüzeylerin temizliği alkol bazlı temizleyicilerle sağlanmaktadır. Son yıllarda panel yüzey temizliğini robotik sistemlerle yapılmasını sağlayan projeler yapılmaktadır [48]. Endüstri 4.0 uygulamalarının da gelişmesiyle birlikte robotik sistemler hemen her alan da önemli bir hale gelmiştir. Bunların haricinde ayrıca elektrostatik sistemler kullanılarak da temizlik yapılmasına yönelik çalışmalar da gerçekleştirilmektedir [49]. İkinci faktör ise gelen ışınların yüzeyden yansımadır. Yüzey yansımalarını azaltmak için seçici dağlama teknikleri kullanılarak panel

yüzeyinde küçük piramit yapılar oluşturulur. Bu piramitler, yansıyan ışığı çarparak kırılmaya uğratır ve böylece ışınları güneş pili içine geri yönlendirir [50].

BÖLÜM 5

GÜNEŞ PANELLERİNDE VERİMLİLİK ARTTIRICI MEKANİZMALAR

5.1. AÇI OPTİMİZASYONU VE ÖNEMLİ PARAMETRELER

Güneş panellerinin verimliliği, üzerlerine düşen güneş ışınlarının açısına bağlı olarak artmaktadır; yani ışınlar ne kadar dik açıyla düşerse, paneller o kadar verimli çalışmaktadır. Bu nedenle, güneş takip sistemleri ve bu alanda geliştirilen prototipler, panellerin güneş ışınlarını en verimli açıdan alacak şekilde sürekli olarak ayarlanmasını sağlamak için tasarlanmıştır [51]. Bu sistemlerin ana amacı panele düşecek ışığın olabildiğince dik olmasını sağlamaya çalışmaktır. Dünyanın şekli, güneş ve kendi etrafında dönmesinden dolayı ışığın dünyaya geliş açısı sürekli değişmektedir. Panele vuran ışığın açısını hesaplamak için belirli açı değerlerinin bilinmesi gerekmektedir [51].

5.1.1. Deklinasyon açısı (δ)

Deklinasyon açısı, güneş ile gök ekvatoru arasındaki eğimi temsil eder. Bu açı belirli bir güne bağlı olarak yıl boyunca $-23,45^\circ$ ile $+23,45^\circ$ arasında değişim göstermektedir. Bu değişim Dünya'nın eğik ekseninden kaynaklanır ve mevsimsel değişiklikleri etkilemektedir. Deklinasyon açısı Eşitlik 5.1'de verilen Copper eşitliği ile bulunabilir ve bir PV panel kapsamı için Şekil 5.1'de ifade edilmiştir [52].

$$\delta = 23.45 \sin \left[360 \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (5.1)$$

5.1.2. Saat açısı (ω)

Güneşin yerel meridyeni geçmesinden bu yana geçen sürenin açısal ölçümüdür. Öğle vakti güneşin konumu 0° olarak tanımlanır. Sabahları konum negatif değerlerle temsil edilirken, öğleden sonraları pozitif değerlerle ifade edilir. Konum, her saat için 15° değerinde artmakta olup, saat 12:00'da bu değer 0° 'ye gelmektedir. Bu değişime ilişkin hesaplama yöntemi Eşitlik 5.2'de verilmiştir.

$$\omega = 15(\text{Güneş Saati Zamanı} - 12) \quad (5.2)$$

Güneşin doğduğu ve battığı zamanları tespit etmek için Eşitlik 5.3'te verilen gün batımı açısı (ω_s) hakkında bilgi sahibi olmak gerekmektedir. Bu açı, öğleden sonra güneşin ufuktan yüksekliğinin büyüklüğünü temsil etmektedir [53].

$$\omega_s = \left(\sin^{-1} \left(-\tan(\phi) \tan(\delta) \right) \right) \quad (5.3)$$

Güneşin doğuş ve batış açıları sırasıyla Eşitlik 5.4 ve Eşitlik 5.5 yardımıyla hesaplanabilir.

$$G_{ds} = 24 - G_{bs} \quad (5.4)$$

$$G_{bs} = \frac{12(\omega_s + 15)}{15} \quad (5.5)$$

5.1.3. Enlem açısı (θ)

Bir noktanın ekvatora göre konumunu temsil etmektedir ve alınan güneş radyasyonunun miktarı ile eğimini hesaplar.

5.1.4. Zenit açısı (θ_z)

Gözlemcinin bakış açısından görüldüğü gibi, güneş ışınları ile doğrudan tepedeki nokta arasındaki açıdır. Güneş ışığının yüzeye kesiştiği açıyı göstermektedir.

5.1.5. Yükseklik Açısı (α)

Güneş ile ufuk arasındaki dikey mesafeyi temsil eden açıdır. Gün boyunca bu açı 0° ile 90° arasında değişim göstermektedir.

5.1.6. Azimut Açısı (ψ)

Kuzeyden saat yönünde ölçülen güneşin yatay konumunu ifade etmektedir. Tipik olarak 0° kuzey, 90° doğu, 180° güney ve 270° batı olarak kabul edilmektedir.

5.1.7. Panel Eğim Açısı (β)

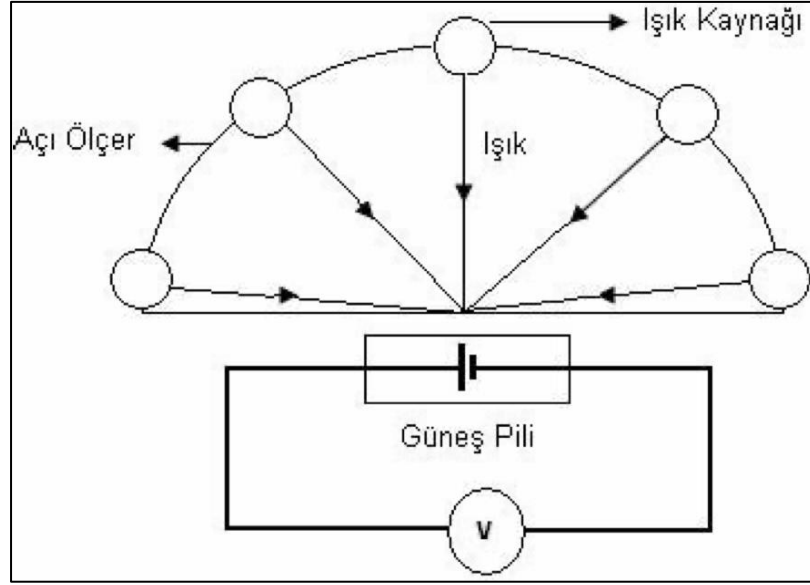
Bir güneş panelinin yatay düzleme göre eğimini ifade etmektedir. Panelin eğimi, güneş ışığı emilimini en üst düzeye çıkarmak için değiştirilmektedir.

5.1.8. Optimum Panel Eğim Açısı (β_{opt})

Bir yıl boyunca güneş enerjisi emilimini en üst düzeye çıkarmak için bir güneş panelinin konumlandırılması gereken en uygun açıyı ifade etmektedir. Güneş panellerinin ideal eğiminin hesaplanması, bölgesel enlem ve mevsimsel değişimleri dikkate alan Hottel&Woertz Yöntemi kullanılarak belirlenmektedir. Bu teknik, enerji üretimini en üst düzeye çıkarmak için güneş radyasyonunun kullanımını optimize etmektedir.

5.2. AÇI DEĞİŞİMİNE YÖNELİK TEK GÜNEŞ PİLİ DENEY VE SONUÇLARI

Deney düzeneği bir güneş pili, bir açı ölçer ve ışık kaynaklarından oluşmaktadır. Düzeneğe, ışık kaynaklarından güneş hücresine gelen ışığın açısını değiştirebilen bir eğimölçer bağlanmıştır ve örnek deney düzeneği Şekil 5.3'te gösterilmektedir. Bu, ışığın güneş pili üzerindeki çeşitli perspektiflerden etkisinin analiz edilmesini sağlamaktadır. Bu konfigürasyonun amacı, güneş pilinin farklı açılardaki tepkisini incelemek amacıyla tasarlanmasının ardından değerler not edilmiştir.



Şekil 5.3. Açı deney şeması [47].

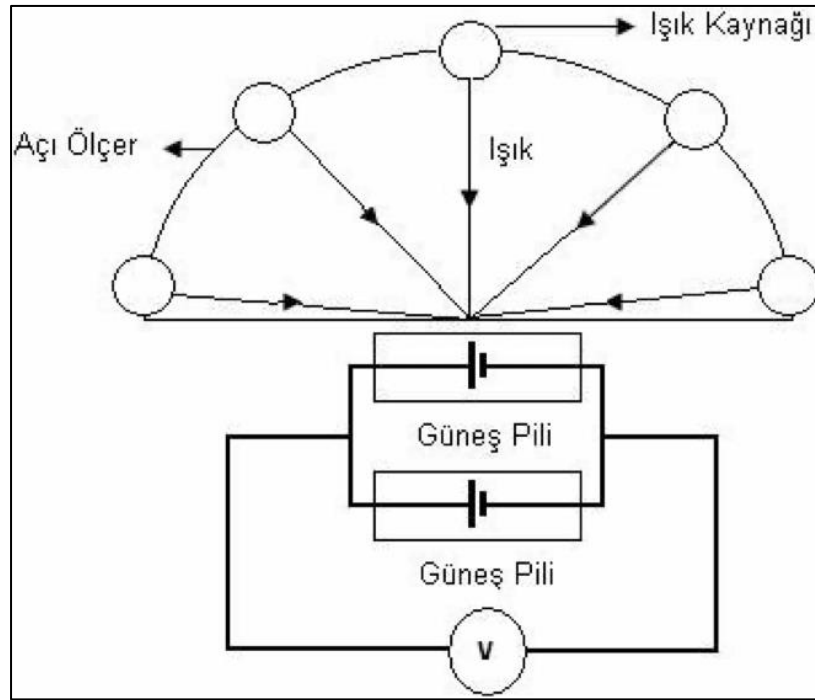
Şekil 5.4, güneş ışınlarının güneş piline çarptığı açılara bağlı olarak elektrik akımı (mA cinsinden ölçülür) ve voltajdaki (V cinsinden ölçülür) değişiklikleri göstermektedir. 0° ile 180° arasındaki açılarda güneş ışınlarının güneş pili üzerindeki etkisinin nicel bir gösterimini sunmaktadır. Veriler, güneş ışınları güneş piline 90° 'lik bir açıyla çarptığında, 42,8 mA'lık maksimum akım değerine ve 3,25 V'luk en yüksek gerilime ulaştığını göstermesi bakımından özellikle dikkat çekici bir sonuç sunmaktadır. Bu veriler, güneş pilinin en yüksek enerji üretim kapasitesine güneş ışınları yüzeye 90° derecelik bir açıyla geldiğinde ulaştığını göstermektedir. 90° 'de maksimuma ulaştıktan sonra, açı azaldıkça (90° 'den 0° 'ye) veya yükseldikçe (90° 'den 180° 'ye) hem akım hem de voltaj değerleri düşmektedir. Bu düşüş, gelen güneş ışınlarının açısı dikeyden uzaklaştığında optimum olmayan koşulları ifade etmektedir. Akım ve gerilimdeki düşüş, güneş pilinin 0° ve 180° 'ye yakın açılarda konumlandırıldığında minimum enerji ürettiğini göstermektedir. Bu keşifler, güneş panellerini kurarken ve hizalarken açısal konumun önemini vurgulamaktadır. Güneş panellerinin güneş ışınlarıyla en iyi şekilde hizalanması, güneş enerjisinin maksimum düzeyde yakalanmasını sağlarken, yanlış yerleştirme enerji verimliliğini büyük ölçüde azaltabilmektedir. Bu nedenle, sistem performansını iyileştirmek ve enerji üretimini optimize etmek için güneş enerjisi sistemleri tasarlanırken ve kurulumu yapılırken bu tür verilerin dikkate alınması önem arz etmektedir.

