



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE HÜCRE
SICAKLIĞININ PANEL VERİMİ ÜZERİNDEKİ
ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK
ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sinem AYYILDIZ DEMİR

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi İsmail KAYRI

Ocak-2023
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Sinem AYYILDIZ DEMİR tarafından hazırlanan “**Fotovoltaik sistemlerde hücre sıcaklığının panel verimi üzerindeki etkisinin deneysel olarak araştırılması**” adlı tez çalışması 10/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dal’ında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Hüseyin AYDIN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi İsmail KAYRI

Üye

Doç. Dr. Melih KUNCAN

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Osman PAKMA
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all materials and results that are not original to this work.

İmza

Sinem AYYILDIZ DEMİR

Tarih: 10.01.2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE HÜCRE SICAKLIĞININ PANEL VERİMİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Sinem AYYILDIZ DEMİR

**BATMAN ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmail KAYRI

2023, 116 Sayfa

Jüri

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İsmail KAYRI

Prof. Dr. Hüseyin AYDIN

Doç. Dr. Melih KUNCAN

En önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisinden PV teknolojileri aracılığıyla elektrik üretimi, dünya genelinde özellikle son on yıl içinde artan bir ivmeyle devam etmektedir. PV uygulamalarının performansı, temelde en önemli sistem bileşenlerinden olan modüllerin enerji dönüştürme oranıyla yakından ilgilidir. PV hücre teknolojilerinin verimleri gün geçtikçe artmasına rağmen, bu artış umulan hızda gerçekleşmemektedir. Bu durum PV sistemlerin beklenen düzeyin altında performanslara sahip olmasına neden olmaktadır. Fotovoltaik sistemlerin güç çıkışı; panel alanı, panel konfigürasyonu, panellerin yatay yüzeye yerleştirilme açıları, panel yüzeyine gelen ışınım şiddeti, panel karakteristikleri, hücre/ortam sıcaklığı ve rüzgâr hızı gibi birçok faktöre bağlıdır. Fotovoltaik sistemleri etkileyen en önemli faktörlerden biri sıcaklıktır. Güneşten gelen ışınımın önemli bir kısmı fotovoltaik hücre üzerinde soğurulmakta ve hücre sıcaklığı artmaktadır. Bu çalışmada, su ile aktif soğutma yöntemiyle soğutulan bir PV modül ile normal şartlar altında çalışan bir PV modülün ürettikleri elektrik enerjisi ve PV/T bir model olarak soğutulan modülün termal kazancı ölçülmek üzere bir deney düzeneği tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma, 0,245 lt/dk, 0,402 lt/dk ve 0,584 lt/dk debi değerleriyle 3 gün boyunca yapılmıştır. Soğutulan modül tarafından üretilen elektrik enerjisinin normal modüle göre, farklı debiler için %6,03 ile %6,16 arasında daha fazla olduğu tespit edilmiştir. 3 farklı debi için termal enerjiyi de içeren net kazanç değeri, normal modüle göre sırasıyla %1285, %1665 ve %3662 olarak hesaplanmıştır. Deneysel çalışma boyunca elde edilen verilerle yapılan hesaplamalar, grafikler halinde yorumlanarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Enerji verimliliği, Fotovoltaik sistemler, PV hücre verimliliği, PV/T hibrit sistemler

ABSTRACT

MS THESIS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CELL TEMPERATURE ON PANEL EFFICIENCY IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Sinem AYYILDIZ DEMİR

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. Dr. İsmail KAYRI

2023, 116 Pages

Jury

Advisor: Asst. Prof. Dr. İsmail KAYRI

Prof. Dr. Hüseyin AYDIN

Assoc. Prof. Dr. Melih KUNCAN

Electricity generation through PV technologies that use solar energy which is one of the most important renewable energy sources, continues increasingly around the world, especially in the last decade. The performance of PV applications is closely related to the energy conversion rate of modules, which is fundamentally one of the most important system components. Although the efficiency of PV cell technologies increases day by day, this increase is still beyond the expectations. This situation causes PV systems to have performances remained below the expected level. Power output of photovoltaic systems depends on many factors such as panel area, panel configuration, tilt angles of the panels according to the horizontal surface, radiation intensity on the panel surface, panel characteristics, cell/ambient temperature and wind speed. One of the most important factors affecting the photovoltaic systems is temperature. A significant part of the radiation coming from the sun is absorbed by the photovoltaic cells and the temperature of the cells increases. In this study, an experimental setup was designed and implemented to measure and compare the electrical energy produced by a PV module cooled by the active cooling method using water and a PV module operating under normal conditions, and to measure the thermal gain of the cooled module. Experimental studies were carried out for 3 days with 0.245 l/min, 0.402 l/min and 0.584 l/min flow rates. It has been determined that the electrical energy produced by the cooled module is higher between 6.03% and 6.16% than the normal module for different flow rates. The net energy gains including the thermal energy for 3 different flow rates were calculated as 1285%, 1665% and 3662%, respectively, compared to the normal module. Calculations made with the data obtained during the experimental study are presented by interpreting them as graphics.

Keywords: Energy efficiency, Photovoltaic systems, PV cell efficiency, PV/T hybrid systems

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca tez konumun belirlenmesinde bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, bana her konuda destek olan, yardımlarını esirgemeyen, araştırmamın planlamasından yazılmasına kadar süren uzun aşamada desteğini hiç esirgemeyerek beni teşvik eden, yönlendiren, katkılarıyla beni aydınlatan değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi İsmail KAYRI'ye ve tüm değerli bölüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde en büyük paya sahip olan, bana daha iyi şartlar sunmak için her zaman çabalayan aileme; özellikle de sevgili annem ve sevgili babama, hayatımın her alanında hiçbir yardımını esirgemediği sabırla ve sevgiyle bana destek olan aldığı her türlü kararda arkamda olan sevgili eşim Hüseyin DEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

Sinem AYYILDIZ DEMİR
BATMAN-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	6
1.2. Tezin Yapısı.....	7
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	10
3. GENEL BİLGİLER.....	22
3.1. Yenilenebilir ve Sürdürülebilir Enerji	22
3.2. Yenilenebilir Enerji Çeşitleri	22
3.2.1. Hidrolik enerji.....	23
3.2.2. Rüzgâr enerjisi	23
3.2.3. Biyoenerji.....	24
3.2.4. Jeotermal enerji.....	24
3.2.5. Hidrojen enerjisi	25
3.2.6. Güneş enerjisi	25
3.3. PV Hücre Teknolojileri.....	29
3.3.1. Kristalize silikon hücreler	32
3.3.1.1. Tek kristalli silikon hücreler	32
3.3.1.2. Çok kristalli silikon hücreler.....	32
3.3.2. İnce film hücreler.....	33
3.3.2.1. Amorf silisyum (a-Si) ince film hücreler.....	33
3.3.2.2. Galyum arsenit (GaAs) ince film hücreler.....	34
3.3.2.3. Kadmiyum tellür ince film hücreler.....	35
3.3.2.4. Bakır indiyum di-selenid ince film hücreler	35
3.4. Enerji Üretimine Genel Bakış.....	36
3.4.1. Türkiye elektrik enerjisi profili.....	43
3.4.2. Batman güneş enerjisi profili.....	49
4. PV SİSTEMLERDE KAYIPLAR.....	52
4.1. PV Sistemlerde Kayıp çeşitleri	53
4.1.1. Gölgeleme kayıpları.....	53
4.1.2. Toz ve kir kayıpları.....	53
4.1.3. Yansıma kayıpları	54

4.1.4. Uyumsuzluk kayıpları.....	54
4.1.5. Kablolama kayıpları.....	54
4.1.6. İnverter kayıpları.....	55
4.1.7. Sıcaklık kayıpları	56
4.2. PV Hücre Modellerinde Sıcaklığın İfadesi.....	56
5. PV SİSTEMLERDE MODÜL SOĞUTMA TEKNİKLERİ	59
5.1. Pasif Soğutma Teknikleri.....	59
5.2. Aktif Soğutma Teknikleri	63
6. MATERYAL VE YÖNTEM.....	69
6.1. Deney Setinin Tanıtılması	69
6.1.1. PV modüller ve soğutma yöntemi	71
6.1.2. PV modül için tasarlanan yükler.....	75
6.1.3. Gerilim bölücü devre	76
6.1.4. Sirkülasyon motoru ve pompası	77
6.1.5. Data logger ve meteorolojik sensörler	79
7. BULGULAR.....	82
7.1. Test Günü 1 Verileri	82
7.2. Test Günü 2 Verileri	86
7.3. Test Günü 3 Verileri	90
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	94
8.1. Sonuçlar	94
7.2. Öneriler	97
KAYNAKLAR	99
EKLER	111
ÖZGEÇMİŞ	117

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo	Sayfa
Tablo 3.1. Mevcut PV teknolojileri hücre ve modül verimleri	30
Tablo 6.1. PV modüllerin katalog bilgileri (AM= 1.5, E=1000 W/m ² , T _c =25 °C)	71
Tablo 6.2. Motor gücüne göre tespit edilen debi değerleri	78



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Tipik bir termal güneş kolektörü	26
Şekil 3.2. Tipik bir PV hücresinde elektron akışı.....	27
Şekil 3.3. Mono kristal bir PV hücrenin kesiti	28
Şekil 3.4. Çeşitli PV hücre teknolojileri	30
Şekil 3.5. Yıllara göre PV hücre verimi gelişimi	31
Şekil 3.6. Tek kristalli silikon hücre ve modül	32
Şekil 3.7. Çok kristalli silikon hücre ve modül	33
Şekil 3.8. Amorf silisyum ince film modül uygulaması.....	34
Şekil 3.9. Kadmiyum tellür ince film dizi	35
Şekil 3.10. Bakır indiyum diselenid bir hücre	36
Şekil 3.11. Yıllara göre fosil kaynaklarla enerji üretimi	37
Şekil 3.12. Yıllara göre CO ₂ salınımı	37
Şekil 3.13. Yıllara göre küresel enerji tüketimi.....	38
Şekil 3.14. Yıllara göre kaynakların tüketimi karşılaması	39
Şekil 3.15. 2021 yılında kaynaklara göre küresel enerji üretimi	40
Şekil 3.16. Küresel elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı	40
Şekil 3.17. Küresel elektrik üretiminin kaynaklara göre oransal dağılım değişimi	41
Şekil 3.18. 2021 yılı küresel elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı	42
Şekil 3.19. Türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı.....	43
Şekil 3.20. Türkiye elektrik üretiminin kaynaklara göre oransal dağılım değişimi	44
Şekil 3.21. 2021 yılı ulusal elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı	45
Şekil 3.22. Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası	46
Şekil 3.23. Türkiye aylara göre ışıınım enerjisi.....	47
Şekil 3.24. Türkiye ay bazında ortalama güneşlenme saati.....	48
Şekil 3.25. Türkiye PV teknolojisi – Elektrik enerjisi üretimi	48
Şekil 3.26. Batman güneş enerjisi potansiyel atlası.....	49
Şekil 3.27. Batman ili GEPA verileri	50
Şekil 4.1. Bir PV sistemdeki kayıplar ve oranları	52
Şekil 4.2. Gerçek tek diyotlu PV hücre modeli	57
Şekil 5.1. İki farklı L-profil kanatla pasif soğutma	60
Şekil 5.2. Hava ile pasif soğutma şematik gösterimi.....	60
Şekil 5.3. Su ile pasif soğutma – daldırma yöntemi	61
Şekil 5.4. Su ile pasif soğutma – yüzdürme yöntemi	62
Şekil 5.5. Isı borusu ile pasif soğutma içeren PV/T uygulaması.....	62
Şekil 5.6. PCM ile pasif soğutma uygulaması.....	63
Şekil 5.7. Nozül kullanılarak su ile aktif soğutma.....	64
Şekil 5.8. Su ile soğutma prensibi	64
Şekil 5.9. Su ile doğrudan soğutma	65
Şekil 5.10. Su ile dolaylı soğutma	66
Şekil 5.11. Su ile dolaylı soğutma	67
Şekil 5.12. Hava ile aktif soğutma çalışması.....	68
Şekil 6.1. Deney düzeneğinin genel görüntüsü	70
Şekil 6.2. Deney seti bileşenlerinin genel görüntüsü.....	71
Şekil 6.3. Termokuplların montajı.....	72
Şekil 6.4. PV modüllerin tamamlanmış montaj görüntüleri	74
Şekil 6.5. Rezistif yükler	76

Şekil 6.6. Gerilim bölücü devre.....	77
Şekil 6.7. DC motor & pompa ve sürücü devre.....	78
Şekil 6.8. Meteoroloji istasyonu ve data logger bağlantıları	79
Şekil 6.9. CMP6 piranometresi ve HC2S3 probu.....	80
Şekil 6.10. Verilerin toplanmasına ilişkin blok diyagram	81
Şekil 7.1. Sıcaklık değerlerinin değişimi – TG-1	82
Şekil 7.2. Modüllerin ürettiği güç değerleri – TG-1	83
Şekil 7.3. Modüllerin ürettiği enerji değerleri – TG-1	84
Şekil 7.4. Elektriksel kümülatif enerji değerleri – TG-1	85
Şekil 7.5. Net kümülatif enerji değerleri – TG-1.....	85
Şekil 7.6. Sıcaklık değerlerinin değişimi – TG-2	87
Şekil 7.7. Modüllerin ürettiği güç değerleri – TG-2.....	87
Şekil 7.8. Modüllerin ürettiği enerji değerleri – TG-2	88
Şekil 7.9. Elektriksel kümülatif enerji değerleri – TG-2	89
Şekil 7.10. Net kümülatif enerji değerleri – TG-2.....	89
Şekil 7.11. Sıcaklık değerlerinin değişimi – TG-3	90
Şekil 7.12. Modüllerin ürettiği güç değerleri – TG-3.....	91
Şekil 7.13. Modüllerin ürettiği enerji değerleri – TG-3	92
Şekil 7.14. Elektriksel kümülatif enerji değerleri – TG-3	92
Şekil 7.15. Net kümülatif enerji değerleri – TG-3.....	93

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

I_D	: Diyot akımı
I_{mp}	: Maksimum güç noktası akımı
I_{PH}	: Foton akımı
I_s	: Diyot ters satürasyon akımı
I_{sc}	: Kısa devre akımı
k	: Boltzmann sabiti
m	: Diyot kalite faktörü
N_s	: Seri bağlı hücre sayısı
P_{max}	: Maksimum güç
q	: elektron yükü
R_p	: Paralel direnç
R_s	: Seri direnç
T_o	: İşletme sıcaklığı
V_{mp}	: Maksimum güç noktası gerilimi
V_{oc}	: Açık devre gerilimi
V_T	: Termal gerilim
β	: Eğim açısı

Kısaltmalar

AM	: Hava kütlesi
a-Si	: Amorf silikon
BEFS	: Binaya entegre fotovoltaik sistem
CdTe	: Kadmiyum tellürid
CIGS	: Bakır indiyum galyum diselenid
CPV	: Yoğunlaştırılmalı fotovoltaik
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
EVA	: Etilen vinil asetat
GaAs	: Galyum arsenit
GEPA	: Güneş enerjisi potansiyel atlası
GES	: Güneş enerjisi santrali
MPPT	: Maksimum güç noktası izleyicisi
m-Si	: Monokristal silikon
p-Si	: Polikristal silikon
PV	: Fotovoltaik
PV/T	: Fotovoltaik termal
RES	: Rüzgâr enerjisi santrali
STC	: Standart test koşulları
TG	: Test günü

1. GİRİŞ

Enerji bir cismin veya sistemin iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Enerji somut olarak incelendiğindeyse karşımıza, yaşamın daha iyi şartlarda devam ettirilebilmesi için vazgeçilemez unsurlardan biri olarak çıkmaktadır. Sanayi devriminden günümüze değin geçen sürede enerjiye olan gereksinim hızla artmaktadır. Artan bu ihtiyaca karşılık, talebin karşılanabilmesi için farklı kaynak arayışlarının veya mevcut kaynakların kullanımında verim iyileştirmeleriyle ilgili araştırmalardaki motivasyon gün geçtikçe artmaktadır. Yeni dünya düzeninde enerji arz ve talep düzeyi, toplumların refah seviyesi ve gelişmişlik düzeyleriyle ilgili endekslerin belirlenmesinde en önemli unsurlardan biri olduğu görülmektedir.

Enerji ihtiyacı, gelişmekte olan ülkelerdeki hızlı nüfus artışı, sanayileşme, endüstriyel üretim trendi, teknolojik gelişmeler gibi nedenlerle gün geçtikçe artmaktadır. Buna bağlı olarak enerji üretimi ve tüketimi arasındaki fark da gün geçtikçe açılmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının faaliyete koyulmasında yaşanan doğal ivme düşüklüğünden dolayı, enerjiye bağımlı mevcut yaşam modelinde yüksek miktarlardaki talebe yenilenebilir enerji kaynaklarıyla cevap vermek şu an mümkün görünmemektedir. Bu arz ve talep arasındaki farkın artarak küresel bir enerji krizine dönüşmemesi için fosil kökenli enerji kaynaklarının konvansiyonel yöntemlerle üretimi ve tüketimi artarak devam etmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı'nın 2021'de sunduğu rapordaki istatistiklere göre 2019 sonu itibarıyla, küresel enerji üretiminin %80,9'u petrol, kömür ve doğal gaz fosil kökenli kaynaklardan elde edildiği bildirilmektedir [1]. Fosil kökenli enerji kaynakları, milyonlarca yıllık bir başkalaşım sonucu meydana geldiğinden, döngülerini kısa vadede tamamlayamadıklarından en iyi senaryolara göre bile birkaç on yıl içinde tükenerek enerji talebine cevap veremeyecekleri öngörülmektedir [2]. Tükeneceği öngörülen bu kaynakların çalışma prensibi üzerine kurulu birçok konvansiyonel ve teknolojik sisteminin de çalışamaz hale geleceği kaçınılmazdır. Ayrıca fosil kaynakların tüketimi, dünya üzerinde yaşanan çevresel sorunların oluşmasında büyük paya sahip olduğu bilinmektedir. Bu kaynakların kullanımıyla oluşan başta CO₂ ve N₂O olmak üzere birçok sera gazının atmosfere salınması, atmosferdeki ortalama sıcaklık değerinin artmasına neden olmaktadır. Milyonlarca yılın müktesebatı olan biyo-çeşitliliğin geleceği, özellikle sanayi devrimiyle başlayan fosil kaynak tüketiminin günümüze kadar ivmelenerek artmasıyla bir krize dönüşen küresel iklim değişikliğindeki ani refleksler nedeniyle tehdit altındadır. Çünkü yanma sonucu atmosfere salınan sera

gazları, doğada yaşayan tüm canlıların sağlığını ve esasen geleceğini orta ve uzun vadede direkt veya indirekt etkilemektedir. Bu etkilenme genellikle, küresel iklim bozuklukları, suların ve toprağın kirlenmesi, bitki örtüsünün zarar görmesi, biyolojik çeşitlikte azalmalar, asit yağmurları, çölleşme şeklinde hissedilmektedir. Bu olumsuzluklara karşı, çevre sorunlarına neden olmayan, canlıların yaşamlarını tehdit etmeyen, temiz, güvenilir ve sürdürülebilir nitelikteki yenilenebilir enerjiler, insanoğlunun geleceği için büyük önem taşımaktadır. Birincil enerji kaynaklarının temininin siyasi sonuçlar doğurduğu da bilinmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşması, fosil kökenli kaynaklar bakımından özellikle erişilebilir rezerv yönünden zayıf coğrafyalarda bulunan ülkeler veya rezerve erişimde teknoloji ithalatı yapmak durumunda kalan gelişmemiş ve geliştirmekte olan ülkelerin dışa bağımlılığını azaltmada veya tamamen yok etmede de önemli bir fonksiyona sahiptir [3, 4].

Bu sebeplerden dolayı dünya genelinde bilimsel araştırmalar, yenilenebilir enerji kaynakları için gerek yeni enerji dönüşüm tekniklerinin geliştirilmesinde, gerekse mevcut tekniklerdeki verimliliğin artırılmasına yönelik çalışmalar üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu ekseninde, ülkelerin geliştirdiği enerji politikaları gereği sağlanan hibeler, krediler ve bürokratik kolaylıklar şirketlerin fosil kökenli kaynaklara alternatif olabilecek yenilenebilir enerji kaynakları alanındaki endüstriyel yatırım faaliyetlerini artırmasını sağlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları; yakın gelecekte tükenme tehlikesi olmayan ve sürdürülebilir bir yaşam için yaygınlaşarak kullanılması kaçınılmaz kaynaklardır. Bir enerji krizinin yaşanmaması için yakın bir gelecekte tükenen fosil kökenli kaynakların da dahil edildiği bir enerji arzı modeli geliştirilmesi sağlanarak, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimin artması için gerekli çalışmalar, uluslararası bir motivasyon ve planlama ile hızlandırılmalıdır.

Yenilenebilir enerji kaynakları temelde, doğada bulunan ve kaynağı güneş olan enerjilerin değişik formlarını kapsayan, sürdürülebilir, bir gök cismi olarak güneş var olduğu sürece kullanılacak, sera gazı üretmeyen temiz kaynaklardır. Alternatif enerji kaynakları olarak da bilinen bu kaynakların tümünün kökeninde güneş enerjisi var olsa da, genel olarak dönüştükleri formlarla isimlendirilirler. Bunları genel olarak, hidrolik enerji, güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, dalga enerjisi, gelgit enerjisi ve hidrojen enerjisi olarak sınıflandırmak mümkündür.

Bir gök cismi olarak güneş, bütün yenilenebilir enerji kaynaklarının özünü oluşturmaktadır [5]. Yapısı ve enerji dönüşümündeki ilkelerden ötürü jeotermal enerjiyi diğerlerinden farklı görmek mümkünse de esasen dünya gezegeninin güneşten ayrılarak

oluştugu düşünöldüğünde bu enerji türünün bile kökeninin güneş olduğu savunulabilir. Yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak güneş enerjisi, sahip olduğu potansiyel dolayısıyla, özellikle +40 Kuzey ve -40 Güney enlemleri arasında kalan ve güneş kuşağı olarak isimlendirilen coğrafyalarda bulunan ölkeler için sınırsız bir kaynaktır. Güneş bandının dışında bulunan coğrafyalarda da kullanılabilen güneş enerjisi, kârlılık açısından görece olumsuzluklar barındırdığından, endüstriyel üretimden çok evsel uygulamaları içermektedir.

Güneş enerjisinin kaynağı, ihtiva ettiğı hidrojeni füzyon tepkimeleri şeklinde gerçekleşen bir zincir reaksiyon sonucunda helyum atomuna dönüştürmesi sırasında ortaya çıkardığı ışıınıdır. Bu reaksiyon esnasında kullanılan hidrojen ile tepkime sonucu ortaya çıkan helyumun kütlesi eşit olmayıp aradaki kütle farkı $E=mc^2$ yasasına göre güneş yüzeyinde bir ışıını oluşturmaktadır. Bu ışıını esasen güneş yüzeyindeki yüksek sıcaklıktan ileri gelmektedir. Isının iletilebilmesi için moleküllü bir ortam gerekmektedir. Güneş ile dünya arasındaki yaklaşık 150 milyon kilometrelik mesafe boyunca bulunan boşlukta ısının transfer olması mümkün değildir. Ancak ışıını dalga formuyla boşlukta yol alabilmektedir. Dünya atmosferinin dışına güneşten gelen ışıının değeri 1353 W/m^2 iken, bu değerin bir kısmı atmosfer tarafından soğurulmakta ve bir kısmı ise atmosfer dışına tekrar yansıtılmaktadır. Sonuç olarak yeryüzüne ortalama 1000 W/m^2 ışıını gelmektedir [6-8]. Yeryüzüne gelen bu ışıını, kara parçaları, su kütleleri, hava kütleleri ve çeşitli cisimler tarafından soğurulmaktadır. Enerjinin farklı miktarlarda soğurulmasının oluşturduğu basınç farkları direkt veya indirekt olarak rüzgâr, yağış, dalga vb. doğa fenomenlerinin oluşmasını sağlamaktadır. Hemen hemen bütün yenilenebilir enerji kaynakları bu fenomenler arasındaki değişim ve dönüşümü esas almaktadır. Başta hidrolik enerji olmak üzere, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, dalga enerjisi yaygın kullanım alanı bulan ve enerji arzında önemli boşlukları dolduran enerji kaynaklarıdır. Ancak bu yaklaşımların tümü, elektrik enerjisi üretimi aşamasında kullanılan generatör için mekanik enerji temininde kullanılırlar. Güneşin ışıını enerjisini kullanarak elektrik enerjisi üretiminde kullanılan, Stirling motoru teknolojisi, konsantre güneş ısıı enerji teknolojisi ve parabolik oluklu ayna teknolojisi yaklaşımlarında da direkt elektrik enerjisi üretimi söz konusu olmayıp elektrik enerjisi üretimi için generatörlerin ihtiyaç duyduğu mekanik enerji temini esastır. Bütün bu yöntem ve yaklaşımlardan farklı olan fotovoltaiik teknolojisi sayesinde türbin, generatör ve bu ekipmanların uyum içinde çalışmalarını sağlayan düzeneklerin kullanımına gerek kalmamaktadır. Fotovoltaiik (PV) teknolojisi, güneşten gelen ışıını enerjisini doğrudan

doğru akım (DC) formunda elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız olarak işletilebilen PV sistemler küçük ve orta boyutta çatı tipi, cephe tipi gibi uygulamaların yanında, endüstriyel boyutta enterkonnekte sisteme dâhil edilebilen büyük boyutlara kadar birçok uygulamayı kapsamaktadır. PV sistemler, yapılarında diğer enerji üretim yöntemlerine göre sık sık arıza oluşumuna sebebiyet veren hareketli teçhizat bulundurmamaları, kurulumlarının çok basit olması, hücre ve panel üretim pazarlarının yaygınlaşmasının sağladığı rekabet ortamı ve geri dönüş sürelerinin kısa olması gibi birçok avantaja sahiptirler.

Bu avantajlar sayesinde, fosil kökenli yakıtların kullanımıyla ortaya çıkan sorunlarla mücadeleyle başlayan alternatif enerji kaynakları arayışı, bu alandaki çalışmaların, güvenilir ve çevre dostu, neredeyse limitsiz bir enerjiye sahip yenilenebilir enerji kaynağı olan PV teknolojisi üzerinde toplanmasını sağlamıştır. Güneş enerjisi en çevreci ve verimli elektrik enerjisi üretim yöntemlerinin başında gelmektedir [9-13].

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında sağladığı avantajlar nedeniyle başat konumda olan PV teknolojisi ile elektrik enerjisi üretiminin temel bileşenleri PV modüller, inverterler, konstrüksiyon malzemeleri, yüksek verimliliğe sahip enerji depolama üniteleri ve bu temel bileşenler arasındaki bağlantıları kurmaya yarayan kablolardır. Uluslararası marketlerdeki yoğun rekabete rağmen, PV sistemlerin kurulum maliyetleri, özellikle gelişmemiş ve gelişmekte olan ülkeler için, hibeler ve teşviklerin yeterli olmadığı durumlarda küçük, orta ve büyük yatırımcıların kararlarını etkileyebilmektedir. Bununla beraber, PV sistemlerde kullanılan hücrelere ilişkin verimliliği ifade eden enerji dönüştürme oranları gün geçtikçe iyileştirilmektedir. Ancak bu iyileştirmeler yeterli bir ivmeyle gerçekleşemediğinden, PV sistemler ile birim alana düşen ışıınım enerjisinden daha yüksek elektrik enerjisi elde etmek için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerin bazıları, gün boyunca modül yüzeyine gelen ışıınım değerinin kontrol edilmesini içerirken, bazıları da standart test koşullarından (STC) olan işletme sıcaklığı (T_o) değerinin kontrol edilmesine dayanmaktadır.

Bu yöntemlerden bir tanesi, PV modüllerin güneş takip sistemi ile beraber kullanılmalarıdır. Güneş takip sistemleri, sınırlı veya sınırsız bir alandan elde edilmek istenen verim artışı değerine göre tek eksen (Doğu-Batı veya Güney-Kuzey) veya iki eksenli (Doğu-Batı ve Güney-Kuzey) olarak kullanılabilirler. Özellikle iki eksenli güneş takip sistemleri, sağladıkları yüksek verim artışına rağmen, üretim maliyetlerinin yüksek olması ve bu sistemlerde bulunan dişli, kayış kasnak sistemleri, lineer aktüatörler

ve motorların bakım onarım giderleri, büyük çaplı uygulamalarda tercih edilmemelerine neden olmaktadır.

Bir başka yöntem ise, PV sistemlerin β eğim açılarının bir yıl içerisinde belirli zaman dilimlerinde manuel olarak değiştirildiği uygulamalardır. İlgili bölgenin coğrafi konumuna göre, 6 aylık, 3 aylık ve 1 aylık periyotlarla PV modülleri taşıyan konstrüksiyonun eğim açısının belirli değerlere göre ayarlanarak ışıının panel düzlemine daha fazla düşmesi sağlanmaktadır. Bu yöntem, uygulamanın yapıldığı arazilerin düzgün olması durumunda, belirli bir noktadan onlarca modülü içeren konstrüksiyon tablalarının yönlendirilebilmesi mümkün olduğundan hem uygulanabilir hem de sağladığı avantaja göre maliyeti düşük olmaktadır. Ancak, büyük PV uygulamaları genellikle tarıma elverişsiz tepelik arazilerde gerçekleştirildiğinden, bu bölgelerde eğim açısının periyodik olarak ayarlanması yöntemini uygulamak mümkün olamamaktadır.

Yukarıda verilen yöntemler, PV uygulamalarında, sistemin genel verimini artırmaya yönelik optik esaslara dayanmaktadır. PV modül üreticileri, ürettikleri modüllere ait teknik değerleri son kullanıcılara modül karakteristik özellikleri tablosu ile sunmaktadırlar. Genel bir standardın yakalanması için bütün üreticiler bu değerleri STC değerlerine göre tespit etmek durumundadırlar. Bu değerler genel olarak, 1000 W/m^2 ışıının, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ işletme sıcaklığı ve 1,5 hava kütlesi (AM: Air Mass) şeklindedir. Işıının değeri güneşten modül düzlemine dik olarak gelen birim gücü temsil etmekteyken, hava kütlesi modül düzlemi ile güneş arasında kalan atmosfer kalınlığını ifade etmektedir ve bu değerler harici olduğu için bunların kontrol edilmesi mümkün görünmemektedir. Ancak, işletme sıcaklığına müdahale etmek ve kontrol altına alabilmek mümkündür.

PV hücreler, silisyum, germanyum, selenyum, bakır, arsenik, tellür gibi saf veya bunların oluşturduğu bileşiklerden oluşmaktadır. P veya N olarak katkılanırılan bu elementler arasında belli bir ara-kesit oluşturularak ışıının ile gelen fotonların aktive ettiği elektron akışı sağlanmış olur. PV hücreler, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çevirebilme özelliğine sahiptir. Bu dönüşüm sürecinde en önemli husus enerji dönüşüm oranı değeridir. Bu oran genel olarak, PV hücre üretim teknolojisi ve üretim sürecindeki hassasiyet ile alakalıdır. Bununla beraber hücrenin işletme koşulları da enerji dönüştürme oranını etkileyebilmektedir. Çünkü ortam sıcaklığı ve ortam sıcaklığının panel ön ve arka yüzeyine taşınma dinamiğini etkileyen rüzgâr hızı, rüzgâr yönü ve bağıl nem oranı değerleri, P-N jonksiyon bölgesindeki işletme sıcaklığı değerini etkilemektedir. PV hücrelerin verimini olumsuz etkileyen işletme sıcaklığı sadece enerji dönüşüm oranı

üzerinde etkili olmayıp, hücre ömrünü etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Aynı sistemden daha fazla enerji ve daha uzun çalışma ömrü elde etmek için işletme sıcaklığının düşük veya orta seviyelerde kalması sağlanmalıdır.

Modül, dolayısıyla hücre sıcaklığı, bu amaçla kontrol edilmek üzere pasif ve aktif soğutma sistemleri kullanılmaktadır. PV sistemleri için soğutma teknolojilerinin küresel ilerlemesine ilişkin bir literatür çalışmasında [14], soğutma ile ilgili araştırmaların amacının, PV sistemlerin verimliliğini artırmak ve aynı zamanda hücreler için daha uzun bir çalışma ömrü sağlamak şeklinde iki yönlü olduğu belirtilmektedir. Bu iki önemli fayda ile beraber, aktif soğutma tekniklerinin uygulanması halinde, evsel veya endüstriyel kullanım için sıcak su teminini mümkün kılan fotovoltaik termal (PV/T) hibrit sistemler, PV sistemlerin toplam verimini çok büyük miktarlarda artırdığı ifade edilmektedir.

1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı

PV sistemler, açık hava şartlarında işletildiklerinden dolayı, uygulamaların gerçekleştirildiği yerlerdeki çevresel faktörlere maruz kalırlar. Güneşten panel yüzeyine gelen ışıınım enerjisi modül gücü üzerinde olumlu bir etkiye sahipken, modül içinde bulunan hücrelerin sıcaklığını direkt etkileyen ortam sıcaklığı ise çıkış gücünü azaltıcı bir etki göstermektedir. Rüzgâr hızı ve rüzgâr yönü, ortam sıcaklığının panel yüzeyine transferini artıran özellikleriyle genellikle olumlu parametreler olarak değerlendirilir. Çünkü ışıınım değerinin belli bir büyüklüğün üzerinde olduğu hava şartlarında, modül sıcaklığı genel olarak ortam sıcaklığından büyüktür. Bağlı nem oranı ise PV sisteminin bulunduğu ortamın tozluluk oranına göre olumlu veya olumsuz bir etki oluşturabilir: Tozun az olduğu durumlarda, bağlı nem oranı rüzgârın varlığı ile beraber modül yüzeyinde soğutma etkisi yaparak modül gücünü artırıcı bir etki oluştururken, tozlu hava şartlarında modüllerin cam yüzeyindeki tozlanma eğilimini artırıcı bir etkiyle modül gücünü azaltıcı bir etki oluşturur. PV panellerde tozlanmanın verim üzerindeki etkilerinin araştırılması bu tezin kapsamı dışındadır.

Mevcut PV teknolojileri, güneş ışıınımını yalnızca maksimum %25 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştürebilmektedir. Güneşten gelen enerjinin önemli bir kısmı hücre yapımında kullanılan elementler tarafından absorbe edilerek termal olarak ortama aktarılırken daha küçük bir kısmı ise panel yüzeyinden atmosfere geri yansıtılır. Modül sıcaklığının en önemli kısmı ışıınımın termal etkisinden kaynaklanırken, ortam sıcaklığı ve belli bir yükü besleyen hücrelerdeki elektron akışı da modül sıcaklığını etkileyen diğer unsurlardır. Hücrelerde meydana gelen sıcaklık artışlarının sebeplerinden bağımsız

olarak, hücre sıcaklığındaki bir derecelik artışın PV modül verimini %0,4 ila %0,65 arasında düşürdüğü, dolayısıyla hücre sıcaklığının düşürülmesinin modül verimini kayda değer şekilde artırdığı bilinmektedir [15-18].

Bu tez çalışmasının esas amacı, hücre sıcaklığının PV modül verimi üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Bu amaçla hazırlanan deney setinden elde edilen veriler değerlendirilerek, normal PV sistemlerinde atmosfere salınan ısı enerjisinin faydalı hâle getirilebileceği de irdelenerek, uygulamanın PV/T hibrit bir sistem olarak kullanılması halinde elektriksel kazancın yanında termal kazanç ile ilgili hesaplamalar da sunulmuştur.

Deneyisel çalışmada, PV pazarında yüksek verimlilikleriyle ön plana çıkan çok-kristalli silikon (p-Si) modüller kullanılmıştır. Çalışmada herhangi bir güneş takip sistemi kullanılmamış olup, soğutmasız ve soğutmalı paneller Batman ili için yıllık optimum eğim açısı değeri olan 32° olarak ayarlanmıştır. Test aşamasında deney düzeneği, panel yüzeyleri tamamen güneye gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Soğutmalı modül, arka kısımdan aktif soğutma işlemine tabi tutulmuştur. Soğutma sıvısı olarak su kullanılmıştır. Deneyisel çalışmada, debinin etkisi de araştırılmak istendiğinden, testler 3 gün için 3 farklı debi ile gerçekleştirilmiştir. Hassas bir ölçüm gerçekleştirmek için, modüllerin ürettiği güç değerini hesaplamak üzere ürettikleri gerilim değeriyle beraber, soğutulan modülün giriş suyu sıcaklığı, çıkış suyu sıcaklığı ve her iki modülün sıcaklığı data logger ile kaydedilmiştir.

Deneyisel çalışma, $1554 \text{ KWh/m}^2\text{-yıl}$ global radyasyon enerjisi ve ortalama günlük 7,76 saatlik güneşlenme süresi değerleri ile güneş enerjisi potansiyeli bakımından zengin Türkiye-Batman ilinde gerçekleştirilmiştir [19]. Deney düzeneği, Batman Üniversitesi Merkez Kampüsü Ek Binası üzerinde $37,903^\circ$ Kuzey enlemi ve $41,129^\circ$ Doğu boylamında konumlandırılmıştır. Veriler 2021 yılının Ekim ayında kaydedilmiş olup, Batman ili için Ekim ayında ortalama günlük global radyasyon değeri $3,79 \text{ KWh/m}^2$ iken ortalama günlük güneşlenme süresi 7,33 saattir [19].