Açı	Akım(mA)	Gerilim(V)
0°	2,3	1,90
30°	9,1	2,0
45°	16,6	2,67
60°	34,3	2,98
90°	42,8	3,25
120°	35,2	3,01
135°	18,7	2,84
150°	9,5	2,28
180°	2,7	1,95

Şekil 5.4. Akım-gerilim değerleri [47].

5.3. PARALEL BAĞLI GÜNEŞ PİLLERİ İLE YAPILAN DENEY

Bölüm 5.2’de anlatılan deneyler aynı deney koşullarındaki paralel bağlı olan 2 güneş piline Şekil 5.5’teki gibi bağlanarak yürütülmüştür. Parametreler aynı tutulup açı değişiminin etkisi incelenmiştir ve daha sonra güneş ışınları 0° ile 180° arasında güneş panelleri üzerine yansıtılmıştır.



Şekil 5.5. Paralel bağlı güneş pilleri için deney şematığı [47].

Deneysel sonuçlar, güneş ışınlarının eğiminin güneş pilinin verimliliğini önemli ölçüde etkilediğini kesin olarak göstermektedir ve sonuçlar Şekil 5.6'da sunulmuştur. Işınlara güneş piline 90°'lik bir açıyla çarptığında, maksimum 81,7 mA akım ve 3,18 V voltaj üretmişlerdir. Bu, güneş pilinin güneş ışınları yüzeye dik açıda olduğunda optimum verimliliğe ulaştığını göstermektedir. Açı bu noktadan saptıkça hem akım hem de voltaj düşmekte, bu da güneş ışınlarının açısının enerji üretim kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Panellerin seri olarak bağlanması durumunda, akım değerinde bir değişiklik olmazken, gerilim değerlerinin yaklaşık olarak iki kat arttığı gözlemlenmiştir. Paralel bağlama yapıldığında ise, akım değeri yaklaşık iki katına çıkarken, gerilim aynı seviyede kalmıştır. Her iki deneyde de dik açıyla gelen panellerin verimleri diğer açılara göre daha yüksek gerçekleşmiştir.

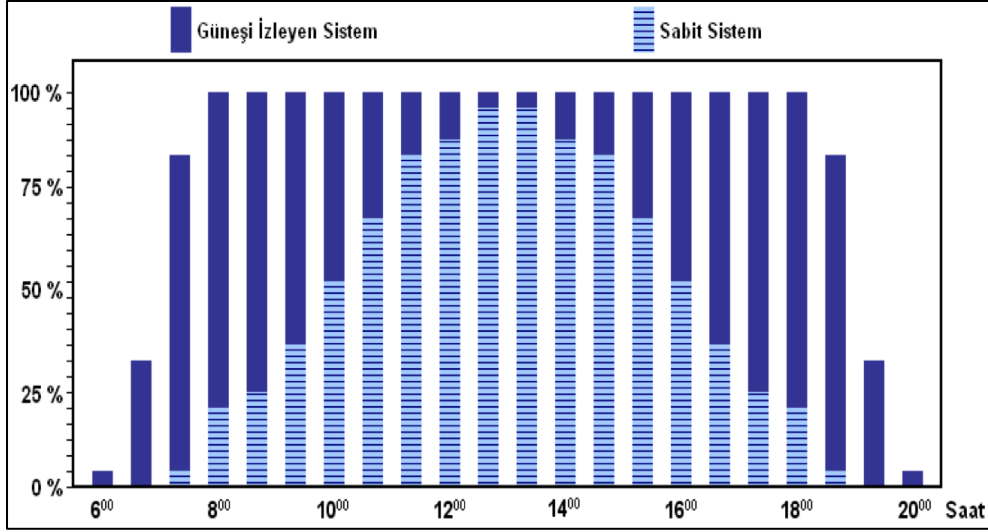
AÇI	AKIM(mA)	GERİLİM(V)
0°	5,3	1,84
30°	17,6	2,23
45°	35,4	2,79
60°	53,2	2,94
90°	81,7	3,18
120°	53,2	2,94
135°	35,4	2,79
150°	17,6	2,23
180°	5,3	1,84

Şekil 5.6. Paralel bağlı güneş pilleri için akım gerilim sonuçları [47].

5.4. GÜNEŞ TAKİP SİSTEMLERİYLE (TRACKER) FOTOVOLTAİK PANEL VERİMİ ATTIRMA

Güneş takip sistemleri güneş panellerinin yönlerini gün boyunca dinamik olarak değiştirerek güneşle en uygun hizalamayı sağlar ve böylece güneş radyasyonunun yakalanmasını en üst düzeye çıkarır. Diğer yandan, sabit sistemler sabit bir açıda konumlandırılmış ve gün boyunca değişmeden kalan güneş panellerinden oluşmaktadır. Bu açılar genellikle yıl boyunca güneşin ortalama konumuyla aynı hızda olacak şekilde optimize edilmektedir.

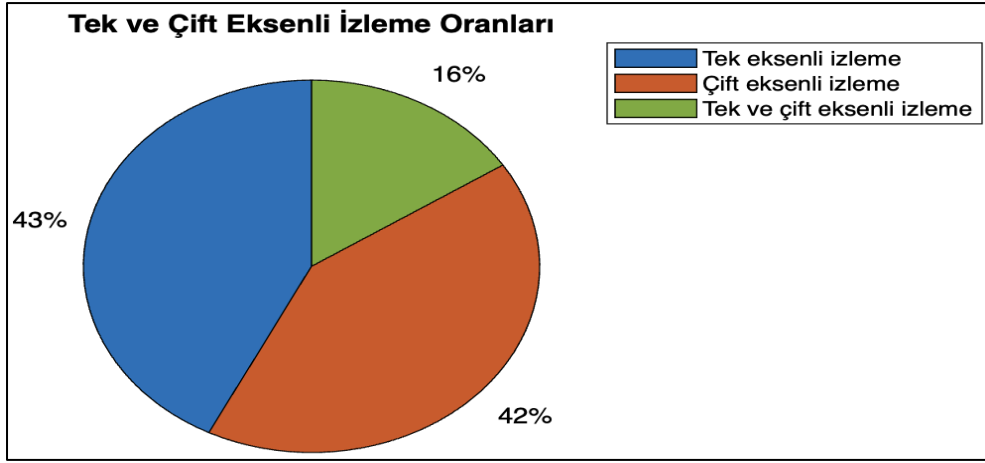
Şekil 5.7, sabah 6'da başlayıp akşam 8'de sona eren 14 saatlik bir süre boyunca güneş takip sistemlerinin sabit sistemlere kıyasla göreceli performansını açıkça göstermektedir. Yapılan bu karşılaştırma, güneş takip teknolojisinin güneş enerjisi kurulumlarının verimliliğini nasıl optimize edebileceğini anlamak için çok önemlidir.



Şekil 5.7. Sabit sistem ile güneş izleyici sistem arasında olan üretilen güç farkı [47].

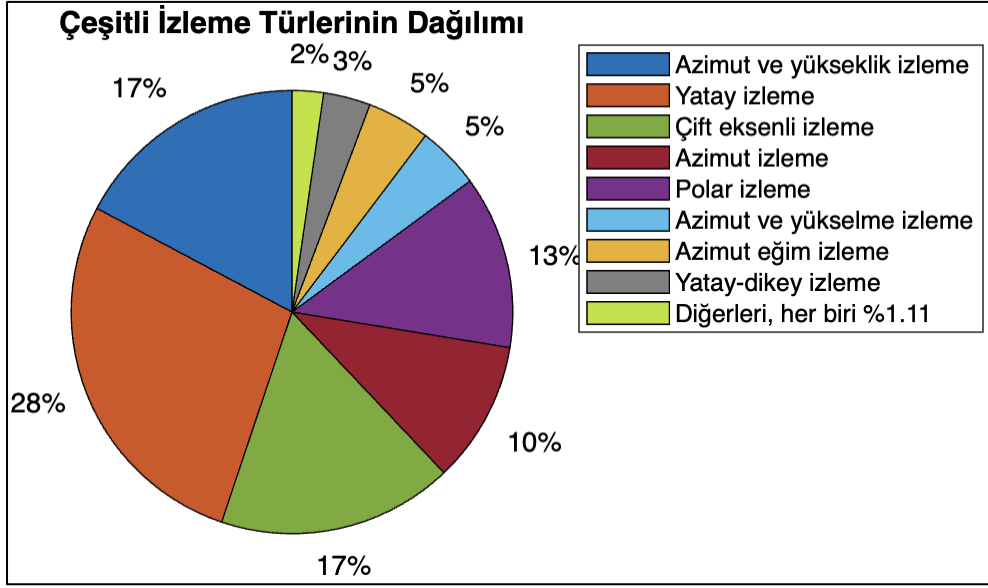
Şekil 5.8, çeşitli güneş takip cihazı kategorilerinin dağılımını göstermektedir. En büyük kısmı oluşturan tek eksenli izleme sistemleri, toplamın %42,57'sini oluşturmaktadır. Bu sistemler, güneşin gökyüzündeki yörüngesini takip etmek için genellikle kuzey-güney yönünde yönlendirilmiş tek bir eksen etrafında dönmektedir. Çift eksenli izleme sistemleri toplamın %41,58'ini oluşturmaktadır ve yakınlık açısından tek eksenli izleme sistemlerine benzemektedir. Bu cihazlar, tipik olarak yatay ve dikey olmak üzere iki boyutta hareket ederek daha hassas güneş takibi sağlamaktadır [54]. Toplamın %15,84'ünü oluşturan en küçük kategori hem tek hem de çift eksenli izleme teknolojilerini entegre eden sistemlerden oluşmaktadır. Bu sistemler tipik olarak güneş takibinde farklı hassasiyet seviyeleri gerektiren belirli uygulamalar için kullanılır. Veriler hem tek hem de çift eksenli takip sistemleri için neredeyse eşit bir tercih olduğunu ve tek eksenli sistemlere doğru küçük bir eğilim olduğunu göstermektedir. Bu faktörler, maliyet, karmaşıklık ve verimlilik, güneş enerjisi projeleri için izleme sistemlerinin seçimini etkilemektedir. Veriler, güneş takip sistemlerinin sabit sistemlere kıyasla gün boyunca güneş enerjisini yakalamadaki üstün etkinliğini açık bir şekilde göstermektedir [54]. Takip sistemleri güneşin

konumuna uyum sağlayarak güneş enerjisi yakalamayı geliştirebilir ve bu da enerji toplamada önemli bir artışa neden olur. Bu, özellikle güneşin daha düşük bir açıda olduğu sabah ve öğleden sonra geç saatlerde avantajlıdır. Güneş takip sistemlerinin artan enerji yakalama kapasitesi, güneş ışınımının yüksek olduğu bölgelerde etkinliklerini artırır ve böylece daha sürdürülebilir ve verimli güneş enerjisi üretimini teşvik etmektedir. Bu analiz, enerji gereksinimlerini karşılamak veya güneş enerjisi teknolojisine yapılan yatırımın geri dönüşünü optimize etmek için güneş enerjisinin yakalanmasını en üst düzeye çıkarmanın gerekli olduğu alanlarda güneş takip cihazlarının dahil edilmesinin önemini vurgulamaktadır.



Şekil 5.8. İzleme sistemlerinin dağılımı [54].

Şekil 5.9, daha ayrıntılı bir kategorizasyona vurgu yaparak güneş takip sistemlerinde kullanılan birçok metodolojiyi göstermektedir. Bu kategoriler Azimut ve yükseklik takibi, Yatay takip, Çift eksenli takip, Azimut takibi, Kutupsal takip, Azimut ve yükseklik takibi, Azimut-eğim takibi, Yatay-dikey takip ve diğer yöntemlerden oluşmaktadır. Diğer kategorisi en küçük sektör olup toplamın sadece %2,22'sini oluşturmaktadır. Bir dizi uzmanlaşmış veya daha az sıklıkla kullanılan yaklaşımları kapsamaktadır. Şekil, yatay ve çift eksenli izleme sistemlerine yönelik önemli bir eğilimle birlikte bir dizi izleme yöntemini göstermektedir. Bu, sistemin karmaşıklığı ile güneş enerjisini yakalama verimliliği arasında bir denge olduğunu gösterirken, yatay izleme gibi daha basit yöntemler, uygun maliyetli ve uygulaması kolay olduğu için daha çok tercih edilmektedir [54].



Şekil 5.9. Çalışma prensiplerine göre izleme sistemlerinin dağılımı [54].

5.4.1. Aktif Takip Sistemi

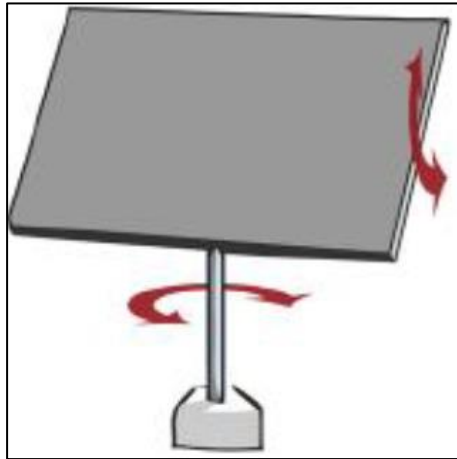
Aktif güneş takip sistemleri, güneşin konumunu aktif olarak takip etmek için motorlar ve sensörler kullanmaktadır. Bu sistemler güneş ışığını algılayan sensörler ve panelin konumunu güneşe en uygun şekilde bakacak şekilde otomatik olarak değiştiren motorlarla donatılmıştır. Bu değişiklik, güneş panellerinin aldığı güneş ışığı miktarını optimize eder ve böylece panellerin verimliliğini büyük ölçüde artırmaktadır [55]. Uygulama türüne ve izleme entegrasyonu için seçilen optik tasarıma bağlı olarak harici güneş takibi günümüzde gerekliliği taşımaktadır. Harici güneş takibini en aza indirmenin belirgin bir dezavantajı, özellikle sabit güneş panelleri için dikkate değer olan eksen dışı kosinüs kayıplarının neden olduğu yıllık güneşlenmeyi azaltmasıdır [56].

Şekil 5.10'da dünyanın dönme eksenini ile hizalanmış tek eksenli bir izleyiciyi göstermektedir.



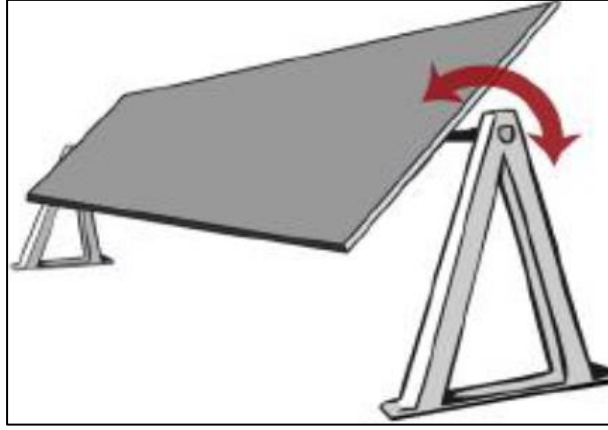
Şekil 5.10. Doğu-Batı eksenli takip sistemi [56].

Şekil 5.11'deki çift eksenli izleyiciler, modülleri sürekli olarak güneşle hizalayarak yıllık izolasyonu en üst düzeye çıkarmaktadır. Bununla birlikte, yıllık güneş radyasyonu miktarı ile kutuplara hizalanmış tek eksenli izleyiciler ve çift eksenli izleyici PV sistemler tarafından üretilen tahmini enerji miktarı karşılaştırıldığında, farklı Avrupa bölgelerinde gözlemlendiği gibi, farklılıklar oldukça küçük seviyededir [57].



Şekil 5.11. Çift eksenli takip sistemi [56].

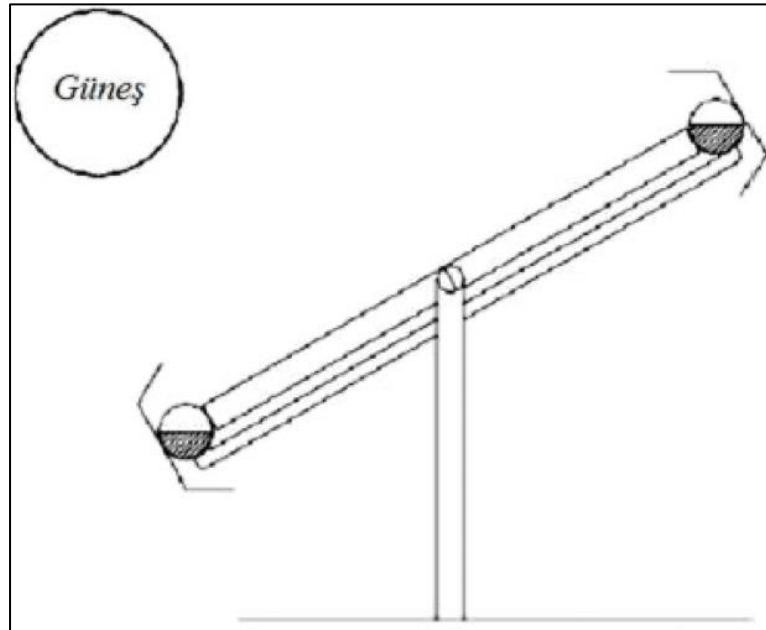
Şekil 5.12'de gösterilen yatay tek eksenli izleyiciler genellikle daha düşük yıllık güneş ışığına maruz kalmaktadır.



Şekil 5.12. Kuzey- Güney eksenli izleme sistemi [56].

5.4.2. Pasif Takip Sistemi

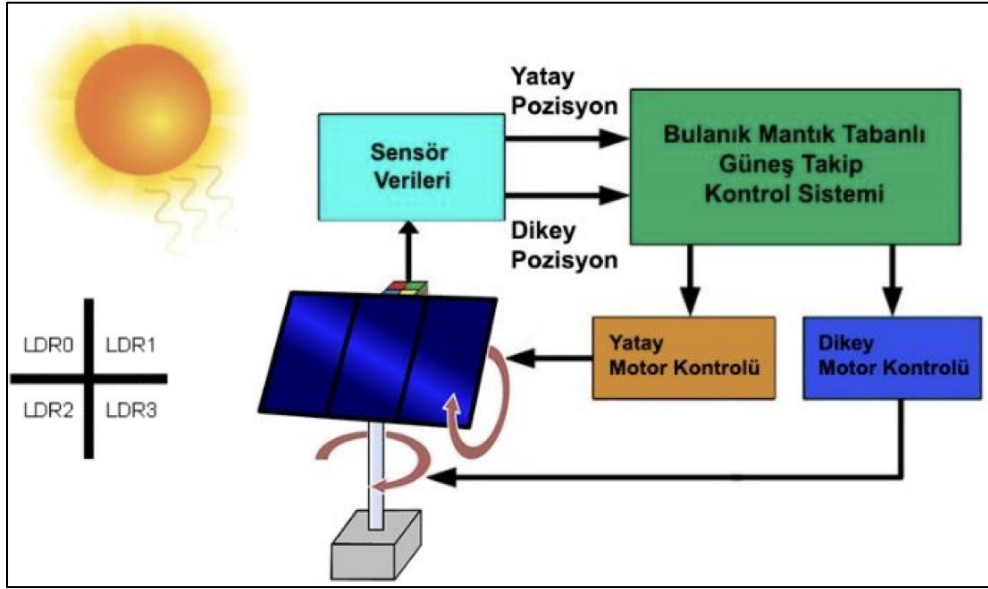
Pasif güneş takip sistemleri, güneşin hareketini izlemek için sıcaklığa duyarlı malzemelerden faydalanır. Bu sistemler motor veya diğer elektrikli bileşenleri içermez. Alternatif olarak, sıcaklık dalgalanmalarına tepki olarak genişleme veya büzülmeye uğrayan ve böylece paneli güneşe doğru otonom olarak hizalayan malzemeler kullanır. Bu sisteme ait şematik görsel Şekil 5.13'te verilmiştir. Daha az hassas olmalarına rağmen, bu cihazlar aktif sistemlere göre daha ekonomiktir ve güneş enerjisini toplamayı verimli bir şekilde artırmaktadır [55].