1.2. Tezin Yapısı

Deneyisel olarak gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en önemli konuma sahip güneş enerjisini doğrudan elektrik akımına dönüştüren PV sistemlerde, hücre sıcaklığının modül verimini üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu tez çalışmasının hazırlanmasında genel olarak; gerekli literatür bilgilerinin verilmesi, çalışmada kullanılan materyallere ilişkin bilgiler, deneyin

gerçekleştirilmesinde takip edilen yöntem, deneylerden elde edilen verilerin sunulması ve sonuçların tartışılması düzeni takip edilmiş olup tez metni 8 bölümden oluşmaktadır.

Tezin birinci bölümünde; enerjinin insan hayatındaki önemi, fosil kökenli yakıtların tüketiminin kontrol altına alınması ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmenin doğa ve insan hayatında oluşturacağı katkılar, yenilenebilir enerji kaynağı çeşitleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelen güneş enerjisi ile ilgili temel bilgiler, termal bir kaynak olarak güneş enerjisinin önemi, kaynak olarak güneş enerjisi kullanan PV teknolojisi ve bu teknolojiye ilişkin verim iyileştirme çalışmaları ve PV sistemlerde sıcaklık faktörünün modül verimi üzerindeki etkileri hakkında temel bilgiler verildikten sonra, tezin amacı ve kapsamı hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde; hücre sıcaklığının modül verimi üzerindeki etkilerini araştırdığımız bu çalışmayla doğrudan veya dolaylı olarak ilgili önceki çalışmaların amaç, yöntem ve bulgularının özet şekilde vurgulandığı kronolojik bir alınyazın araştırması yapılmıştır.

Üçüncü bölümde; yenilenebilir enerji kaynakları arasında bulunan güneş enerjisi, dalga enerjisi, jeotermal enerji, rüzgâr enerjisi, biyokütle enerjisi, hidrolik enerji ve hidrojen enerjisi hakkında temel bilgiler verildikten sonra, tezin kapsamı dahilinde kullanılan güneş enerjisinin elektrik enerjisine doğrudan dönüşümünü sağlayan PV sistemleri, PV hücre teknolojileri gibi konular detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Dünyada ve Türkiye’de güneş enerjisinin görünümü içeren bilgiler ve tez kapsamında deneysel çalışmanın gerçekleştirildiği Batman iline ait güneş enerjisi potansiyeli ile ilgili bilgiler de bu bölümde verilmiştir.

Dördüncü bölümde; fotovoltaiik sistemlerde modül performansını etkileyen parametreler üzerinde durulduktan sonra, hücre sıcaklığının modül performansını etkileme dinamiği hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

Beşinci bölümde, hücrelerin enerji dönüştürme oranını artırmak üzere geliştirilen modül soğutma teknikleri hakkında bilgiler sunulmuştur. Pasif ve aktif soğutma tekniklerinin temel prensipleri anlatıldıktan sonra, literatürde bulunan bazı çalışmalara ait detaylar üzerinde durulmuştur.

Altıncı bölümde; çalışmanın amacına uygun biçimde geliştirilen deney seti hakkında bilgiler verilmiştir. Deney setinde kullanılan PV modüllerin karakteristik özellikleri, soğutma tekniği, soğutulan modülün geliştirilmesine ilişkin detaylar, ölçümlerin gerçekleştirilmesi, ölçümlerde kullanılan sensörler, modülleri yüklemek üzere geliştirilen rezistif yükler, soğutma sıvısının hareketini sağlayan motor ve pompa, farklı

debiler elde etmek için bu motora enerji veren sürücü devre, ölçüm sonuçlarını kaydeden data logger, bu data loggerın programlanması ve ortama ait verilerin elde edilmesi için kullanılan meteoroloji istasyonuna ait bilgiler gibi gerek deney setinin hazırlanması gerekse verilerin elde edilmesine ilişkin süreç detaylı şekilde bu bölümde ele alınmıştır.

Yedinci bölümde; deneysel çalışmadan elde edilen veriler ve bu veriler üzerinde yapılan hesaplamalara ait bulgular grafik ve tablolar şeklinde sunulmuştur. 3 farklı debi değeri için gerçekleştirilen testlerde genel olarak; normal ve soğutulan panellere ait elektriksel güç, elektriksel enerji, kümülatif elektriksel enerji ve elektriksel ve termal enerjinin toplamını ifade eden net kümülatif enerji değerleri grafik halinde verilmiştir. Ayrıca her test gününe ait hava sıcaklığı, normal panel sıcaklığı, soğutmalı panel sıcaklığı, giriş ve çıkış suyu sıcaklıkları bir arada grafik şeklinde gösterilmiştir. Test günlerinin birbiriyle kıyaslanmasına ait veriler de derlenerek grafik olarak sunulmuş ve elde edilen bulgular yorumlanarak okuyucuların hizmetine sunulmuştur.

Sekizinci bölümde; deneysel çalışmaların yürütülmesi sürecinde ve erişilen bulgular ışığında tez ile ilgili tartışmalar yapılarak genel sonuçların elde edilmesi planlanmıştır. Ayrıca bu bölümde, yapılan literatür taramasında karşılaşılan çalışmalar ve bu çalışma amaç, materyal – yöntem ve bulgular bakımından irdelenerek PV/T alanında araştırmacıların ilgi duyabileceği sonraki çalışmalar hakkında öneriler sunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Thomas ve Fordham [20], yaptıkları çalışmada güneş panellerinin en iyi çalışma sıcaklık değerleri ve bu sıcaklık değerlerinde elde edilebilecek maksimum verimi incelemişlerdir. Panelde meydana gelebilecek kayıpları önlemek için soğutma işlemi yapılmıştır. Araştırmada, güneş panellerinin 25 °C işletme sıcaklığı değerlerinde katalog verilerine göre enerji ürettiğini, ancak 40-45 °C'yi aşan işletme şartlarında modül veriminde ciddi azalmalar meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Verim üzerindeki bu olumsuzlukları gidermek için panel altından bir akışkan gezdirmeye yöntemi kullanılmıştır. Bir başka yöntem olarak ise faz değiştiren malzeme yerleştirilerek yüzeyde oluşan ısıyı akışkana veya faz değiştiren malzemeye transfer edip yüzey sıcaklığında düşüş oluşturarak verimin artırılması sağlanmıştır.

Fıratoğlu ve Yeşilata [21], yaptıkları çalışmada lineer elektriksel yüke bağlı PV panellerde akım ve gerilim arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Elektriksel yükün akım ve gerilim arasındaki lineer ilişkinin panel üzerindeki bağlantıları gözlemlenmiştir. Panelin maksimum güç üretebilmesi için optimum direnç değerinin hangi aralıkta tutulması gerektiği tespit edilerek, PV modüllerin çeşitli çevresel şartlar altında doğrusal olmayan karakteristikler sergiledikleri vurgulanarak optimizasyon süreçlerinin önemine değinilmiştir.

Engin ve Çolak [22], yarı saydam PV modüller kullanarak İzmir ili meteorolojik şartlarında gerçekleştirdikleri PV/T hibrit çalışmalarında, doğal (serbest akış) ve zorlanmış (pompa) dolaşım deneylerine göre PV modül verimini %4,5 oranında artırdıklarını belirtmişlerdir.

Krauter [23], panel ön yüzeyinde yaptığı soğutma işlemiyle panel sıcaklığını 60 °C'den 38 °C'ye düşürmüştür. Çalışmada, su kullanarak gerçekleştirilen PV panel yüzey sıcaklığındaki 22 °C düşüşe karşılık günlük enerji üretiminde %10,3 oranında bir artış sağlandığı belirtilmiştir.

Fraisse ve ark. [24], Fransa'nın Macon ili iklim şartlarında, camlı ve camsız PV modüller üzerinde gerçekleştirdikleri elektriksel verim araştırmalarının bulgularına göre, cam kaplı PV modülün yıllık ortalama enerji dönüşüm oranı %6,8 iken, camsız PV modülün yıllık ortalama enerji dönüşüm oranı %9,4 olarak tespit edilmiştir. Bu durumda, camsız PV modülün enerji dönüştürme oranının camlı PV modülün enerji dönüştürme oranına göre %28 oranında yüksek olduğu görülmektedir. Araştırmacılar, modüller arasında bu yüksek enerji dönüştürme oranındaki farkın cam yüzey ile hücreler arasında

oluşan sıcaklık artışıyla ilgili olduğunu belirterek, PV modüllerde soğutma uygulamalarının önemine dikkat çekmişlerdir.

Kumar ve ark. [25], Birleşik Arap Emirlikleri iklim şartlarında şebekeden bağımsız bir PV sistemi üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, modül sıcaklığındaki 1°C'lik artışın modülün elektriksel enerji dönüştürme oranını %0,5 oranında düşürdüğünü belirtmişlerdir.

Ji ve ark. [26], mono kristal silisyum bir PV modül kullanarak yaptıkları çalışmada doğal akışlı bir PV/T su kolektörü tasarlamışlardır. Aynı anda hem elektrik hem de sıcak su elde edilebilen bu sistemde belli debi değerlerinde toplam sistem enerji kazanım oranının %65'e ulaşabildiği belirtilmiştir. Araştırmacılar, yaptıkları simülasyon sonuçlarına göre, PV hücre kaplama faktörü ve cam geçirgenliği ne kadar yüksek olursa, genel sistem performansının o kadar iyi olduğu sonucuna vardıklarını ifade etmişlerdir.

Keçel ve Yavuzcan [27], PV sistem performansını genel olarak etkileyen faktörleri ele aldıkları araştırmalarında, bu sistemleri en çok etkileyen parametrenin hücreler tarafından yutulan ışıının panel yüzeyinde oluşturduğu sıcaklık olduğunu belirterek, Türkiye'nin farklı bölgelerinde iklim özelliklerinden kaynaklı sıcaklık farklarından oluşabilecek kayıpların PV verimliliği üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Yapılan gözlemler ışığında, kurulacak PV elektrik sistemlerindeki kayıpların en aza indirgenmesi için çeşitli öneriler sunmuşlardır.

Hassan [28], Dublin'de gerçekleştirdiği binalara entegre PV sistemlerde faz değiştirme malzemeleri (PCM) kullanarak termal düzenleme isimli tez çalışmasında, konvansiyonel aktif ve pasif PV soğutma tekniklerinin yeterli olmadığını belirterek, farklı faz değiştirme malzemelerini çeşitli koşullarında test ederek bulgular ışığında önerilerde bulunmuştur. Hassan çalışmasında iç ve dış mekânda 500 W/m², 750 W/m² ve 1000 W/m² ışıının şiddeti altında işletilen PV modüller üzerinde PCM içeren soğutma sistemleri kullanmıştır. Çalışmanın bulgularına göre, 1000 W/m² güneş ışıını altında 5 saatlik bir zaman dilimi sonunda modül ön yüzey sıcaklığında 15 °C'lik bir azalma sağlandığı tespit edilmiştir. Bu sıcaklık düşüşü karşısında, referans PV hücresine göre %9,7 oranında güç kazancı elde edildiği kaydedilmiştir.

Kostic ve ark. [29], PV/T hibrit sistemlerin termal ve elektrik verimliliğini artırmak üzere panel yüzeyindeki ışıının enerjisini yoğunlaştırmak üzere düz reflektörler kullandıkları çalışmalarında, reflektörlerin konumu değiştirilmiş ve maksimum güneş radyasyonu konsantrasyonu elde etmek için hem deneysel ölçümler hem de sayısal hesaplamalar ile reflektörlerin optimum konumu belirlenmiştir. Hesaplamalarda sistemin

reflektörlü ve reflektörsüz kullanılması halindeki enerji tasarrufları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Çalışmanın bulgularına göre, reflektörleri optimum konumda olan PV/T kolektörü tarafından üretilen elektrik enerjisi, reflektörsüz PV/T kolektörü tarafından üretilen toplam termal ve elektrik enerjisinden önemli ölçüde yüksek olduğu görülmektedir.

Rosa-Clot ve ark. [30], bir tek kristalli silikon PV paneli su altında işleterek, soğutmanın verim üzerindeki etkilerini araştırdıkları çalışmalarında; PV modülün suyun 4 cm altında ve hücre sıcaklığının 30 °C olarak tutulmaya çalışıldığı şartlarda modül veriminin %11 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Farklı derinlik değerlerinin test edildiği çalışmada, derinliğin artması halinde, panel yüzeyine düşen ışıyım miktarının azaldığı tespit edilmiştir.

Sarhaddi ve ark. [31], yaptıkları çalışmada bir solar fotovoltaik termal hava kolektörünün ekserjetik performansını değerlendirmişlerdir. Çalışmada, tipik bir PV/T hava toplayıcısının termal ve elektriksel parametrelerini, ekserji bileşenlerini ve ekserji verimliliğini hesaplamak için ayrıntılı bir enerji ve ekserji analizinin yapılmasının gerekliliği vurgulanmıştır. Bu amaçla, ilgili ısı kaybı katsayılarında bazı düzeltmeler yapılmıştır. Çalışma kapsamında mevcut PV/T hava toplayıcılarıyla ilgili literatür araştırmasının ışığında bir PV/T hava toplayıcısının termal ve elektriksel parametrelerini hesaplamak için bir bilgisayar simülasyon programı geliştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarının literatürde belirtilen deneysel ölçümlerle iyi bir uyum içinde olduğu belirtilen çalışmada parametrik çalışmalar da yapılmıştır. Çalışmada, ayrıca örnek bir iklim, çalışma ve tasarım parametreleri için PV/T hava kolektörünün termal veriminin, elektrik verimliliğinin, genel enerji verimliliğinin ve ekserji verimliliğinin sırasıyla yaklaşık %17,18, %10,01, %45 ve %10,75 olduğu bulunmuştur.

Kane ve Verma [32], Binaya Entegre Fotovoltaik Sistemlerde (BEFS) panelin arka tarafından konveksiyon nedeniyle ısı transferi mümkün olmadığından sıcaklık artışının daha fazla olduğunu belirttikleri çalışmalarında, ısı giderilmezse sıcaklıktaki her 1 °C artışta PV modül çıkış gücünün %0,45 oranında azaldığını ifade etmişlerdir. Oluşturdukları BEFS'te soğutma işlemi için geliştirilen termoelektrik yöntem kullanılmıştır. Çalışmalarında geliştirdikleri PV modülün arkasına takılan termoelektrik modül soğutma modunda çalıştırılmıştır. Araştırmalarında, öncelikle bireysel sistemlerin matematiksel modellenmesi yapıldıktan sonra BEPV/Termoelektrik sistemin, PV panel sıcaklığı dikkate alınarak dinamik modeli geliştirilerek termoelektrik soğutma aracılığıyla BEFS sistemlerine ilişkin performans iyileştirmeleri sunulmaktadır.

Moharrem ve ark. [33], özellikle Mısır'daki çöl bölgeleri gibi sıcak ve kurak bölgelerde güneş panellerinin soğutulması için gereken su ve elektrik enerjisi miktarını en aza indirmek üzere bir çalışma yapmışlardır. PV panellerin yüzeylerine su püskürtülmesine dayalı bir soğutma sisteminin geliştirildiği bu çalışmada, panellerin sıcaklığı izin verilen maksimum sıcaklığa ulaştığında, PV panellerin soğumaya ne zaman başlayacağını belirlemek için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Önerilen soğutma sisteminde, PV panellerin normal işletme sıcaklığı olan 35 °C değerine kadar soğutulmasının ne kadar zaman alacağını belirlemek için de bir soğutma modeli kullanılmıştır. Isınma ve soğutma hızı modeli olmak üzere her iki modelin de deneysel olarak doğrulandığı bu çalışmada, geliştirilen modellere dayanarak PV panellerin sıcaklığı izin verilen maksimum sıcaklık olan 45 °C'ye ulaştığında panellerin soğutulması işleminin başlaması halinde, PV panellerin en yüksek çıkış enerjisini verdiği tespit edilmiştir.

Kolhe ve ark. [34], panel sıcaklığının büyük seviyelere çıkabildiği ışıyım yoğunlaştırılmalı PV (CPV: Consantrated PV) sistemlerinin su ile soğutulmasının verime olan etkilerini araştırdıkları bir çalışma yapmışlardır. Elde ettikleri bulgulara göre, soğutmalı CPV panelin normal panele göre 4,7 ila 5,2 kat daha büyük çıkış gücü sağladığını tespit etmişlerse de, bu büyük farkın ışıyımın yoğunlaştırılmasından kaynaklandığını, soğutma işleminin elektriksel verim artışına katkısının %9'un altında olduğunu belirtmişlerdir.

Huang ve ark. [35], polikristal silikon panellerle gerçekleştirdikleri bir PV/T çalışmasında, panele giren ve panelden çıkan suyun sıcaklığını ölçerek suya aktarılan ısı enerjisini ve buna karşılık su sirkülasyonundan kaynaklanan soğutma işleminin PV enerji dönüştürme oranına etkisini incelemişlerdir. Sıcak su depolama tankı sıcaklığının 40 °C'nin üzerine çıkabildiği görülmüştür. Termal verim %35,33~47,21 arasında değişirken elektriksel verimin %12,77~14,46 arasında değiştiği kaydedilmiştir.

Kabul ve Duran [36], Isparta ili iklim şartlarında gerçekleştirdikleri bir PV/T uygulamasında, güneş enerjisinden elektrik üretimi esnasında panel sıcaklığının artması sonucu azalan verimi, paneli su ile soğutarak artırmayı hedeflemişlerdir. Deneysel çalışmada kullanılan fotovoltaiik panelin arka yüzeyine yerleştirilen borular içerisinden geçirilen su ile panel yüzeyinde soğuma sağlanmıştır. Bu çalışmada, panelde oluşan sıcaklık, öncelikle boru profil içerisinde bulunan suya transfer edildikten sonra, bu boru bir depo içinden geçirilerek ısıyın nihai olarak depo içindeki suya aktarılması sağlanmıştır. Bu sayede, hem PV panelin verimi artırılmış hem de sıcak su temin

edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, soğutmalı ve soğutmasız paneller karşılaştırıldığında, sistemin soğutulmasıyla elektrik üretiminde yaklaşık %35'lik güç artışı ve %7'lik bir verim artışı elde edildiği kaydedilmiştir.

Alzaabi ve ark. [37], yaptıkları bir PV/T çalışmasında, kullandıkları poli-kristal PV panelin arka kısmına yerleştirdikleri metal profillerden su sirkülasyonu sağlayarak paneli %15-20 civarında soğutmuşlardır. Bu değerdeki bir soğutma işlemine karşılık, soğutulan panelin normal panele göre %15-20 civarında daha yüksek güç çıkışı sağladığı belirtilmiştir. Gerçekleştirilen sistemde ayrıca %60-70 civarında termal verim sağlandığı belirtilmiştir.

Fudholi ve ark. [38], fotovoltaiik/termal (PV/T) su kolektörlerinin elektriksel ve termal performanslarını 500 ila 800 W/m² arasında değişen güneş ışıını altında belirlemek istedikleri çalışmalarında, farklı güneş radyasyonu seviyelerine göre, 0,011 kg/s ile 0,041 kg/s arasında değişen kütle akış hızları kullanmışlardır. Bu şartlar altında PV/T kolektörlerde PV verimliliği, termal verimlilik ve her ikisinin bir kombinasyonu PV/T verimliliği test edilmiştir. Sonuçlar, spiral akış soğurucunun 800 W/m² güneş radyasyonu seviyesinde ve 0,041 kg/s kütle akış hızında en yüksek performansı sergilediği kaydedilmiştir. Kullanılan bu soğutucunun, %68,4'lük bir PV/T verimliliği, %13,8'lik bir PV verimliliği ve %54,6'lık bir termal verimlilik ürettiği belirtilmiştir.

Sabri ve Benzirar [39], yaptıkları çalışmada ortam şartlarının fotovoltaiik paneller üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmada, kristal ve şekilsiz (amorfl) silikon paneller kullanılmıştır. Araştırma, sadece ortam koşullarının panel sıcaklığı üzerindeki etkileri değil, ayrıca diğer çalışmalardan farklı olarak hücre termal parametreleri üzerindeki etkilerini de içermektedir. Güneş hücresi tasarımında derin bir kavrayışa sahip olmak için bu faktörlerin etkisinin dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Smith ve ark. [40], yaptıkları çalışmada özellikle kristal silikon bazlı malzemelerle üretilmiş PV modüllerin sıcaklıktan olumsuz etkilendiği belirtilmiştir. Çalışmada, bu olumsuzluğun sadece verim düşüklüğüne yol açmadığı, aynı zamanda panellerin kullanım ömrünü kısalttığı da ifade edilmiştir. PV modülleri soğutmak üzere gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, soğutma işlemini suyu panel yüzeyine püskürterek sağlamışlardır. Bu yöntemin panel üzerinde zamanla biriken tozlanmayı da azaltarak verime katkı sunacağı belirtilmiştir. Çalışmalarında mono kristal silikon PV paneller kullanan araştırmacılar, su ile soğutma testlerinde, pompa güç tüketimini de göz önünde bulundurarak net güç kazancını %4,6 olarak hesaplamışlardır.

Zhu ve ark. [41], PV hücrelerin soğutulmasıyla ilgili yaptıkları çalışmada, önceki yaklaşımlardan farklı bir yol izlemişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarında, bir güneş hücresinin çalışma sıcaklığını, güneş emilimini korurken, gökyüzü erişimi yoluyla ışımsal olarak düşüren bir yaklaşım sunmuşlardır. Çalışma, güneş ışınlamadaki fotonlara müdahale etmeden, sadece ısıyı toplayıp ortama atan silikon bir tabakayla panel soğutma esasına dayanmaktadır. Araştırmacılar, ideal şartlarda çıplak bir kristal silikon hücre sıcaklığının pasif olarak 18,3 °C düşürülebildiğini gösterdikleri çalışmalarında, soğutma tabakasının yeterince ince olacak şekilde tasarlanması halinde konveksiyon, iletim ve parazitik güneş absorpsiyonu varlığında bile radyatif soğutma etkisinin önemli düzeyde olduğunu belirtmişlerdir.

Aktif su soğutma sistemiyle soğutulmuş paneller kullanılarak yapılan deneysel çalışmada Musthafa [42], %9 civarında enerji dönüşümü sağlayan bir panelin yüzey sıcaklığının 4 °C düşürülmesi halinde enerji dönüşüm değerinin %12'ye kadar artabildiğini belirtmiştir.

Chander ve ark. [43], bir solar simülatör ile yaptıkları çalışmada sıcaklık faktörünün, seri ve bağlı mono-kristal silikon hücrelerdeki etkisini araştıran bir çalışma sunmaktadırlar. Deneysel çalışma, tek, seri ve paralel bağlı mono-Si güneş hücreleri için 550 W/m² sabit ışınlam altında, hücre sıcaklığının 25 °C ila 60 °C aralığında değişmesi durumuna göre gerçekleştirilmiştir. Açık devre gerilimi, maksimum güç, doluluk faktörü ve verim gibi performans parametrelerinin hücre sıcaklığı ile azaldığı, buna karşın kısa devre akımının ise arttığı gözlenmiştir. Deneysel sonuçlar, seri ve paralel bağlanan silikon güneş hücrelerinin Kirchhoff yasalarıyla uyum içinde olduğunu ve sıcaklığın güneş hücrelerinin performans parametreleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Sahay ve ark. [44], yaptıkları çalışmada ince film fotovoltaiik hücrelerin yanı sıra kristal bazlı hücrelerin verimliliğinin de panel sıcaklığının artmasıyla azaldığı, panel sıcaklığındaki 1 °C'lik artışta verimin yaklaşık %0,5 oranında düştüğü belirtilmiştir. PV modüllerinin elektriksel veriminin kabul edilebilir seviyede tutulabilmesi için düşük sıcaklıklarda çalıştırılması gerektiğini ifade eden araştırmacılar, bu nedenle güneş panelleri için düşük maliyetli soğutma sistemlerine ihtiyaç duyulduğuna dikkat çekmişlerdir. Araştırmaya göre, solar PV panellerinin soğutulması, büyük pratik önemi olan bir problemdir. Soğutma işlemlerinin güneş enerjisi maliyetini düşürme üzerindeki potansiyeli 3 madde ile özetlenmiştir: a) Soğutma uygulamaları standart PV modüllerin elektriksel verimini iyileştirebilir, b) Soğutma işlemi, hücreler üzerinde büyük sıcaklık

değerlerinin olduğu yoğunlaştırıcı PV (CPV) sistemlerinin kullanımını mümkün kılar ve c) Su ile aktif soğutmanın tercih edildiği PV soğutma tekniklerinde, modülleri terk eden ısı enerjisi, evsel veya endüstriyel amaç için kullanılabilir. Çalışma kapsamında, Hindistan'da bulunan Rajiv Ghandi Enerji Park'ında Solar PV panellerinin soğutulması için kurulan toprağa bağlı soğutma sistemine ait veriler sunulularak bir performans değerlendirilmesi yapılmıştır.

Du ve ark. [45], tarafından gerçekleştirilen çalışmada, PV panel sıcaklığı, gerçekçi senaryolarda kullanılabilecek teorik modeller geliştirilerek değerlendirilmiştir. Çalışmada, güneş ışınımı, rüzgâr hızı ve ortam sıcaklığının PV panel sıcaklığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Parametrik çalışma sonuçları, güneş ışınımının ve rüzgâr hızının PV panel sıcaklığı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Araştırmada, sıcaklığın fotovoltaik verimlilik üzerindeki etkisinin, gerçekçi hava koşullarında güneş hücrelerinin gerçek zamanlı sıcaklık ölçümüne dayalı olarak değerlendirilmesi sonucunda, sıcaklık katsayısı $-0,21 \sim 0,50$ aralığında olan güneş hücreleri için, saha testleri verilerine göre hücreler üzerinde yaklaşık olarak %2,9 ile %9 arasında bir verim kaybına sebep olduğu kaydedilmiştir.

Grubisic-Cabo ve ark. [46], yaptıkları çalışmada fotovoltaik panellerin soğutma teknikleri ve sıcaklık kontrolündeki mevcut gelişmeleri analiz ederek tartışmışlardır. Çalışmada, PV soğutma uygulamalarında sağlanan elektriksel verim artışının, soğutma tekniklerine, modülün tipine ve boyutuna, uygulamanın yapıldığı coğrafi konuma ve yılın mevsimine bağlı olarak değiştiğini ve bu artışın genellikle %3 ila %5 arasında olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar, PV soğutma tekniklerini genel olarak; pasif soğutma, ısı boru soğutması, aktif soğutma, nanoakışkan kullanarak soğutma ve termoelektrik soğutma olarak sınıflandırmışlardır.

Peng ve ark. [47], PV yüzey sıcaklığının çıkış performansı ve özellikle verimlilik üzerindeki pratik etkilerini araştırmayı amaçlayan çalışmalarında, farklı radyasyon koşulları altında çıkış voltajı, akımı, çıkış gücü ve veriminin değişimini görmek üzere testler yapılmıştır. Çalışmada ayrıca, soğutma uygulaması ile hangi oranda verimlilik sağlanabileceği bulunmak üzere soğutma testi yapılmıştır. Bu çalışmaya ait test sonuçları, yeterli miktarda soğutma sağlanması halinde, PV verimliliğinde %47'e kadar bir artış olabileceğini gösterdiğinden, araştırmacılar tarafından konut tipi bir PV uygulaması için bir soğutma sistemi önerilmiştir. Araştırmacılar, önerdikleri soğutma sisteminin, yıllık PV enerji üretim verimliliğini %35'e kadar artırabileceğini ve elektrik üretimi ve sıcak su

üretimi dâhil olmak üzere yıllık toplam sistem enerji verimlilik artışının %107'ye kadar çıkabileceğini ifade etmektedirler.

Mays ve ark. [48], yaptıkları çalışmada alüminyum kanatlı levha kullanan ve doğal konveksiyon altında soğutma yaparak PV panellerin performansını artırmak istemişlerdir. Bu amaçla, alüminyum kanatçıklı levhalara ait optimum bir tasarım geliştirilerek PV panelin soğutulması sağlanmıştır. Soğutmada herhangi bir soğutma sıvısı kullanılmamış olup, sıcaklık doğal taşınım ile transfer edilmektedir. Araştırma sonuçları, alüminyum kanatçıklı levha kullanımının güneş ışımasını elektrik enerjisine dönüştürme verimliliğini %1,75 ve deneysel çalışmada kullanılan 30 Watt'lık panel gücünü 1,86 Watt artırdığını göstermektedir.

Rawat ve Dhiran [49], polikristal silikon PV modüller kullanarak solar PVT-Hava ve PVT-Su hibrit sistemler tasarlayarak karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, PVT hava ve PVT su kolektörü olarak konfigüre edilen ticari bir PV modülünün zorlamalı akışla hava ve su soğutması incelenmiştir. PVT sistemlerinin enerji ve ekserji performansları, akışkanların çeşitli kütleli debileri için deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, hibrit PVT sistemlerin basit PV uygulamalarına göre daha iyi performansa sahip olduğunu ve solar PVT su hibrit sisteminin PVT hava hibrit sisteminden daha iyi verime sahip olduğunu göstermektedir. Araştırmacılar bu sistemlerin uygulanabilir olduğunu ve mevsime bağlı olarak mahal ısıtması sağlayan bina entegrasyonuna ve düşük sıcaklıklı ısıtma uygulamalarına uygun olduğunu ifade etmişlerdir.

Benato ve Stoppato [50], yaptıkları çalışmada düşük maliyetli bir PV soğutma sistemi geliştirmişlerdir. Soğutma uygulamasında minimum düzeyde su kullanılarak maksimum verim elde edilmek amaçlanmıştır. Tasarlanan sistemde 3 adet 90°'lik açıyla 1,5 bar basınçla püskürtme yapabilen nozül kullanılmıştır. Sonuçlar, 30 saniye aktif kalan ve 120 saniye kapalı durumda olan soğutma sisteminin, modül sıcaklığını 28 °C azaltabileceğini ve bu sıcaklık düşüşüne karşılık modül verimini yaklaşık %14 oranında artırdığını göstermektedir. Araştırmacılar, soğutma sisteminin bir modül başına maliyetinin sadece 15 € olduğunu ifade etmişlerdir.

Demir ve Özkan [51], yaptıkları çalışmada temel olarak bir soğutucu radyatör üzerinde soğutulan suyun panel arka yüzeyindeki alüminyum kanallı soğutucu içinden geçmesine dayanan bir sistem kurmuşlardır. Bölgenin enlem derecesine bağlı olarak panelin yatayla yaptığı açının mevsimlik 15° artırılması ve eksiltilmesi esasına dayanan ikinci bir sistemin birlikte ve ayrı ayrı kullanılarak verimlilik üzerindeki etkisi

araştırılmıştır. Kullanılan soğutma sistemi sadece iki paneli kapsamaktadır. Soğutma sistemi olan bir panelde mevsimlik açı ayarı bulunmakta, diğerinde ise sadece soğutma sistemi bulunmaktadır. Panel arka yüzeyinde bulunan ince soğutucu kanallar panellerle tam temas ederek ısı transferini gerçekleştirilmiştir. Mevsimlik açı ayarı yapılan paneller ve soğutulan panellerin çıkışlarına bağlanan bir adet DC wattmetre ile günlük üretilen enerjiler ölçülmüş ve not edilmiştir. Yapılan çalışmada, çıkış gücü üzerinde zenit açısının tek başına %7,49 sıcaklığın ise %11,17 oranında etkili olduğu görülmüştür. Panel üzerinde yapılan soğutma işlemi ile beraber yapılan zenit açı ayarı çıkış gücünü %17,47 oranında arttırmıştır. Fotovoltaik panellerde verimliliği etkileyen iki önemli faktör olan soğutma ve zenit açı ayarı birlikte uygulandığında, panel verimlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Ceylan ve ark. [52], yaptıkları çalışmada fotovoltaik modüllerin ısı aktarım kategorisini belirlemeyi hedeflemişlerdir. Yapmış oldukları bu çalışmada panellerin bulunduğu ortamın güneş ışıınımı ve sıcaklığını da göz önünde bulundurularak, arka panele gelen rüzgâr hızının modülü soğutmadaki etkisini araştırmışlardır. PV modüllerin soğutulması işlemiyle modül açık devre geriliminde artış olduğu gözlenmiştir. Çalışmada, PV sistemlerdeki en önemli kayıpların güneş radyasyonu ve dış hava sıcaklığının da etkisiyle panel sıcaklığındaki artışla meydana geldiği belirtilerek, kurmuş oldukları sistemde modül arka sıcaklık değerinin değişimi 0-5 m/s rüzgâr hızlarında ve 10-40 °C sıcaklık aralığında inceleyerek soğutma işleminin etkilerini araştırmışlardır. Hava sıcaklığı 10-40 °C aralığındayken, rüzgâr hızının 5 m/s olması halinde, fotovoltaik paneldeki ısı aktarımı 11,6 W/m²K olarak hesaplanmıştır.

Akman [53], yaptığı lisansüstü tez çalışmasında, PV panel hücrelerinin ısınması sonucu artan sıcaklığa bağlı elektriksel verim düşmesini önlemek ve termal enerji kazanımı elde edilmesine yönelik, su kanallı ve su serpantinli farklı iki soğutma yöntemi uygulayarak bir karşılaştırma gerçekleştirmiştir. 20 Watt gücünde polikristal PV paneller üzerinde gerçekleştirilen testlerde, uygulanan iki yöntem ile normal şartlarda çalıştırılan panelin elektriksel güçleri, termal güçleri ve elektriksel enerji dönüştürme oranları karşılaştırılmıştır. Karabük ili iklim şartlarında gerçekleştirilen deneysel çalışmanın ekstrem sıcaklıklardaki sonuçlarına göre, su kanallı sistemin serpantinli sisteme göre daha avantajlı olduğu belirlenmiştir. 775 W/m² ışıınım değeri altında işletilen panellerde en yüksek sıcaklıklar saat 14:30'da normal panelde 59,53 °C iken, serpantinli panelde 43,90 °C ve su kanallı panelde ise 29,23 °C olarak kaydedilmiştir.

Gül ve Akyüz [54], yaptıkları bir PV/T hibrit deneysel çalışmada sistemin elektriksel ve termal çalışma performansları incelemişlerdir. Çalışmada, 0,015, 0,044 ve 0.069 kg/s'lik akışkan hızları kullanılmıştır. Bu akışkan hızlarına göre sistemin termal veriminin %49,9 ila %52,11 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca, PV/T panelin soğutmalı ve soğutmasız durumlarda elektriksel performansı incelendiğinde, soğutma yapılması halinde, maksimum güç noktasında %12,9 oranında bir artışın sağlandığı ve bu esnada elektriksel verimin %12 olduğu belirtilmiştir.

Kerem ve ark. [55], yaptıkları çalışmada panelin üst kısmına yerleştirilen bir boru ile soğutma suyu homojen bir şekilde panel yüzeyine akıtılarak sağlanan güneş paneli yüzey soğutma işleminin elektriksel verime etkisini incelemişlerdir. Osmaniye ili iklim şartlarında gerçekleştirilen deneysel çalışmanın bulgularına göre, soğutulan panelin verimliliğinde %14,47 oranında artış sağlandığı kaydedilmiştir.

Elbreki ve ark. [56], PV modüllerin pasif soğutulması üzerine yaptıkları çalışmada, verimliliğin optimize edilmesi için düzlemsel reflektör ve arka plaka uzatılmış yüzeyini PV modül ile birleştirmişlerdir. CFD, ANSYS, FLUENT yazılımları kullanılarak kanatçık yüksekliği, kanatçık sayısı, kanatçık aralığı, rüzgâr hızı ve güneş ışınlamına dayalı bir parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, kanatçıklar arasındaki mesafenin 20 mm'den 60 mm'ye çıkarılmasının kanatçık sayısının 20'den 10'a düşmesine yol açtığını ve bu durumun PV modül sıcaklığının 44,13 °C'den 54,01 °C'ye yükselmesine yol açtığını ortaya koymuştur. Soğutmasız PV modülün sıcaklığı 64,3 °C'ye ulaşırken, 18 kanatçık ve 27,7 mm kanatçık aralığı ile PV modülün sıcaklığının 39,73 °C'ye düşürüldüğü gözlemlenmiştir. Çalışmada 1000 W/m² ışınlam altında 24,57 °C'lik bir sıcaklık farkıyla normal PV modüle kıyasla elektrik verimliliğinde %11,2 oranında artış sağlanmıştır. Çalışmada sonuç olarak kanatçıkların PV modül sıcaklığını düşürmede üstün bir performansa sahip olduğu ifade edilmektedir.

Hernandez-Perez ve ark. [57], yaptıkları çalışmada PV modüllerin çalışma sıcaklığını düşürmek için panel alt yüzeyinde alüminyum kanatlı pasif soğutucu profil kullanmışlardır. Farklı genişlikte iki adet kanat profili prototip olarak üretilerek termal performans incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda basınç düşüşü önemli ölçüde azaltılarak değişken yönlü bir rüzgâr akışında daha tutarlı bir termal tepkinin gerçekleştiği görülmüştür. Araştırmacıların önerdiği pasif soğutma modeli sayesinde PV modül sıcaklığının 7 °C civarında düşürüldüğü ve önceki çalışmalarda kullanılan geometrilere sahip soğutuculara nazaran performans ölçütlerine göre daha iyi sonuçlar verdiği kaydedilmiştir.

Bhakre ve ark. [58], PV/T sistemlerle ilgili yaptıkları literatür çalışmasında, PV soğutma süreçlerinde uygulanan birçok tekniği ele alarak bu teknikleri karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Çalışmada, panel ön yüzeyinden suyun akıtılması veya püskürtülmesi tekniğinden, modüllerin arka yüzeylerinden soğutulmaları ve evaporatif soğutmaya değin birçok yöntem incelenmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, ön yüzey soğutma yönteminde, suyun püskürtülerek uygulanmasının, suyun akıtılarak uygulanmasına göre 5-6 °C arasında daha fazla sıcaklık düşüşü gerçekleştirdiği bildirilmiştir. Bununla beraber, suyun ön yüzeyden uygulanmasının arka yüzeyden uygulanmasına göre daha verimli sonuçlar doğurduğu ve ayrıca suyun ön yüzeyden uygulanmasının panel yüzeyinde temizlik etkisi yaptığından çeşitli optik kayıpların da önüne geçilebileceği bildirilmiştir.

Shalaby ve ark. [59], gerçekleştirdikleri bir çalışmalarında bir PV modülün arka yüzeyinin soğutulmasının elektrik enerjisi üretimi ve verimliliği üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar, önerilen soğutma tekniğinin basit ve ucuz olmakla beraber, aynı zamanda ters osmoz arındırma sisteminin besleme suyunun önceden ısıtılması için verimli bir termal kaynak sağlayabileceğini bildirmişlerdir. Soğutmalı ve soğutmasız iki özdeş PV modülü aynı anda test edildiğinde ve önerilen soğutma tekniği uygulandığında, PV modül güç üretiminin yaklaşık %14,1 oranında iyileştiği gözlemlenmiştir.

Kaynak araştırması olarak, 2000 ile 2022 yılları arasında, PV modüllerde soğutmanın hücre verimi üzerindeki etkilerini, PVT hibrit sistemlerle panel sıcaklığı düşürülürken elde edilen termal enerjiyi faydaya çeviren sistemlerin performans analizlerini, araştırmacıların geliştirdikleri farklı PV modül soğutma tekniklerinin karşılaştırılmasını ve sair konulara ilişkin bazı yayımlanmış makale, bildiri ve lisansüstü tez çalışmaları amaç, yöntem ve bulgular bakımından incelenmiştir. Kronolojik olarak sunulan bu araştırmalar bir arada değerlendirildiğinde, PV modüllerin soğutulmasının elektriksel verimi önemli miktarda artırdığı ve PV/T hibrit sistem olarak tasarlandığında toplam enerji kazancını büyük oranlarda artırdığı anlaşılmaktadır. Kaynak taramasında ele alınan çalışmalarda soğutmanın verim üzerindeki etkilerine dair farklı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bu durumun, çalışmaların yapıldığı bölgelerin coğrafi özelliklerine bağlı olarak testlerde kullanılan modüllerin eğim açıları, testlerin gerçekleştirildiği ortamda ve zaman dilimindeki ışıınım, rüzgâr, bağıl nem oranı, ortam sıcaklığı gibi meteorolojik parametreler arasındaki büyük farklardan, teste tabi tutulan PV sistemlerin boyutları, kullanılan PV hücre teknolojisi gibi özelliklerden kaynaklandığı

düşünülmektedir. Bu sonuç, hücre sıcaklığının PV sistemlerde verim ile ilişkisinin tespit edilmesi sürecinde tahmin edilenden çok parametre olduğunu göstermektedir. Belirli bir bölgede ve belirli şartlar altında işletilen PV sistemlerin sıcaklıktan etkilenme dinamikleri hakkında bir sonuca varabilmek için, o bölgeye ait coğrafi konum ve meteorolojik parametreler açısından benzerlik gösteren bölgelerdeki çalışmaların incelenmesi gerekmektedir. Bu mümkün değilse, o bölgede PV/T araştırmaları kapsamında uygun yöntem ve hassasiyetle çalışmaların tekrarlanması gerekebilir. Bu tez çalışmasında Batman ilinde, özellikle yaz aylarında yüksek sıcaklık değerlerine ulaşan PV modüllerde meydana gelen kayıp miktarının saptanması ve bu kayıpları aktif bir soğutma tekniği ile kontrol altına alan PV/T uygulaması üzerinde yapılan ölçümler ve analizler sonucunda modül sıcaklığı ve hücre verimi arasındaki ilişkinin belirlenmesi hedeflenmiştir.



3. GENEL BİLGİLER

3.1. Yenilenebilir ve Sürdürülebilir Enerji

Günümüzde, özellikle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde küresel talep miktarındaki artış nedeniyle, fosil kökenli yakıtlardan konvansiyonel yöntemlerle elektrik üretime alternatif olarak daha sürdürülebilir enerji teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır [60]. Fosil yakıtı dayalı enerji kaynakları, küresel ısınma ve iklim değişikliği gibi zararlı çevre sorunlarına neden olmaktadır [61]. Enerji üretimi sürecinde, atmosfere salınan sera gazı emisyonu son birkaç on yılda katlanarak arttı [62]. Bu nedenle, mevcut küresel iklim değişikliği krizinin üstesinden gelmek için fosil kökenli yakıtların direkt veya elektrik üretmek için kullanılmasının yerine güneş, rüzgâr, hidrolik, biyokütle, jeotermal, dalga ve hidrojen enerjileri gibi yenilenebilir enerji teknolojileri geliştirilmekte ve uygulanmaktadır [63, 64]. Çevre dostu özellikleri ve sıfır veya sıfıra yakın emisyon değerleriyle enerji üretebilme kabiliyetleri ve toplum genelinde çevre bilincinin gelişmesi nedeniyle yenilenebilir enerji gün geçtikçe daha fazla ilgi görmektedir [65]. Yenilenebilir enerji sadece sürdürülebilirliğe katkı sunmakla kalmayıp, özellikle son yıllarda artan enerji fiyatları nedeniyle ekonomik öneme de sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak enerji üretimi, fosil kaynaklı elektrik üretimin maliyetini düşürerek ekonomiye fayda sağlar [66, 67]. Bunların dışında, tüketiciler ve dağıtım firmaları aralarındaki protokellere göre, yenilenebilir kaynaklarla üretilen elektrik enerjisi belirli tarifelerle satılarak üreticiler için bir gelir aracı hâline gelebilmektedir. Enerji üretimi için yenilenebilir kaynaklara olan yönelim artmakla beraber, bazı çeşitlerinde sürekliliğin olmaması ve yüksek kurulum maliyetleri nedeniyle elektrik enerjisi üretiminin büyük bir kısmı hâlâ fosil yakıtlarla gerçekleştirilmektedir. Örneğin, PV sistemler sadece gündüz saatlerinde, rüzgâr türbinleri ancak yeterli hava akışı olduğunda ve hidrolik enerjiler ancak yeterli miktarda su potansiyeli bulunduğunda çalışabilir. Bu nedenle, dünyanın dört bir yanındaki araştırmacılar, yenilenebilir enerji verimliliğini artırmak ve sınırlılıklarını aşmak için titizlikle araştırmalar yapmaktadırlar [66].

3.2. Yenilenebilir Enerji Çeşitleri

Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimi amacıyla kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Bunun temel sebepleri arasında, fosil kökenli yakıtların sınırlı olması ve gün geçtikçe azalması, yine fosil kökenli kaynaklardan ileri gelen çevresel olumsuzlukların doğurduğu endişe ve neredeyse tüm enerji formlarına rahatlıkla

dönüştürebilen elektrik enerjisinin üretimindeki yüksek kârlılık oranı gösterilebilir. Genel olarak sahip oldukları potansiyel açısından kayda değer altı yenilenebilir enerji kaynağı çeşidinden söz edilebilir. Bunlar; güneş enerjisi, hidrolik enerji, rüzgâr enerjisi, biyoenerji, jeotermal enerji ve hidrojen enerjisidir. Bu enerji türleri farklı coğrafi konum ve koşullara göre, farklı verimliliklere sahip olabilirler [66].

3.2.1. Hidrolik enerji

Hidrolik enerji, belli bir noktaya göre daha yüksekte bulunan suyun sahip olduğu potansiyel enerji olarak tanımlanmaktadır. Hidroelektrik enerji ise, görece yüksekte bulunan bu su kütlesinin kontrollü olarak kinetize edilmesiyle elektrik enerjisine dönüştürülmesine dayalı dönüşüm olarak ifade edilir. Ekstrem koşullar haricinde, sağladığı ikincil avantajlar da hesaba katıldığında uygun tesis maliyetli enerji türleri arasındadır. Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılaştırıldığında hidrolik kaynaklar, yaklaşık %90 oranındaki enerji dönüşüm oranıyla en yüksek verimliliğe sahiptir [68]. Hidroelektrik enerji, küresel elektrik üretiminin %20'sini sağlamaktadır. Bununla beraber, ABD'deki yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik üretiminin %81'i, Yeni Zelanda'daki toplam elektrik üretiminin %75'i ve Norveç'teki toplam elektrik üretiminin %99'u hidrolik kaynaklarla sağlanmaktadır [69]. Hidroelektrik santraller, suyun potansiyel enerjisinden azami kapasite faktörüyle işletilmek üzere, pompalı depolama sistemleri, küçük hidroelektrik santraller ve kademeli rezervuar hidroelektrik santralleri gibi uyarlanmış çeşitli hidroelektrik santral türleri vardır.

3.2.2. Rüzgâr enerjisi

Rüzgâr enerjisi ile elektrik enerjisi üretimi, rüzgâr türbinlerine dayalı santraller aracılığıyla sağlanmaktadır. Rüzgâr enerjisi, görece basit altyapısı, performansına göre maliyet oranı ve sahip olduğu teknolojik olgunluk nedeniyle, elektrik üretiminde hidrolik enerjiden sonra tercih edilen en büyük ikinci yenilenebilir enerji kaynağıdır [70, 71]. Rüzgâr türbinleri karada ve kıyıdan uzak açık denizlerde tesis edilebilirler. Denizde veya tatlı sularda tesis edildiğinde açık deniz (offshore) rüzgâr çiftlikleri olarak isimlendirilirken, suyun olmadığı bölgelere tesis edildiğinde ise karasal (onshore) rüzgâr çiftlikleri olarak isimlendirilirler [72]. Rüzgâr çiftliklerinin çoğu kara parçalarında tesis edilirler. Bununla beraber, özellikle Avrupa'da tesis edilen açık deniz rüzgâr çiftliklerinin sayısı hızla artmaktadır [73]. Rüzgâr çiftliklerinin tesisinde yer seçimi için, beklenen güç değerinin üretimin tayininde ilgili bölgenin yıllık ortalama rüzgâr hızının potansiyel bir

parametre olarak önceden bilinmelidir. Bu anlamda yüksek rakımlı geniş araziler veya özellikle dağların denize dikey uzadığı bölgelerdeki deniz kıyıları karada tesis edilen rüzgâr çiftlikleri için idealdir [66].

3.2.3. Biyoenerji

Biyoenerji son yıllarda, evsel ve endüstriyel ısıtma ile ulaşım sektörünün yanı sıra çevre dostu elektrik üretimine de katkıda bulunan yenilenebilir bir enerji kaynağı haline gelmiştir [74]. Biyoenerjinin kaynağı, geleneksel veya modern yöntemlerle elde edilen ve biyokütle olarak bilinen organik ham maddelerdir [75]. Geleneksel yöntemlerle elde edilen biyoenerjinin kaynağı, kentsel alanda kullanılmak üzere işlenen yakacak odun, odun kömürü, bitki artıkları ve hayvan dışkısı gibi tarımsal ve hayvansal materyallerdir. Modern yöntemlerle elde edilen biyoenerjinin kaynağı ise endüstriyel amaçlarla ve elektrik üretiminde kullanılan, karbonizasyon, gazlaştırma, yakma ve piroliz gibi biyokütlenin çeşitli termal dönüşüm teknolojileri aracılığıyla elde edilen biyogaz, biyodizel ve biyokömürdür [76, 77]. Biyokütlenin biyokömür, biyoyakıt ve biyogaz üretimi için kullanılması ayrıca, halk sağlığı için sanitasyonun iyileştirilmesine, katı atıklar için kullanılan sahaların azalmasına, atık yönetimi uygulamalarına ve çeşitli sürdürülebilir kalkınma başarılarının sağlanmasına da yardımcı olmaktadır [78]. Biyoenerji, kırsal kalkınmayı da beraberinde getirdiğinden, özellikle uluslararası, ulusal ve bölgesel planların hazırlanmasında önemli ölçüde kabul edilmektedir [79].

3.2.4. Jeotermal enerji

Jeotermal enerji, maden kaynaklarının radyoaktif bozunmasından ve bir gezegen olarak Dünya'nın oluşumuna dayanan termal bir enerjidir [80]. Güneş enerjisi rüzgâr enerjisi ve hidrolik enerji gibi sürekli var olamayan yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılaştırıldığında, yerkürenin barındırdığı jeotermal enerjinin zengin ve tükenmez olduğu söylenebilir [81]. Bununla beraber jeotermal enerji süreklilik bakımında kararludur ve CO₂ emisyonu barındırmamaktadır [82]. Özellikle aktif volkanlara sahip coğrafyalarda hidrotermal enerji ile birlikte kullanılması halinde büyük ekonomik potansiyele sahip bir enerji kaynağıdır [83]. Günümüzde, Amerika Birleşik Devletleri, Endonezya, Filipinler, Meksika, İtalya, İzlanda, Yeni Zelanda ve Japonya başta olmak üzere jeotermal enerjiyi elektrik üretiminde kullanan yaklaşık 26 ülke bulunmaktadır [84, 85]. Jeotermal enerji santralleri, buhar ve ikili enerji çevrimlerine dayalı santraller olmak üzere iki ana grubu ayrılmaktadır [86]. Jeotermal enerji kullanımında termal kayıpların önüne geçmek için

akışkan yalıtılmış borular içinde iletilmekte ve yine bu amaçla bu santraller genellikle 10 km'den fazla olmayacak şekilde kaynakların bulunduğu yerlerde tesis edilip işletilirler [87]. Son yıllarda, jeotermal santrallerin performansı, geleneksel yaklaşımların ve kavramların modernize edilmesi sayesinde önemli ölçüde iyileştirilmiştir.

3.2.5. Hidrojen enerjisi

Hidrojen enerjisi, birim kütle başına yüksek enerji yoğunluğu içeren, zehirli olmayan, temiz bir enerji kaynağı olarak bilinmektedir. Örneğin, 9,5 gr hidrojen, 25 gr benzinle eşit miktarda enerji içermektedir [88]. Hidrojen enerjisi, doğrudan veya elektrolitik yöntemlerle elektrik üretiminde kimyasal reaksiyon sağlamak üzere belli bir süre için depolanabilir [89]. Su elektrolizi, kömürün ve diğer ağır hidrokarbonların gazlaştırılması, doğrudan ve dolaylı termokimyasal ayrışma ve doğrudan güneş ışığı kullanılarak yürütülen işlemler başta olmak üzere hidrojen enerjisi üretmenin birçok yolu vardır [90, 91]. Hidrojen enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilbildiği için sürdürülebilir bir özelliğe sahiptir ve bu özelliği sayesinde ulaşım, ticari, kurumsal ve konutsal amaçlarla kullanılabilir [92]. Üretim, depolama ve taşıma ile ilgili sorunlarına etkili çözümler bulunması halinde, hidrojen enerjisinin rolünün daha da önem kazanacağı ve belki de elektrik enerjisiyle beraber en önemli enerji kaynağı olacağı düşünülmektedir [93]. Ayrıca yakıt hücresinde hidrojen enerjisinden üretilen yan ürün olan su buharı zararsızdır. Diğer yakıt hücresi türlerine kıyasla yüksek enerji içeriği nedeniyle, hidrojen enerjisinden enerji üretim sisteminde alternatif yakıt hücresi olarak faydalanılmakta ve ayrıca gaz türbini ve hidrojen santrallerine güç sağlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır [94].

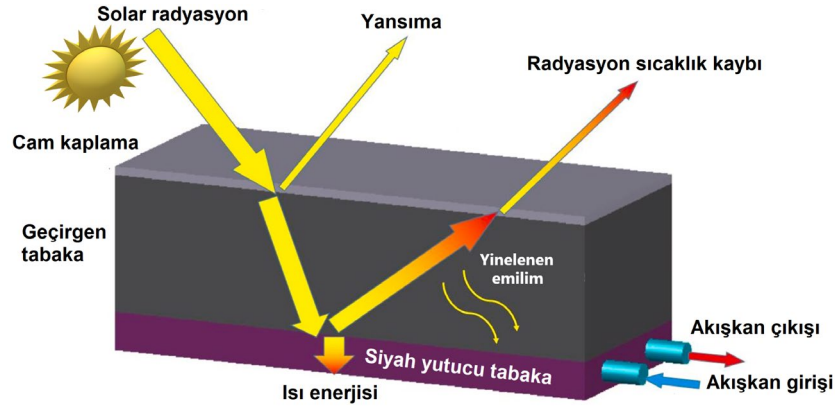
3.2.6. Güneş enerjisi

Güneş enerjisi, diğer tüm yıldızlarda olduğu gibi yapısında bulunan hidrojenin nükleer füzyon reaksiyonuna uğrayarak helyuma dönüşmesi esnasında yaydığı enerjiye dayanmaktadır. Güneş yüzeyini terk eden ışıınım, güneş ile dünya arasındaki yaklaşık 150 milyon km'lik boşluğu aşarak dünya atmosferinin dışına ulaşır. Buradaki ışıınım gücü metrekaresine başına 1353 Watt değerindedir ve bu enerjinin bir kısmı atmosfer tarafından uzay boşluğuna tekrar yansıtılırken, bir kısmı atmosfer tarafından yutulur. Gelen enerjinin ortalama 1000 W/m^2 gibi önemli bir kısmı ise yeryüzüne ulaşır. Yeryüzünde bulunan kara ve su parçaları veya buralarda bulunan objeler bu ışıınım enerjisini absorbe ederek termal olarak açığa çıkarır. Güneş enerjisi dünya çapında en çok kullanılan enerjilerden biridir.

Güneş enerjisini kullanan birçok enerji dönüşüm tekniği mevcuttur ve bu alanda çalışan birçok araştırmacı enerji dönüşüm verimliliğini artırmak için, yeni sistemler geliştirmekte veya mevcut sistemlerin tasarımında optimizasyonlar yapan çalışmalar yürütmektedirler [95]. Araştırmacılar maliyetleri ve enerji dönüşümünü optimize ederken aynı zamanda, direkt veya dolaylı olarak güneşten kaynaklı çevresel etkilerin de azalmasını sağlamaktadırlar [96]. Güneş enerjisinden temelde, termal enerji sistemleri ve fotovoltaik enerji sistemleri olmak üzere iki şekilde yararlanılır ve gelişmekte olan ve gelişmiş ülkelerde bu her iki sistem de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bilimsel ilerleme sürecinde araştırmacılar bu her iki yaklaşım için de verimliliği aşamalı olarak iyileştirmek için çalışmalarına devam etmektedirler [66].

3.2.6.1. Termal güneş enerjisi

Termal güneş enerjisi, güneşten yeryüzüne gelen ışıınım enerjisinin termal olarak dönüştürülmesini ifade etmekte ve endüstriyel proses ısısı ve enerji üretimi olarak hem endüstriyel alanda hem de su ve alan ısıtma sağlayarak konutsal amaçla sıklıkla tercih edilen bir enerji dönüşüm teknolojisidir [97, 98]. Bu teknoloji, ısı enerjisini doğrudan elektriğe dönüştürme amaçlı da araştırmacıların ilgisini çekmektedir [99]. Teorik olarak termal güneş enerjisi, güneşten gelen radyasyonu absorbe ederek bu termal enerjiyi kolektörün altında akan sıvıya aktarmaya dayalı bir enerji dönüşüm şeklidir [100]. Şekil 3.1’de tipik termal güneş kolektörü verilmiştir.



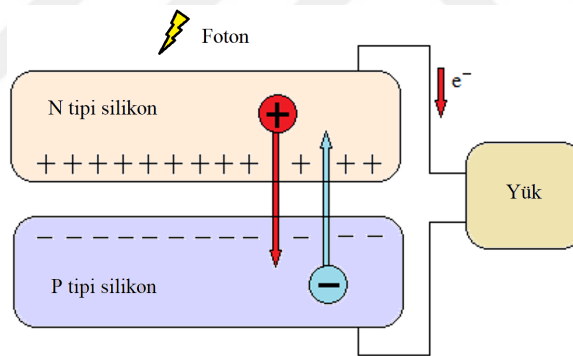
Şekil 3.1. Tipik bir termal güneş kolektörü [66, 100]

Yapılarına ve kullandıkları malzemeye göre düşük, orta ve yüksek sıcaklık olmak üzere üç tip termal kolektör mevcuttur [101]. Düşük ve orta sınıftaki kolektörler genellikle yüzme havuzlarını ısıtmada ve evsel uygulamalara hitap eden su ve saha ısıtma gibi amaçlarla kullanılırlar. Bu kolektörler genellikle düz plakalardan oluşmaktadır.

Yüksek sıcaklık kolektörlerinde güneş ışığından gelen ışınmı yansıtmak veya yoğunlaştırmak üzere aynalar veya mercekler bulunur. Bu tip kolektörlerle yüksek sıcaklıklar elde edilebildiğinden genellikle termal güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretme yöntemlerinde kullanılır. Araştırmacılar, çok bakım gerektiren vakum tüpü ve optik konsantrasyon sistemi gibi pahalı bileşenlerin yerine alternatif malzemeler önererek termal güneş uygulamalarının maliyetini azaltmak için çalışmalar yürütmektedirler [66, 102].

3.2.6.2. Fotovoltaik teknoloji

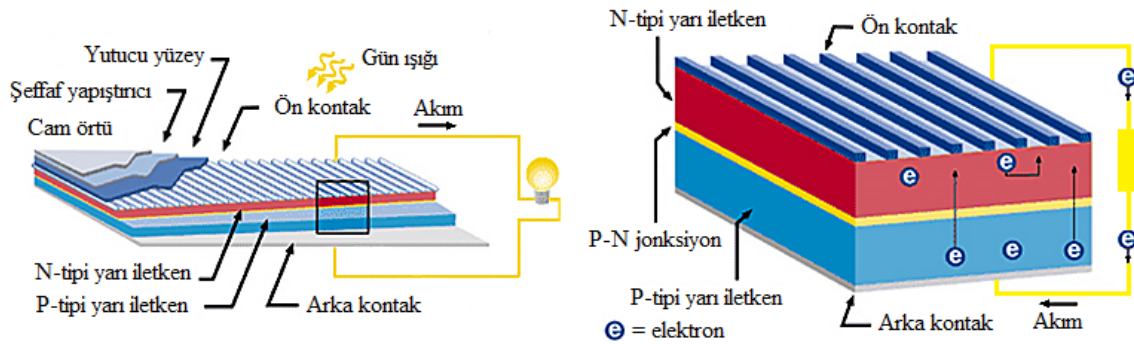
Fotovoltaik teknoloji, güneşten gelen ışınmı enerjisini, N ve P olarak katkılanırılan yarı iletken materyalleri içeren bir PV hücre tarafından doğrudan elektrik enerjisine dönüştürme esasına dayalıdır. Yunanca'da ışık anlamına gelen “photo” ve voltaj anlamına gelen “voltaic” kelimelerinin bir arada kullanılmasıyla adlandırılan bu teknoloji, elektrik enerjisini doğru akım formunda üretmektedir. Şekil 3.2’de tipik bir PV hücrenin temel yapısı görülmektedir. PV hücrelerde elektrik akışının gerçekleşebilmesi için elektriksel bir yüke bağlanması gerekmektedir.



Şekil 3.2. Tipik bir PV hücresinde elektron akışı [103]

Farklı geometrilere sahip güneş hücreleri üretilmesine rağmen bir standardın sağlanması için birçok firma tarafından kare, dikdörtgen veya daire formunda, enerji dönüşümünün sağlandığı bölgeye ait kalınlıkların 0,2 mm ila 0,4 mm arasında, yüzey alanının ise yaklaşık 100 mm² olduğu PV hücreler üretilmektedir [104]. Son yıllarda özellikle büyük güçlü (> 500 Wp) panellerin üretilmeye başlanmasıyla hücre boyutlarında da artışlar gerçekleşmiştir. PV hücrelerin yapısında genel olarak yarı iletkenler kullanılmaktadır. Yoğun elektron akışının sağlanabilmesi için PV hücrelerdeki jonksiyon bölgesi kesiti diğer yarı iletken komponentlere göre çok daha yüksektir [105, 106]. Şekil

3.3'te mono kristal silikon yapıları bir hücrenin camla kaplanmış ve çıplak bir yapısı kesit şeklinde verilmiştir.



Şekil 3.3. Mono kristal bir PV hücrenin kesiti [105, 106]

Şekil 3.3'te görüldüğü üzere, silikon esaslı bir PV hücrenin temel yapısını N ve P olarak katkılandırılmış germanyum ve silisyum gibi yarı iletkenler oluşturmaktadır. Bununla beraber, ince film olarak adlandırılan PV teknolojilerinde, bu yarı iletkenlerle bileşikler de oluşturabilen, arsenit, indiyum, fosfor, kadmiyum, tellür gibi elementler de kullanılabilir. Tipik bir PV hücre üzerinde elektron akımı yollarının oluşturulabilmesi için arka ve ön kontaklar kullanılır. Hücrenin ışınım yutulumunu artırmak ve kontrol etmek için yutucu bir yüzey ve hücreyi fiziksel etmenlerden korumaya yarayan optik çerçevede düzenlenerek temperlenmiş cam tabaka kullanılmaktadır. Arka kontakların da nem, sıvı, darbe gibi fiziksel etmenlere karşı korunabilmesi için EVA (Etilen vinil asetat) bir tabaka ile koruma altına alınmaktadır. Bu koruma katmanları genellikle PV hücrelerin bir araya gelmesiyle oluşan PV modüller için kullanılmaktadır. Bir modül bu katmanlarla beraber anodize alüminyum bir çerçeve içine alınır ve uzun yıllar boyunca kullanılabilen modüllerde tabakaların yan kesitinden süreç içinde sıvı ve nemin sızması için tüm açık alanlar sıvı silikonla kapatılmaktadır.

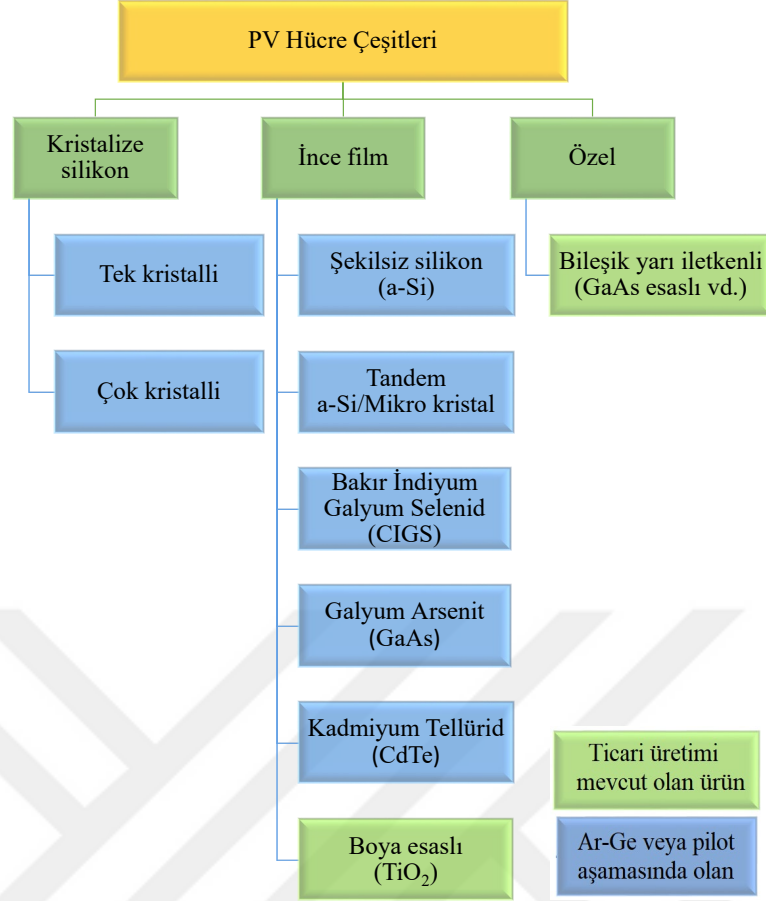
Fotovoltaik enerji, sahip olduğu avantajlar nedeniyle, güneş enerjisi uygulamalarında günümüzde ve gelecekte öne çıkan teknolojilerden biri olup, hâlihazırda küresel elektrik enerjisinin %3,68'i bu teknoloji aracılığıyla üretilmektedir [107]. Fotovoltaik sistemler, diğer bazı yenilenebilir enerji sistemlerinde olduğu gibi, giriş güç kaynağının kolay ölçeklendirilmesi nedeniyle uzak bölgelerde düşük ve orta güç seviyeleri için mükemmel bir seçimdir [108, 109]. PV sistemlerinin en önemli özellikleri arasında, sıfır emisyon özelliğiyle çevreye zarar vermeden tükenmez bir enerji kaynağı olan güneşi kullanmaları, yaygın üretim ve pazarlama ağına sahip olmaları, tesis maliyeti ve geri dönüş sürelerinin görece düşük olması ve kolay uygulanabilir olmaları sayılabilir.

Bununla beraber, PV sistemlerinin maliyetinde devam eden düşüş ve verimliliklerindeki artışın yakın gelecekte bu sistemler için umut verici bir role sahip olmasına rağmen [110], maalesef PV güç sistemleriyle ilişkili teknolojiler, diğer enerji kaynaklarının birim fiyatındaki cazibe dolayısıyla küresel ölçekte henüz kabul edilebilir düzeyde yaygınlaşamamıştır [111].

Geleneksel PV hücreler, Schockley-Queisser limiti olarak bilinen sınırdan dolayı, güneşten doğal olarak gelen ışıınım enerjisinin en fazla %31'ini elektrik enerjisine dönüştürebilirler [112]. Bilimsel gelişme süreci içinde, bu sınırın aşılabilmesi için, doğal yollarla gelen güneş enerjisinin panel yüzeyine daha yoğun miktarda gelebilmesini veya doğal olarak gelen ışıınımdan daha fazla yararlanabilen, yoğunlaştırıcı fotovoltaiik (CPV) sistemi, çok kesitli güneş hücreleri (MJSC), iki yüzölü hücreler (bifacial cells) ve benzer teknolojiler ortaya çıkmıştır.

3.3. PV Hücre Teknolojileri

Bütün PV hücrelerinin yapısında, güneşten foton yoluyla gelen ışıınıımı elektrik enerjisine dönüştürmek üzere bu ışıınıımı soğurmak için gerekli bir malzeme bulunmaktadır. Fotoelektrik etki olarak adlandırılan kavram genel olarak, güneşten gelen fotonları absorbe eden materyalin, PV hücredeki serbest elektronları uyarması esasına dayanmaktadır ve foton enerjisi bu fenomen aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürölür. PV malzemeler elektron akışı oluşturmak üzere, terminallere bir yük bağlanması durumunda, PV hücrenin terminalleri arasında bir devrenin çalışması için gerekli potansiyel farkın oluşmasını sağlarlar. Bugüne kadar ticari güneş PV hücrelerinin üretimi genellikle silikon esaslı yarı iletken malzemelere dayansa da, çeşitli metal oksitler veya organik esaslı malzemelerle üretilen PV hücre teknolojileri de kayda değer düzeyde gelişmiş ve gün geçtikçe gelişmeye devam etmektedir [113]. Şekil 3.4'teki diyagramda PV pazarında ticari amaçlı bulunan veya çeşitli verim ve optimizasyonlar açısından geliştirilme sürecinde olan bazı PV teknolojileri verilmiştir.



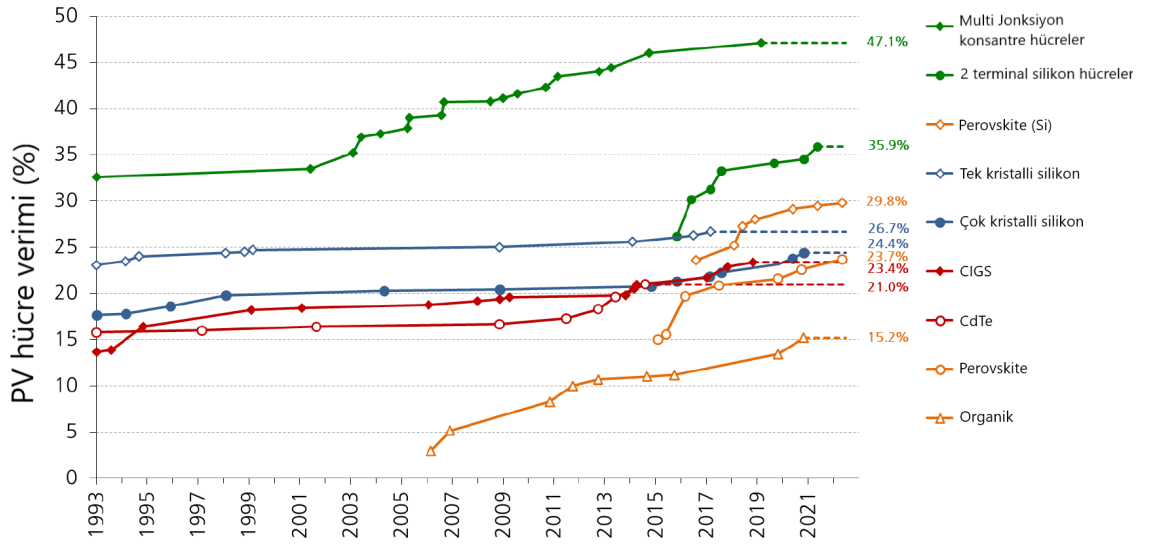
Şekil 3.4. Çeşitli PV hücre teknolojileri [103]

Mevcut PV teknolojileri arasında bulunan, tek kristalli silikon ve çok kristalli silikon teknolojilerine ait erişilen hücre verimleri sırasıyla %26,7 ve %24,4 iken; galyum arsenit, amorf silikon, kadmiyum tellür ve CIS/CIGS teknolojilerine ait enerji dönüştürme verimleri ise sırasıyla, %29,1 - %14,0 - %21 ve 23,35'tir. Tablo 3.1'de küresel pazarlarda üretilen hücre teknolojilerine ait son erişilen enerji dönüştürme oranları, hücre verimi, modül verimi ve hücre açık devre gerilimi (V_{oc}) değerleri ile beraber verilmiştir.

Tablo 3.1. Mevcut PV teknolojileri hücre ve modül verimleri [114]

PV Teknoloji	Hücre Verimi (%)	Modül Verimi (%)	Hücre V_{oc} (Volt)	Hücre J_{sc} (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

Tablo 3.1’de de görüleceği üzere bir PV teknolojisinin hücre verimi, bu hücrelerin seri ve/veya paralel bağlanmasıyla oluşturulan modüllerin verimine göre daha yüksektir. Bunun sebebi, hücreler arasındaki elektriksel bağlantılarda meydana gelen kayıplar ve hücreler arasında mecburi olarak bırakılan mesafedir. Hücrelerin kapladığı alanın dışında kalan boşlukların, modül verimi belirlenirken hesaba katıldığı unutulmamalıdır. Bu tabloda yer alan verim değerleri, araştırmacılar tarafından gün geçtikçe artırılmakta ve periyodik olarak erişilen son değerler gerek enstitüler gerekse üretici firmalar tarafından tablolar ve grafikler şeklinde yayınlanmaktadır. Şekil 3.5’te yıllara göre PV hücre verimindeki değişimin seyri görülmektedir.



Şekil 3.5. Yıllara göre PV hücre verimi gelişimi [115]

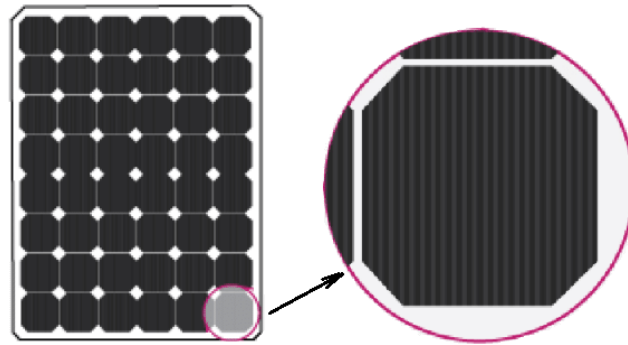
Üretim sürecinde kullanılan teknoloji ve PV yapısını oluşturan elementlere göre birçok PV hücre türü bulunsa da kabul edilebilir düzeydeki verimleri, maliyet değerleri ve ortalama işletme ömürleri dolayısıyla iki hücre teknolojisi ön plandadır. Bunlar kristalize silikon ve ince film fotovoltaik hücrelerdir. Kristalize silikon hücreler, görece daha çok saflaştırılmış silikon materyalinin kullanıldığı tek kristalli silikon (mono-kristalin) ve saflaştırma prosesinde Siemens işlemi ile yetinilmiş çok kristalli silikon (poli-kristalin) fotovoltaik hücreler olarak ikiye ayrılmaktadır. Bir başka ana teknoloji olan ince film fotovoltaik teknolojisi ise amorf silikon, galyum arsenit, kadmiyum tellürid ve bakır indiyum diselenid fotovoltaik hücreler olarak üretilmekte olup, tüm bu yaklaşımların birbirlerine, kullandıkları şartlar, ömür, maliyet verim gibi parametrelere göre avantaj ve dezavantajlara sahiptirler [116].