Şekil 5.13. Pasif takip sistemi modellemesi [55].

5.4.2. Bulanık Mantık Kullanılarak Verimlilik Arttırmaya Yönelik Tasarım

Bu sistemin amacı güneş izleme sistemi akıllı kontrol algoritmalarından bulanık mantık kullanılarak tasarlanmasıdır. Sistem mikro denetleyiciye bağlı dört ışık algılayıcısından alınan verilerin bulanık mantık kurallarına göre yorumlanması ile servo motorları kontrol ederek PV panelin güneş ışınlarını dik bir açı ile almasını sağlamaktadır. Bu sisteme ait şematik görsel Şekil 5.14'te verilmiştir. Matlab/Simulink ortamında tasarlanan kontrolör gerçek sistemi kontrol etmekte olup özellikle olumsuz hava koşullarında sistemin bulunduğu konumu koruyabilmesi sayesinde başarılı sonuçlar vermektedir. Bu izleme yöntemi ile PV sistemin elektrik üretme veriminde yaklaşık %9 oranında artış sağladığı yapılan çalışma sonuçlarından görülebilmektedir [58].

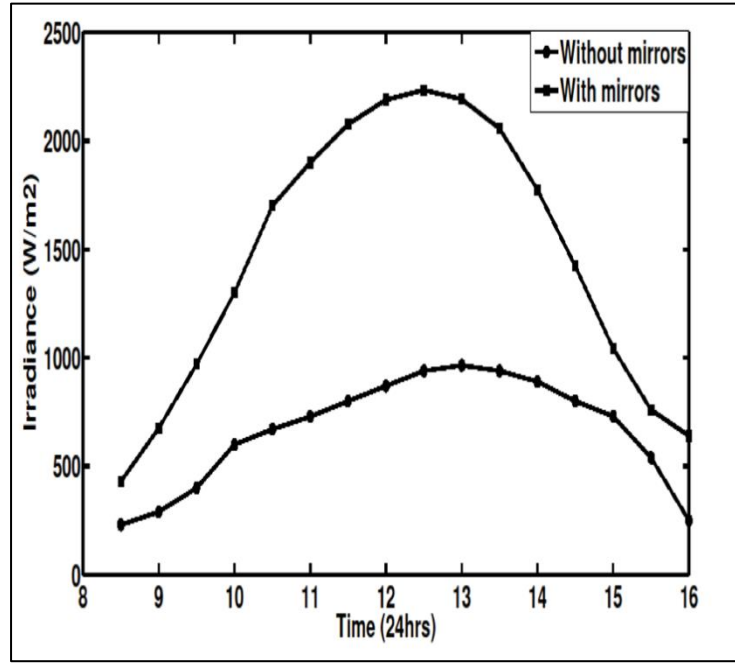


Şekil 5.14. Bulanık mantık tabanlı kontrol sistemi entegre edilmiş tasarım örneği [58].

5.4.3. Basit Aynalama ve Soğutma Kullanılarak Sistem Verimliliğini Arttırma

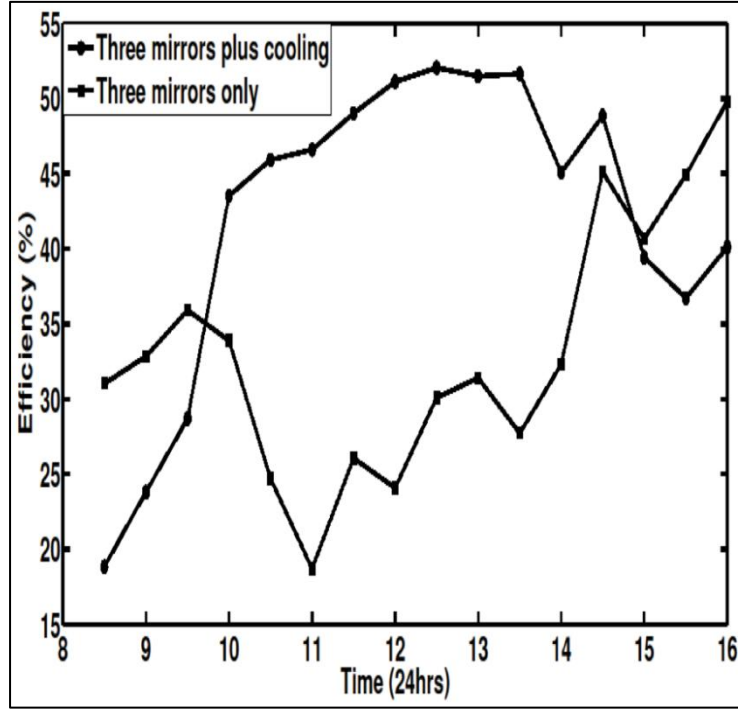
Yapılan bazı çalışmalarda basit aynalar ve bir soğutma sistemi kullanarak güneş panellerinin verimliliğini artırmak için farklı dizayn ve metotlar kullanılmıştır. Konsantre fotovoltaik teknolojisi (CPV) elektrik üretmek için güneş ışığının güneş hücreleri üzerindeki konsantrasyonunu kullanılmaktadır ve aynı güç çıkışını elde

etmek için gereken hücre sayısının azalmasını sağlamaktadır [59]. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklar PV modüllerinin performansını azaltmaktadır. Yapılan çalışmalarda incelenen ana dizayn parametreleri olarak 3 karşılaştırılma üzerinde durulmuştur. Bu çalışmalardan ilkinde aynalar ve soğutma kullanılmamıştır ve verimlilik ölçümleri alınmıştır. İkincisinde ise basit aynalamalar kullanılmıştır ancak soğutma işlemi yapılmamıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 5.15'teki gibi bir eğilim sergilemiştir.



Şekil 5.15. Ayna kullanımının verimliliğe etkisi [59].

Son işlemde ise hem ayna hem de soğutma işlemi yapılarak verimlilik ölçümleri alınmıştır. Aynalar soğutma ile birleştirildiğinde verimlilik Şekil 5.16'da sunulduğu gibi %52 oranında artmıştır [59]. Her iki yöntemin kombinasyonu, her bir yöntemin ayrı ayrı kullanılmasına kıyasla çok daha yüksek bir etkinlik seviyesi göstermiştir ve güneş panellerinde optimum verimliliğin sürdürülmesinde soğutmanın önemli rolünü vurgulamıştır.



Şekil 5.16. Soğutmanın verimliliğe etkisi [59].

5.5. IŞINIM ETKİSİ

Güneş enerjisi sistemleri güneşten gelen ışıklardan elde edilen enerjiyi kullanarak hava ve su ısıtıcıları, yoğunlaştırılmış enerji santralleri ve PV hücreler gibi çeşitli uygulamalarla ısı ve elektrik üretiminde önemli bir rol oynamaktadır [60–62]. Ayrıca fotosentez gibi doğal süreçlerin de ihtiyacı olan enerji sağlar. Güneş enerjisi bol, temiz ve yıl boyunca mevcut olup, fosil yakıt maliyetlerinin artması ve fosil yakıt kullanımıyla ilgili çevresel endişeler karşısında önemli bir alternatif haline gelmektedir [63]. Güneş ışınları dünyaya farklı spektrumlarda ışınlarla ulaşmaktadır. Bu ışınımın %45'i görünür ışık dalga boyunda, %9'u mor ötesi ve kalan bölümü de kızılötesi dalga boyu bölgesinde yer almaktadır. 1 m² alana dik olarak ulaşan ışın miktarı 1367 W/m²'dir [53]. Atmosfere ulaşan güneş radyasyonu metrekare başına 342 Watt'lık bir büyüklüğe sahiptir. Çevremiz için tek ve etkili ısı kaynağı olan güneş radyasyonu saçılma, kırılma, yansıma ve soğurulma gibi çoklu dönüşüm ve hareketlere uğramaktadır. Güneş radyasyonunun etkilerinin analizi, 342 W/m²'lik toplam güneş radyasyonunun 77 W/m²'sinin bulutlar tarafından yansıtıldığını ve ilave 30 W/m²'nin Dünya'nın albedosu olarak adlandırılan Dünya yüzeyi tarafından yansıtıldığını göstermektedir ve atmosfer geri kalan 67 W/m²'yi absorbe etmektedir.

Eş zamanlı olarak, Dünya yüzeyi 168 W/m^2 güneş radyasyonunu absorbe etmektedir ve enerji miktarı atmosfere giren ve hemen Dünya yüzeyine ulaşan enerjinin birincil kısmını oluşturmaktadır. Isınan hava yukarı doğru hareket ettiğinde, konveksiyon yoluyla gizli ısı açığa çıkarır ve bu da 24 W/m^2 'lik bir transferle sonuçlanmaktadır. Buna ek olarak, evapotranspirasyon 78 W/m^2 'lik bir salınım katkıda bulunmaktadır. Toprak tarafından alınan toplam enerjinin metrekare başına 102 Watt 'ı atmosfere geri boşaltılır. Atmosfer 67 W/m^2 güneş enerjisi ve yüzeyden yansıyan 350 W/m^2 enerji alır. Uzaya 195 W/m^2 ve toprağa 324 W/m^2 enerji yayar. Toprak tarafından 168 W/m^2 absorbe edildikten sonra geriye kalan 68 W/m^2 enerji, atmosfere ulaşan 390 W/m^2 enerji ile geri yansıyan 324 W/m^2 enerjiyi eşitlemeye yarar.

Atmosferin güneş radyasyonu tarafından doğrudan ısıtılması, sıcak bir üst atmosfer ve dünya yüzeyi de dahil olmak üzere soğuk bir alt yarı oluşturmaktadır. Bu sonuç dikey hava akışını engellemektedir. Coğrafi enlem ile kara ve denizlerin varlığı, dünyanın sıcaklığının dağılımı üzerinde açık bir etkiye sahiptir. Genel olarak, ekvator dan kutuplara doğru gidildikçe sıcaklıkta bir azalma meydana gelmektedir.

5.6. ÇİFT TARAFLI (BIFACIAL) PV PANELİ

Çift taraflı bir fotovoltaik panelin (iki yüzeyli modül) çalışma prensibi normal güneş paneli ile aynıdır. Bu panel üzerinde de güneş pilleri tarafından doğrudan emilen ve elektriğe dönüştürülen güneş pilleri vardır. Güneş panelinin üzerine düşen güneş ışınları, güneş pili tarafından emilir ve emilemeyen kısım ise çevre ortama yansır. Ancak bu noktada iki yüzeyli panel ile tek yüzeyli paneller birbirine göre farklılık sergilemektedir. Bu farklılık arz eden nokta iki yüzeyli panelde bu kayıp ışığın panel tarafından yeniden soğurulma olasılığının yüksek olmasıdır. Işığın doğrudan içinden geçtiği ve oldukça yansıtıcı bir yüzeyle çarpıştığı durumda daha sonra güneş enerjisine dönüştürülmek üzere panellere doğru geri döner. Güneş pillerinin her iki tarafının da güneş ışığına maruz kalması sonucunda çift yüzeyli güneş panelleri güneş enerjisi daha fazla faydalanır ve daha fazla elektrik üretmektedir [64].

Çift taraflı panellerin avantajı, sadece yerden yansıyan ışığı değil, çeşitli ortamlardaki ışığı emebilmeleridir. Çift taraflı güneş panelleri, yüksek oranda yansıtıcı yüzeylerin yakınına kurulduğunda en iyi performansı göstermektedir. Bu sistemler yüzme havuzları gibi cam, kumlu, taşlı yerler veya karlı alanlarda elektrik üretim verimi daha fazla olabilmektedir. Doğru yerleşim ve doğru uygulama ile yerleştirilen çift taraflı güneş panelleri, diğer panellere göre yaklaşık %30 civarında daha fazla verim sağlamaktadır. Çift yüzey plakalarının en önemli çalışma mantığı, arka yüzeylerde ve ön panellerdeki maksimum plakalarda gölgelemeyi azaltmaktır. Bu bağlamda ele alınan çift yüzlü güneş panelinin temsili görseli Şekil 5.17’de verilmiştir [64].



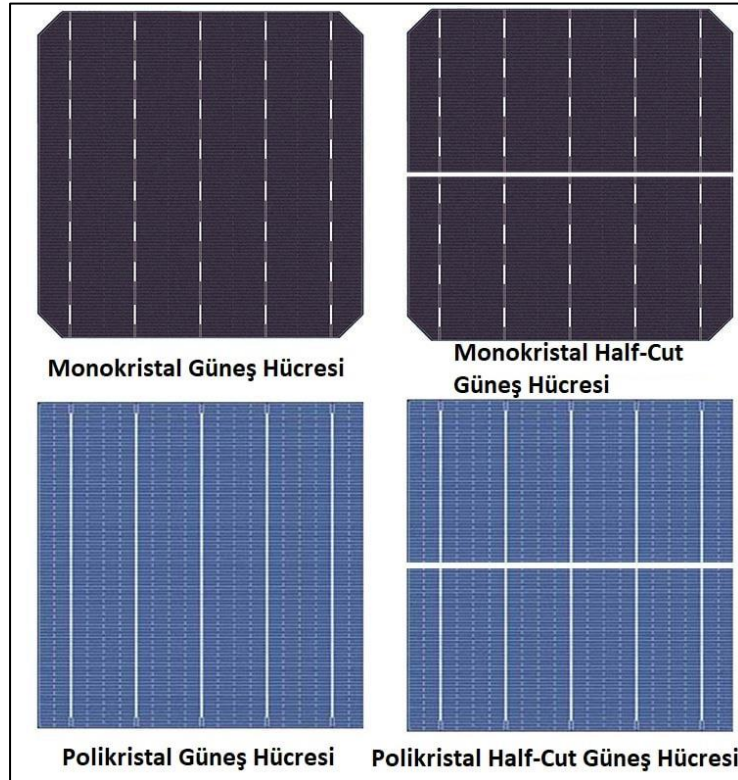
Şekil 5.17. Çift yüzlü (bifacial) güneş paneli [64].

5.7. GPS TABANLI ÇİFT EKSEN ARDUINO GÜNEŞ TAKİP SİSTEMİ

Güneş ışınlarını GPS tabanlı çift eksenle takip edebilen Arduino Güneş Takip Sistemi piyasada veya internette araştırdığımızda geliştirilen güneş takip sistemlerinin hemen hemen hepsi LDR teknolojisini kullanan projelerdir. Ancak LDR’li sistemler kısmen güneşi takip etmektedir ve sistem duyarlılığı düşüktür. Bu cümlede ifade edilen duyarlılık kelimesi sistem kararlılığı olarak düşünülmelidir. Bir PV sistemi dış ortam değişkenlerinden ne kadar az etkileniyor ve sistemsel güneş açısı değerlerinin hata değeri sapmaları ne kadar az ise duyarlılığının ve kararlılığının yüksek olduğunda bahsedebiliriz [65].

5.8. HALF-CUT GÜNEŞ PANELİ KULLANIMI

Half-Cut, ifadesi dilimizde yarı-kesim anlamına gelmektedir. Bu ismi almasının sebebi de standart güneş hücrelerinin özel bir teknoloji kullanılarak ikiye kesilmesidir. Buradaki hücre kesiminin amacı ise standart güneş paneline göre daha fazla güneş hücresine sahip bir güneş paneli oluşturmaktır. Paneldeki bypass diyotları da üst ve alt kısmı birbirinden ayıracak şekilde ortada yer almaktadır. Panel bu şekilde alt ve üst kısım olarak da ikiye ayrılmaktadır ve alt ile üst kısım birbirinden bağımsız olarak çalışmaktadır. Bu da PV panelde daha az iç direnç, daha yüksek enerji çıkışı ve gölgelenme sonucu daha az verim kaybı anlamına gelmektedir. Geleneksel monokristal güneş panelleri genellikle 60 ile 72 adet arası güneş hücresine sahip iken, bu hücreler de ikiye kesildiğinde hücre sayıları da iki katına çıkmaktadır. Yani half-cut güneş panelleri 120 ile 144 adet güneş hücresine sahiptir ve genellikle de daha yüksek modül verimliliği sağlayan PERC teknoloji ile üretilmektedir. Half-cut teknolojisi ile üretilen güneş hücrelerinin tekdüze güneş hücreleri ile görsel kıyaslanması Şekil 5.18’de verilmiştir [66].



Şekil 5.18. Half-cut hücre teknolojisinin yapısal kıyaslaması [66].

5.9. PV PANEL TEMİZLİĞİ

Güneş enerjisi santrallerindeki PV paneller açık havada pek çok kirletici etkiye maruz kalmakta ve panel üzerinde oluşan bu kir tabakası panel üzerine düşen ışınımı azaltmaktadır. Dolayısıyla bu kirin, panel performansına direk ve dolaylı etkisini görmek mümkündür. Bu tez çalışması kapsamında performans incelemesi yapılan Mersin ilindeki AKY Teknoloji firmasına ait PV sistem üzerinde kirlenme faktörünün performansa etkisi ele alınmıştır. İnceleme kapsamında iki farklı deney metodu üzerinden analizler yürütülmüştür; a) aynı panel özelinde standart test koşullarına uyarlanmış üretim değerlerinin temiz durum ve kirli durumdaki değerlerinin kıyaslanması, b) santral üretimi bazında günlük maksimum güç çıkışlarının incelenmesi.

İncelemeye alınan PV panelin teknik bilgileri Çizelge 5.1’de, elde edilen ölçüm sonuçları ise Çizelge 5.2’de verilmiştir. Ayrıca yaklaşık yarım saat ara ile kayıt altına alınan PV panellerinin temiz ve kirli durumlarına ilişkin temsili görselleri ise Şekil 5.19’da paylaşılmıştır.

Çizelge 5.1. Mersin ilinde yer alan AKY Teknoloji GES’ine ait PV panelin teknik bilgileri.

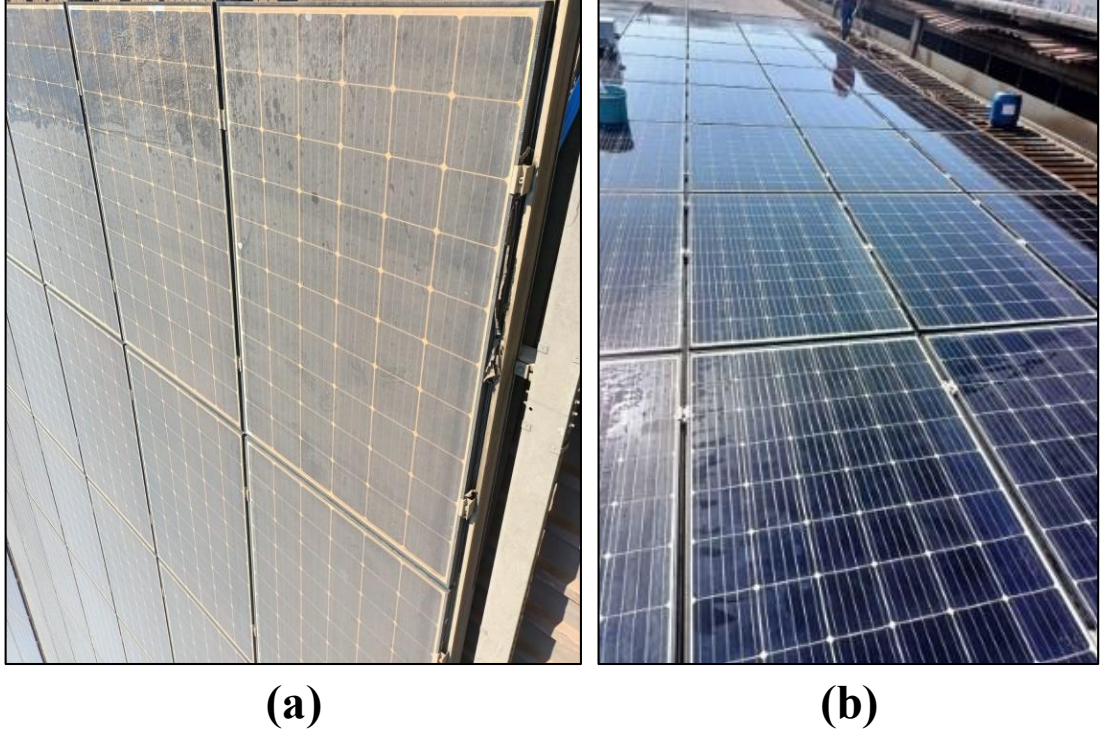
P_{MPP} STC (W)	V_{OC} STC (V)	I_{SC} STC (A)	Çarpım	Verim
265	38,01	8,94	339,81	%78,1

Çizelge 5.2. Mersin ilinde yer alan AKY Teknoloji GES’inin kirli ve temiz yüzey durumlarına ait çalışma verileri.