3.3.1. Kristalize silikon hücreler

Kristalize silikon hücreler, en eski ama buna rağmen en popüler hücre teknolojisi olup 1. nesil güneş hücrelerinin temelini oluştururlar [117]. Silisyum elementi doğada saf olarak bulunmamaktadır. Bu teknolojiye, hücre üretiminde kullanılan silisyum elementinin çeşitli silikatların belirli işlemlere tabi tutularak saflaştırılması gerekmektedir. Bu saflaştırma süreci, özellikle tek kristalli silikon hücrelerin üretim maliyetini artırmaktadır. Maliyet oranlarına rağmen, kristalize silikon hücreler yüksek verimlilikleri nedeniyle küresel pazarlarda hâlâ başı çekmekteyse de, bu hücrelerin kristal yapılarında meydana gelen kusurların hücre performansı üzerindeki büyük olumsuz etkileri diğer hücre teknolojilerinin gelişmesini ve yaygınlaşmasını da sağlamaktadır. [118]. Kristalize silikon hücreler genel olarak, tek kristalli ve çok kristalli silikon hücreler şeklinde iki alt kategoriye ayrılır.

3.3.1.1. Tek kristalli silikon hücreler

Tek kristalli silikon hücreler, Siemens işleminden sonra Czochralski saflaştırma prosesine tabi tutularak üretilen hücrelerdir [119]. Bu üretim sürecinde üretilen büyük boyutlu külçeler dilimlenerek Si kristaller elde edilir. Hem silikatlardan silikon elementinin sentezlenmesi, hem de bu aşamadaki ürünün Czochralski prosesiyle saflaştırılması hassasiyet gerektiren pahalı üretim yöntemleridir. PV pazarında bulunan tek kristalli silikon hücrelere ait erişilen hücre verimi ve modül verimi değerleri sırasıyla %26,7 ve %24,4'tür [114]. Şekil 3.6'da tek kristalli silikon bir hücre ve bu hücrelerle oluşturulmuş bir modül görülmektedir.

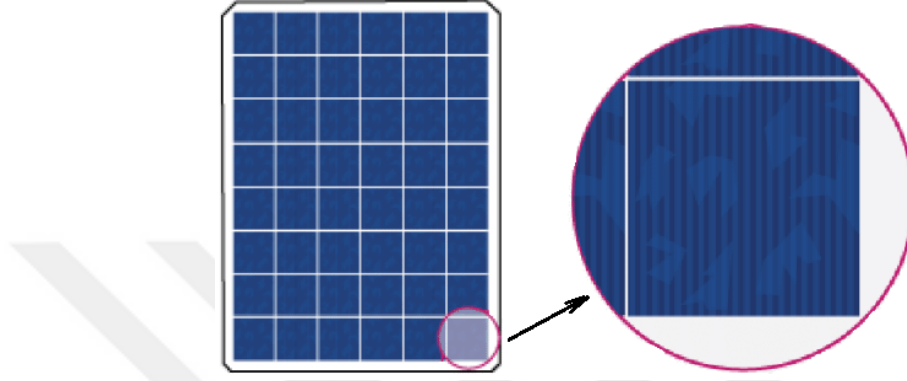


Şekil 3.6. Tek kristalli silikon hücre ve modül [120]

3.3.1.2. Çok kristalli silikon hücreler

Çok kristalli silikon güneş hücresini oluşturmak için bir dizi farklı kristal birlikte kullanılır. Üretim prosesi Siemens işleminden sonra tamamlanmaktadır. Bu tür güneş

pillerinin işlenmesi, grafit dolgulu bir kalıbın soğutulmasıyla yapılır ve bu da onu daha ekonomik hâle getirmektedir. Bu hücreler küresel olarak yaklaşık %50'lik kullanım oranıyla en popüler güneş pili türlerindendir. Tek kristalli hücrelere göre daha düşük üretim maliyetine sahip olan çok kristalli silikon hücrelerin erişilen enerji dönüştürme oranları, hücre ve modül bazında sırasıyla %24,4 ve %20,4'tür [114]. Şekil 3.7'de çok kristalli silikon bir hücre ve bu hücrelerle oluşturulmuş bir modül görülmektedir.



Şekil 3.7. Çok kristalli silikon hücre ve modül [120]

3.3.2. İnce film hücreler

İnce film PV hücrelerinin çoğu tarihi gelişim açısından 2. nesil PV hücreler sınıfında olup 1. nesil silikon esaslı hücrelere kıyasla daha ekonomiktirler. Kristalize silikon hücreler 350 μm kalınlığa kadar ışığı soğuran katmanlara sahipken, ince film güneş pilleri genellikle 1 μm kalınlığında çok ince ışık soğuran katmanlara sahiptirler [121]. İnce film hücrelerde kullanılan materyaller çoğunlukla, kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemiyle elde edilirler. Bu yöntem sırasında reaksiyona giren elementler, üretimi aktive eden basınç, sıcaklık ve gaz akış debisi parametrelerine göre farklı fiziksel özelliklere sahip alaşımlar oluştururlar. Bu yaklaşımla üretilen ince film hücreler kullanılan alaşımların türüne göre, amorf silikon (a-Si), galyum arsenit (GaAs), kadmiyum tellürid (CdTe), bakır indiyum diselenid (CIS – CIGS) gibi isimler almaktadır [103]. İnce film hücreler, ekonomik olarak kristalize silikon hücrelere göre daha avantajlı olmasının yanında enerji dönüştürme oranları daha düşük olup, çeşitlerine göre geniş bir skalada bulunmaktadır [122].

3.3.2.1. Amorf silisyum (a-Si) ince film hücreler

Amorf silisyum ince film PV hücreleri, endüstriyel olarak üretilen ilkel güneş pilleridir. Bu hücrelerin üretiminde düşük sıcaklık değerlerinin kullanılması, yapılarında

düşük maliyetli polimer ve çeşitli diğer alt tabakaların kullanılmasına olanak verir. Böylece bu hücrelerin tabakalarının işlenmesi için görece düşük enerji değerleri yeterlidir [123]. Bu avantajları nedeniyle amorf silisyum ince film hücreler daha ucuzdur ve yaygın kullanım alanı bulurlar. Bu hücrelere ismini veren amorf (şekilsiz) kelimesi, hücrenin silisyum maddesinin belirli bir atom dizilişine sahip olmaması, yapılandırılmamış olması nedeniyle kristal olmayan bir yapıyı ifade etmektedir. Kristal bir yapıda olmaması bu hücrelere bükülgen bir özellik katmaktadır. Şekil 3.8’de amorf silisyum modüllerle yapılan bir uygulama verilmiştir.



Şekil 3.8. Amorf silisyum ince film modül uygulaması [124]

Amorf silisyum ince film hücrelerin erişilen enerji dönüştürme oranları, hücre ve modül bazında sırasıyla %14 ve %12,3 olup [114], yansıtıcı tarafından bakıldığında koyu kahverengi veya koyu kırmızı, kontak kısmından bakıldığında ise gümüş rengindedir.

3.3.2.2. Galyum arsenit (GaAs) ince film hücreler

Sınırlı olarak PV hücre üretiminde kullanılan galyum arsenit (GaAs) bileşiği elektronik devre elemanlarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Galyum arsenit ince film hücreler, kristalize silikon hücrelere kıyasla modül performansını etkileyen radyasyonun termal etkisine karşı yüksek bir dirençle sahip olduklarından konsantre PV (CPV) uygulamaları için oldukça elverişlidirler [125]. Bununla birlikte, galyum kaynaklarının sınırlılığı ve bu hücrelerin üretimindeki zorluklar nedeniyle çok yüksek maliyete sahiptirler [126]. Bu nedenle, PV sistemler için daha verimli ve düşük maliyetli galyum arsenit ince film hücrelerin daha da geliştirilmesi gerekmektedir. Galyum arsenit ince film hücre üretiminde erişilen enerji dönüştürme oranları, hücre ve modül bazında sırasıyla %29,1 ve %25,1’dir [114].

3.3.2.3. Kadmiyum tellür ince film hücreler

İnce film güneş pilleri arasında kadmiyum tellür (CdTe), daha ucuz, ekonomik olarak uygun PV sistemlerin geliştirilmesi için önde gelen ince film hücrelerden biri olup, düşük maliyetli ilk PV hücre teknolojisidir [127]. Kadmiyum tellür hücreler yaklaşık 1,5 eV'luk bant aralığına, yüksek optik absorpsiyon katsayısına ve kimyasal kararlılığa sahiptir. Bu özellikler, CdTe alaşımını ince film güneş hücrelerinin tasarımı için en çekici malzeme haline getirmektedir [117]. Şekil 3.9'da kadmiyum tellür bir modüle ait görsel verilmiştir. Kadmiyum tellür ince film hücre üretiminde erişilen enerji dönüştürme oranları, hücre ve modül bazında sırasıyla %21 ve %19'dur [114].



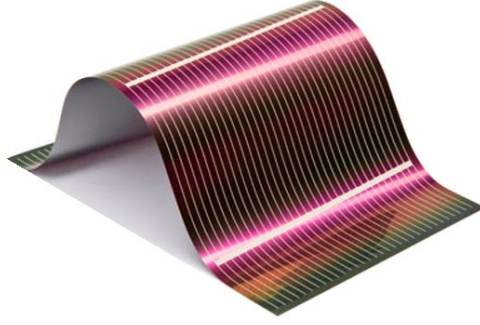
Şekil 3.9. Kadmiyum tellür ince film dizi [128]

Kadmiyum, insan vücudunda, hayvanlarda ve bitkilerde birikebilen ağır bir metal ve potansiyel toksik olarak kabul edilir. Toksik Cd bazlı malzemelerin bertaraf edilmesi ve bunların geri dönüştürülmesi oldukça pahalı olabilir ve çevreye ve topluma zarar verebilir. Bu nedenle, sınırlı bir kadmiyum kaynağı ve kullanımıyla ilişkili çevresel tehlike, CdTe teknolojinin başlıca sorunlarıdır [129].

3.3.2.4. Bakır indiyum di-selenid ince film hücreler

Bakır indiyum diselenid (CuInS_2 - CIS) ve bakır indiyum galyum diselenid (CuInGaS_2 - CIGS) ince film hücreler, CdTe ince film hücreler ile karşılaştırıldığında, yaklaşık %10 - %12 arasında daha yüksek bir verimliliğe sahip oldukları görülmektedir. Önemli derecede yüksek verimlilikleri ve ekonomiklikleri nedeniyle, CIS ve CIGS tabanlı hücre teknolojilerinin en uygun teknolojilerinden biri olduğu söylenebilir. CIGS

hücreler için taban tabakası, cam, polimer, çelik, alüminyum vb. malzemeler olarak seçilebilir. Şekil 3.10’da bakır indiyum diselenid hücreye ait bir görsel sunulmuştur.

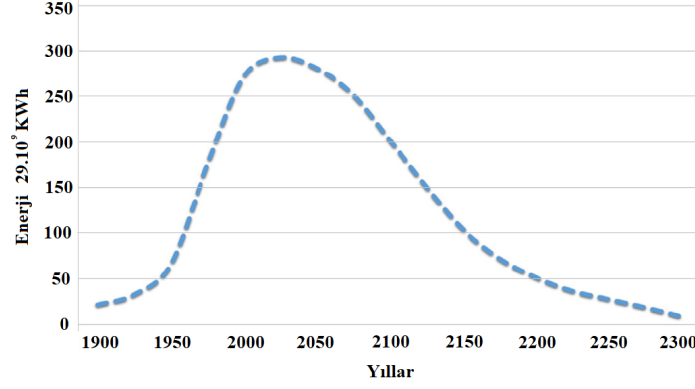


Şekil 3.10. Bakır indiyum diselenid bir hücre [130]

CIGS ince film hücrelerin en önemli özelliklerinden biri de enerji dönüştürme oranlarını fazla kaybetmeden görece uzun işletme ömürleridir. Bakır indiyum diselenid hücreler, ince film hücre teknolojileri arasında en yüksek verimliliğe sahiptirler ve üretiminde erişilen enerji dönüştürme oranları, hücre ve modül bazında sırasıyla %23,35 ve %19,2’dir [114].

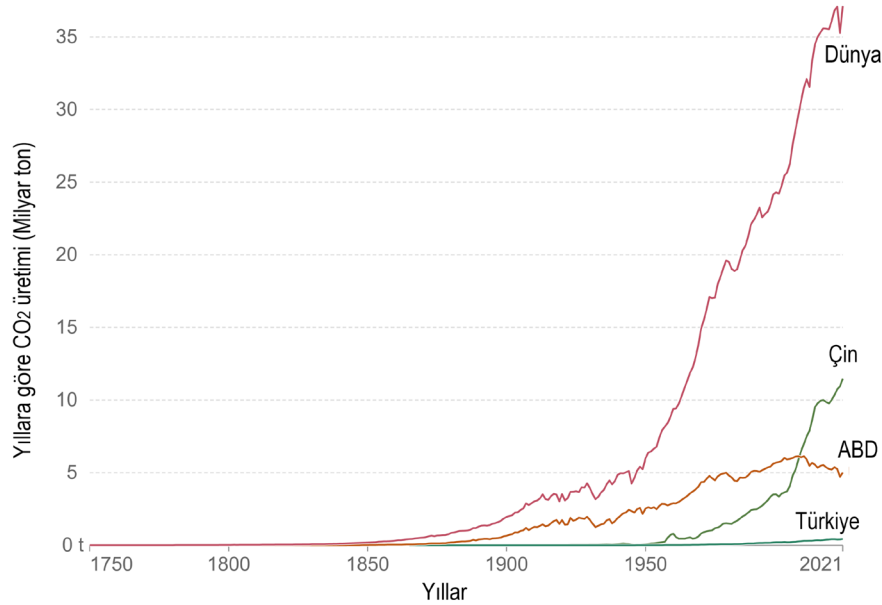
3.4. Enerji Üretimine Genel Bakış

Fosil kökenli yakıtlar küresel enerji ihtiyacının hâlâ büyük kısmını sağlamakla beraber barındırdığı olumsuzluklar sebebiyle tüketim trendi bütün dünyayı yakından ilgilendirmektedir. Endüstriyel üretim sayesinde toplumların refah düzeyi artmakta, bu da nüfus artışına neden olmaktadır. Artan nüfusun ihtiyaç duyduğu enerji ihtiyacı da buna paralel olarak gün geçtikçe artmaktadır. Dünyada, 2004 yılına ait küresel elektrik üretim miktarı 17450 TWh, 2021 yılına ait küresel elektrik üretim miktarı 27782 TWh olarak gerçekleşmiştir. Bazı projeksiyonlar, 2030 yılında küresel elektrik enerjisi üretiminin 32000 TWh dolaylarında olacağını bildirmektedir [131]. Elektrik üretiminde fosil kökenli yakıtların kullanılma oranlarında hâlâ kayda değer azalmalar gerçekleşmemiştir. Enerji talebi trendi incelendiğinde, fosil kökenli yakıtlara olan ilginin belli bir süre daha devam edeceği düşünülmektedir. Şekil 3.11’de Sanayi Devrimi’yle başlayan fosil kökenli yakıt kullanımının günümüze ve geleceğe dair tüketim öngörülerini içeren bir grafik sunulmuştur. Bu bilgilere göre, gerek fosil yakıt rezervlerindeki azalma, gerekse alternatif enerji kaynaklarının kullanımındaki artışla, 2050’li yıllardan itibaren fosil yakıtlarla enerjiye erişimin hızla azalmaya başlayacağı ve 2300 yılına doğru tamamen sona ereceği öngörülmektedir [132].



Şekil 3.11. Yıllara göre fosil kaynaklarla enerji üretimi [132]

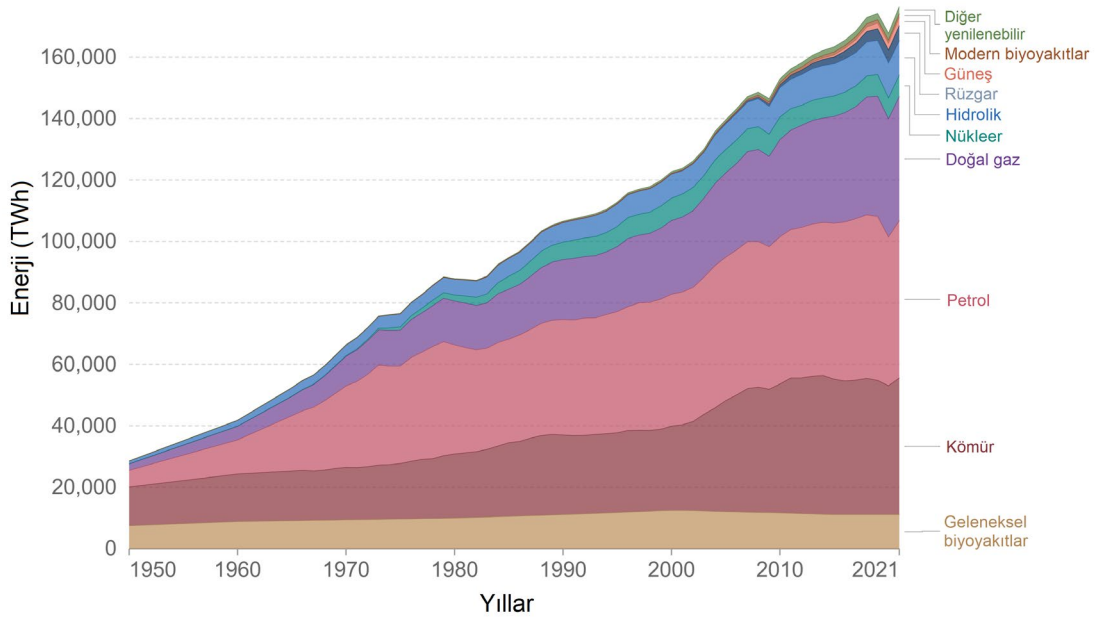
Fosil yakıtların kullanımı, küresel ısınma ve hava kirliliği gibi sağlık sorunlarına neden olan ve toplumların yaşam kalitesini etkileyen çevresel sorunların başında gelmektedir [133]. Şekil 3.12'de yıllara göre sera gazlarının başında gelen CO₂ salınımının dünya, ABD, Çin ve Türkiye için değişimi görülmektedir. Özellikle endüstriyel üretimde enerji ihtiyacını karşılamak için başta ABD ve Çin devletleri küresel salınımın büyük kısmını oluşturmaktadır. Grafik incelendiğinde küresel bazda, 1929'da yaşanan Büyük Buhran ve 2019'da baş gösteren Kovid-19 salgını sürecinde küçük düşüşler yaşanmışsa da, CO₂ salınımı genel olarak artış trendi göstermektedir. Bu emisyonları kontrol altına almak için araştırmacıların ve devletlerin bir araya gelerek bu konuyu ele aldıkları uluslararası zirveler gerçekleştirilerek alınan kararların enerji politikalarına dönüştürülmesi umulmaktadır.



Şekil 3.12. Yıllara göre CO₂ salınımı [134]

Çin hükûmeti geliştirdiği enerji politikaları sayesinde; endüstriyel yapının değiştirilmesi, daha temiz enerji kaynaklarına geçiş, nüfus artışının sınırlandırılması ve araç sayısının ve emisyonlarının düzenlenmesi yoluyla uzun vadeli ve daha kalıcı SO₂ emisyon düşüşü sağlandığı sonucuna varmıştır. Pekin'in ekonomik yapısında ikincil sanayinin payını düşürmeyi amaçlayan reformların, hükümet tarafından uygulanması hava kalitesini iyileştirmenin ana itici gücü olduğunu göstermektedir [133].

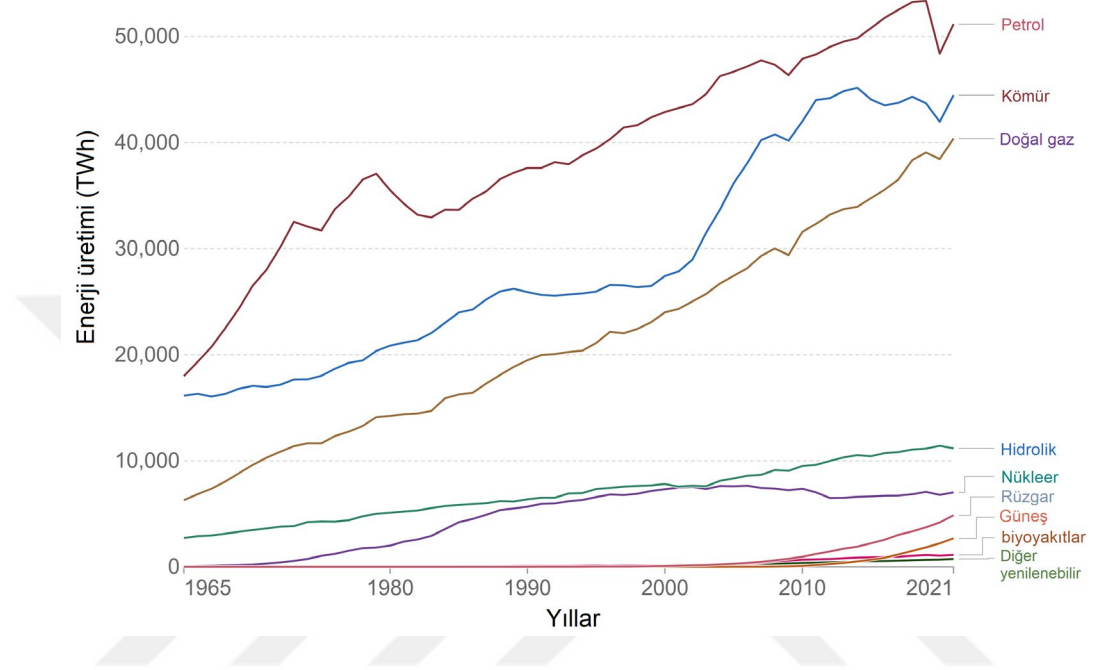
Şekil 3.13'te, 1950'den 2021'e kadar yıllara göre, petrol, kömür, doğal gaz gibi fosil yakıtlarla beraber, nükleer enerji, hidrolik enerji, rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, biyoyakıt enerjisi, jeotermal enerji, dalga enerjisi ve geleneksel biyoyakıt gibi birincil enerji kaynaklarının tüketimine ilişkin ilerleme görülmektedir. Grafîğe göre yıllar içinde, küresel ekonomik krizlerin yaşandığı bazı istisnai durumlar haricinde tüketilen enerji miktarının düzenli olarak arttığı görülmektedir. Tüm yıllar için, tüketilen enerjinin büyük bir kısmı kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil kökenli yakıtlardan sağlanırken, yenilenebilir enerji kaynaklarının talebi karşılamadaki oranlarında küçük de olsa artışlar kaydedilmiştir. Bu verilere göre 2021 yılı içinde dünya genelinde toplam 176.431 TWh enerji tüketilmiştir.



Şekil 3.13. Yıllara göre küresel enerji tüketimi [135]

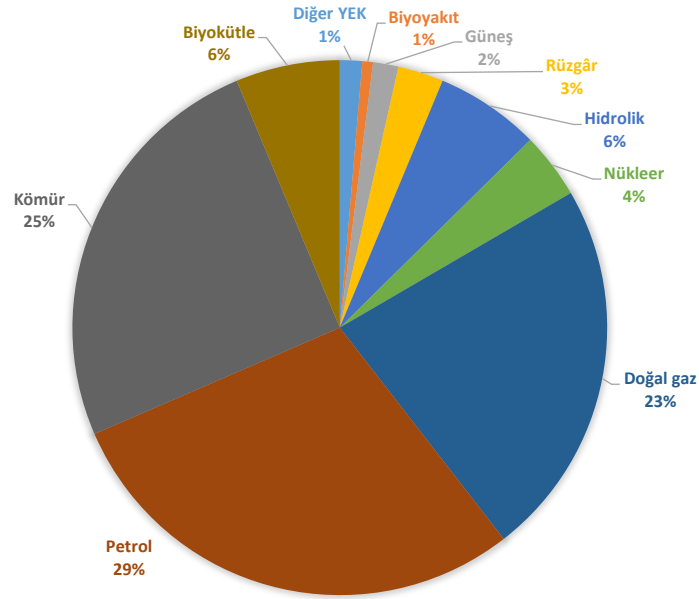
Şekil 3.14'te yıllara göre birincil kaynakların küresel enerji talebini cevaplama seyri görülmektedir. Bu verilere göre, petrol, kömür ve doğal gazın küresel talebi karşılama miktarı alternatif kaynaklara göre çok daha yüksek olmakla beraber hidroelektrik ve nükleer santrallerin rolü de kayda değer düzeydedir. Ancak son birkaç

yılda hidroelektrik ve nükleer santrallerin talebi karşılamada yatay bir seyir izlediği görülmektedir. Bunun özellikle Almanya'nın nükleer enerji santrallerini devreden çıkarmaya yönelik enerji politikalarından ileri geldiği söylenebilir. Yine Şekil 3.14'e göre rüzgâr ve güneş enerjisinin son 10 yıl içinde artan bir ivmeyle enerji talebine yanıt verdiği görülmektedir.



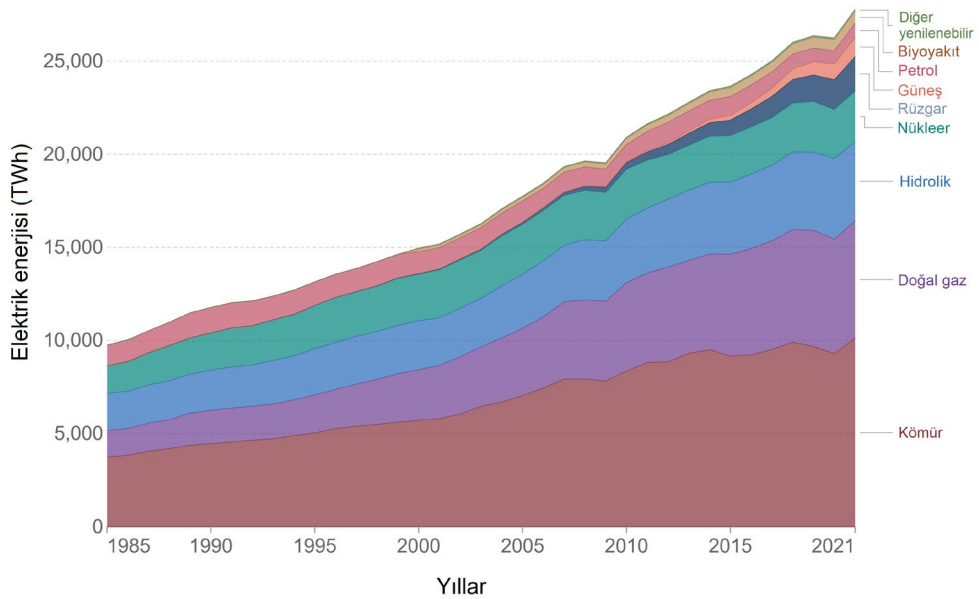
Şekil 3.14. Yıllara göre kaynakların tüketimi karşılaması [135]

Şekil 3.15'te 2021 yılı boyunca tüketilen küresel enerjinin enerji kaynaklarına göre karşılanmasına ait dağılım gösterilmektedir. Bu verilere göre, kurulumları hızla artan yenilenebilir enerji santrallerine rağmen küresel tüketimin %77'si hâlâ fosil kökenli yakıtlarla karşılanmaktadır. Küresel tüketimin %19'luk kısmı yenilenebilir enerji kaynakları tarafından karşılanırken, %4'ü ise nükleer enerji santralleri tarafından karşılanmaktadır. 2021 yılı boyunca küresel enerji tüketimi 176.431 TWh iken bu enerjinin sadece 2702 TWh'lik kısmı güneş enerjisinden karşılanmıştır. Bu değerler, yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelen güneş enerjisi uygulamalarının küresel enerji talebinin sadece %1,53'lük kısmını karşıladığı anlamına gelmektedir



Şekil 3.15. 2021 yılında kaynaklara göre küresel enerji üretimi [135]

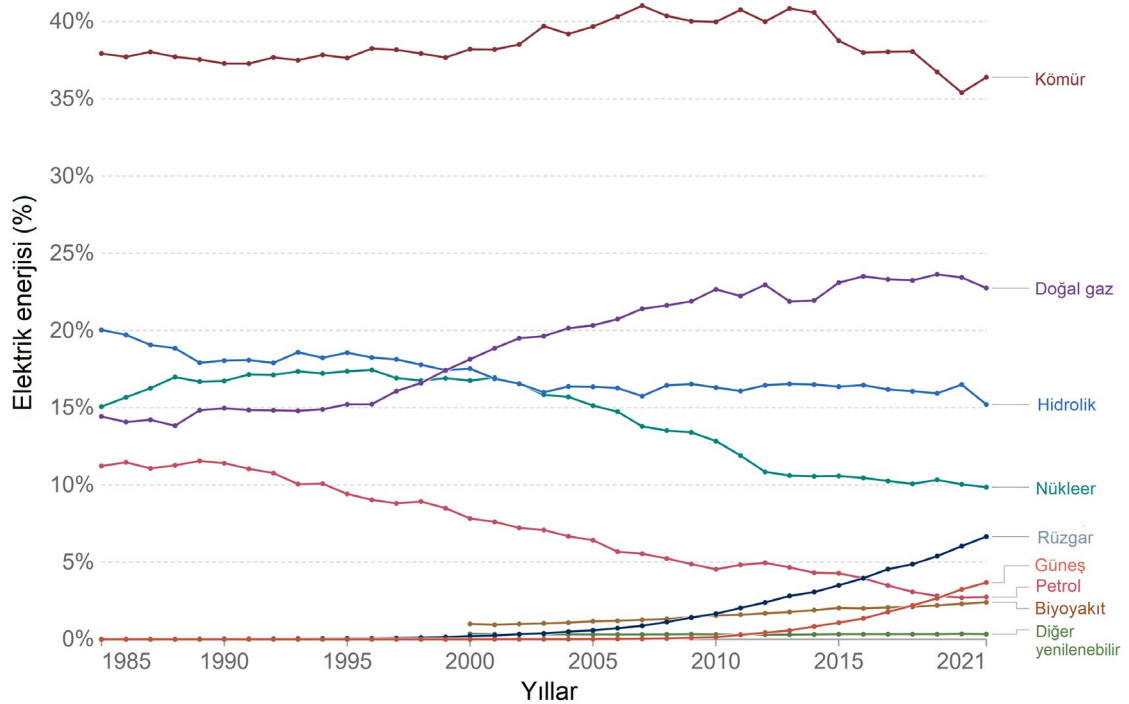
Yukarıda verilen tüm grafikler ve bunlara bağlı sayısal değerler küresel enerji toplam enerji üretim ve tüketimiyle ilgilidir. Bu değerler genellikle petrol ürünlerinin ve doğal gazın kullanıldığı ulaşım ve endüstriyel tarım ve hayvancılık sahasında tüketilen enerjiyi de kapsamaktadır. Tez kapsamında, güneş enerjisinin elektrik üretim amacıyla kullanılmasına ilişkin durumunun daha iyi anlaşılabilmesi için, birincil enerji kaynaklarının sadece elektrik üretimiyle ilgili olan dağılımlarının süreç içindeki seyri de ele alınmak istenmiştir.



Şekil 3.16. Küresel elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı [136]

Şekil 3.16’da küresel elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı yıllara göre sunulmuştur. Bu verilere göre, ulaşım ve endüstriyel üretimde sıklıkla tercih edilen petrol ürünlerinin elektrik üretimindeki payının oldukça düşük olduğu anlaşılmaktadır. Ancak küresel darboğazların ve salgınların yaşandığı dönemler haricinde, fosil kökenli yakıtlar da dâhil olmak üzere, elektrik enerjisi üretiminde kaynak kullanımının sürekli artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Ne yazık ki elektrik enerjisi üretiminde de fosil kökenli yakıtların en önemli rolü üstlendiği görülmektedir.

Şekil 3.17’de 1985 ile 2021 yılları arasında, elektrik enerjisi üretimi amacıyla kullanılan kaynakların, enerji üretimindeki katkıları oransal olarak sunulmuştur. Fosil kökenli yakıtların başında gelen kömürün, 35 yıllık süre içinde kullanım oranının genellikle değişmediği görülmektedir. Doğal gazın talebi karşılama oranının yıllara göre yükselmesi, enerji dönüşüm sürecinin göre kolaylığı ve küresel yeni rezerv keşiflerine bağlanabilir. Yüksek maliyetlerinden ve uluslararası su politikalarından dolayı geleneksel yenilenebilir enerji üretim teknolojilerine sahip hidroelektrik santrallerin küresel üretimdeki payının düşme eğiliminde olması dikkat çekicidir.

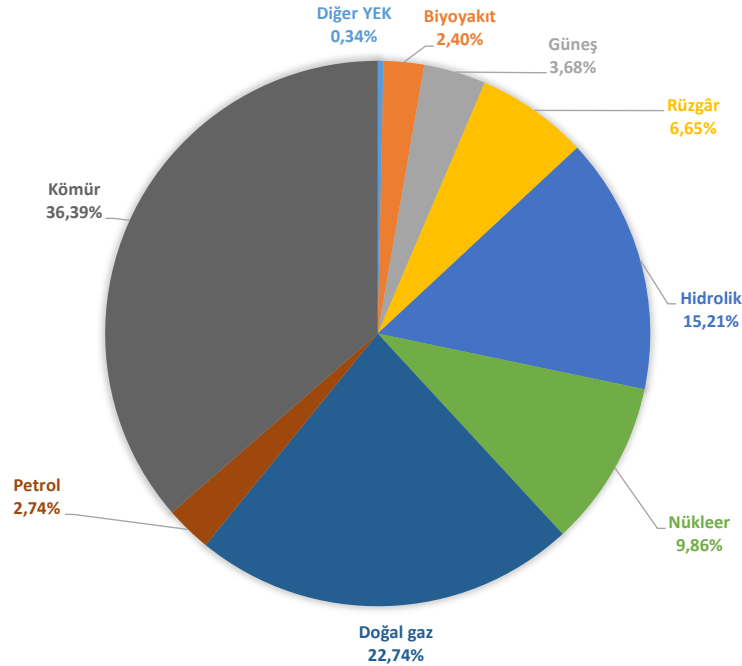


Şekil 3.17. Küresel elektrik üretiminin kaynaklara göre oransal dağılım değişimi [136]

Nükleer teknolojiyle elektrik üretiminin de özellikle 2000 yılından sonra düşme eğiliminde olduğu görülmektedir. 2010 yılındaki sert düşme trendinin, 2011 yılında yaşanan Fukushima Felaketi’nin ülkelerin nükleer enerji kullanım politikaları üzerindeki

radikal kararlarından ileri geldiği söylenebilir. Petrol ve türevlerinin elektrik enerjisi üretimindeki payının ise 35 yıllık zarfta sürekli düşme eğiliminde olduğu görülmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik enerjisi üretimi tarafına bakıldığında, rüzgâr ve güneş başta olmak üzere, biyoyakıt ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının da 2000'den sonra sahneye çıktığı ve özellikle 2010 yılından başlayarak artan bir ivmeyle küresel üretimdeki paylarını artırdıkları görülmektedir.

Şekil 3.18'deki grafikte 2021 yılı içinde üretilen küresel elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı verilmiştir. Şekil 3.16 ve 3.17'deki verilerin kullanılmasıyla oluşturulan bu grafiğe göre, küresel elektrik üretiminin %61,87'si fosil kökenli yakıtlarla sağlanmıştır. Zararlı emisyonlar salmaması ile bilinen ancak barındırdığı teknolojinin olası felaketlere yol açabilmesi nedeniyle toplumları endişelendirebilen nükleer santraller küresel talebin %9,86'sına cevap vermiştir. 2021 yılında bütün yenilenebilir enerji kaynakları, küresel elektrik üretiminin %28,28'ini karşılamış olup, bu oran 1985 yılında hidroelektrik santrallerin kullanımıyla sadece % 20 idi. 2021 yılında modern kaynaklar olarak bilinen rüzgâr, güneş, biyoyakıt, jeotermal ve dalga enerjisi olarak bilinen kaynaklarla elektrik üretiminin toplam oranı %13,05'tir. Bu oran 2000 yılında sadece %1,55'tir. 2021 yılı içerisinde neredeyse tümünün PV santrallerle sağlandığı güneş enerjisi ile elektrik üretimin toplam elektrik üretimine oranı %3,68 olup, bu oran 2010 yılında %0,15 ve 2000 yılında %0,01'in altında bir değere sahiptir.