Panel Durumu	Tarih ve Saat	Işınım (W/m²)	Hücre Sıcaklığı (°C)	V_{OC} OPC (V)	I_{SC} OPC (A)
Kirli	26.7.2024 09:28	738	49,80	33,70	6,13

Çizelge 5.2. (devam ediyor).

Temiz	26.7.2024 09:51	817	49,60	33,60	7,14
-------	--------------------	-----	-------	-------	------



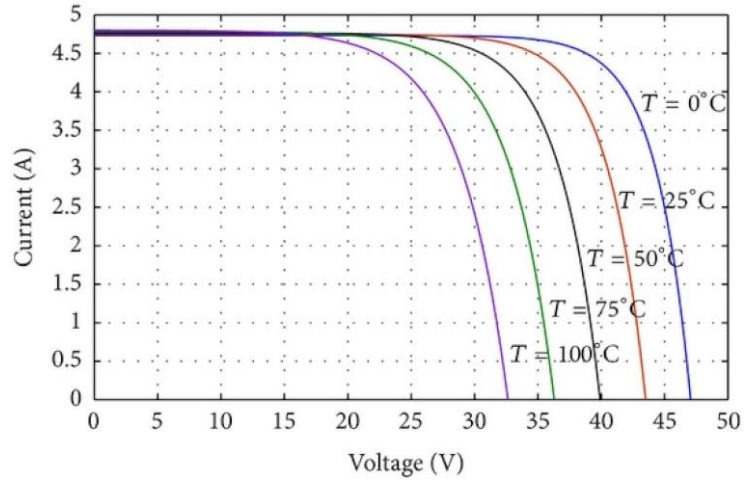
Şekil 5.19. Mersin ilinde yer alan AKY Teknoloji GES'inin; (a) kirli ve (b) temiz yüzey durumlarına ait görseller.

Temizliğin etkisinin rahatlıkla gözlemlenebildiği Çizelge 5.2'de ölçüm değerleri ve kıyaslamaları aşağıdaki şekilde görmek mümkündür.

5.10. SICAKLIĞIN VERİME ETKİSİ

Güneş enerji santrallerinde sıcaklığın önemi ve paneller üzerindeki etkisi önemlidir. Fotovoltaik sistemlerde güç çıkışı ile panel sıcaklığı ters orantılıdır. Panellerde sıcaklığın yükselmesiyle panellerden alınan güç azalmaktadır. Ortamdaki sıcaklığın yükselmesi ile panellerin içerisindeki hücrelerinde sıcaklığı yükseleceği için üretilen enerjide düşüş meydana gelmektedir. Sıcaklık parametresi ile PV panel kısa devre akımı artarken, bu artıştan daha büyük oranda açık devre gerilimi azalmaktadır (**SS**).

Fotovoltaik hücreler için 25°C sıcaklık 1.000 W/m^2 güneş ışınımı ve 1.5 AM (hava kütlesi) ideal test koşulu olarak kabul edilmektedir. Panellerin verimleri bu değerlere göre hesaplanmaktadır. Güneşten gelen ışınım ile elektrik üretimi başlamaktadır ancak panellerde meydana gelen kayıplardan dolayı güneşten gelen ışınım ile elde edilen enerjinin bir kısmı elektrik enerjisine dönüşürken bir kısmı da ısı enerjisine dönüşmektedir. Bu olayın sonucunda ise panellerde sıcaklık artışı meydana gelecektir. Panellerin ısınmasıyla serbest kalan elektronların hareketinden dolayı akım artışı meydana gelmekte ancak gerilim değeri düşmektedir. PV panellerde akım-gerilim ilişkisinin sıcaklık ile değişimi Şekil .20'de gösterilmiştir (SS).



Şekil 5.20. PV panellerin sıcaklığa bağlı olarak akım-gerilim düşüşü grafiği (SS).

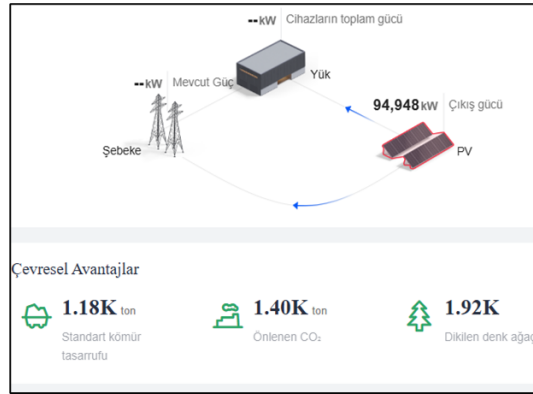
BÖLÜM 6

ÖRNEK GES ANALİZLERİ

Tezin bu bölümünde Türkiye'nin farklı enlem ve boylamlarında yer alan ve farklı güneşlenme sürelerine ve ışın geliş açlarına sahip üç farklı ilde (Mersin, Kahramanmaraş, Kilis ve Ardahan) kurulumu yapılan GES'lerin kurulumu ve performanslarının iyileştirilmesine yönelik yapılan uygulamaların karşılaştırılması yapılmıştır. Mersin ilinde AKY Teknoloji firması için yapılan bir proje kapsamında bir fabrikanın 724 kWp DC ve 600 kWe AC ihtiyaçlarına binaen bir GES kurulumu yapılmıştır. Proje ile birlikte, yıllık olarak 1.123.000 kWh (1.123 MGW) enerji üretimi sağlanmaktadır. Türkiye'de üretilen 1MWh elektrik enerjisi üretimi sırasında atmosfere salınan CO₂ miktarının 0,439 ton olduğu kabul edildiğinde, sistemin devreye alınması ile birlikte 493 ton CO₂/yıl miktarındaki sera gazı emisyonunun önüne geçilmektedir. Bu projede daxler olarak Half-Cut teknolojilerine sahip yeni 182 mm hücreli panel kullanılmıştır ve bu son teknoloji sayesinde modül verimliliği ve güç çıkışı en yüksek seviyede tutulmuştur. Kullanılan bu son teknoloji Half-Cut güneş paneli, geleneksel fotovoltaik panellere göre farklı bir hücre tasarımıyla üretildiği için verim açısından ön plana çıkmaktadır. Bu paneller, standart güneş hücrelerinin ikiye kesilmesiyle birlikte daha fazla hücre sayısına sahip olmaktadır. Bu tasarım, panelin gölgelenme gibi olumsuz koşullarda bile enerji üretmeye devam etmesini sağlamaktadır ve GES'in genel verimliliğini artırmaktadır. Bu tür paneller, özellikle gölgelenmenin sık olduğu bölgelerde daha iyi performans göstermektedir. Half-Cut hücrelerdeki özel tasarım, elektrik üretim verimliliğini artırmakta, enerji kaybını azaltmakta ve uzun ömürlü bir kullanım imkânı sunmaktadır. Bu özellikler, Half-Cut güneş panellerini hem bireysel kullanıcılar hem de ticari uygulamalar için faydalı bir performans ortaya koymaktadır. Verilen bu tasarım bilgileri ışığında kurulumu yapılan GES'in görseli Şekil 6.1'de, sistem üretim ve diğer parametrelerine yönelik veriler ise Şekil 6.2'de verilmiştir.



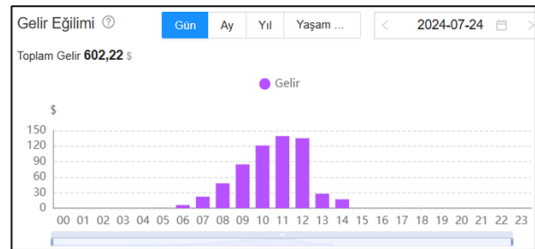
Şekil 6.1. Mersin iline AKY Teknoloji firması için kurulumu yapılan GES'in temsili gösterimi.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.2. Mersin iline AKY Teknoloji firması için kurulumu yapılan GES'in; (a) toplam güç ve çevresel fayda değerleri, (b) yıllık enerji eğilimi ve (c) günlük gelir eğilimi.

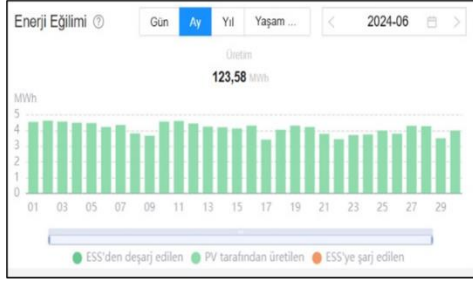
Mersin ilinde Çetintaş Çelik A.Ş. firmasının tüketim ihtiyaçlarına özel olarak tasarlanan projede GES mevcut çatı eğimine göre çift yönlü güney batı ve kuzey doğu yönlerine göre tasarlanmıştır. Ayrıca çatı ve panel arası mesafe 8 cm olacak şekilde kurulum yapılmış olup, bu sayede hava akışının daha sağlıklı gelişmesinden dolayı panellerin soğutulması ve verimliliğinin sıcaklık kaynaklı azalmasının önüne geçilmiştir. Bu projede de Half-Cut teknolojilerine sahip yeni 182 mm hücreli panel kullanılmıştır. Projenin tamamlanmasıyla birlikte yıllık olarak 1.314.000 kWh (1.314 MGW) enerji üretimi sağlanmaktadır ve bu elektrik üretimi yıllık olarak 576 ton CO₂ 'nin sera gazı olarak salınımını engellemektedir. Kurulumu yapılan GES'in temsili görseli Şekil 6.3'te, sistem üretim ve diğer parametrelerine yönelik veriler ise Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.3. Mersin iline Çetintaş Çelik A.Ş. firması için kurulumu yapılan GES'in temsili gösterimi.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.4. Mersin iline Çetintaş Çelik A.Ş. firması için kurulumu yapılan GES'in; (a) toplam güç ve çevresel fayda değerleri, (b) yıllık enerji eğilimi ve (c) günlük gelir eğilimi.