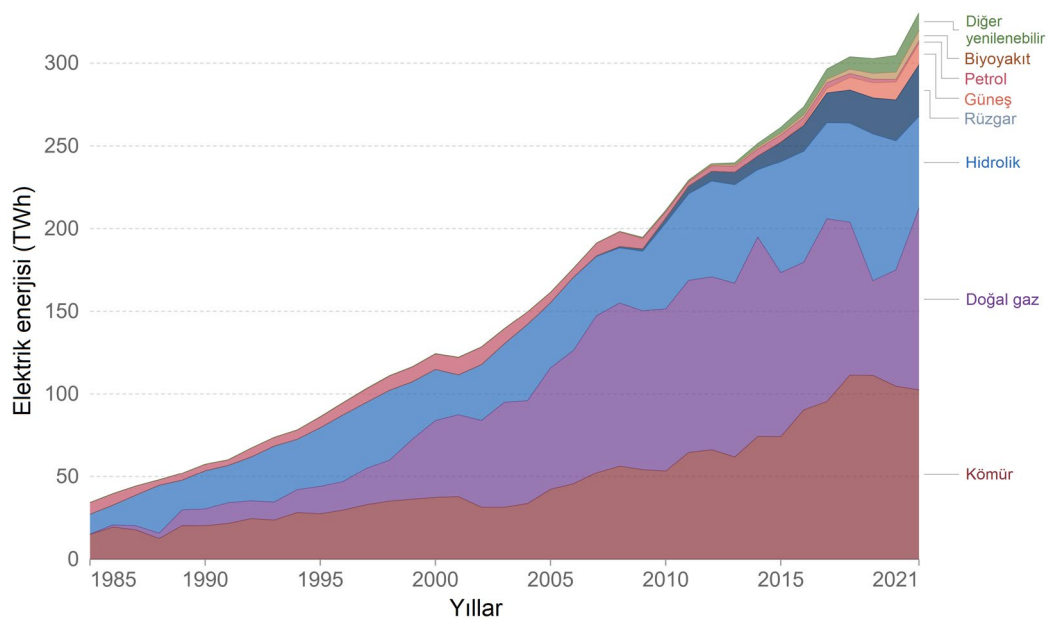


Şekil 3.18. 2021 yılı küresel elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı [136]

Sunulan tüm bu istatistiksel verilere göre, başta rüzgâr ve güneş enerjisi olmak üzere, tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel elektrik üretimine cevap verme eğiliminde ciddi bir artış görülmektedir. Bu durum umut verici olmakla beraber, tüm canlıları yakından ilgilendiren sürdürülebilir bir yaşam ortamının sağlanması için yenilenebilir kaynakların daha da yaygınlaşması sağlanarak fosil kökenli yakıtlara olan ihtiyacın sınırlandırılması ve uzun vadede nihayet sona erdirilmesi gerekmektedir.

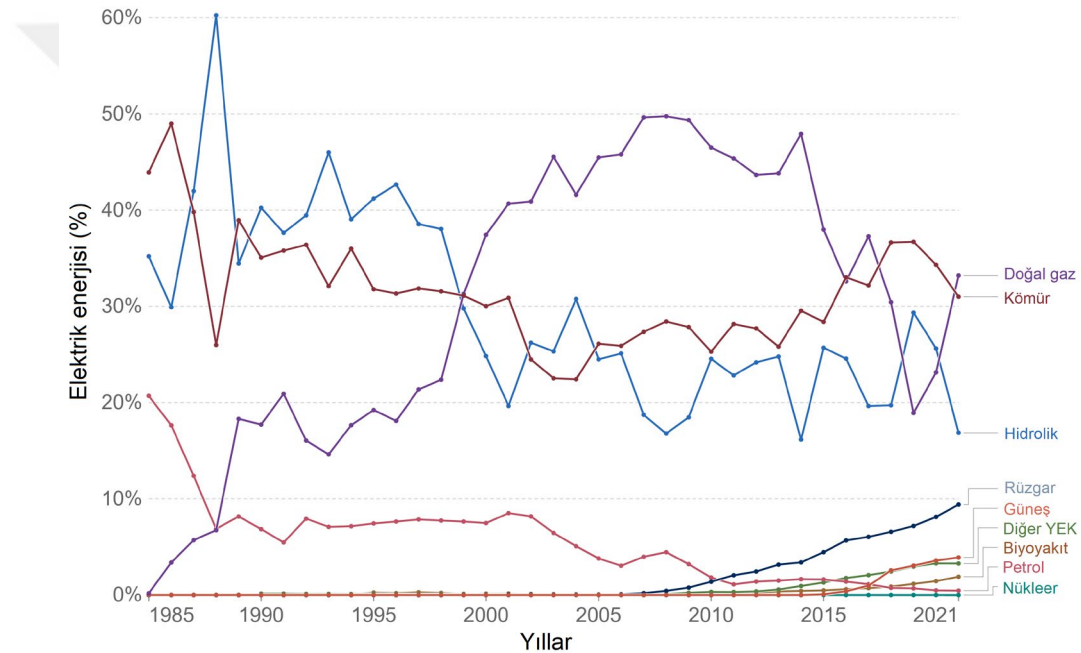
3.4.1. Türkiye elektrik enerjisi profili

Gelişmekte olan ülkeler arasında bulunan Türkiye genel olarak, inşaat, ev aletleri, elektronik, tekstil, petrol arıtma, petrokimya ürünleri, gıda, madencilik, demir-çelik ve makine sanayi alanlarında yoğun endüstriyel faaliyetler gösterdiğinden yüksek miktarda elektrik enerjisine ihtiyaç duymaktadır. Şekil 3.19’da Türkiye’de 1985 ile 2021 yılları arasında toplam elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı yıllara göre verilmiştir. Grafik incelendiğinde, ulaşım ve endüstriyel üretim alanında sıklıkla tercih edilen petrol ve türevlerinin elektrik üretimindeki payının küresel elektrik üretimindeki payına benzer şekilde oldukça düşük olduğu görülmektedir. 2008 küresel ekonomik krizi ve 2019 Kovid-19 pandemisi dolayısıyla bu tarihlerde elektrik enerjisi üretiminde düşüşler yaşanmışsa da küresel ölçeğe benzer şekilde fosil kökenli yakıtlar da dâhil olmak üzere, elektrik enerjisi üretiminde kaynak kullanımının sürekli artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Yine küresel elektrik üretiminde kaynakların dağılımına benzer olarak Türkiye’de de fosil kökenli yakıtların en önemli rolü üstlendiği görülmektedir.



Şekil 3.19. Türkiye elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı [136]

Şekil 3.20’de Türkiye’de 1985 ile 2021 yılları arasında, elektrik enerjisi üretimi amacıyla kullanılan kaynakların, üretimindeki katkıları oransal olarak sunulmuştur. Fosil kökenli yakıtların başında gelen kömürün, genel üretime olan oranın %20 ila %59 arasında değişebildiği görülmektedir. Doğal gazın talebi karşılamadaki oranı 2014 yılına kadar genel bir artış seyretmesine rağmen bu tarihten sonra özellikle de 2019’da baş gösteren küresel salgın nedeniyle enerji talebinin azalmasıyla elektrik üretiminde kullanımında bir düşme yaşandığı görülmektedir. Türkiye kendi doğal gaz rezervlerine sahip olmadığından, enerji talebinin azalmasından etkilenen ilk kaynak olduğu söylenebilir. Bununla beraber bu tarih aralığında yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik üretimindeki artışı, doğal gazla elektrik üretiminin azalmasına katkı sunmuştur.

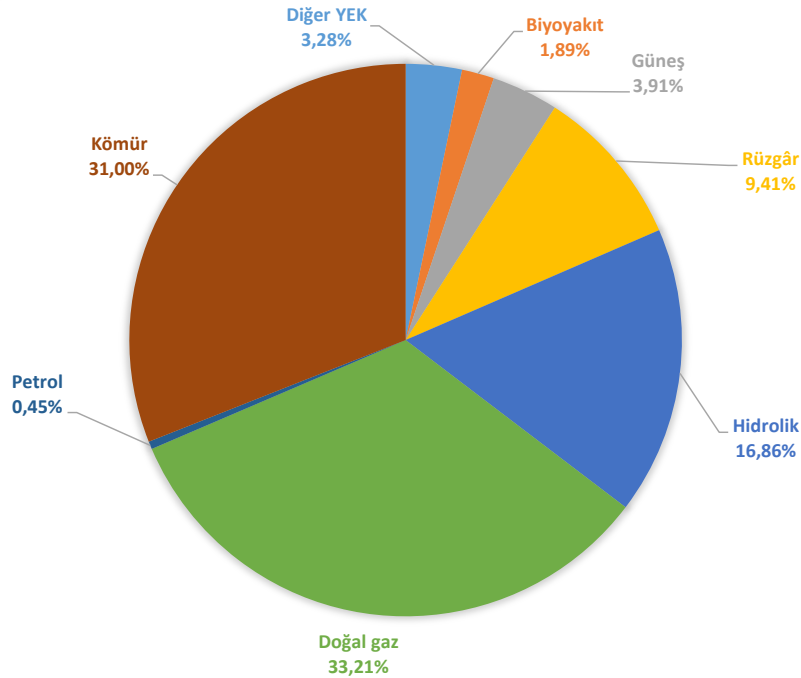


Şekil 3.20. Türkiye elektrik üretiminin kaynaklara göre oransal dağılım değişimi [136]

Türkiye’de yıllara göre yağış miktarının değişken olması nedeniyle, hidroelektrik santrallerle elektrik üretiminin ulusal üretime oranında yıllara göre ciddi değişimler gözlenmektedir. Türkiye’de faal olan bir nükleer santral henüz bulunmamaktadır. Ancak, 4800 MW kurulu güce sahip, ilki 2023 yılında diğerleri 2026 yılında faaliyete geçmesi planlanan toplam 4 reaktörden oluşan Akkuyu Nükleer Güç Santrali yapımı devam projeler arasındadır. Türkiye’de petrol ve türevlerinin elektrik enerjisi üretimindeki payı 1985 yılında %20 civarındayken 35 yıllık süreçte bu pay azalarak 2021 yılı sonu itibarıyla neredeyse tamamen sona ermiştir. Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik enerjisi üretimi tarafına bakıldığında, rüzgâr ve güneş başta olmak üzere, biyoyakıt ve

diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının özellikle 2008’den sonra kullanılmaya başladığı ve bu tarihten sonra hükûmetin sağladığı teşvikler nedeniyle ivmelenerek arttığı görülmektedir. Şekil 3.20’de “Diğer YEK”’in önemli kısmını oluşturan jeotermal enerjinin toplam 1679 MW kurulu gücüyle önemli yenilenebilir enerji kaynakları arasında olduğu görülmektedir.

Şekil 3.21’de 2021 yılı içinde üretilen ulusal elektrik enerjisi üretiminin kaynaklara göre dağılımı verilmiştir. Şekil 3.19 ve 3.20’deki verilerin kullanılmasıyla oluşturulan bu grafiğe göre, Türkiye’de 2021 yılına ait elektrik enerjisi üretiminin %64,66’sı fosil kökenli yakıtlarla sağlanmıştır. 2021 yılında bütün yenilenebilir enerji kaynakları, ulusal elektrik üretiminin %35,35’ini karşılamış olup küresel oran olan %28,28’in üzerinde olduğu görülmektedir. 2021 yılında Türkiye’de modern kaynaklar olarak bilinen rüzgâr, güneş, biyoyakıt ve jeotermal olarak bilinen kaynaklarla elektrik üretiminin toplam oranı %18,46 olup küresel oran olan %13,05’in epey üzerindedir. Bu oran 2010 yılında sadece %1,86’dır. Türkiye’de 2021 yılı içerisinde neredeyse tümünün PV santrallerle sağlandığı güneş enerjisi ile elektrik üretimin toplam elektrik üretimine oranı %3,91 olup, küresel olan %3,68’in biraz da olsa üzerindedir. Türkiye’de bu oran 2015 yılında %0,07 gibi düşük bir değere sahiptir.

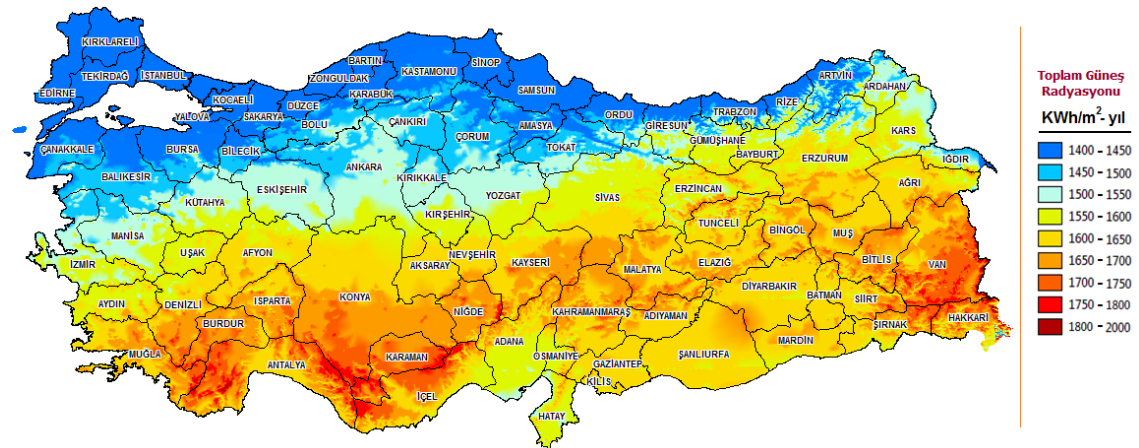


Şekil 3.21. 2021 yılı ulusal elektrik üretiminin kaynaklara göre dağılımı [136]

Türkiye’ye ait sunulan tüm bu istatistiksel verilere göre, küresel ölçeğe benzer ve hatta başta rüzgâr ve güneş enerjisi olmak üzere, tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının

elektrik üretimine cevap vermede genellikle daha başarılı bir eğilim içinde olduğu görülmektedir. Buna rağmen başta güneş enerjisi olmak üzere ulusal yenilenebilir enerji potansiyelinin diğer ülkelere göre çok daha iyi olduğu bilindiğinden, yenilenebilir enerji kullanımında başta Almanya, Japonya, ABD, Çin, İtalya, Belçika ve Avustralya olmak üzere birçok ülkenin gerisinde olduğumuz söylenebilir. Ancak ülkemizde yenilenebilir enerji olgusu çok yeni olmasına rağmen kısa sürede büyük kurulu güçlere erişilmiş olması gelecek açısından oldukça umut vericidir.

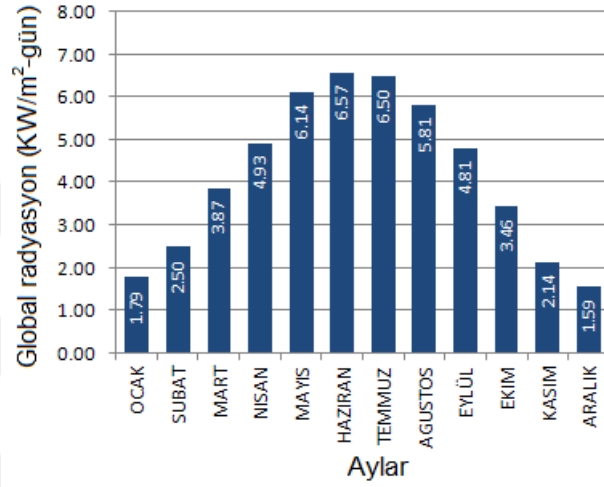
Dünya genelinde çeşitli ülkelere bağlı enstitüler ve çeşitli güneş enerjisi ile ilgilenen araştırma şirketlerinin genellikle çevrimiçi olarak sundukları potansiyel atlasları mevcuttur. Termal güneş enerjisi veya PV güneş enerjisi alanında yatırım yapmak isteyen müteşebbislere danışmanlık yapan şirketler bu atlaslar sayesinde, kurulması planlanan güç santrallerinin orta ve uzun vadedeki davranışları ve sistemin geri dönüş süresi hakkında edindikleri bilgiler sayesinde planlamalar yapabilmekte ve danışmanlık yaptıkları yatırımcılara bilgi verebilmektedirler. Bununla beraber bazı çevrimdışı yazılımlar sayesinde bir güneş enerjisi santralının tesisinde, fizibilite aşamasından kurulum aşamasına kadar tüm tasarım sürecinde mühendislik firmalarına kılavuzluk yapabilmektedir. Türkiye’de güneş enerjisi potansiyel atlası, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığına bağlı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından çevrimiçi olarak araştırmacıların hizmetine sunulmaktadır. Şekil 3.22’de Türkiye’ye ait Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA) verilmiştir.



Şekil 3.22. Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası [137]

Türkiye kara parçaları olarak, 26°-45° doğu meridyenleri ve 36°-42° kuzey enlemleri arasında kalan konumu itibarıyla, dünya ortalamasının üzerinde bir güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Şekil 3.22’den anlaşılacağı üzere ülkemiz, özellikle güney

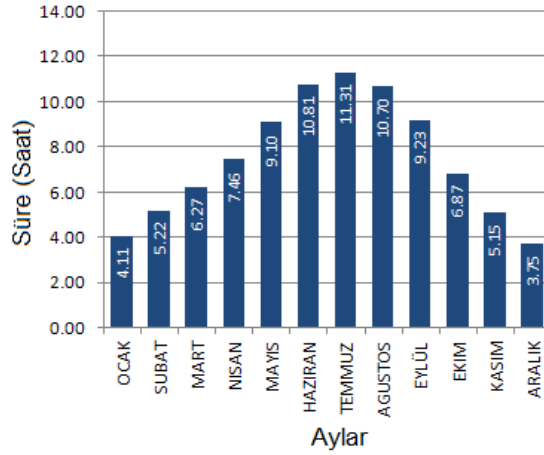
bölgeleri ve Doğu Anadolu Bölgesi'nin tümünü kapsayan noktalarda yıllık 1550 KWh/m²'nin üzerindeki ışıınım değerleriyle tüm güneş enerjisi teknolojilerinin yüksek verimle çalışabileceği bir potansiyele sahiptir. Türkiye'de yıllık güneş enerjisi ışıınınının en düşük gerçekleştiği Kuzey Karadeniz ve Trakya bölgeleri dâhi, asgari 1400 W/m²-yıl değeriyle tatminkâr bir seviyededir. Bir konuma ait güneş enerjisi potansiyeli genellikle yıllık olarak sunulmakta olup, daha detaylı araştırmalara cevap vermek üzere aylık bazda da sunulmaktadır. Şekil 3.23'te Türkiye'ye ait güneş ışıınımı değeri tüm bölgelerin ortalaması olarak aylık bazda verilmiştir.



Şekil 3.23. Türkiye aylara göre ışıınım enerjisi [137]

Türkiye'de en düşük günlük ışıınım enerjisi ortalama 1,59 KWh/m²-gün değeri olarak aralık ayında gerçekleşirken, en yüksek enerji ise 6,57 KWh/m²-gün değeriyle haziran ayında gerçekleşmektedir. Bu değerlere göre, Türkiye'nin ortalama günlük güneş ışıınımı enerjisi değeri 4,11 KWh/m² iken yıllık toplam ışıınım enerjisi değeri ise yaklaşık 1500 KWh/m²'dir.

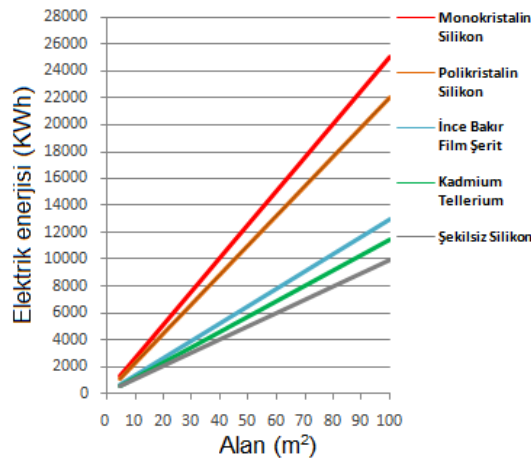
Bir bölgenin güneş enerjisi potansiyeli, sadece konumuna bağlı olmayıp, dolaylı da olsa güneşlenme saati bu potansiyel değer üzerinde bir etkiye sahiptir. Bir bölgenin güneşlenme süresi, anlık ışıınım değerinin 120 W/m²'nin üzerinde olduğu zaman dilimlerinin toplamı olarak tayin edilmektedir. Şekil 3.24'te Türkiye'ye ait ortalama günlük güneşlenme süreleri ay bazında verilmiştir.



Şekil 3.24. Türkiye ay bazında ortalama güneşlenme saati [137]

Şekil 3.24'e göre, Türkiye en düşük ortalama günlük güneşlenme süresini 3,75 saat ile aralık ayında, en yüksek ortalama günlük güneşlenme süresini ise 11,31 saatle temmuz ayında yaşamaktadır. Bu değerlere göre, Türkiye'nin bir yıl boyunca ortalama günlük güneşlenme saati 7,39 saat iken, yıllık toplam güneşlenme saati ise yaklaşık 2700 saattir. Bu değer, güneş enerjisi uygulamaları gerçekleştirmenin ekonomik yönden elverişli olduğu güneş bandı ülkelerinin ortalamasının üzerindedir.

Bir coğrafyanın güneş enerjisi potansiyeli, gerek ısı uygulamalar için gerekse PV sistem uygulamaları için kritik öneme sahiptir. PV sistemlerde farklı hücre teknolojilerinin kullanılabileceği ve bu sistemlerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları önceki bölümlerde ele alınmıştı. Türkiye GEPA sunduğu çevrimiçi uygulama, PV teknolojiye göre elde edilebilecek elektrik enerjisine ilişkin bilgiler de sunmaktadır. Şekil 3.25'te, hücre teknolojisine bağlı olarak belli bir alana sahip bir PV sistemden elde edilebilecek enerji değerleri verilmiştir.

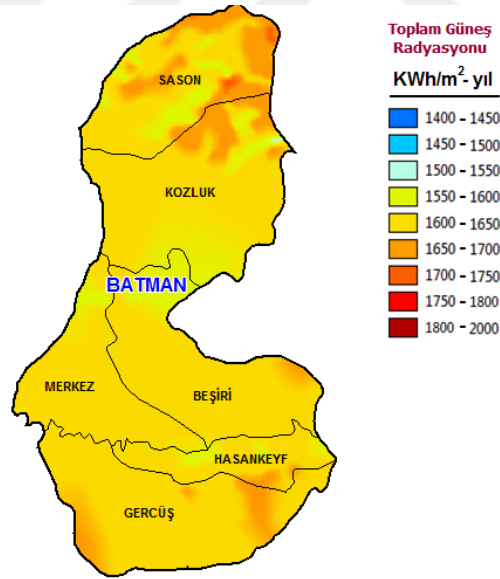


Şekil 3.25. Türkiye PV teknolojisi – Elektrik enerjisi üretimi [137]

Araştırmacılara ve yatırımcılara hızlı bir bilgi sunan Şekil 3.25'teki diyagrama göre, belirli bir alanda tesis edilecek bir PV uygulamada, kristalize silikon teknolojisine sahip tek kristalli ve çok kristalli PV hücrelerin ince film teknolojisine sahip CdTe, a-Si ve CIS hücrelere göre çok daha yüksek enerji dönüşümü sağlamaktadır.

3.4.2. Batman güneş enerjisi profili

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğünün sunduğu Şekil 3.22'deki Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası incelendiğinde, ilk bakışta Akdeniz ve Doğu Anadolu Bölgesinin bazı kısımlarının en yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip olduğu görülse de, bu bölgelerdeki gerek ormanlık sahalar gerekse dağlık bölgeler erişilebilir rezervi kısıtlamaktadır. Erişilebilir güneş enerjisi potansiyeli bakımından en zengin bölge Güney Doğu Anadolu Bölgesidir. Bu bölgede, $41,66^\circ$ ve $41,16^\circ$ doğu boylamları ile $38,66^\circ$ ve $37,83^\circ$ kuzey enlemlerinin sınırladığı Batman ili, güneş enerjisi potansiyeli bakımından en zengin şehirler arasında olmakla beraber, arazi yapısı nedeniyle PV sistem uygulamaları için de oldukça elverişlidir. Şekil 3.26'da Batman ili güneş enerjisi potansiyel atlası verilmiştir.

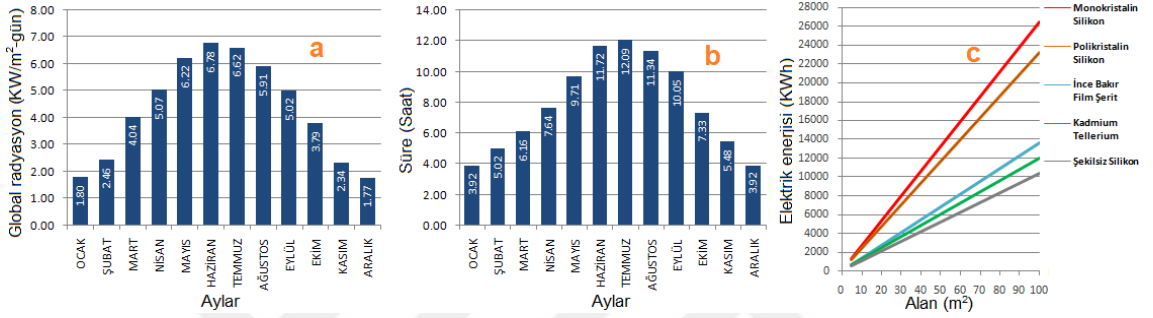


Şekil 3.26. Batman güneş enerjisi potansiyel atlası [137]

Şekil 3.26'ya bakıldığında Batman ili, hem merkez hem de bütün ilçeleriyle beraber $1550 \text{ KWh/m}^2\text{-yıl}$ potansiyel değeri ile güneş enerjisi açısından oldukça zengindir. Şekil 3.27a'da, aylık bazda Batman iline ait günlük ortalama güneş ışıınımı değerleri, Şekil 3.27b'de ay bazında Batman iline ait ortalama günlük güneşlenme

süreleri ve Şekil 3.27b’de, Batman ilinde hücre teknolojisine bağlı olarak belli bir alana sahip bir PV sisteminden elde edilebilecek enerji değerleri verilmiştir.

Şekil 3.27a’ya göre, Batman’da aylık bazda en düşük günlük ışıınım enerjisi ortalama $1,77 \text{ KWh/m}^2\text{-gün}$ değerini alarak aralık ayında gerçekleşirken, en yüksek enerji miktarı ise $6,78 \text{ KWh/m}^2\text{-gün}$ değeriyle haziran ayında gerçekleşmektedir. Bu değerlere göre, Batman’ın ortalama günlük güneş ışıınımı enerjisi değeri $4,33 \text{ KWh/m}^2$ iken yıllık toplam ışıınım enerjisi değeri ise yaklaşık 1581 KWh/m^2 ’dir. Aynı değerler Türkiye için sırasıyla $4,11 \text{ KWh/m}^2$ ve 1500 KWh/m^2 idi.



Şekil 3.27. Batman ili GEPA verileri [137]

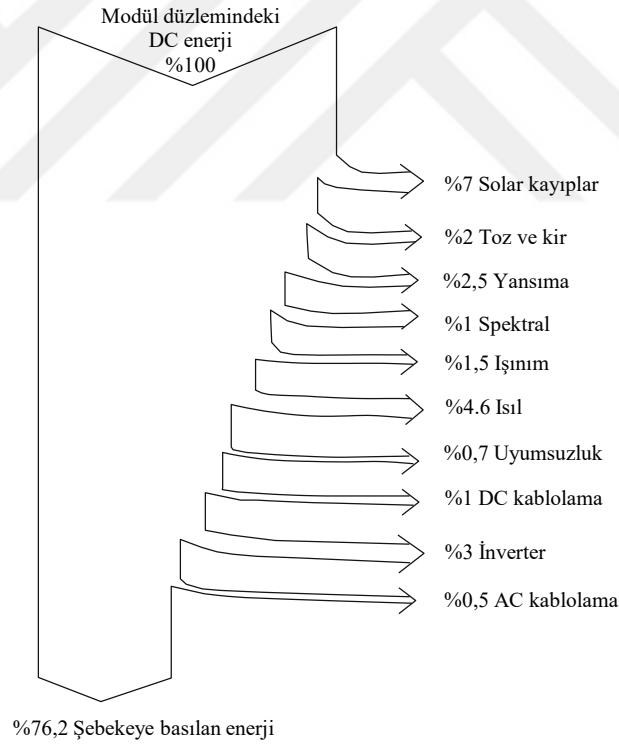
Şekil 3.27b’ye göre, Batman ili en düşük ortalama günlük güneşlenme süresini 3,92 saat ile ocak ve aralık ayında, en yüksek ortalama günlük güneşlenme süresini ise 12,09 saatle temmuz ayında yaşamaktadır. Bu değerlere göre, Batman ilinin bir yıl boyunca ortalama günlük güneşlenme saati 7,89 saat iken, yıllık toplam güneşlenme saati ise yaklaşık 2879 saattir. Aynı değerler Türkiye için sırasıyla 7,39 saat ve 2700 saat’tir. Bu değer, güneş enerjisi uygulamaları gerçekleştirmenin ekonomik yönden elverişli olduğu güneş bandı ülkelerinin ortalamasının üzerindedir. Şekil 3.27a ve Şekil 3.27b’ye göre, Batman ilinin, PV sistem uygulamalarının tesisi açısından diğer ülkelere göre oldukça avantajlı olan Türkiye’nin ortalamasının da üzerinde değerlere sahiptir.

Türkiye elektrik enerjisi profili başlığında verilen istatistiklere göre, 2021 yılı içinde toplam 330 TWh elektrik enerjisi üretilirken bunun 12,91 TWh’lık kısmını PV sistemler karşılamıştır. Türkiye’de güneş enerjisi santrallerinin 2021 yılı toplam elektrik üretiminde %3,91’lik bir katkıya sahip olduğu ve bu oranın sadece son birkaç yılda sağlandığı belirtilmişti. Türkiye’de, 2022 yılı sonu itibarıyla 37’si lisanslı olmak üzere toplam 674 adet kayıtlı GES bulunmaktadır. Bu santrallerin toplam kurulu gücü 8335 MW iken Batman ilindeki GES kurulu gücü ise sadece 23 MW’tır [138]. Bu verilerden, son yıllardaki atılımlara rağmen, hem dünya ortalamasının oldukça üzerinde potansiyele

sahip olan Türkiye’de hem de Türkiye ortalamasının oldukça üzerinde potansiyele sahip Batman ilinde güneş enerjisinden yeterince yararlanılmadığı anlaşılmaktadır. Özellikle 2018 yılından sonra GES kurulumlarını kapsayan devlet destekli teşviklerin sınırlandırılması ve elektrik alış fiyatlarındaki güncellemeler, yatırımcıların GES tesislerine karşı temkinli davranmasına neden olmuştur. Şekil 3.20’de güneş enerjisi eğrisinin 2015 yılından sonra artan ivmesini 2018 yılından sonra doğrusal bir artışa bırakması ve nihayet 2020 yılından sonra yatay bir seyir içinde olmasının sebeplerinden birinin de küresel ekonomik krizle beraber bu olduğu düşünülmektedir. Bununla beraber, çatı - cephe uygulamaları ve endüstriyel tüketicilerin öz tüketim amaçlı tesis ettikleri santrallere sağlanan teşvikler ve kolaylıklar bu alandaki GES sayısının artışını sağlamışsa da, bu uygulamaların sahip olduğu kurulu güç değerlerinin küçüklüğü sebebiyle Türkiye istatistikleri üzerinde güçlü bir etki oluşturamamaktadır. Bu veriler ışığında, ülkemizin sahip olduğu potansiyel sebebiyle 2015 ve sonraki yıllarda yakalanan ivmenin tekrar sağlanabilmesi için, yatırımcıların dikkatini çekecek teşvikler, hibeler ve kredileri kapsayan enerji politikalarının gözden geçirilmesi umulmaktadır.

4. PV SİSTEMLERDE KAYIPLAR

Fotovoltaik sistemlerin genel yapısını düşük verimle çalışan PV modüller oluşturduğundan üretilen enerjinin mümkün olan en düşük kayıplarla işletilmeleri gerekmektedir. Bu amaçla PV sistemlerde meydana gelen kayıpların doğru bir şekilde tanımlanması ve bu kayıplara yol açan faktörlerin etkilerini ortadan kaldıracak veya azaltacak tedbirlerin alınması gerekmektedir. PV sistemler, toz, kar, nem, yağmur, sıcaklık gibi birçok meteorolojik faktöre maruz kalmaktadır. Bununla beraber dış ortamlarda işletilmelerinden dolayı yakın veya uzak gölgeleme unsurlarından da etkilenebilmektedirler. Bir PV sistemde kullanılması elzem olan DC üretim kısmında bulunan kablolama, enerji formunun dönüştürüldüğü inverter ve üretilen AC enerjinin şebekeye iletilen kısmını oluşturan AC kablolama bileşenlerinde de ciddi kayıplar oluşmaktadır. Şekil 4.1’de ışınım enerjisinden elektrik enerjisi elde edilen ve birçok bileşeni içeren bir PV sistemdeki kayıp çeşitleri ve genel oranları gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Bir PV sistemdeki kayıplar ve oranları [139]

Şekil 4.1’deki diyagram, hücrelerin enerji dönüşümünü sağladıktan sonraki kayıpları kapsamaktadır ve bu kayıp çeşitleri tesis edilen tüm PV sistemlerde meydana gelebilmektedir. Ancak bazı kayıp çeşitlerinin etki oranları sistemin tesis edildiği bölgenin coğrafi ve meteorolojik özelliklerine göre farklılık gösterebilir. Örneğin

tozlanma olayının çok daha fazla görülebildiği çöl iklimine sahip bölgelerde, gerekli tedbirler alınmadığında %2 değerindeki kayıp çok daha büyük olabilir. Benzer şekilde ortam sıcaklığının yüksek seyrettiği bölgelerdeki PV sistemlerin termal kayıpları %4,6'dan daha yüksek olabilir. Kayıp oranları bölgenin özelliklerinin haricinde, sistem kurgusu ile de ilgili olabilir. Örneğin gölgelenme kayıplarını içeren solar kayıplar, PV sistemin tesis edildiği lokasyonda uzak veya yakın gölgeleme unsurlarını barındırmaması veya PV tablaları arasındaki mesafenin yeterli düzeyde tutularak modüllerin birbirini gölgelemesinin önüne geçilmesiyle %7'den daha düşük hâle getirilebilir.

4.1. PV Sistemlerde Kayıp çeşitleri

4.1.1. Gölgeleme kayıpları

PV sistemlerin performansını etkileyen en önemli faktörlerden biri gölgelemedir [139]. Sistemin konumlandırıldığı yerlere yakın binalar, bitkiler, enerji nakil direkleri ve enerji hatları ve benzer cisimler bu kayıplara sebebiyet verebilir [140]. Özellikle şehir merkezlerinde binalar birbirine çok yakın inşa edilir ve bu durum özellikle çatılara kurulan PV modüllerinde gölgelenmeye neden olur [141]. PV sistemlerde gölgeleme olayı sadece harici değildir. Sistem bileşenlerinden olan modülleri taşıyan ve sabitleyen tablalar ve bu tablaların eğim açısı, modüllerin birbirini gölgelemesine neden olabilir. PV sistemlerde tesisin yapılacağı sahanın verimli kullanılması önemlidir. Belli bir alandan azami güç alınmak üzere olabildiğince PV modül yerleştirilmek istenir. Ancak bu durum modüller arasındaki mesafenin azalmasına ve özellikle de güneş geliş açısının düştüğü kış aylarında modüllerin birbirini gölgeleme miktarı ve süresinin artmasına sebep olmaktadır. Bunların dışında, PV sistemin kurulduğu bölgede ufuktan kaynaklı uzak gölgelenme de söz konusu olabilir. Sistemin kurulduğu bölgede doğu veya batı yönünde yüksek dağ veya tepelerin gölgeleme etkisi, sistemin güneşlenme süresini olumsuz etkileyecektir. Bir PV sistem tasarlanırken, tüm bu değişkenler hesaba katılmalı ve özellikle modüller arasındaki mesafenin doğru optimize edilmesi gerekmektedir.

4.1.2. Toz ve kir kayıpları

Bir PV sistemin kullandığı hücre teknolojisinden bağımsız olarak tüm açık hava olumsuzluklarıyla karşı karşıyadır. Gerekli bakımlar periyodik olarak yapılmadığı zaman toz, ağaç yaprakları, saman parçacıkları, kuş pislikleri gibi etmenler modüllerin yüzeyini kapatarak hücrelerin soğurabileceği ısıyı değerini düşürürler [142]. Bu faktörler, enerji dönüşümü sağlayan hücrelerin daha düşük dönüştürme miktarı sunmalarına neden olarak,

modüllerden oluşmuş bütün bir sistemin olması gerekenden çok daha düşük bir verimle işletilmelerine neden olabilmektedir. Rutin temizlik ve bakım işlemleri yapılmadığı veya yağışın olmadığı bir dönemde, bir PV modülde tozlanma faktörünün çok etkili olabildiği yaz aylarında Batman ili şartlarında, 1 ay sonunda %30'lara, 6 ay sonunda %80'lere varabilen verim kayıpları yaşanabilmektedir [142]. Bu sakıncanın meydana gelmemesi için, tozlanma rejiminin yüksek olduğu coğrafyalarda ihtiyaç halinde PV sistemlerin temizlenmesi gerekmektedir. Bununla beraber, temizlik için kullanılacak otomatik sistemler ve/veya personel giderleri, özellikle su sıkıntısı yaşanan bölgelerde maliyetli olabilmektedir.

4.1.3. Yansıma kayıpları

Bir PV modülü, güneş ışınımının bir kısmını soğururken, belirli bir miktarı modül yüzeyinden geri yansıtılır. Bu olaydan kaynaklanan ışınım kayıpları, yansıma kayıpları olarak adlandırılır [143]. Bu yansımanın miktarı, özellikle güneş geliş açısıyla modülün normali arasındaki açının görece büyük olduğu durumlarda artmaktadır. Yansıma miktarının kontrol altında tutulması için modüllerde kullanılan cam tabakanın altında yutucu bir tabaka kullanılmaktadır. Ayrıca modülün en dışında bulunan cam tabaka tırtıklı temperlenmiş camdan imal edilerek yansıma kayıpları bir nebze daha azaltılmaktadır.

4.1.4. Uyumsuzluk kayıpları

Fotovoltaik sistemdeki en büyük kayıp kaynaklarından biri de, modüldeki iki veya daha fazla dizi tarafından üretilen farklı enerji miktarlarıdır. Bu farklı enerji üretim miktarları, kısmi gölgeleme ve kirlilik gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır [39]. Eşit şartlar altında üretilen modüllerin sunduğu güç değerleri, belli bir tolerans dâhilinde, etiket değerlerinden farklı miktarlarda enerji sağlayabilmektedirler. Düşük güçlü sistemlerde, bu tür modüllerin farklı güç değerleri de bu kayıplara yol açabilmektedir.

4.1.5. Kablolama kayıpları

Bir PV sistemde, modüller bağımsız birer enerji üretim bileşenidir. Modüller arasındaki bağlantıların yapılmasıyla oluşan diziler, bu diziler arasındaki paralel bağlantılar açık hava şartlarına dayanıklı kablolarla sağlanmaktadır. Dizilerin ürettiği enerjinin invertere ulaştırılması ve inverter çıkışındaki enerjinin şebekeye ulaştırılması için de aynı dayanım özelliklerine sahip kablolar kullanılmaktadır. Uygun kesitte ve

doğru materyallerle tasarlanmış bir sistemde kablolama kayıpları %2'den büyük olmamalı ve bu oran zamanla artmamalıdır. Kablolarda meydana gelen kayıpların temel nedeni, modüllerin ürettiği akımın kablo üzerinde meydana getirdiği I^2R kayıpları ve modüller arasındaki bağlantıları sağlayan Mc4 veya benzer konnektörlerdeki tasarıma ve zamana bağlı zayıf temas ve korozitif etkilerden ileri gelen yüksek dirençlerdir. Bu kayıpların kontrol altında tutulması için belirli sızdırmazlık standartlarına sahip konnektörlerle beraber, modül ve dizilerin ürettiği güç değerine göre uygun kesitte doğru alaşımlardan oluşturulmuş kabloların kullanılması gerekmektedir. AC iletim kısmındaki kayıpların önüne geçmek ve kontrol altında tutabilmek için, PV sistem kurulumlarının şebekeye uzaklığına dikkat edilmeli, hesaplamalar bu kapsamda yapılmalıdır.

4.1.6. İnverter kayıpları

İnverter kayıpları genel olarak, DC/AC çevrim verimi kayıpları ve güç kısıtlamasından kaynaklanan kayıplardan oluşmaktadır. Çevrim kayıpları inverterlerin stand-by konumunda ihtiyaç duydukları enerji değeri de hesaba katılarak üreticilerin sunduğu verim grafiği üzerinden hesaplanır [144]. DC/AC çevrim verimliliği için “Avrupa Verimliliği” ve “Ağırlıklı Verim” gibi ölçütler kullanılmaktadır DC/AC çevrim kayıpları, güç katmanı topolojisinin tasarımıyla beraber, inverterlerin imalatında yarı iletken, manyetik elementler ve kapasitörlerin nitel ve nicel özelliklerine göre şekillenmektedir [145]. STC’de işletilen bir PV dizisinin DC kısmındaki gücünün inverter çıkışındaki AC güce oranı inverterin verimini ifade etmekle beraber, bu oran PV dizisinden şebekeye aktarılan güç miktarını sınırlandırabilmektedir. PV dizilerinin, STC’deki nominal güç değerinin üzerindeki güç değerlerine ulaşmalarının çok zor olduğu yönündeki yaygın algıdan dolayı, inverterlerin nominal güç değerleri, genellikle sistemin nominal gücünden belli bir oranda daha düşük seçilir. Ancak bu farkın büyük olduğu durumlarda, özellikle de sıcaklığa bağlı enerji kayıplarından görece az etkilenen a-Si ve CdTe ince film teknolojisine sahip modüller içeren sistemlerde büyük inverter kayıpları oluşabilir [146]. Bundan dolayı, inverter seçiminde sadece PV sistemin nominal güç değeri değil, sistemi oluşturan modüllerin hücre teknolojisi, sistemin işletileceği bölgenin ortalama ışıyım miktarı, ortam sıcaklığı bilgisi ve inverteri oluşturan komponentlerin özellikleri dâhi göz önünde bulundurulmalıdır.

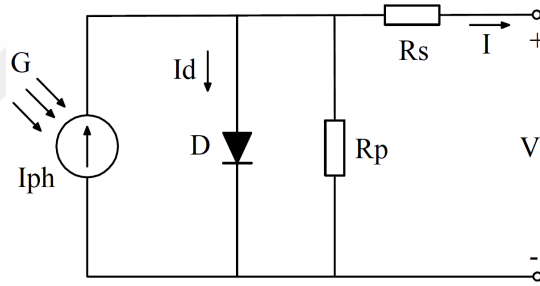
4.1.7. Sıcaklık kayıpları

PV paneller bir standardın oluşması açısından üreticiler tarafından, 25 °C ortam sıcaklığı, 1000 W/m² ışıınım ve AM 1,5 (hava kütlesi) değerlerindeki test koşullarında test edilmektedir. PV sistemlerde elektrik enerjisi dönüşümü, modül yüzeyine ışıınım enerjisinin alınmasıyla başlamaktadır. Gelen güneş ışıınının bir kısmı elektrik enerjisine dönüşürken, bu ışıınının bir kısmının hücreyi oluşturan materyaller tarafından soğurulmasıyla ısı enerjisine dönüşmektedir [32]. Bir hücrenin yüksüz olduğu durumda bile önemli derecede bir sıcaklık oluşurken, modüllerin yüklenmesi halinde, hücre üzerindeki ve arkasındaki kontaklardan geçen akım geçişleri de bu ısıya katkı sunmaktadır. Bunlarla beraber modüllerin işletildiği ortamın sıcaklığı da modül sıcaklığı üzerinde doğrudan etkilidir. Modülde meydana gelen sıcaklık artışları, hücrelerin enerji dönüştürme oranını olumsuz etkilemektedir. PV hücrelerin enerji dönüştürme oranları yaklaşık %5-25 aralığındadır. Modüllerin elektrik enerjisine dönüştüremediği geriye kalan ışıınım enerjisi hücrelerin ısınmasına ve dolayısıyla termal kayıplara yol açmaktadır. PV sistemlerde aktif veya pasif soğutma teknikleri kullanılarak bu kayıplar belli bir seviyenin altında tutulabilirler. Bununla beraber, PV modülde oluşan bu ısı enerjisini endüstriyel veya evsel amaçlar için kullanırken modül sıcaklığının da azaltılarak verimin artırılmasını amaçlayan PV/T hibrit sistemler de sıklıkla önerilmekte ve kullanılmaktadır. Gerek aktif ve pasif soğutma teknikleri gerekse bu teknikleri barındıran PV/T yaklaşımları tasarlanırken, amortisman maliyetleri göz önünde bulundurularak, uzun vadede sistemin kârlılık düzeyi hesaba katılmalıdır.

4.2. PV Hücre Modellerinde Sıcaklığın İfadesi

PV panellerin katalog bilgilerinde genellikle, STC'de panelin üreteceği maksimum güç (P_{max}), kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}), optimum yük değeri altında üretilecek gerilim (V_{mp}) ve akım (I_{mp}) değerleri sunulmaktadır. Katalog verilerinde ayrıca, temel model parametreleri olan paralel direnç (R_p), seri direnç (R_s), diyot ters satürasyon akımı (I_s) ve diyot kalite faktörü (m) gibi hücrelerin üretim teknolojisi ve boyutu ile ilgili değerler de verilmektedir. Katalog bilgilerinde yer alan bu parametreler, PV hücrelerin modellenmesinde kullanılan matematiksel denklemler aracılığı ile, STC ve STC dışındaki işletme şartlarında panele ait akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) eğrilerinin elde edilmesinde kullanılmaktadır. Bu eğriler PV panellerin karakteristiğinin anlaşılması için önemli olup, özellikle maksimum güç noktası izleyici (MPPT) sistemlerinin güç noktalarını izleyebilmeleri için gereklidir.

PV hücrelerin modellenmesiyle ilgili çalışmalar, hücre teknolojilerinde genellikle yarı iletken malzemeler kullanıldığından, P-N jonksiyonu içeren bir diyodun ışıyım enerjisini temsil eden bir akım kaynağı ile beraber kullanılması şeklindedir [147]. PV hücrelerin sıcaklık ve ışıyım gibi değişkenlerle ilişkisini ortaya koymak üzere birçok model önerilmektedir. Bu öneriler arasında, gerçek bir PV hücresinin davranışına çok benzer sonuçlar veren, tek diyotlu, iki diyotlu ve üç diyotlu model ve gölgelemenin etkisini de ele alan kısmi gölgelemeli model gibi birçok parametrik model bulunmaktadır [148-150]. I-V ve P-V eğrilerinin üretilmesinde sağladığı yüksek doğruluk oranları nedeniyle gerçek tek diyot ve iki diyotlu modeller en çok tercih edilen modeller arasındadır [149]. Hücreye ait seri ve paralel direnç parametrelerini de içeren bu model aynı zamanda gerçek bir PV hücresinin farklı koşullar altındaki karakteristiğini de çok iyi şekilde yansıtmaktadır. Bu bölüm, sıcaklığın PV hücrelerinde P-N bağlantı bölgesi üzerindeki etkilerini açıklamak için sunulmuştur. Bu sıcaklık etkisi, birçok PV hücre modelinde V_T 'nin hesaplanmasında bir parametre olarak kullanılır. Şekil 4.2'de gerçek tek diyotlu PV hücre modelinin elektrik eşdeğer devresi sunulmuştur.



Şekil 4.2. Gerçek tek diyotlu PV hücre modeli [103]

İdeal tek diyotlu PV hücre modelinde, hücre gerilimi V , diyot üzerinde bulunan gerilime eşittir ve diyot üzerinden akan akım Denklem (4.1) ile ifade edilir.

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{V}{m \cdot V_T}} - 1 \right) \quad (4.1)$$

Burada;

I_D : diyot akımını,

I_s : diyot ters satürasyon akımını,

V : hücre gerilimini,

m : $1 \leq m \leq 2$ olmak üzere diyot faktörünü,

V_T : +25 °C'de yaklaşık 25,7 mV değerini alan termal gerilimi ifade etmektedir.

Jonksiyon bölgesindeki termal gerilim V_T hesaplanırken Denklem (4.2) kullanılmaktadır.

$$V_T = \frac{N_s k T}{q} \quad (4.2)$$

Burada;

- N_s : PV modülde seri bağlı hücre sayısını,
- k : $1,3806503 \times 10^{-23}$ J/K olarak Boltzmann sabitini,
- T : Kelvin olarak P-N jonksiyon bölgesindeki sıcaklığı,
- q : $1,60217646 \times 10^{-19}$ C olarak bir elektronun yük değerini ifade etmektedir.

Şekil 4.2'deki elektrik eşdeğer devresinde akım ve gerilim kanunu uygulanırsa Denklem (4.3) elde edilir.

$$I_{PH} - I_D - I_{Rp} - I = 0 \quad (4.3)$$

Bu modelde diyot üzerindeki gerilim $V + I.R_s$ değerini almıştır. İdeal tek diyotlu modelde kullanılan I_D diyot akımı düzenlenerek Denklem (4.3)'te yerine konulursa, hücre akımı Denklem (4.4)'teki son halini alır.

$$I = I_{PH} - I_S \left(\left(e^{\frac{V + I.R_s}{m.V_T}} \right) - 1 \right) - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (4.4)$$

Burada;

- I : Hücre akımını,
- I_{PH} : Işıyım tarafından oluşturulan foton akımını,
- V : Hücre gerilimini,
- R_s : Seri direnci,
- R_p : Paralel direnci ifade etmektedir.

Denklem (4.4) kullanılarak bir PV hücrenin I-V eğrilerini elde edebilmek üzere doğrusal olmayan denklemleri çözmekte kullanılan sayısal analiz yöntemleri kullanılmaktadır [151].

5. PV SİSTEMLERDE MODÜL SOĞUTMA TEKNİKLERİ

PV sistemlerde soğutma teknikleri, PV teknolojisi kullanımının erken dönemlerinde başlamıştır [152]. Modülleri soğutmanın ana amacı daha yüksek PV çıkış gücü sağlamaktır. Bununla beraber, PV/T uygulamaları sayesinde elde edilen ısı enerjisini de kullanarak genel sistem veriminde yüksek artışlar sağlayan kojeneratif uygulamalar da mevcuttur. Soğutma uygulamalarının bir örtük faydası da, PV modüllerin işletme ömürlerinin uzamasına katkı sunmasıdır.

Soğutma işlemi standart PV sistem bileşenlerinin dışında ayrı bir sistem gerektirmektedir. Geliştirilen soğutma sistemlerinin inşası ve bakımı, PV sistem çıkışından elde edilen elektriksel verimin faydalarından ağır basması ihtimali vardır. Bu olumsuzluğun yaşanmaması için, soğutma işlemlerinin uygulanacağı PV sistemlerinde orta ve uzun vadede sistemin kârlılığı ile ilgili hesapların doğru bir planlama dâhilinde yürütülmesi gerekir [46]. Literatürde, PV sistemlerde soğutma uygulamalarıyla ilgili birçok optimizasyon çalışması yapılarak, örnek uygulamalar için önerilerde bulunulmuştur. PV sistemlerde genel olarak, pompa ve fan gibi enerji tüketen bileşenlerle sağlanan aktif ve ısı tahliyesinin sağlandığı doğal taşınım/iletim tekniklerinin kullanıldığı pasif soğutma yaklaşımları söz konusudur.

5.1. Pasif Soğutma Teknikleri

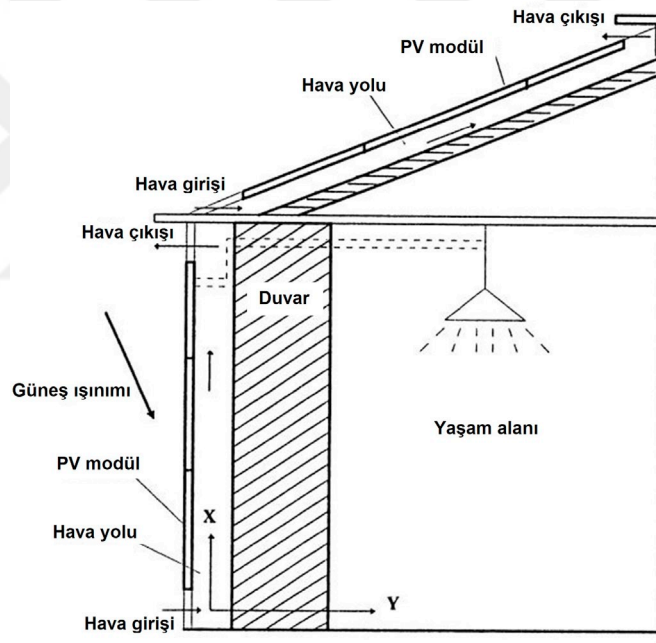
Pasif soğutma teknikleri, hava ile pasif soğutma, su ile pasif soğutma ve iletim ile soğutma olmak üzere üç grup şeklindedir. Pasif soğutma tekniklerinde fan ve pompa benzeri zorlanmış taşınım bileşenleri mevcut değildir. Bundan dolayı hava ve suyun doğal taşınımı yoluyla gerçekleştirilen soğutma teknikleri en kolay ve ucuz yöntemlerdir [153].

İletim ile soğutmada çoğunlukla, hava ile pasif soğutmaya ek olarak PV hücrelerden ısı transferi sağlamak üzere iletken materyaller kullanılmaktadır. İletim ile pasif soğutmada genellikle modüllerin arka kısmına monte edilmiş alüminyum kanatçıklar kullanılır. Bu kanatçıkların geometrik yapısı ve kanatçıklar arasındaki mesafe ısı transferi üzerinde son derece etkilidir. Özellikle doğru tasarlanmamış kanatçık derinlikleri, ısıyı ilgili alanda hapsedebilme ihtimali dolayısıyla soğutma üzerinde olumsuz bir etki oluşturabilmektedir. Şekil 5.1’de iletim ile pasif soğutmaya ilişkin deneysel bir çalışma gösterilmiştir.



Şekil 5.1. İki farklı L-profil kanatla pasif soğutma [154]

Hava ile pasif soğutmada en temel yaklaşım doğal ventilasyonun kullanılmasıdır. Özellikle binaya entegre PV sistemlerinde havanın sıcaklık farklarından dolayı doğal taşınımı PV sistemlerin soğutulması için bir araç olarak kullanılabilir. Şekil 5.2’de hava ile pasif soğutmaya ilişkin bir simülasyon çalışmasının temsili görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.2. Hava ile pasif soğutma şematik gösterimi [155]

Şekil 5.2’de temsili şekli gösterilen simülasyon çalışmasında, PV panellerin arkasındaki bir kanaldan havanın doğal taşınımı sağlanarak, bina dış yüzeyini ve çatısını kaplayan PV modüllerin sıcaklığı düşürülmeye çalışılmıştır [155]. Çalışmada, soğutma kanalının yüksekliği ve derinliği gibi bazı temel parametrelerin soğutma üzerindeki başarımı incelenmiştir. Çalışmada, parametrelerin doğru seçilmesiyle, PV modül sıcaklığının 15-20 °C aralığında düşürülebileceği belirtilmiştir. Hava ile pasif soğutmada havanın doğal taşınımı başka yöntemlerle de sağlanabilmektedir.

Su ile pasif soğutma teknikleri arasında en yaygın olanları, daldırma ve yüzdürme yöntemleridir. Bu yöntemlerde PV modüller belli bir derinlikte suyun altında işletilmektedir. Böylece panelin hem ön hem arka yüzünden soğutulması sağlanmaktadır. Daldırma yönteminin en önemli olumsuzluğu, derinlik nedeniyle modül yüzeyine gelen ışının su tarafından yutulması veya yansıtılmasından dolayı azalmasıdır. Şekil 5.3'te su ile pasif soğutma tekniklerinden daldırma yöntemine ilişkin deneysel bir çalışmadan görüntüler sunulmuştur.



Şekil 5.3. Su ile pasif soğutma – daldırma yöntemi [156]

Şekil 5.3'te gösterilen deneysel çalışmanın sonuçlarına göre, modülün 5 cm derinliğe daldırılması halinde maksimum güç çıkışının sağlandığı, su derinliğinin 5 cm'den 15 cm'ye çıkarılmasıyla modül gücünün azaldığı görülmüştür. Bu azalmanın daha derinde bulunan modülün üst kısmında kalan su kütesinin gelen ışınımı soğurmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Dolayısıyla bu yöntemle yapılan soğutma faaliyetlerinde su derinliğinin önemli bir parametre olduğu unutulmamalıdır. Bunun yanında, modülün içinde bulunduğu suyun sıcaklığı da son derece önemlidir. Kullanılan suyun büyük bir miktarda olması soğutmanın sürekliliği açısından gereklidir. Su ile pasif soğutma yöntemlerinden biri de yüzdürme yöntemidir. Özellikle orta ve büyük güçteki güneş santrallerinin göl gibi tatlı su kaynaklarının üzerine inşa edilmesiyle oluşturulan bu santraller, suyun sağladığı serin ortam sayesinde soğutulabilmektedir. Şekil 5.4'te su ile pasif soğutma tekniklerinden yüzdürme yöntemine ilişkin bir uygulama gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Su ile pasif soğutma – yüzdürme yöntemi [157]

Yüzdürme ile pasif soğutma tekniğinde tek fayda, PV modüllerin çalışma performanslarının artırılması değildir. Güneş panelleri sudaki yaşam için gölge ve örtü sağlayarak buharlaşmayı ve su kaybını azaltır. Bu durum, sudaki canlılar için daha yaşanabilir bir ortam oluşmasını sağlayarak sürdürülebilir ekosisteme katkı sunmaktadır.

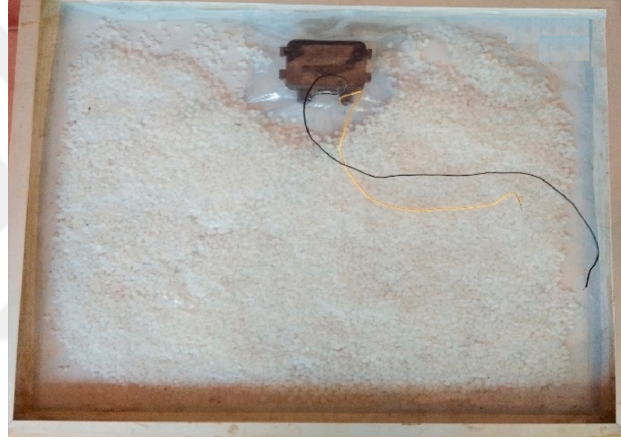


Şekil 5.5. Isı borusu ile pasif soğutma içeren PV/T uygulaması [160]

Pasif soğutma tekniklerinden biri de ısı borusu (heat pipe) kullanımını içeren yöntemdir. Bir ısı borusu, büyük bir ısı transferini mümkün kılmak için buharlaşma ve yoğunlaşmanın meydana geldiği iki fazlı bir ısı transfer cihazıdır [158]. Isı boruları kullanılarak PV modüllerin soğutulması yöntemi, genellikle büyük enlem değerlerine

sahip bölgelerde veya kış mevsimlerinde önerilen bir pasif soğutma yaklaşımıdır [159]. Şekil 5.5'te ısı borusu ile soğutulan bir PV/T deneysel çalışmanın görüntüsü verilmiştir.

Bir diğer pasif soğutma tekniği faz değiştiren materyallerle (PCMs: Phase-changing materials) gerçekleştirilmektedir. Faz değiştiren materyaller, yararlı ısı veya soğutma sağlamak için faz geçişinde yeterli enerjiyi salan veya absorbe eden maddelerden üretilmektedir. Genel olarak faz geçişleri, katı ve sıvı olan iki temel durum arasında gerçekleşmektedir. PCM'ler, erime sıcaklığı değerleri arasında sahip oldukları yüksek potansiyelli kaynaşma ısısı nedeniyle, termal enerjiyi mümkün olduğunca depolamalarını mümkün kılmaktadır. Bu durum, faz değiştiren materyallerin PV modüllerin pasif soğutulmasında kullanılabilecek bir yöntem olmasını sağlamaktadır. Şekil 5.6'da PCM ile soğutulan bir PV modül gösterilmiştir.



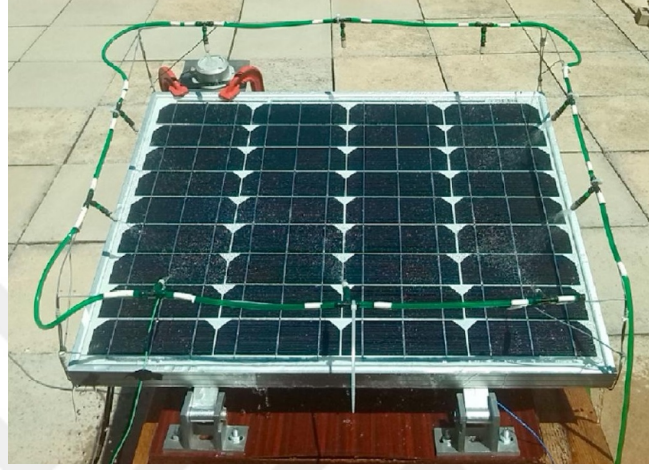
Şekil 5.6. PCM ile pasif soğutma uygulaması [161]

PCM kullanımının yukarıda belirtilen avantajlarının yanında iki önemli avantajı da söz konusudur. Bunlar, gece gündüz arasındaki sıcaklık farklarının yüksek olduğu bölgelerde PV modüller üzerinde meydana gelecek termal streslerin ortadan kalkması ve gece vakitlerinde su buharının modül cam yüzeyleri üzerinde oluşturacağı katı tabakanın önlenmesi şeklindedir.

5.2. Aktif Soğutma Teknikleri

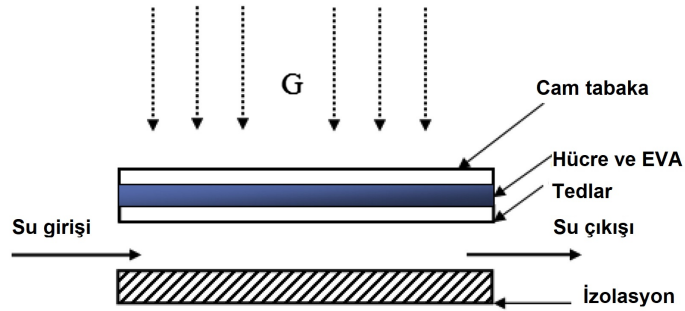
Aktif soğutma teknikleri ile pasif soğutma teknikleri arasındaki en temel fark, aktif soğutmada genel olarak soğutma işleminde kullanılan sıvı veya gaz akışkanının taşınması için pompa, fan ve benzeri bileşenlerin kullanılmasıdır. Bu soğutma tekniklerinde harici bir enerji kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. PV sisteminde gerçekleştirilecek soğutma işlemi sayesinde elde edilecek verim artışı ile zorlanmış

taşıyım için harcanan enerjinin doğru bir şekilde koordine edilmesi gerekmektedir. Bu soğutma tekniklerinde genellikle, hava, su veya çeşitli nanoakışkanlar kullanılmakta olup uygulamaya dönük birçok teknik mevcuttur. En temel yaklaşımlardan biri, suyun nozüller aracılığıyla modüllerin cam yüzeyine püskürtülerek soğutma işleminin gerçekleştirilmesidir. Şekil 5.7’de modül yüzeyine su püskürtülerek soğutmaya ilişkin deneysel bir çalışma gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Nozül kullanılarak su ile aktif soğutma [162]

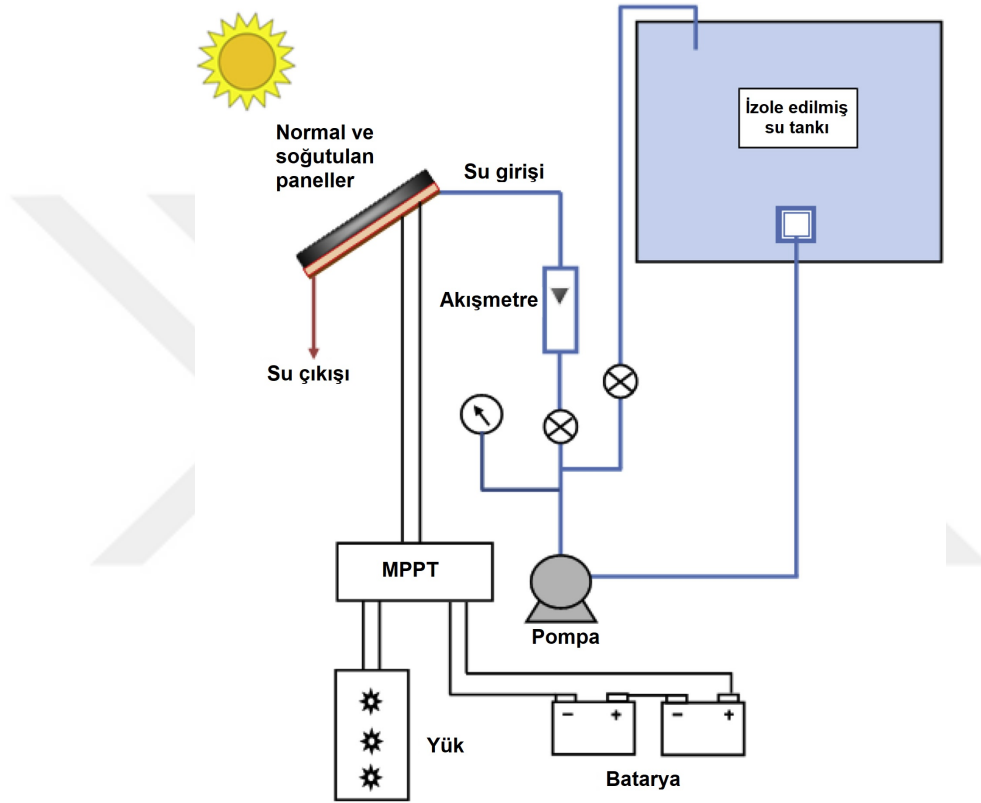
Şekil 5.7’deki deneysel çalışmada gösterilen teknikle PV modülleri soğutmak mümkün olsa da, bu teknik bazı sorunlar taşımaktadır. Panel yüzeyinde biriken su damlacıkları tarafından ışının kırılması ve yutulması, su püskürtülme zaman aralıklarının tayini, biriken su damlacıklarının mercek etkisi yaparak hücre yapısına zarar vermesi, suyun buharlaşmasıyla oluşan su israfı ve genel olarak bu yöntemin büyük çaplı PV sistemlerinde uygulamanın doğuracağı zorluklar bu tekniğin olumsuz taraflarını oluşturmaktadır. Bu olumsuzlukların birçoğu modül yüzeyinin su ile temizlenmesi esasına dayanan bütün teknikler için geçerlidir.



Şekil 5.8. Su ile soğutma prensibi [163]

Su ile aktif soğutma yöntemlerinden biri de, modüllerin arka tarafından doğrudan veya dolaylı bir şekilde su iletilerek soğutulmasına dayanan tekniklerdir. Şekil 5.8’de su ile soğutmanın temel yapısı gösterilmiştir.

Modüllerin arka kısımlarının su ile doğrudan teması sağlanarak yapılan soğutma teknikleri dolaylı olarak gerçekleştirilen tekniklerden daha etkili olmakla beraber bazı olumsuzluklar da barındırmaktadır. Şekil 5.9’da modüllerin arka kısımdan su ile doğrudan soğutulmasına yönelik deneysel bir çalışmanın şematik gösterimi sunulmuştur.

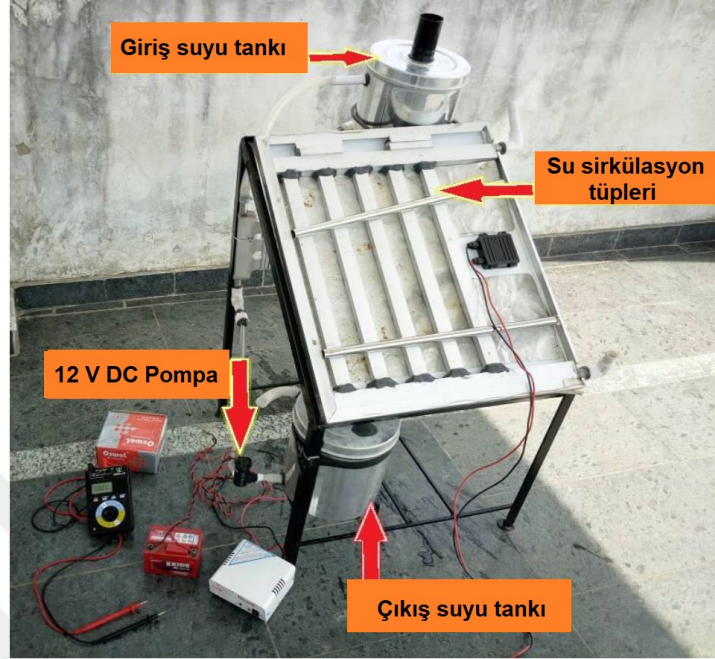


Şekil 5.9. Su ile doğrudan soğutma [163]

Su ile aktif soğutmada, PV modüllerin doğrudan soğutulması, modüllerin homojen olarak soğumasına ve ısınan suyun evsel veya endüstriyel amaçlarla kullanılmasına imkân vermesi bakımından etkili ve yüksek verimli bir yöntemdir. Ancak bu şekilde yapılacak soğutmada su sızmalarının hücre yapısına zarar verme ihtimali mevcuttur. Orta ve uzun vadede PV modülün su ile temas halinde olan tüm noktalarına kaliteli malzemelerle sızdırmazlık özelliğinin kazandırılması gerekmektedir.

Su ile aktif soğutma yöntemlerinden biri de modülün arka yüzeyinin dolaylı olarak soğutulmasıdır. Bu yöntemde, modülün arka yüzeyine monte edilen kapalı kutu profillerden su akışı sağlanmaktadır. Kapalı kutu profiller ile modül arka yüzeyi arasındaki ısı transferi, termal iletkenliği yüksek macunlarla sağlanmaktadır. Şekil

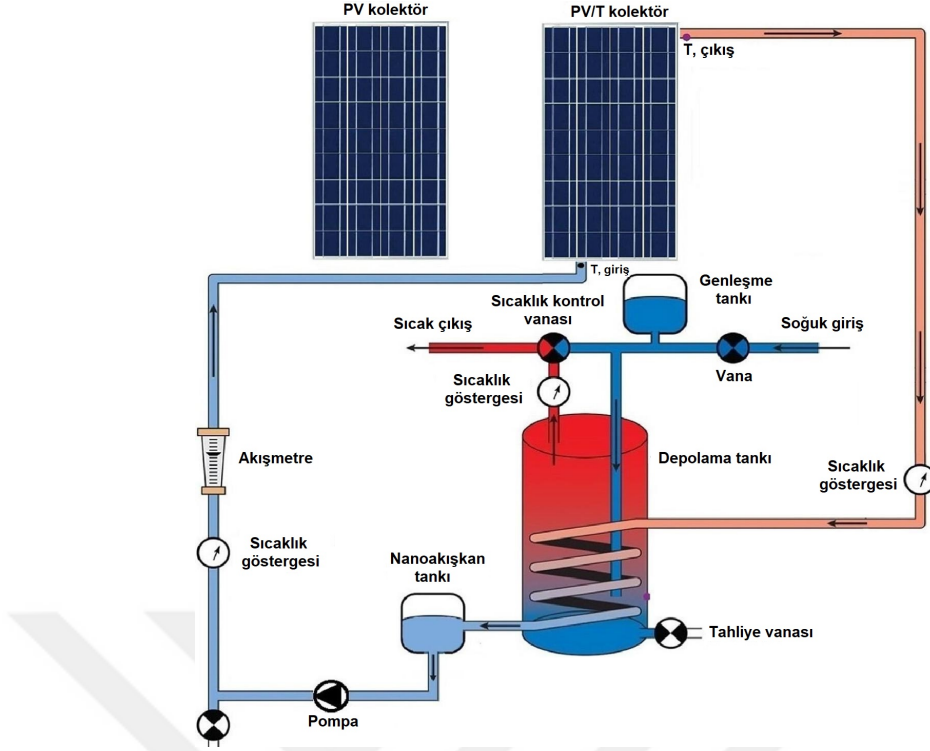
5.10’da modül arka yüzeyinin su ile dolaylı olarak soğutulmasına ilişkin bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Su ile dolaylı soğutma [164]

Su ile dolaylı aktif soğutmanın en önemli olumsuzlukları, modül arka yüzeyinde homojen bir soğutma sağlayamaması ve profiller içinde akan suyun panel sıcaklığını üstüne yeterli düzeyde alabilmesini gerektiren termal iletkenliği çok yüksek pahalı materyallere ihtiyaç duymasındır. Bununla beraber bu teknik, sıcaklığı artan suyun evsel ve endüstriyel amaçlarla kullanılabilmesi ve su ile doğrudan temas etmediği için PV modüllerde sıvı sızması gibi olumsuzluklar barındırmaması gibi avantajlara sahiptir.

Su ile aktif soğutma tekniklerinde soğutma performansının iyileştirilmesi için soğutma suyuna belli oranlarda çeşitli nanoakışkanlar katılabilmektedir. Nanoakışkanların PV/T sistem soğutucuları olarak kullanılması, temel sıvılara kıyasla nanoakışkanların geliştirilmiş termofiziksel özellikleri nedeniyle PV/T sistem verimliliğini artırmanın en etkili yöntemlerinden biri olarak kabul edilir [165]. Şekil 5.11’de nanoakışkan kullanılarak gerçekleştirilmiş aktif bir soğutma içeren bir PV/T çalışmasının şematik diyagramı verilmiştir.



Şekil 5.11. Su ile dolaylı soğutma [166]

Nanoakışkanlarla soğutma çalışmalarında SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , SiC , CuO_2 ve FeO_2 olmak üzere birçok nanoakışkan türü kullanılmaktadır. Nanoakışkanlar su ile belli oranlarda karıştırılırlar. Karışım oranı ve akışkan hızı, PV modülü soğutma performansı üzerinde en etkili parametrelerdendir. Fazla oranda nanoakışkan kullanımı, karışımın viskozitesini artırmakta ve özellikle de doğal akışlı uygulamalarda akışkan hızını düşürerek soğutma performansını azaltabilmektedir [167]. Nanoakışkan ile gerçekleştirilen soğutma uygulamalarında, sistemin PV/T hibrit bir uygulama olarak tasarlanmaması halinde, PV modüllerde ısınan akışkanın çevrime tekrar soğuk olarak girebilmesi radyatör sistemlerinin kullanılmasını gerektirir. Bundan dolayı verimliliği yüksek nanoakışkan soğutma tekniklerinin ancak PV/T hibrit uygulamalarla sağlanabileceği söylenebilir.