Kahramanmaraş ilinde yapılan Lidaş A.Ş. için yapılan proje kapsamında fabrikanın 1.215 kWp DC ve 950 kWe AC ihtiyaçlarına yönelik bir GES tasarlanmıştır. Projenin tamamlanmasıyla birlikte, yıllık olarak 2.257.875 kWh (2.257 MGW) enerji üretimi sağlanmaktadır. Karbon salınımı ile ilgili sağlanacak fayda bu proje içinde göz önüne alınırsa yıllık olarak 990 ton CO₂ 'nin miktarındaki sera gazı emisyonu engellenmektedir. Bu projede Half-Cut teknolojilerine sahip yeni 182 mm hücreli panel kullanılmıştır. Bu projede ayrıca çatı eğimleri de dikkate alınmıştır. Çatının eğim ve yön bilgisi sistem tasarımı için çok önemli bir parametre olup, çatının tek yöne ve güneye eğimli olması kritik bir önem taşımaktadır. Bu nedenle projenin inşaat aşamasında kurulum yapılacak çatı tek eğim-güney yönüne göre tasarlanmıştır. Ayrıca çatı ile güneş paneli arasındaki mesafe büyük olacak şekilde sistem tasarımı yapılmıştır ve bu durum panellerin daha verimli çalışmasını sağlamıştır. Verilen bu tasarım bilgileri ışığında kurulumu yapılan GES'in görseli Şekil 6.5'te sunulmuştur.

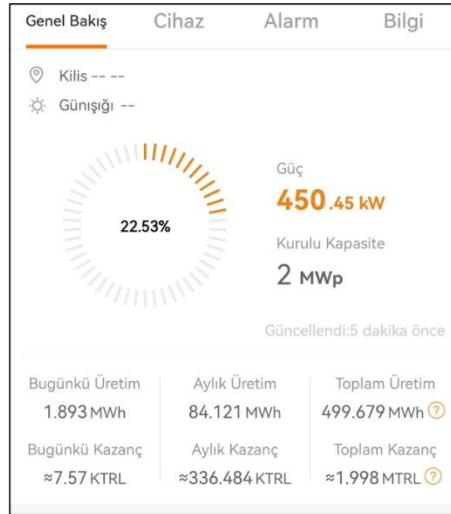


Şekil 6.5. Kahramanmaraş iline Lidaş A.Ş. için kurulumu yapılan GES'in temsili gösterimi.

Kilis ilinde Yağız Plastik A.Ş. firmasının ihtiyaçlarına özel olarak tasarlanan projede, arazi eğimi tek yönlü güneye bakacak şekilde tasarlanmış ve ayrıca güneş panelleri bu ilde en verimli açı olan 26° derece ile yatay konumda yerleşim yapılarak dizayn edilmiştir. Panel kurulum açısının performans üzerindeki etkisine bakıldığında panellerin bu açı yerine 15° 'lik açı ile kurulması elektrik üretim miktarında yaklaşık %20 kayba sebebiyet vermektedir. Bu projenin tamamlanmasıyla birlikte, yıllık olarak 2.257.875 kWh (2.257 MGW) enerji üretimi sağlanacaktır. Karbon salınımı ile ilgili sağlanacak fayda bu proje içinde göz önüne alınırsa yıllık olarak 990 ton CO₂'nin miktarındaki sera gazı emisyonu engellenmektedir. Verilen bu tasarım bilgileri ışığında kurulumu yapılan GES'in görseli Şekil 6.6'te, sistem kapasite ve üretim parametrelerine yönelik veriler ise Şekil 6.7'te verilmiştir.



Şekil 6.6. Kilis ilinde Yağız Plastik A.Ş. için kurulumu yapılan GES'in temsili gösterimi.



(a)



(b)

Şekil 6.7. Kilis ilinde Yağız Plastik A.Ş. için kurulumu yapılan GES'in; (a) anlık güç üretimi ve (b) kümülatif enerji üretim değerleri.

Ardahan'da Hanak Belediyesine ait tüketim ihtiyaçlarına özel olarak tasarlanan projede ise arazi üzerine Tracker sistem tasarımı yapılmıştır. Tracker sistemi bir GES'in etkinlik, verimlilik ve güvenlik açısından en üst düzeyde çalışmasını sağlamaktadır. Projenin tamamlanmasıyla birlikte, yıllık olarak 2.930.000 kWh (2.930 MGW) enerji üretimi yapılabilmektedir ve bu üretim miktarı yaklaşık 1.286 ton CO₂ salınımı engellemektedir. Bu sistemde ELİN SİRİUS-MBB HC monokristalin FOTOVALTAYİK MODÜL 535-550W- Mutli-Busbar ve Half-Cut teknolojilerine sahip 182 mm hücreli paneller kullanılmıştır. GES'te yer alan tracker sistemi, güneşi doğudan batıya otomatik olarak takip ederek panellere düşen ışığı dik bir açıyla tutarak elektrik enerjisi üretiminde verimi artırmayı amaçlamaktadır. Bu sistemler, güneş panellerinden elde edilen elektrik enerjisinde %40'a kadar artış sağlayabilmektedir ve yıl boyunca tüm mevsimlerde güneşin konumunu izleyerek enerji kayıplarını en aza indirmektedir. Verilen bu tasarım bilgileri ışığında kurulumu yapılan GES'in görseli Şekil 6.8'de verilmiştir.



Şekil 6.8. Ardahan ilinde Hanak Belediyesi için kurulumu yapılan GES'in temsili gösterimi.

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında ele alınan ve aynı coğrafya koşullarında AKY Teknoloji firmasına ve Çetintaş Çelik Sanayi firmasına kurulumu yapılan GES'lerin karşılaştırması bu bölümde yapılmıştır. AKY Teknolojiye kurulumu yapılan GES'te panelin çatı ile arası da ki kullanılan alt yapı profil yüksekliği 12 cm iken, bu mesafe Çetintaş Çelik Sanayi firmasına 8 cm'dir. Yapılan ölçüm ve takip sisteminden alınan verilere göre profil yüksekliği daha fazla olan AKY Teknoloji GES'inde hava kütle debisinin daha fazla olmasından dolayı panellerde ısınma kaynaklı verim düşüşlerinin daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bu iki GES'in çatı eğimleri eşit olmasına rağmen AKY Teknoloji GES'inden üretilen enerji miktarı Çetintaş Çelik Sanayi GES'inden elde edilen enerji üretim miktarı ile kıyaslandığında AKY Teknoloji GES'inin 2024 yıl dönemi Nisan ve Haziran ayları için sırasıyla %11,2 ve %12,9 daha fazla enerji ürettiği gözlemlenmiştir. Tesis performanslarına ilişkin dönemsel ayrıntılı kıyaslama Çizelge 7.1'de yer almaktadır.

Çizelge 7.1. Mersin ilinde yer alan AKY Teknoloji GES'i ile Çetintaş Çelik Sanayi GES'inin performans karşılaştırması.

Referans Zamanı (ay)	Nisan 2024		Haziran 2024	
	Çetintaş Çelik Sanayi	AKY Teknoloji	Çetintaş Çelik Sanayi	AKY Teknoloji
Kurulu Güç (kWe)	480	600	480	600
Kullanılan Panel Açısı	14°	14°	14°	14°
Kurulu Güç Göre Toplam Üretilen Enerji (kWe)	67680	94140	87500	123580

Çizelge 7.1. (devam ediyor).

1 MGW Göre Üretilen Enerji (kWe)	141000	156900	182292	205967
Kurulum Yapılan İl	Mersin	Mersin	Mersin	Mersin
Güneşlenme Süresi Yıllık Ortalama (Saat)	8,3	8,3	8,3	8,3
Işınım Miktarı (W/m ²)	535	535	535	535
Güneşlenme Süresine göre Işınım Miktarı (W/m ²)	4440,5	4440,5	4440,5	4440,5

KAYNAKLAR

1. Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y., and Uğurlu, İ., "Dünyada ve Türkiye’de Enerji Görünümünün Genel Değerlendirilmesi", *Mühendis Ve Makina*, 59 (692): 86–114 (2018).
2. Şenel, M. C., "Rüzgâr türbinlerinde güç iletim mekanizmalarının tasarım esasları-dinamik davranış", *Ondokuz Mayıs Üniversitesi*, (2012).
3. Doğanay, M. M., "MARDİN BÖLGESİ GÜNEŞ (FOTOVOLTAİK) ENERJİSİ POTANSİYEL ANALİZİ", *Uluslararası Batı Karadeniz Mühendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi*, 3 (1): 86–117 (2021).
4. Melike, D., "Güneş enerjisi santrallerinin incelenmesi ve verimlilik analizi", *Sakarya Üniversitesi*, (2019).
5. Toklu, E., "Overview of potential and utilization of renewable energy sources in Turkey", *Renewable Energy*, 50: 456–463 (2013).
6. Yılmaz, M., "Türkiye’nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi", *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4 (2): 33–54 (2012).
7. Özbektaş, S., Şenel, M. C., and Sungur, B., "DÜNYADA VE TÜRKİYE’DE YENİLENEBİLİR ENERJİ DURUMU VE KURULUM MALİYETLERİ", *Mühendis Ve Makina*, 64 (711): 317–351 (2023).
8. Rüştü, E., "Fotovoltaik Güç Sistemlerinde Performansın Modellenmesi.", *Muğla Üniversitesi*, (2000).
9. Taşkın, O. and Vardar, A., "Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Amfi Çatısının Güneş Elektriği Potansiyelinin Tahminlenmesi", *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 33 (1): 45–51 (2019).
10. Ceylan, M., "Kampüs Binalarında Şebekeden Bağımsız Bir Çati Üstü Fotovoltaik Sistem Tasarımı ve Benzetimi", *Enerji Enstitüsü*, (2018).
11. Tamış, Z. and Altıntaş, N., "Elazığ ilinde şebekeye bağlı 1036,8 kw fotovoltaik güneş enerjisi santralının ölçülen ve simüle edilen performans verilerinin analizi", *EMO Bilimsel Dergi*, 13 (2): 71–80 (2023).
12. Kınalı, M. Y., "Güneş Enerjisi Simülasyon Programlarının Gerçek Verilerle Doğruluk Analizi", *Konya Teknik Üniversitesi*, (2019).