Aktif soğutma yöntemlerinden biri de zorlanmış hava taşınımı esasına dayanmaktadır. Bu yöntemde PV modüller arka kısımlarından doğrudan veya yönlendirilmiş şekilde bir fan aracılığıyla soğutulurlar. Bu tür soğutmada ısı transferinin iyileştirilerek verimliliğin artırılması için modül arka yüzeyine termal iletkenliği yüksek kanatlar da ilave edilebilmektedir. Şekil 5.12’de hava ile aktif soğutma gerçekleştirilen bir PV uygulaması örneği sunulmuştur.



Şekil 5.12. Hava ile aktif soğutma çalışması [168]

Şekil 5.12’deki uygulamada, bir PV panelinin arka yüzeyinde bir fan tarafından oluşturulan cebri hava akışını kullanan fotovoltaik paneller için aktif bir soğutma tekniği önerilmiştir. Sistem, PV panelinin çalışma sıcaklığını azaltmak için havanın PV panelinin arka yüzeyine yönlendirildiği, kullanılan modüle özel olarak tasarlanmış kanal sistemine bağlı bir üfleyiciden oluşmaktadır. Hava ile aktif soğutma temelde, panel arkasında oluşan ve doğal taşınım ile giderilmesi zor olan ısıyı zorlanmış bir şekilde hava kullanılarak bertaraf edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu esnada modüllerin arka kısımlarına ortam sıcaklığı değerindeki hava iletilmektedir. Hava ile aktif soğutma sistemlerinde, su ile aktif soğutma sisteminde bulunan su sızması, izolasyon sorunları ve olası heterojen soğutma durumları gibi olumsuzluklar bulunmamakla beraber sıcaklık düşürme performansları sınırlıdır.

6. MATERYAL VE YÖNTEM

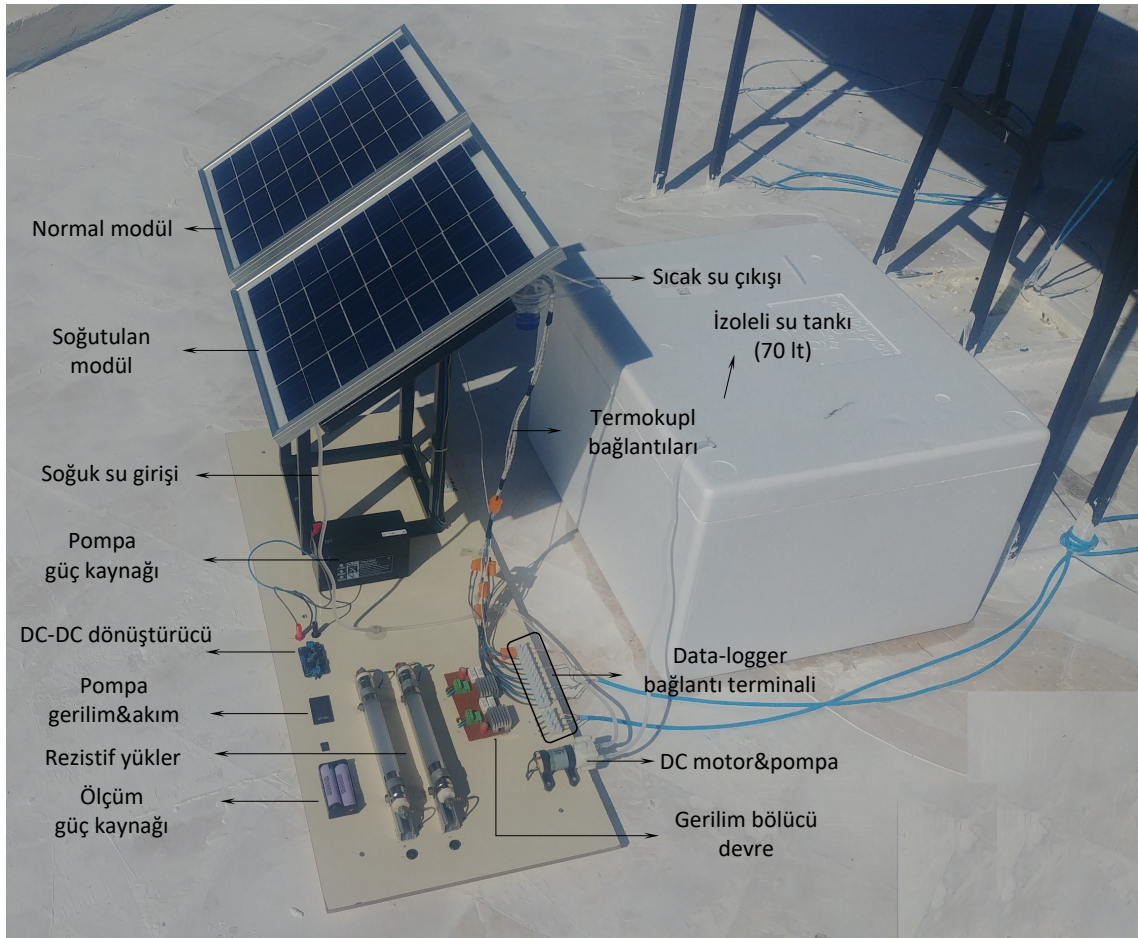
Bu tez kapsamında; su ile aktif soğutma yöntemi ile soğutulan bir PV modül ile normal şartlar altında çalışan bir PV modülün ürettikleri elektriksel enerji değerleri arasındaki fark ile beraber, bir enerji kazancı olarak panel yüzeyinden ve panelin arka kısmından soğutma sıvısı olarak kullanılan suya aktarılan ısı enerjisi miktarı ölçülmek üzere bir deney düzeneği tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan bütün elektriksel ve mekanik teçhizat küçük boyutlarda ancak uyum içinde seçilmiştir. Bunun nedeni, mekanik işlerdeki kolaylık ve elektriksel ölçme işlemlerindeki hassasiyet ve doğruluk oranlarının kabul edilebilir aralıkta olmasını sağlayan bir prototip geliştirmektir. Bu deney düzeneğinden elde edilen sayısal sonuçlar ve bu sonuçlarla elde edilen grafiklerin, büyük çaplı uygulamalar ile birbirine yakın davranışlar göstereceği düşünülmektedir.

6.1. Deney Setinin Tanıtılması

Deneyisel çalışma Türkiye Batman ilinde, $37^{\circ}54'12''$ kuzey ve $41^{\circ}07'47''$ doğu koordinatlarında, gölgeleme unsurlarının bulunmadığı bir konumda gerçekleştirilmiştir. Batman Türkiye'nin Güneydoğu Bölgesinde yer almakta olup, yıllık 2879 saat güneşlenme süresi ve $1581 \text{ KWh/m}^2\text{-yıl}$ ışıınım enerjisi değeri ile güneş enerjisinden çok faydalanılabilecek bir bölgede bulunmaktadır. Test verileri, güneşlenme süresi ve ortam sıcaklığının uygun olduğu 29 Eylül – 10 Ekim tarihleri arasında elde edilmiştir. Soğutma işleminde kullanılan suyun hava sıcaklığından asgari düzeyde etkilenmesi için strafor köpükten yapılmış bir kutu kullanılmıştır. Bu kutunun hacmi yaklaşık 70 litredir. Düşük su sıcaklıklarına ait verilerin de elde edilebilmesi için, her test günü suya buz ilavesi yapılmıştır.

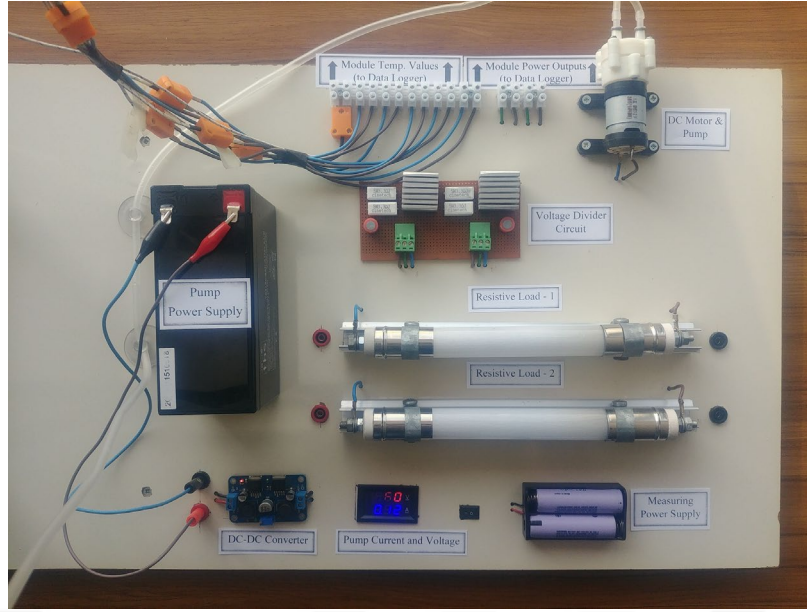
Deney setinden elde edilen veriler düzenlenerek; normal PV panel ve soğutma işlemi uygulanan PV panele ilişkin güç, enerji, verim, enerji dönüştürme oranı ve benzeri büyüklükler elektriksel ve termal olarak kıyaslanmış ve grafikler halinde sunulmuştur. Sistemden alınan veriler 5 dakikalık periyotlarla ölçülmesine rağmen, zaman çizgisi üzerindeki veri yığılmasından kaynaklanacak okuma zorluğunu engellemek için grafikler 15 dakikalık periyotlara göre çizilmiştir. Bu işlem yapılırken akım, gerilim, güç, sıcaklık ve enerji dönüştürme oranı gibi verilerin 5 dakikalık ölçümlerinin ortalaması alınırken, enerji ile ilgili büyüklüklerin ise 5 dakikalık ölçümlerinin toplamı hesaplanmıştır.

Tasarlanan ve gerçekleştirilen deney düzeneğinin genel görüntüsü tüm bileşenleriyle Şekil 6.1’de sunulmuştur.



Şekil 6.1. Deney düzeneğinin genel görüntüsü

Deney seti hazırlanırken; DC motorun enerjisini sağlayacak batarya, farklı debilerin elde edilmesi için motorun gerilimi ayarlamak için kullanılan DC-DC konvertör, DC motorun besleme gerilim ve akımını ölçen tümleşik voltmetre-ampermetre, ölçü aletlerinin besleme gerilimi için kullanılan Li-ion batarya, PV panellerin yüklenmesi için kullanılan rezistif yükler, panellerin üzerindeki gerilim değerini ölçülebilecek aralığa getirmek için kullanılan gerilim bölücü devreler, DC motor ve pompa, panellerden gelen tüm sıcaklık değerlerinin ve panel gerilim değerlerinin data logger ile bağlantısını gerçekleştirmek üzere kullanılan klemensler, iki PV modül ile beraber bir bordun üzerine uygun şekilde monte edilmiştir. Bu bordda bulunan bileşenlere ait genel görüntü Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2. Deney seti bileşenlerinin genel görüntüsü

6.1.1. PV modüller ve soğutma yöntemi

Deneyisel çalışmada, STC’de maksimum 22 Watt güç üretebilen çok kristalli silikon modüller kullanılmıştır. Bu panellere ilişkin katalog bilgileri Tablo 6.1’de sunulmuştur.

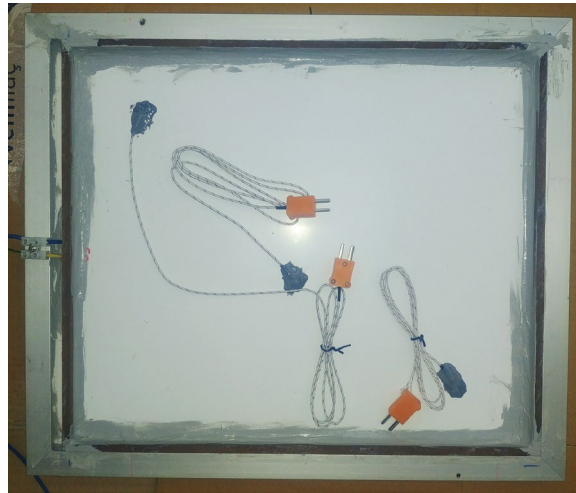
Tablo 6.1. PV modüllerin katalog bilgileri (AM= 1.5, E=1000 W/m², T_c=25 °C)

Özellikler	Değer
Maksimum güç (P_{max})	22 W
Güç toleransı (%)	Sadece pozitif
Optimum işletme akımı (I_{mp})	1,25 A
Optimum işletme gerilimi (V_{mp})	18,2 V
Kısa devre akımı (I_{sc})	1,31 A
Açık devre gerilimi (V_{oc})	22,58 V
Ağırlık	2,00 kg
Ebat	360x420x20 mm
Maksimum sistem voltajı	600 V

Hava kütlesi (Air mass) değerinin 1,5, ışıınım değerinin 1000 W/m² ve işletme sıcaklığının 25 °C olduğu standart test koşullarında minimum 22 W güç üreten bu paneller, ışıınım miktarının daha düşük olduğu şartlarda daha küçük güçler üretecektir. PV panellere ilişkin etiket değerlerinde de belirtildiği üzere, PV paneller aynı üretim bantlarında üretilmesine rağmen, üretici tarafından belirtilen bir güç toleransı değeriyle beraber sunulmaktadırlar. Bu güç toleransı, maksimum güç değerinin bir oranı olarak "artı" ve "eksi" olarak verilebildiği gibi, "sadece pozitif" olarak da verilebilmektedir. Her

iki durumda da özellikle panellerin soğutulması ve tozlanma etkisinin incelendiği hassas deneysel çalışmalarda, 2 adet panelin ürettikleri güçlerin karşılaştırılması söz konusu olduğundan bu PV panellerin aynı şartlar altında birbirine yakın sonuçlar vermesi son derece önemlidir. Ürettikleri güç değerleri arasında ihmal edilemeyecek büyüklükte bir fark olması halinde, elde edilen ölçüm sonuçlarının belirlenen bir düzeltme faktörü katsayısı ile tekrar düzenlenmesi gerekmektedir. Bu düzeltme faktörü katsayısının saptanması için uygun yöntemlerden biri, PV panellerin eşit şartlar altında ürettikleri kısa devre akımlarının ve açık devre gerilimlerinin karşılaştırılmasıdır. Kullanılan PV panellerin çok kristalli silikon panel olması halinde bu detaya dikkat etmek daha da önem kazanır. Çünkü bu panellerin üretiminde kullanılan hücrelerin çok kristalli olması, hücre içindeki kristallerin homojen bir dağılım oluşturması ihtimalini azaltmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan PV paneller bu amaç doğrultusunda; eşit şartlar altında teste tabi tutulmaları sonucu elde edilen açık devre gerilimi ve kısa devre akım değerleri arasındaki yaklaşık % 1'lik fark, bir katsayı olarak ölçüm sonuçlarına yansıtılmıştır.

PV panellerin hücre sıcaklığını ölçmek üzere K tipi termokupllar kullanılmıştır. Yapılan bir dizi ön testte, PV panellerde hücre sıcaklığı değerinin saptanmasında, panelin cam tabakasının üstünden yapılan ve EVA tabakasından yapılan sıcaklık ölçümlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Ancak; gerek termokuplların panelin üst kısmına yerleştirilmesinin hücreler üzerinde gölge etkisi oluşturması, gerekse hücrelerin EVA tabakasına daha yakın olması, panelin arka kısmından yapılacak ölçümlerin gerçek hücre sıcaklığına daha yakın değerler verecek olmasından dolayı termokuplların panellerin arka kısımlarına monte edilmeleri uygun görülmüştür. Şekil 6.3'te soğutulan modülün arka kısmına tespit edilen termokupl bağlantıları gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Termokuplların montajı

Panellere ait hücrelerin sıcaklık değerlerinin ölçülmesinde toplam 4 adet termokupl kullanılmıştır. Bunlardan 1 tanesi normal işletme şartlarında kullanılan panelin arka kısmına, diğer 3 tanesi de soğutulacak panelin arka kısmına monte edilmiştir. Soğutulacak panele monte edilen termokupllar, panelin alt, orta ve üst kısmına monte edilmişlerdir.

PV hücreler matematiksel olarak modellenirken, davranışları diyot komponentinin davranışına benzediğinden genellikle diyotlu modeller kullanılmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan PV paneller, 36 adet hücrenin seri bağlantısı ile oluşturulmuştur. Tıpkı birbirine seri bağlı diyotlardan bir tanesinin kesime gitmesinin tüm seri devreyi etkilediği gibi, seri bağlı PV hücrelerde de bir hücrenin enerji üretmemesi seri bağlı tüm sistemin enerji üretmemesine sebep olmaktadır. Buna benzer olarak, seri bağlı hücrelerden oluşmuş bir PV panelin veriminin, en düşük enerjiyi üreten hücrenin verimine eşit olduğunu söylemek mümkündür. Bu bilgiden yola çıkarak, her ne kadar soğutulacak panelin alt, orta ve üst kısmında bulunan hücrelerin sıcaklığını ölçmek üzere 3 adet termokupl kullanılmışsa da, bu sıcaklık değerlerinden en yüksek sıcaklık değerini gösteren termokupl verisini kullanmak daha doğru olacaktır. Isınan suyun panelin yukarısına doğru hareket edeceği bilindiğinden panelin üst kısmında bulunan sıcaklık değeri kullanılmıştır. Çünkü burada bulunan hücreler, soğutma işleminin etkisinden en az faydalanan hücreler olup panelin genel verimini belirleyeceklerdir.

Uzun yıllar boyunca işletmede kalacak şekilde üretilen PV paneller üretilirken, taşıma ve montaj aşamasında olası mekanik darbelere karşı korunaklı, havadaki nemden kolayca etkilenmeyecek anodize alüminyum profiller ile çerçevelenirler. Bunun yanında yağışlı ve nemli havalarda hücrelerin içine sızıntıların gerçekleşmemesi için sıvı geçirime karşı dirençli olacak şekilde üretilirler. PV hücrelerin soğutulması ile verimlerinin artırılmasına yönelik yapılan deneysel çalışmaların birçoğunda soğutma işlemini gerçekleştirecek sıvı, panelin üst kısmına monte edilen nozüller veya valfler aracılığı ile yapılmaktadır. Deneysel bir çalışmada, kullanılan sıvı içindeki kirecin panel yüzeyinde oluşturacağı tortu tabakasının deney sonuçlarının hatalı çıkmasına sebep olması bir yana; nozüllerin zamanla tıkanması, nozüllerden panel yüzeyine akan suyun panel yüzeyini homojen soğutamaması, panel yüzeyini terk eden suyun yönetilmesi, panel yüzeyinde oluşan su damlacıklarının hücreler üzerinde mercek etkisi oluşturarak hücrelerin kısmî aşırı ısınmasına yol açarak panellerin işletme ömrünü kısaltması, orta ve büyük güçteki santrallerde bu tür sistemlerin gerçekleştirilmesinde karşılaşılabilecek mekanik zorluklar ve benzer faktörlerden dolayı profesyonel uygulamalarda bu yöntem

yaygınlaşmayacak gibi görünmektedir. Yine yapılan bazı deneysel çalışmalarda panellerin soğutma işlemi panelin arkasına yerleştirilen ve EVA tabakasına monte edilen su kanalları aracılığı ile yapılmaktadır. Bu yaklaşımın da, kanallar ile EVA tabakası arasında termal macun kullanılsa bile ısı transferinin istenilen düzeyde gerçekleşmemesi, soğutma işleminin homojen olmaması ve büyük çaplı uygulamalarda termal macunun doğuracağı maliyetler nedeniyle tercih edilmeyeceği düşünülmektedir. Bu çalışmada, soğutmanın panel verimi üzerindeki etkisini ve suya transfer edilecek ısı enerjisi miktarının ölçülmesini kapsayan hibrit bir sistem incelenmek istenmiştir. Bundan dolayı hem deney sürecinde bahse konu yöntemlerin doğuracağı sorunlarla karşılaşmamak hem de profesyonel uygulamalara bir ışık tutması için, bu deneysel çalışmada PV panellerde soğutma işlemi arka kısımdan ve suyun EVA tabakası ile direkt temasta bulunacağı bir yöntem izlenmiştir. Bunun sağlanması için, sıvı geçirimine karşı zaten dirençli üretilmiş soğutma işlemi yapılacak panel, poliüretan mastik uygulamasına tabi tutularak sıvıya karşı daha dirençli hale getirilmiştir. Panelin arka kısmında bulunan alüminyum çerçeveye uygun ebatta 2 mm kalınlığındaki alüminyum levha yine poliüretan mastik ile sızdırma yapmayacak şekilde monte edilerek panelin arka kısmında kapalı bir kutu oluşması sağlanmıştır. Şekil 6.4'te çeşitli açılardan soğutulan ve normal panelin tamamlanmış montaj fotoğrafları gösterilmiştir.



Şekil 6.4. PV modüllerin tamamlanmış montaj görüntüleri

Suyun giriş ve çıkış noktaları belirlenerek, bu noktalara 6 mm çapında kauçuk su hortumlarının bağlanmasını sağlayacak bir yapı oluşturulmuştur. Suyun giriş ve çıkış sıcaklığını ölçmek üzere kullanılacak termokupllar da bu yapının uygun bir yerine sabitlenmişlerdir. Suyun giriş ve çıkış sıcaklığını ölçmek üzere kullanılan 2 adet ve hücre sıcaklığını ölçmek üzere panelin EVA tabakasının alt, orta ve üst kısımlarına

konumlandırılmış 3 adet termokupl olmak üzere toplam 5 adet termokupl uygun bir yapı oluşturularak panelin dış kısmına çıkarılmışlardır. Böylece soğutma işlemi yapılacak panel ve normal işletme şartlarında kullanılacak panel deneysel çalışma için uygun hale getirilmiştir.

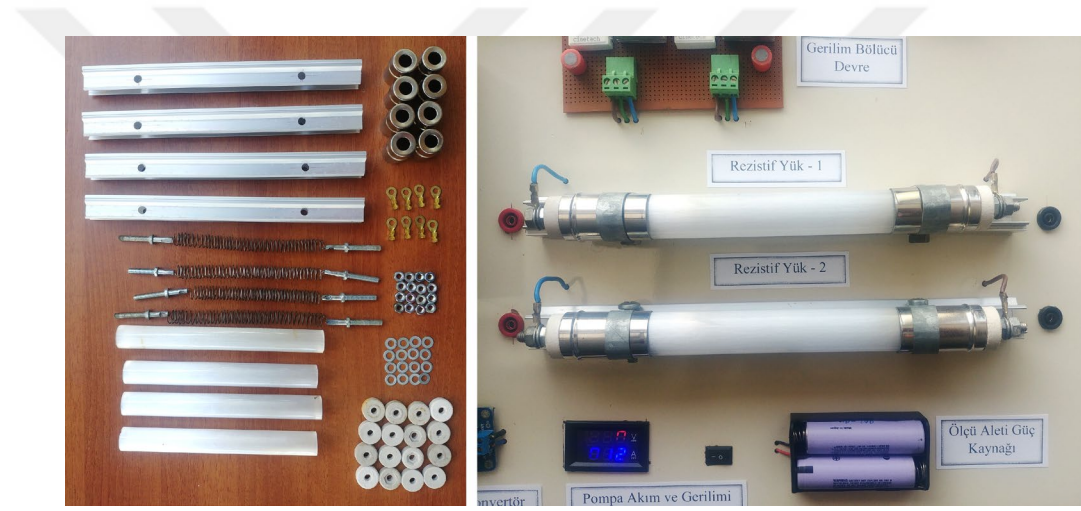
6.1.2. PV modül için tasarlanan yükler

Deneysel çalışmalarda, PV panellerin ürettiği güç değerinin ölçülmesi için genel olarak birkaç yöntem izlenmektedir. Bunlardan biri, panellerin ürettiği gücü MPPT barındıran veya barındırmayan DC-AC inverter ile AC akıma çevirdikten sonra şebekeye veya DC-DC konvertör ile enerji depolama ünitelerine basılması yöntemidir. Bu yöntemde, şebekeye basılan veya akülerde depolanan enerji miktarının elektronik sistemlerle izlenmesi ve kaydedilmesi gerekmektedir. Bu yöntemde, özellikle de şebekeye basılacak enerji miktarı ölçümünde, inverterlerin çalışma gerilimi aralığından dolayı birçok panelden oluşan bir PV dizisi kullanmak gerekmektedir.

Özellikle de hücre sıcaklığının panel verimi üzerindeki etkilerinin araştırılmasına yönelik deneysel çalışmalarda tercih edilen bir başka yöntem, soğutulan ve normal işletme şartlarında çalıştırılan panellerin hücre sıcaklıkları ile beraber, bu panellerin I_{sc} ve V_{oc} değerlerinin ölçülmesi şeklindedir. Bilindiği üzere PV hücrelerin matematiksel modellenmesinde en sık kullanılan modellerden biri Gerçek Tek Diyotlu Model'dir. Bu modele göre P-N jonksiyon bölgesindeki sıcaklığı da içeren $V_T (=N_s kT/q)$ değeri, hücre sıcaklığına göre farklı değerler almaktadır. PV panel üreticileri ürünlerine ait katalog bilgilerinde, tercih ettikleri matematiksel modele göre STC'deki I-V ve P-V eğrilerini sunarlar. Mesela, Gerçek Tek Diyotlu Model'i temsil eden Denklem (4.4)'e göre 1000 W/m^2 ışıınım değeri sabit tutulup, P-N jonksiyon bölgesindeki sıcaklığı temsil eden Kelvin cinsinden T değeri 25'ten büyük seçildiğinde oluşacak I-V ve P-V eğrilerinde P_{max} değerinin belli bir miktarda azaldığı görülecektir. T değeri 25'ten daha küçük seçilerek elde edilen I-V ve P-V eğrilerinde ise P_{max} değerinin belli bir miktarda arttığı görülmektedir. Bu değişim katalog bilgilerinde $\%/^{\circ}\text{C}$ birimiyle Sıcaklık Katsayısı olarak ifade edilir. Her ne kadar katalog bilgilerinde verilen Verim-Sıcaklık grafiklerinde lineer değişim gösteriyor olsa da, birim sıcaklık değişimine göre hücre verimindeki bu artma ve azalma lineer olmayıp, sıcaklık artma eğilimi gösterirken etkisini daha da artıran bir özellik göstermektedir. Dolayısı ile tek bir sıcaklık katsayısından söz etmek mümkün değildir. İşte bundan dolayı, hücre sıcaklığının panel verimi üzerindeki etkisini araştırmak üzere I_{sc} ve V_{oc} değerlerini kullanarak yapılan deneysel çalışmalarda, teorik matematiksel

modellere göre üretilen sıcaklık katsayısı verilerinin kullanılabilmesi için PV hücre karakteristiklerinin çok iyi tanınması ve non-lineerliğe dikkat edilmesi gerekmektedir.

Farklı şartlar altındaki PV panellerin ürettikleri enerji miktarlarının karşılaştırılmasına yönelik çalışmalarda en çok tercih edilen yöntemlerden biri de panellerin değeri bilinen rezistif karakterli bir yük ile yüklenmesidir. Bu yaklaşım, birinci yöntemdeki karmaşık ölçüm sistemlerine gerek duymadığı gibi görece büyük boyutlu PV dizilerinin kullanılmasına da ihtiyaç duymazlar. Ayrıca bu yaklaşım, yukarıda açıklanan PV hücre modellerine dayanarak elde edilen lineer olmayan sıcaklık katsayılarına ihtiyaç duymayan, tamamen somut sonuçlara dayalı hesaplar içerdiğinden, deneysel çalışmanın özüne daha uygundur. Şekil 6.5'te, deneysel çalışmada kullanılan iki adet rezistif yükün tasarım ve montaj görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.5. Rezistif yükler

Deneysel çalışmada bir karşılaştırma yapılacağı için, normal işletme şartlarında enerji üretecek panel ile soğutma işlemi uygulanacak panellere bağlanacak rezistif yük değerlerinin mümkün olduğunca birbirine yakın olması gerekir. Rezistif yüklerin direnç değeri de önemlidir. Küçük değerli bir direnç değeri kullanılması, panellerin aşırı yüklenmesine sebep olacakken, büyük değerli bir direnç kullanılması ise belli ısıtım değerlerinin üzerindeki şartlarda üretilen güç değerleri arasında bir kıyas yapılamamasına neden olacaktır. Bu nedenle uygun görülen direnç değeri; panellerin STC'deki güç üretim değerleri baz alınarak, STC'de 22 Watt güç tüketecek şekilde tasarlanmıştır.

6.1.3. Gerilim bölücü devre

Tez çalışması hassas ölçümlerin yapılmasını gerektirdiğinden, sistem bileşenlerine ilişkin değerler data logger ile ölçülerek belirli periyotlarla kaydedilmiştir.

Data loggerların yapısında bulunan ADC devreleri dolayısıyla sinyal genliği ölçme aralıkları genellikle 5 V ile sınırlıdır. 5 V'tan daha büyük gerilim sinyallerinin ölçülerek kaydedilebilmesi için gerilim bölücü gibi ara devrelere ihtiyaç duymaktadırlar. Bu çalışmada kullanılan PV modüllerin V_{mp} değeri 18,2 V olduğundan, gün içindeki ışıınım miktarına göre modüllerin sunacağı gerilim değerinin 0 - 18,2 V arasında değişeceği öngörülmektedir. Bu gerilim değerlerinin data logger tarafından ölçülebilmesi ve kaydedilebilmesi için gerilim bölücü bir devre tasarlanmıştır. Şekil 6.6'da gerilim bölücü devrenin bord üzerindeki montaj fotoğrafı sunulmuştur.



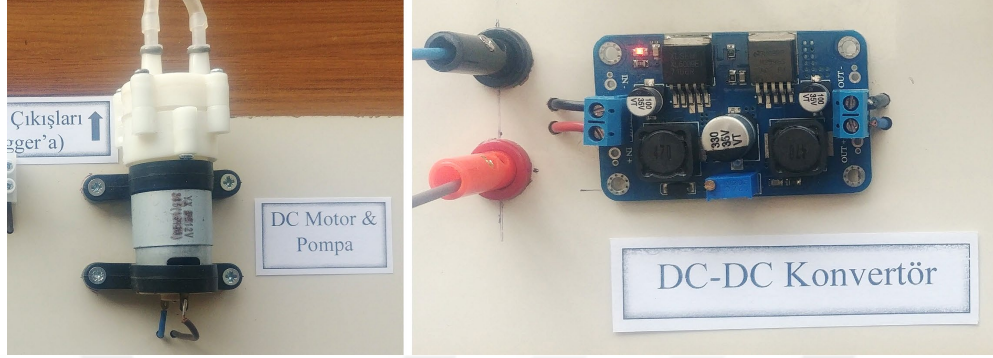
Şekil 6.6. Gerilim bölücü devre

Gerilim bölücü devre, PV modüllerin beslediği rezistif yüklerle bağlanmıştır. Gerilim bölücü devrede kullanılan dirençlerin yüksek ısılar altında çalışabilecek güç değerine sahip olmaları gerekir. Bu nedenle uzun vadede yüksek akımlara dayanabilen tel sargılı seramik dirençler kullanılmıştır. Bununla beraber yüksek ışıınım değerleri altında ısındığı gözlenen bu dirençler için alüminyum malzemeden pasif soğutucular tasarlanarak sorunsuz bir şekilde çalışmaları sağlanmıştır. Alüminyum soğutucular ile seramik direnç yüzeyleri arasındaki ısı transferi, termal iletkenliği yüksek bir macunla sağlanmıştır. Modüllerin ürettiği gerçek gerilim değerlerinin belirlenmesi için, data logger tarafından ölçülen değerlerin, gerilim bölücü devrede kullanılan direnç değerleri tarafından tayin edilen katsayı ile düzeltilmesi gerekmektedir. Bu işlem, data logger programlanırken yapılabileceği gibi, kayıtlar PC ortamına atıldıktan sonra da yapılabilir.

6.1.4. Sirkülasyon motoru ve pompası

Bu çalışmada soğutma sıvısı olarak kullanılan suyu PV panelden geçirmek için bir pompa ve bu pompanın enerjisini sağlayan bir DC motor kullanılmıştır. Çalışma,

farklı debiler için yapılacağından pompa gücünün ayarlanabilir olması gerekmektedir. DC motorların en önemli avantajlarından biri devir hızının gerilim ile çok basit bir şekilde ayarlanabilir olmasıdır. Deney düzeneğinde kullanılan DC motor & pompa ve sürücü devresi Şekil 6.7’de sunulmuştur.



Şekil 6.7. DC motor & pompa ve sürücü devre

Bütünleşik olarak temin edilen bu DC motor ve pompanın etiket değerlerinde, çalışma gerilimi aralığı 6-12 V olarak belirtilmesine rağmen, yapılan testlerde büyük güç gerektirmeyen durumlarda kararlı bir şekilde çalışma geriliminin 3,25 V’a kadar inebildiği görülmüştür. Yapılan ön test çalışmaları kapsamında, motorun çeşitli gerilim değerlerinde PV panellerden ne kadarlık bir su debisi oluşturduğu saptanmıştır. Sistemin genel verimi hesaplanırken, DC motorun harcadığı enerji değeri de kullanılacağından dolayı, tüm debi testlerinde motorun çektiği akım ölçülerek motor gücü not edilmiştir. Yapılan ön testlere göre, DC motor gerilim, akım ve güç değeri ile debi değerleri Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2. Motor gücüne göre tespit edilen debi değerleri

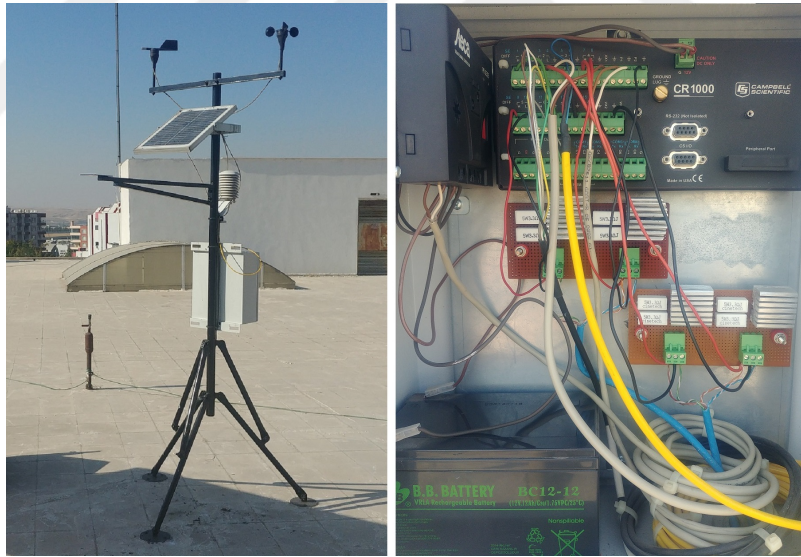
DC motor gerilimi (V)	DC motor akımı (mA)	DC motor gücü (W)	Debi (kg/dk)	Debi (kg/sa)
3,25	165	0,54	0,245	14,70
5,00	250	1,25	0,402	24,12
7,00	300	2,10	0,584	35,04

Yapılan ön testlerde, özellikle düşük debi değerlerinde DC motorun tamamen DC olmayan dalgalı güç kaynakları ile çalıştırılması sırasında kararlılık sorunlarının yaşandığı gözlenmiştir. Bu sorunun çözümü olarak, su sirkülasyonu için kullanılan DC motorun enerjisi, 12 V 9 Ah’lık kurşun asit bir akü ile sağlanmıştır. Kullanılan akünün geriliminin farklı debi testleri için gün boyunca sabit kalabilmesi için akü, ışınımın olmadığı gece saatlerinde şarj edilmiştir. DC motorun geriliminin ayarlanabilmesi, tüm

debi testleri için ihtiyaç duyulan güç değerini dönüştürme kapasitesine sahip bir Buck-Boost DC-DC konvertör kullanılmıştır. Motor üzerindeki gerilim değeri ve çektiği akımın ölçülmesi için bir voltmetre ve ampermetre kullanılmıştır. Bu ölçü aletleri, belli bir gerilim ve akım değerinin altındaki ölçümleri yapmada bir enerji kaynağına ihtiyaç duyarlar. Ölçü aletlerinin besleme gerilimi, Li-ion bataryalardan oluşturulan harici bir enerji kaynağı ile sağlanmıştır.

6.1.5. Data logger ve meteorolojik sensörler

Normal işletme şartlarında çalışan ve soğutma işlemine tabi tutulan PV panellere ait tüm sıcaklık değerleriyle beraber, güneş ışıınım miktarı ve hava sıcaklığı değerlerinin ölçülmesi ve kaydedilmesi için Cambell Scientific firmasının CR1000 model data-loggerı kullanılmıştır. CR1000 model data loggera ait özellikler detaylı olarak Ek 1’de verilmiştir. Bu data-logger 16 analog ve 8 dijital girişe sahip olup ihtiyacı karşılamıştır. Şekil 6.8’de, meteoroloji istasyonu ve kullanılan data logger, sensör bağlantıları ile birlikte sunulmuştur.