13. Özcan, Ö. and İzgi, E., "Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Çatı Sisteminin Karşılaştırmalı Performans Analizi", *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23 (3): 127–140 (2020).
14. Ceylan, O. and Taşdelen, K., "Isparta İli için Fotovoltaik Programlarının Simülasyon Sonuçlarının Doğruluğunun İncelenmesi", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18 (3): 895–903 (2018).
15. Eissa, A.-S., SEZEN, S., and ÖZDEMİR, E., "Lisanssız Elektrik Üretiminde Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik Sistemlerin Performans Analizi", .
16. Tokul, A., "Amasya İli Koşullarında 1 MWp Kurulu Gücünde Yüzer Tip Ve Arazi Tipi Enerji Santrallerinin Karşılaştırmalı Analizi Ve Optimizasyonu", *Amasya Üniversitesi*, (2021).
17. Şimşek, S. and Uçum, M., "Düz Çatılarda Kullanılan Fotovoltaik Sistemlerin Simülasyon Yoluyla Tasarımı ve Performans Karşılaştırılmasının Yapılması", *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, (38): 529–533 (2022).
18. Ay, E. and Pamuk, N., "Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Farabi Yerleşkesindeki Elektrik Enerjisi İhtiyacının Güneş Enerjisi Santralleri Kurularak Elde Edilmesi ve Ekonomik Analizi", *Black Sea Journal Of Engineering And Science*, 6 (3): 173–184 (2023).
19. Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., and Gekas, V., "Environmental impacts from the solar energy technologies", *Energy Policy*, 33 (3): 289–296 (2005).
20. Peake, S., "Renewable Energy-Power for a Sustainable Future.", (2018).
21. Agency, I. E., "Benign Energy?: The Environmental Implications of Renewables", *OECD*, (1998).
22. Hestnes, A. G., "Building integration of solar energy systems", *Solar Energy*, 67 (4–6): 181–187 (1999).
23. Agency, I. E., "Technology Roadmap", (2019).
24. Ahmad, L., Khordehgah, N., Malinauskaite, J., and Jouhara, H., "Recent advances and applications of solar photovoltaics and thermal technologies", *Energy*, 207: 118254 (2020).
25. Internet: IRENA, "IRENA", <https://www.irena.org/Data> .
26. Türker, M., Berk, A., and Öztürk, H., "Güneş Enerjisinden Elektrik Üretiminin Sürdürülebilir Kalkınmaya Olan Sosyoekonomik Etkileri", *Book Of Proceeding 4th International Sustainable Development Congress*, (2023).
27. IEA, "Renewables", (2023).

28. Sethi, V. P., Sumathy, K., Yuvarajan, S., and Pal, D. S., "Mathematical model for computing maximum power output of a PV solar module and experimental validation", *Journal Of Fundamentals Of Renewable Energy And Applications*, 2 (2): 1–5 (2012).
29. Internet: LTD, "YENİLENEBİLİR ENERJİ-Şebeke Bağlantılı Sistemler", <http://2bltd.com.tr/solar.html> .
30. Internet: Web, M., "Ev İçin Kaç Adet Güneş Paneli Gerekliyor?: Off-Grid Örnek Hesaplama", <https://muhendis.web.tr/ev-icin-kac-adet-gunes-paneli-gerekliyor-off-grid-ornek-hesaplama/> .
31. Ugli, T. J. T., "The importance of alternative solar energy sources and the advantages and disadvantages of using solar panels in this process", (2019).
32. Internet: Sakarya Üniversitesi Katihal Fiziği Ders Notları, "Yarı İletkenlerde Enerji Seviyeleri ve Bant Yapıları", http://www.katih.al.sakarya.edu.tr/kutuphane/z_yi_lerde_enerji_bant.htm .
33. Cotter, J. E., Guo, J. H., Cousins, P. J., Abbott, M. D., Chen, F. W., and Fisher, K. C., "P-type versus n-type silicon wafers: prospects for high-efficiency commercial silicon solar cells", *IEEE Transactions On Electron Devices*, 53 (8): 1893–1901 (2006).
34. Xiao, S. and Xu, S., "High-efficiency silicon solar cells—materials and devices physics", *Critical Reviews In Solid State And Materials Sciences*, 39 (4): 277–317 (2014).
35. Altaş, İ. H., "Fotovoltaik Güneş Pilleri : Yapısal Özellikleri ve Karakteristikleri", *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 47: 66–71 (1998).
36. Turhanoğulları, Z., "Antalya ilinde sera işletmelerinde çalışma koşullarının işçi sağlığı ve iş güvenliği açısından değerlendirilmesi", *Akdeniz Üniversitesi*, (2013).
37. Eruz, Ü. G., "Güneş paneli çeşitlerinden polikristal, monokristal ve thin film panellerinin Karabük şartlarında verimlilik karşılaştırılması", *Karabük Üniversitesi*, (2015).
38. Kayri, İ., "Fotovoltaik Uygulamalar İçin Kararlı Tek Eksenli Bir Güneş Takip Sistemi Tasarımı ve Uygulaması", *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28 (2): 432–450 (2023).
39. Köse, S., "Yarıiletken güneş pilleri ve verimlilikleri", *Anadolu University (Turkey)*, (1986).
40. Vakfı, T. E., "Güneş-Elektrik Dönüşümleri: Fotovoltaik Güneş Gözeleri ve Güç Sistemleri", *Temiz Enerji Vakfı*, (2001).

41. Boz, O. H., "Günümüzün alternatif enerji kaynağı: Fotovoltaik güneş pilleri", *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2011).
42. Sio, H. C. and MacDonald, D., "Direct comparison of the electrical properties of multicrystalline silicon materials for solar cells: conventional p-type, n-type and high performance p-type", *Solar Energy Materials And Solar Cells*, 144: 339–346 (2016).
43. Öztürk, H. H. and Kaya, D., "Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi: Fotovoltaik Teknoloji", *Umuttepe Yayınları*, (2013).
44. Wang, C. and Lu, Y., "Solar Photovoltaic", (2016).
45. Sayın, S. and Koç, İ., "GÜNEŞ ENERJİSİNDEN AKTİF OLARAK YARARLANMADA KULLANILAN FOTOVOLTAİK (PV) SİSTEMLER VE YAPILARDA KULLANIM BİÇİMLERİ", *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 26 (3): 89–106 (2011).
46. Alaçakır, B., "Didim’de Kurulan Şebeke Bağlantılı Güneş Pili Sisteminin Tanıtılması ve Performansının İncelenmesi", *Güneş Günü Sempozyumu, Kayseri*, 25–27 (1999).
47. Durgut, T., "Güneş panel sistemi için farklı bir method geliştirilmesi", (2015).
48. Erat, A., "Fotovoltaik panel yüzey temizliği için akıllı sistem tasarımı", *Necmettin Erbakan University (Turkey)*, (2018).
49. Altınbaş, M., "Elektrostatik Yöntemle Güneş Panelinin Temizlenmesi", (2021).
50. Karamanav, M., "Güneş enerjisi ve güneş pilleri", *Sakarya Üniversitesi (Turkey)*, (2007).
51. Gezgin, Ç. D., "Güneş panellerinde, güneş takip sistemlerinin ve panel kirliliğinin panel verimliliğine etkisinin incelenmesi", (2023).
52. Duffie, J. A., Beckman, W. A., and Blair, N., "Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind", *John Wiley & Sons*, (2020).
53. Gönültaş, E., "Güneş enerjisi santrallerinin tasarımı ve performans analizi", *Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2016).
54. Hafez, A. Z., Yousef, A. M., and Harag, N. M., "Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types--A review", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 91: 754–782 (2018).
55. Oral, G. and Uçan, O. N., "Güneş takip sistemleri ve prototip gerçekleştirme", *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi*, 4 (15): 1–14 (2012).

56. Duerr, F., Meuret, Y., and Thienpont, H., "Tailored free-form optics with movement to integrate tracking in concentrating photovoltaics", *Optics Express*, 21 (103): A401--A411 (2013).
57. Huld, T., Cebecauer, T., Šúri, M., and Dunlop, E. D., "Analysis of one-axis tracking strategies for PV systems in Europe", *Progress In Photovoltaics: Research And Applications*, 18 (3): 183–194 (2010).
58. Şenol, A., Ekren, O., and Sahin, S., "Güneş Takip Sistemlerinde Bulanık Mantık Kontrolü", *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, (24): 268–273 (2021).
59. Arshad, R., Tariq, S., Niaz, M. U., and Jamil, M., "Improvement in solar panel efficiency using solar concentration by simple mirrors and by cooling", (2014).
60. Chaichan, M. T. and Abaas, K. I., "Productivity amelioration of solar water distillator linked with salt gradient pond", *Tikrit Journal Of Engineering Sciences*, 19 (4): 24–35 (2012).
61. Chaichan, M. T., Abass, K. I., Al-Zubidi, D. S. M., and Kazem, H. A., "Practical investigation of effectiveness of direct solar-powered air heater", *International Journal Of Advanced Engineering, Management And Science*, 2 (7): 239558 (2016).
62. Kazem, H. A., Hasson, F., and Chaichan, M. T., "Design and analysis of stand-alone solar photovoltaic for desert in Oman", (2013).
63. Al-Maamary, H. M. S., Kazem, H. A., and Chaichan, M. T., "The impact of oil price fluctuations on common renewable energies in GCC countries", *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 75: 989–1007 (2017).
64. Internet: Enerji, O., "Çift Taraflı (Bifacial) Fotovoltaik Güneş Panellerinin Uygulama Alanları Genişliyor", <https://onurenerji.com.tr/haberler/cift-taraflı-bifacial-fotovoltaik-gunes-panellerinin-uygulama-alanlari-genisliyor/> .
65. Internet: TEMIRLABS, "Arduino GPS Modülü Kullanımı", <https://temirlabs.com/arduino-gps-modulu-kullanimi-gy-neo6mv2/> .
66. Internet: Güneş, "Half-Cut Güneş Paneli", <https://www.gunes.net.tr/sozluk/half-cut-gunes-paneli-nedir/> .

ÖZGEÇMİŞ

Bülent AKAY, ilköğretimimi Kilis Mehmet Ferhat Koçarsalan İlkokulunda 1988 yılında tamamlamıştır. 1989 yılında Kilis Endüstri Meslek Lisesi Ortaokul Bölümünde eğitimime devam eden Bülent Akay, aynı okulun Lise Elektrik bölümünden 1995 yılında mezun olmuştur. 1995 ile 2000 yılları arasında özel sektörde Kontrol Panoları ve Halı Üretim Makinelerine ait kumanda panoları üzerinde çalışmaya devam etmiştir. 2000 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Makine Ana Bilim Dalını Tesisat Öğretmenliğini Bölümünü kazanarak eğitim hayatına devam etmiştir. Bu bölümden 2004 yılında mezun olduktan sonra Bursa'da bulunan Koşal Mühendislik Firmasında işe başlamış ve 2007 yılına kadar Proje Sorumlusu olarak görev yapmıştır. 2007 ve 2010 yılları arasında ise Gaziantep Tiryaki AGRO A.Ş firmasında İşletme Müdür Yardımcılığı görevini yürütmüştür. 2010 ve 2019 yılları arasında ise Sarıbal Grup firmasında Genel Müdür görevini icra etmiştir. 2019 ve 2022 yılları arasında MTKC Enerji Firmasında Yenilenebilir Enerji sektöründe Proje Yatırım Müdürü olarak görev yapmıştır. 2022 yılında Akay Pro Enerji adıyla kendi firmasını kuran Bülent Akay Yenilenebilir Güneş Enerji Santralleri ve Rüzgâr Türbinleri üzerine çalışma hayatını sürdürmektedir.