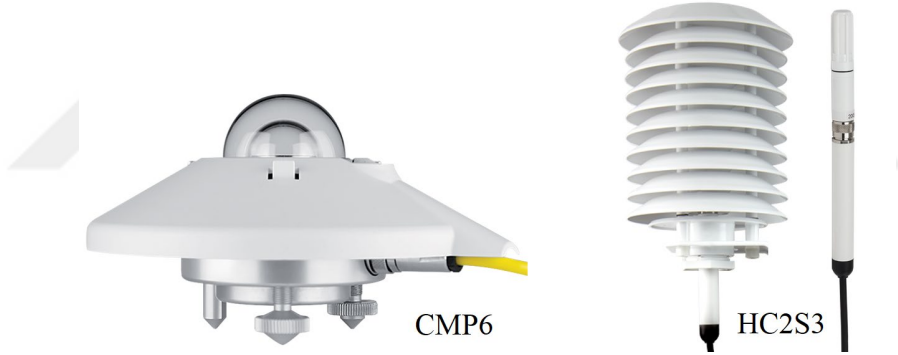


Şekil 6.8. Meteoroloji istasyonu ve data logger bağlantıları

PV sistemlere ilişkin deneysel çalışmalarda, PV modüllerin ürettiği güç değerleri ve bu değerlerin olduğu radyasyon, hava sıcaklığı, nem, rüzgâr hızı gibi ortam bilgilerinin eş zamanlı olarak kaydedilmesi hedeflenir. Bu amaçla, tez kapsamındaki testler esnasında, normal ve soğutulan modüle ilişkin güç değerleri, soğutmalı modül üzerindeki termokupl sıcaklık bilgileri, modüle giren ve modülü terk eden soğutma sıvısının sıcaklık bilgileri ile eş zamanlı olarak ortamın ışıınım değeri ve hava sıcaklığı

bilgisi de data logger ile kaydedilmiştir. Tüm bu bilgileri kaydetmek üzere kullanılan data loggerın programlanmasında, üreticisi tarafından sağlanan LoggerNet 4.2.1 yazılımı kullanılmıştır. Programlamaya ait komutlar Ek 2, sensörlerin data loggera fiziksel bağlantılarını gösteren şema Ek 3'te sunulmuştur.

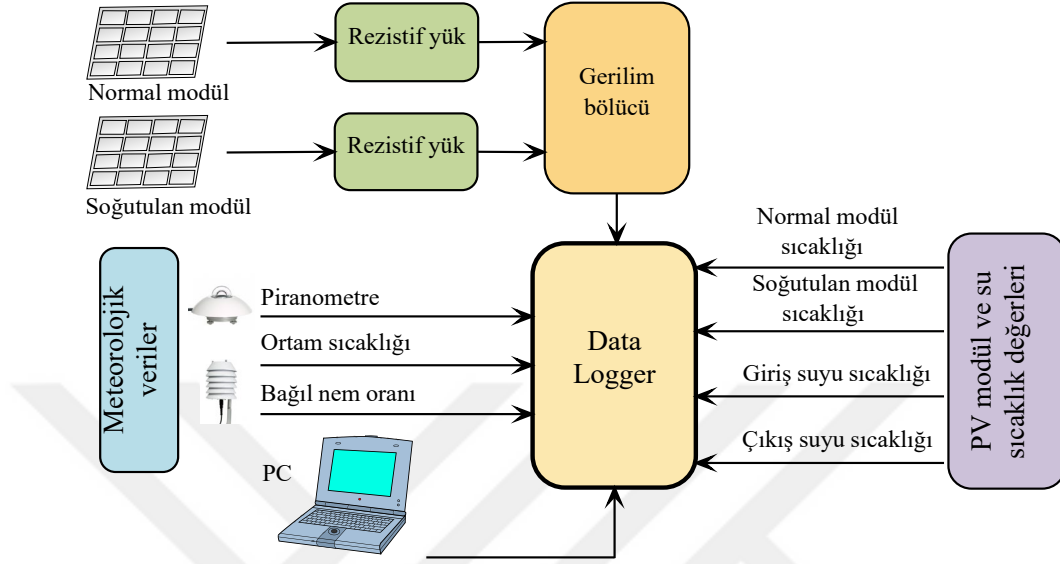
Deneyisel çalışmanın en önemli niceliklerinden biri olan ışıyım değerinin ölçülmesinde Kipp&Zonen firması tarafından üretilen CMP6 sensörü kullanılmıştır. Bu piranometre, $5-20 \mu V/W/m^2$ değerindeki hassasiyetiyle deneyisel çalışmalarda ve profesyonel meteoroloji istasyonlarında sıklıkla kullanılan birinci sınıf (ISO 9060:1990 sınıflandırma) bir üründür. Termopil sensör esasına göre çalışan CMP6 piranometresinin doğruluk toleransının içerisinde çalışabilmesi için ihtiyaç halinde nem tutucu silika jel haznesine periyodik bakımlar yapılmalıdır. Bu amaçla, deneyisel çalışmadan önce silika jel haznesi yenilenmiştir. CMP6 piranometresine ilişkin diğer teknik detaylar Ek 4'te verilmiştir. Şekil 6.9'da çalışma kapsamında kullanılan CMP6 piraometresi ve HC2S3 probu gösterilmiştir.



Şekil 6.9. CMP6 piranometresi ve HC2S3 probu

PV modül soğutma çalışmalarında ortam sıcaklığı, sonuçların yorumlanmasında önemli parametrelerden biridir. Bu amaçla testlerin gerçekleştirildiği ortama ait sıcaklık değerleri de diğer verilerle beraber eş zamanlı kaydedilmek istenmiştir. Bu amaçla Cambell Scientific tarafından üretilen HC2S3 probu kullanılmıştır. Bu ürün ortam sıcaklığı ve bağıl nem oranını ölçen bir probtan ve bu probu sıcaklık ve nem parametrelerinin sıra dışı anlık değişimlerden ve güneşten direkt gelen sıcaklık etkisinden koruyan plastik bir muhafazadan oluşmaktadır. Bu ürünün sıcaklık sensörü -40 ila $+60$ °C arasında, nem algılayıcısı ise 0 ile 100 RH aralığında ölçüm yapma kapasitesine sahiptir. HC2S3 ile ilgili diğer kapsamlı bilgiler Ek 5'te verilmiştir. Data logger programlanırken veriler, 5 dakikalık periyotlarla 5 saniyede bir alınan verilerin ortalaması olarak kaydedilmiştir. İki adet PV modülün güç ve sıcaklık bilgileriyle beraber, soğutma

suyunun soğutulan modüle giriş ve çıkış sıcaklığı bilgisi ve CMP6 ile HC2S3 sensörlerinden gelen ışıınım ve sıcaklık bilgilerinin kaydedilmesine ilişkin diyagram Şekil 6.10’da sunulmuştur.



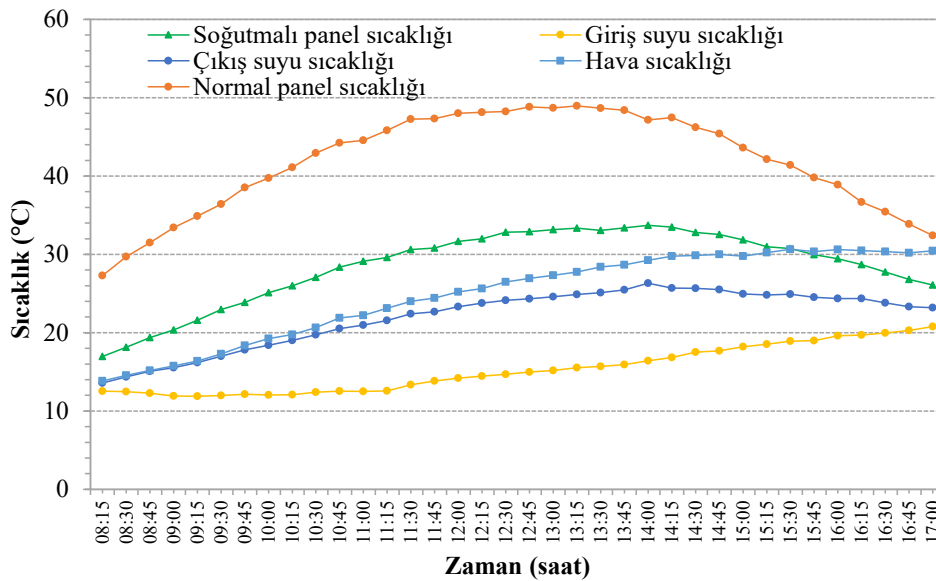
Şekil 6.10. Verilerin toplanmasına ilişkin blok diyagram

7. BULGULAR

Tezin amaçları kapsamında, debinin etkisi de araştırılmak istendiğinden, testler üç gün için üç farklı debi ile gerçekleştirilmiştir. Testlerden elde edilen veriler ve bu veriler üzerinde yapılan hesaplamalara ait bulgular grafik ve tablolar şeklinde sunulmuştur. Farklı debi değerleri için gerçekleştirilen testlerde genel olarak; normal ve soğutulan panellere ait elektriksel güç, elektriksel enerji, kümülatif elektriksel enerji ve elektriksel ve termal enerjinin toplamını ifade eden net kümülatif enerji değerleri grafik halinde verilmiştir. Ayrıca her test gününe ait, hava sıcaklığı, normal panel sıcaklığı, soğutmalı panel sıcaklığı, giriş ve çıkış suyu sıcaklıklarının test günleri boyunca seyirleri bir arada grafik şeklinde gösterilmiştir. Test günlerinin birbiriyle kıyaslanmasına ait veriler de derlenmiş ve elde edilen bulgular yorumlanarak araştırmacıların hizmetine sunulmuştur.

7.1. Test Günü 1 Verileri

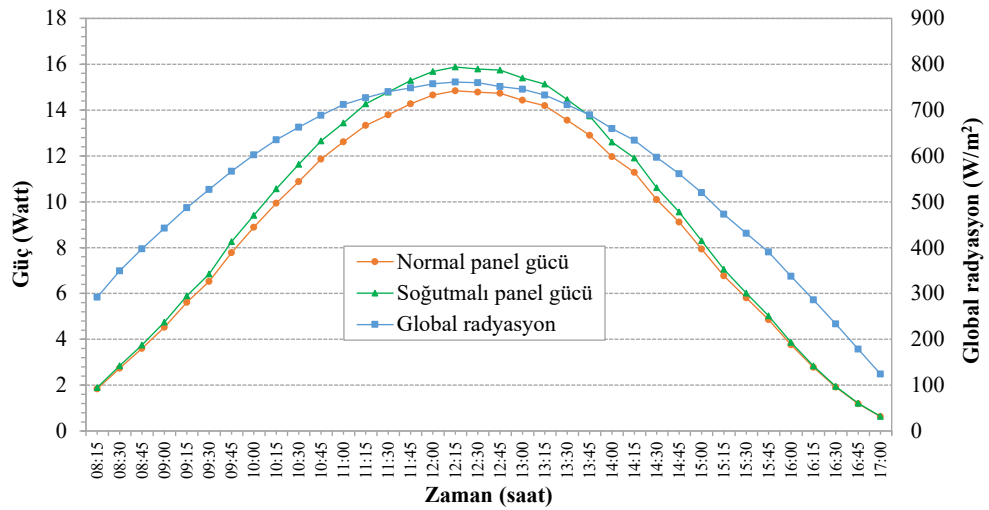
Deney seti 10.10.2021 tarihinde, modüllerin yüzeyleri tamamen güneye bakacak şekilde test sürecine hazır hale getirilmiştir. Bu test gününde (TG) DC-DC dönüştürücünün gerilim değeri, daha önce debi değeri 0,245 lt/dk olarak saptanan 3,25 V'a ayarlanmıştır. Deney seti üzerinde DC motorun çalışma akımını gösteren ampermetre bu gerilim değerinde 0,165 A değerini almıştır. Bu test günü boyunca kaydedilen hava sıcaklığı, normal panel sıcaklığı, soğutmalı panel sıcaklığı, giriş suyu sıcaklığı ve çıkış suyu sıcaklığının 08.00 ila 17.00 saatleri arasındaki değişimi Şekil 7.1'de gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Sıcaklık değerlerinin değişimi – TG-1

Motor bu test günü boyunca anlık 0,54 W gibi küçük bir güç değeriyle gerekli sirkülasyonu sağlayabilmiştir. Normal ve soğutulan PV modülün ürettiği gerilim değeri, güneş ışınım miktarı ve ortam sıcaklığı değeri 5 dakika boyunca 5 saniyede bir alınan verilerin ortalaması olarak kaydedilmişse de, daha okunaklı olması açısından grafikler 15'er dakikalık periyotlara indirgenerek çizilmiştir.

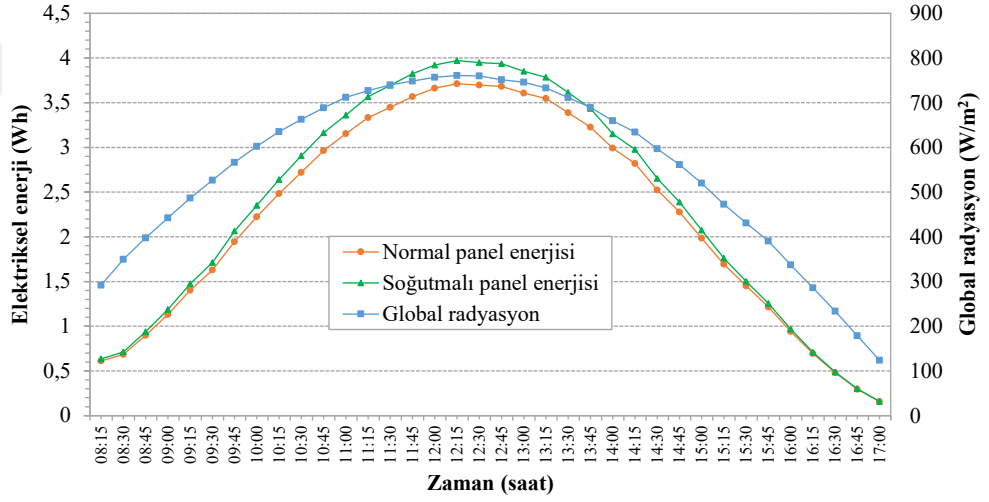
Şekil 7.1'e göre soğutmalı modüle giren su ve çıkan suyun sıcaklığı, giriş suyu ve çıkış suyu sıcaklığının, 70 litrelik depoda bulunan su kütlesinin gün boyunca modül tarafından aktarılan ısı nedeniyle yükseldiği görülmektedir. Giriş ve çıkış suyu arasındaki sıcaklık farkı ışınımın yükseldiği saatlerde artmaktadır. Bu test gününde 13 °C ile başlayan hava sıcaklığı, saat 14.00 civarında 29 °C'ye ulaşmış ve gün sonuna kadar bu civarda seyretmiştir. Normal ve soğutmalı panellerin yüzey sıcaklıkları arasındaki fark, güneş ışınım değerinin görece düşük sayılabileceği günün ilk saatleri ve akşama doğru düşüken, ışınım değerinin yüksek olduğu saatlerde bu farkın arttığı görülmektedir. Sıcaklığın kritik değerlere ulaşabildiği öğlen saatlerinde modül soğutma işleminin başarılı şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Normal modüle ait azami yüzey sıcaklığı saat 13.15'te 48,96 °C olarak kaydedilmişken, soğutma işlemi uygulanan modülün yüzey sıcaklığı aynı saatte 33,35 °C olarak kaydedilmiştir. Şekil 7.2'de TG-1'de normal ve soğutulan modül tarafından üretilen güç değerlerinin gün boyu değişimi güneş ışınımı ile beraber verilmiştir.



Şekil 7.2. Modüllerin ürettiği güç değerleri – TG-1

Şekil 7.2'deki verilere göre, güneş ışınımı değerinin normal ve soğutmalı modüllere ilişkin elektriksel güç değeri üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir. Aynı zamanda iki modülün ürettiği güç değerleri arasındaki fark da güneş ışınımı miktarı

ile sıkı ilişki içindedir. Modüllerin gün boyunca ürettiği güç değerleri arasındaki en yüksek fark, 1,04 W değeriyle saat 12.15'te gerçekleşmişken, bu saatte normal modül 14,84 W, soğutulan modül ise 15,88 W güç üretmektedir. Üretilen bu güç değerlerine göre TG-1 boyunca en yüksek elektriksel verim artışı saat 12.15'te %7 oranında gerçekleşmiştir. %7 verim artışının sağlandığı ilgili saatte modül yüzey sıcaklıkları arasındaki fark 16,16 °C olarak kaydedilmiştir. Buna göre bu saatte 1 °C'lık sıcaklık düşüşü, verimi %0,43 oranında artırmıştır. Soğutulan modülün TG-1 boyunca sağladığı anlık verim artışlarının %1,5 ile %7,18 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Şekil 7.3'te normal ve soğutulan modül tarafından 15 dakikalık periyotlar içinde üretilen enerji miktarlarının TG-1 boyunca değişimi, güneş ışıınımı ile beraber verilmiştir.

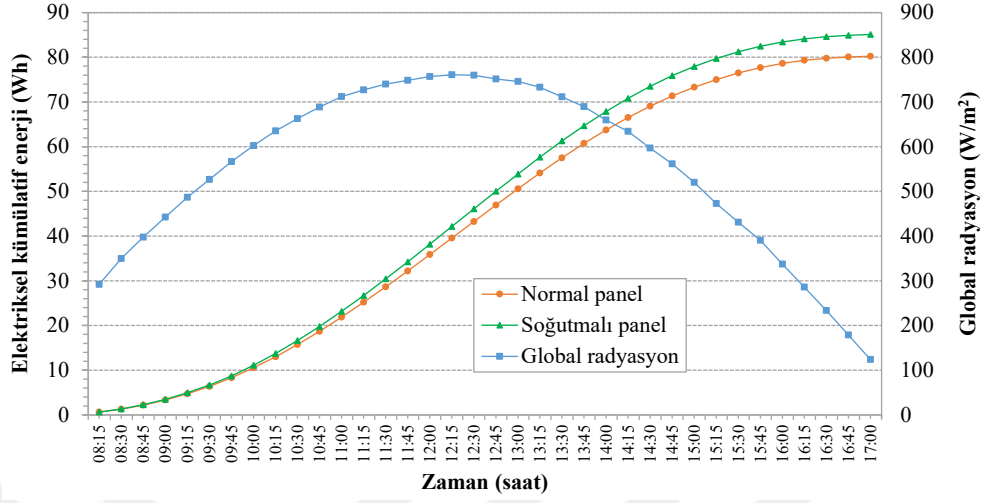


Şekil 7.3. Modüllerin ürettiği enerji değerleri – TG-1

Enerji, gücün zamana göre fonksiyonu olduğu için, Şekil 7.2 ve Şekil 7.3'teki grafikler birbirlerine benzer çıkmışlardır. Şekil 7.3, her iki modülün 15'er dakikalık periyotlar boyunca ürettikleri enerjilerin TG-1 boyunca değişimini içermektedir. Modüller tarafından üretilen enerji değerleri arasındaki azami fark saat 12.15'te 0,259 Wh olarak kaydedilmişken, 12.00 ila 12.15 arasındaki 15 dakikalık sürede normal modülün ürettiği enerji miktarı 3,71 Wh olarak, soğutulan modülün ürettiği enerji miktarı ise 3,97 Wh olarak kaydedilmiştir. Bu durumda, doğal olarak güç üretiminde olduğu gibi enerji üretiminde de %7'lik bir verim artışı gerçekleşmiştir.

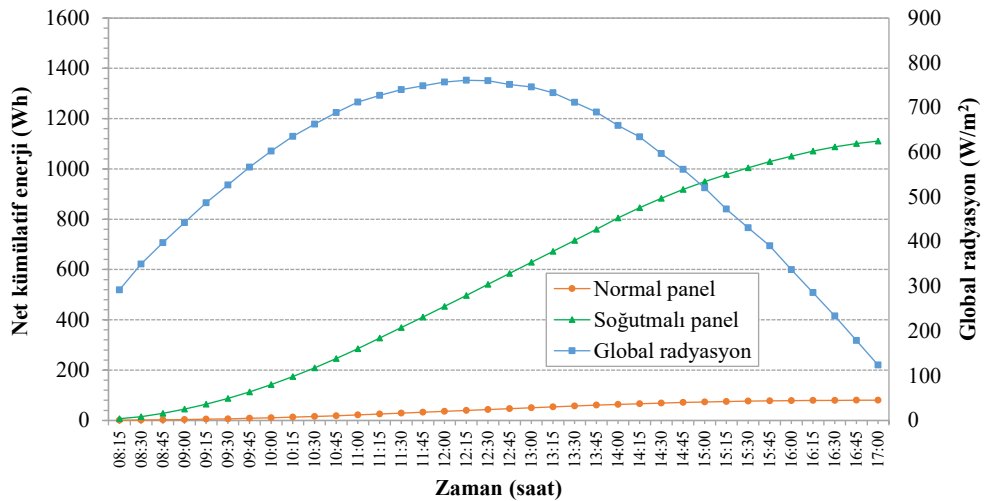
Şekil 7.4'te, normal ve soğutulan modül tarafından üretilen elektriksel enerji miktarlarının TG-1 boyunca kümülatif değişimi sunulmuştur. Şekil 7.3'te sunulan grafikteki verilerin kullanılmasıyla oluşturulan Şekil 7.4'e göre, normal işletme şartlarında çalışan modül ile soğutma işlemi uygulanan modül tarafından üretilen

elektriksel enerji miktarlarının kümülatif değerlerindeki değişim hızı ile güneş ışınlamı miktarı arasında sıkı bir ilişki mevcuttur.



Şekil 7.4. Elektriksel kümülatif enerji değerleri – TG-1

TG-1 boyunca elektriksel kümülatif enerji değişimi, güneş ışınlamının yüksek olduğu saatlerde görece yüksek artışlar göstermiştir. Elde edilen verilere göre, TG-1 sonunda normal modül tarafından üretilen enerji miktarı 80,24 Wh, soğutulan modül tarafından üretilen enerji değeri ise 85,076 Wh olarak kaydedilmiştir. Bu değerlere göre, soğutulan modülde, normal modüle göre TG-1 içerisinde %6,03 dolaylarında bir verim iyileştirmesi gerçekleşmiştir. Şekil 7.5'te TG-1 boyunca, normal modül ve soğutulan modül tarafından üretilen net enerji miktarlarına ilişkin kümülatif değişim gösterilmiştir.



Şekil 7.5. Net kümülatif enerji değerleri – TG-1

PV modüllerin soğutulması işleminde, sistemin PV/T hibrit bir tasarım dâhilinde işletilmesi planlandığında, soğutulan modülü terk eden suya aktarılmış ısı enerjisinin de hesaplanması gerekmektedir. Soğutulan modül tarafından soğutma suyuna aktarılan enerji hesaplanmak üzere TG boyunca ölçülen suyun modüle giriş sıcaklığı ve çıkış suyu sıcaklığı bilgileriyle beraber ilgili güne ait debi değeri hesaba katılmıştır.

Şekil 7.5'teki verilere göre soğutulan panelde oluşan net enerji miktarı Denklem (7.1) ile elde edilmiştir.

$$E_T = E_{elektrik} + E_{termal} - E_{pompa} \quad (7.1)$$

Burada;

$E_{elektrik}$: Soğutulan modül tarafından üretilen elektriksel enerji,

E_{termal} : Soğutulan modül tarafından soğutma suyuna aktarılan termal enerji,

E_{pompa} : Su sirkülasyonunu sağlayan motor&pompanın tükettiği enerji ve

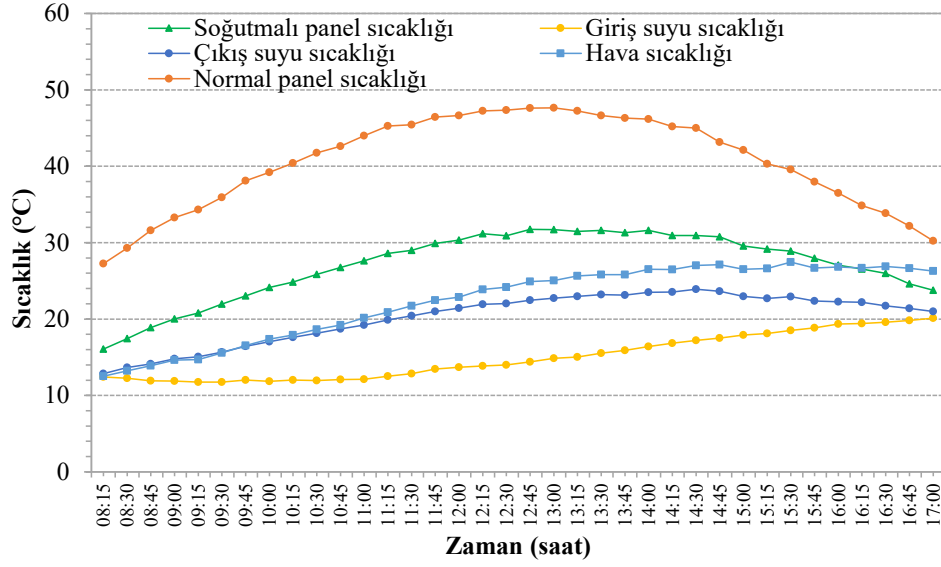
E_T : Soğutulan modül tarafından üretilen toplam enerjidir.

Bütün test günlerinde, motor ve pompanın harcadığı enerjinin bir kayıp olarak değerlendirildiği ve elektriksel ve termal enerjinin toplamını ifade eden net kümülatif enerji değerlerine ait grafik gösterimlerinde Denklem (7.1) kullanılmıştır.

TG-1 boyunca elde edilen verilere göre, normal işletme şartlarında işletilen modül tarafından üretilen toplam enerji miktarı, 80,24 Wh, soğutulan modül tarafından üretilen elektriksel ve termal enerjinin toplamı ise 1111,07 Wh olarak kaydedilmiştir. TG-1 değerlerine göre, soğutmalı modülün PV/T hibrit bir model olarak kullanılması durumunda, normal modülün 13,84 katı değerinde bir enerji ürettiği anlaşılmaktadır. Buna göre TG-1'de net enerji kazancı %1285 oranında gerçekleşmiştir.

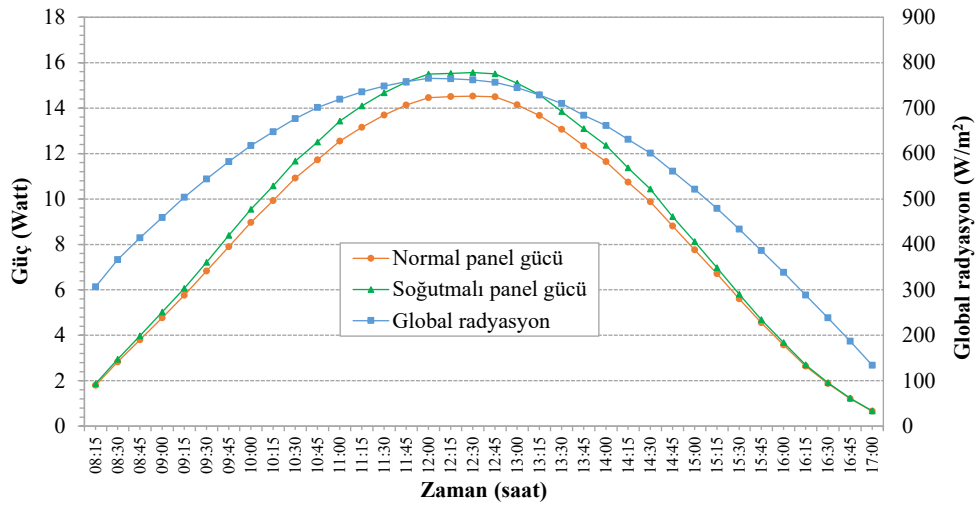
7.2. Test Günü 2 Verileri

Deney seti TG-2 için 07.10.2021 tarihinde, modüllerin yüzeyleri tamamen güneye bakacak şekilde test sürecine hazır hale getirilmiştir. Bu test gününde DC-DC dönüştürücünün gerilim değeri, daha önce debi değeri 0,402 lt/dk olarak saptanan 5 V'a ayarlanmıştır. Deney seti üzerinde DC motorun çalışma akımını gösteren ampermetrede bu gerilim değerinde 0,250 A değeri okunmuştur. Bu test günü boyunca kaydedilen hava sıcaklığı, normal panel sıcaklığı, soğutmalı panel sıcaklığı, giriş suyu sıcaklığı ve çıkış suyu sıcaklığının 08.00 ila 17.00 saatleri arasındaki değişimi Şekil 7.6'da gösterilmiştir.



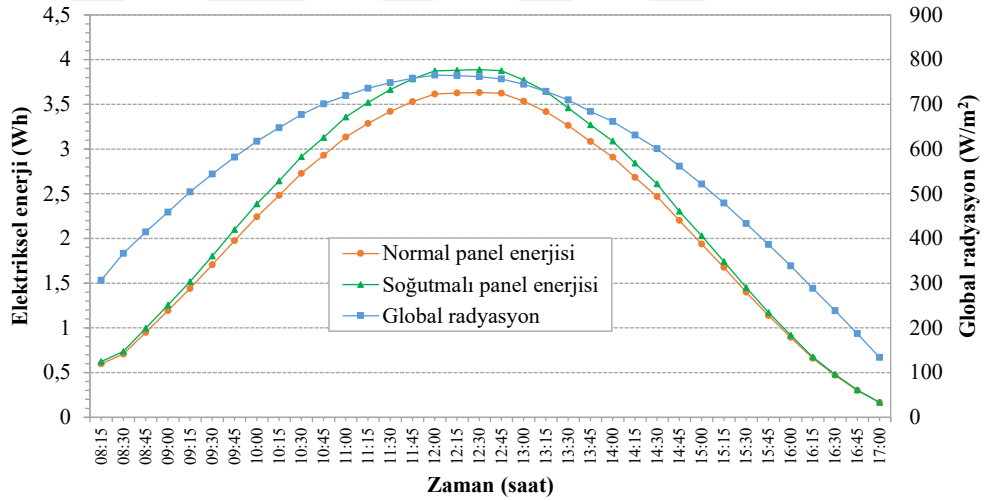
Şekil 7.6. Sıcaklık değerlerinin değişimi – TG-2

Motor bu test günü boyunca anlık 1,25 W gibi küçük bir güç değeriyle gerekli sirkülasyonu sağlayabilmiştir. Bu test gününde 12,51 °C ile başlayan hava sıcaklığı, saat 14:30 sularında 27 °C'ye ulaşmış ve gün sonuna kadar bu civarda seyretmiştir. Normal ve soğutmalı panellerin yüzey sıcaklıkları arasındaki fark, güneş ışınım değerinin görece düşük sayılabileceği günün ilk saatleri ve akşama doğru düşüken, ışınım değerinin yüksek olduğu saatlerde bu farkın arttığı görülmektedir. Normal modüle ait azami yüzey sıcaklığı saat 13.00'da 47,66 °C olarak kaydedilmişken, soğutma işlemi uygulanan modülün yüzey sıcaklığı aynı saatte 31,71 °C olarak kaydedilmiştir. Şekil 7.7'de TG-2'de normal ve soğutulan modül tarafından üretilen güç değerlerinin gün boyu değişimi güneş ışınımı ile beraber verilmiştir.



Şekil 7.7. Modüllerin ürettiği güç değerleri – TG-2

Şekil 7.7'deki verilere göre, güneş ışınlamı değerin normal ve soğutmalı modüllere ilişkin elektriksel güç değeri üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir. Aynı zamanda iki modülün ürettiği güç değerleri arasındaki fark da güneş ışınlamı miktarı ile sıkı ilişki içindedir. Modüllerin gün boyunca ürettiği güç değerleri arasındaki en yüksek fark, 1,04 W değeriyle saat 12.00'da gerçekleşmiştir. Bu saatte normal modül 14,46 W güç üretirken, soğutulan modül 15,5 W güç üretmektedir. Üretilen bu güç değerlerine göre TG-2 boyunca en yüksek elektriksel verim artışı saat 12.00'da %7,19 oranında gerçekleşmiştir. %7,19 verim artışının sağlandığı ilgili saatte modül yüzey sıcaklıkları arasındaki fark 16,32 °C olarak kaydedilmiştir. Buna göre bu saatte 1 °C'lık sıcaklık düşüşü, verimi %0,44 oranında artırmıştır. Soğutulan modülün TG-2 boyunca sağladığı anlık verim artışlarının %1,52 ile %7,19 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Şekil 7.8'de normal ve soğutulan modül tarafından 15 dakikalık periyotlar içinde üretilen enerji miktarlarının TG-2 boyunca değişimi, güneş ışınlamı ile beraber verilmiştir.

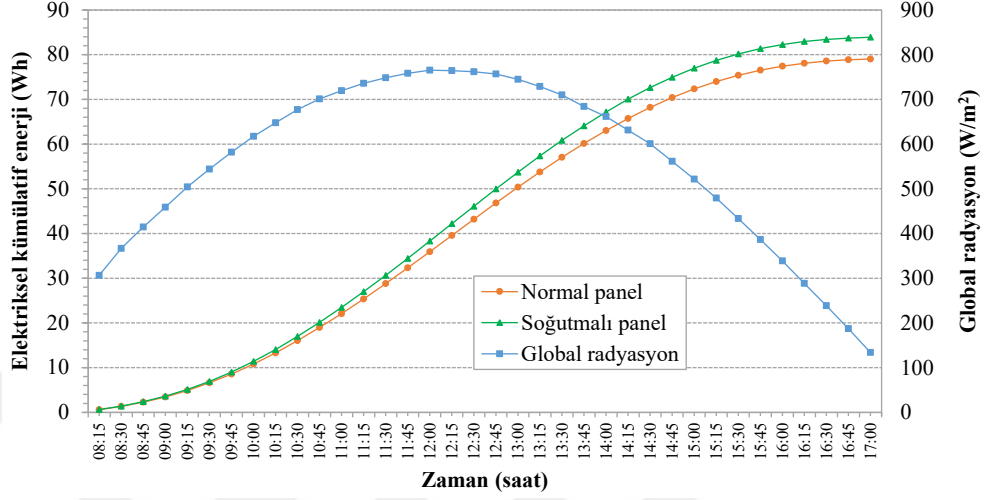


Şekil 7.8. Modüllerin ürettiği enerji değerleri – TG-2

Şekil 7.8'de her iki modülün 15'er dakikalık periyotlar boyunca ürettikleri enerjilerin TG-2 boyunca değişimi görülmektedir. Modüller tarafından üretilen enerji değerleri arasındaki azami fark saat 12.00'da 0,26 Wh olarak kaydedilmişken, 11.45 ile 12.00 arasındaki 15 dakikalık sürede normal modülün ürettiği enerji miktarı 3,61 Wh olarak, soğutulan modülün ürettiği enerji miktarı ise 3,87 Wh olarak kaydedilmiştir. Bu durumda, doğal olarak güç üretiminde olduğu gibi enerji üretiminde de %7,19'luk bir verim artışı gerçekleşmiştir.

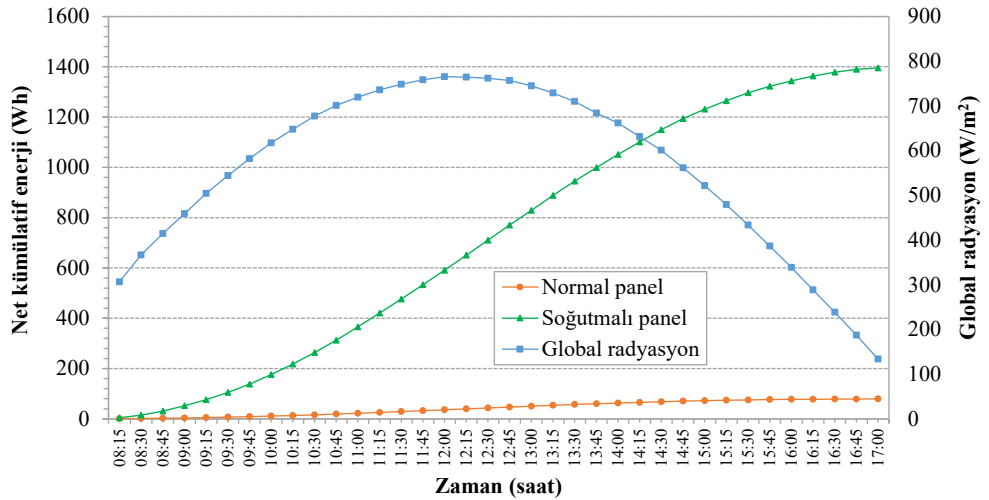
Şekil 7.9'da, normal ve soğutulan modül tarafından üretilen elektriksel enerji miktarlarının TG-2 boyunca kümülatif değişimi sunulmuştur. Şekil 7.8'de sunulan

grafikteki verilerin kullanılmasıyla oluşturulan Şekil 7.9'a göre, normal işletme şartlarında çalışan modül ile soğutma işlemi uygulanan modül tarafından üretilen elektriksel enerji miktarlarının kümülatif değerlerindeki değişim hızı ile güneş ışıınımı miktarı arasında sıkı bir ilişki mevcuttur.



Şekil 7.9. Elektriksel kümülatif enerji değerleri – TG-2

TG-2 boyunca elektriksel kümülatif enerji değişimi, güneş ışıınınının yüksek olduğu saatlerde görece yüksek artışlar göstermiştir. Elde edilen verilere göre, TG-2 sonunda normal modül tarafından üretilen enerji miktarı 79,02 Wh, soğutulan modül tarafından üretilen enerji değeri ise 83,89 Wh olarak kaydedilmiştir. Bu değerlere göre, soğutulan modülde, normal modüle göre TG-2 içerisinde %6,16 dolaylarında bir verim iyileştirmesi gerçekleşmiştir. Şekil 7.10'da TG-2 boyunca, normal modül ve soğutulan modül tarafından üretilen net enerji miktarlarına ilişkin kümülatif değişim gösterilmiştir.

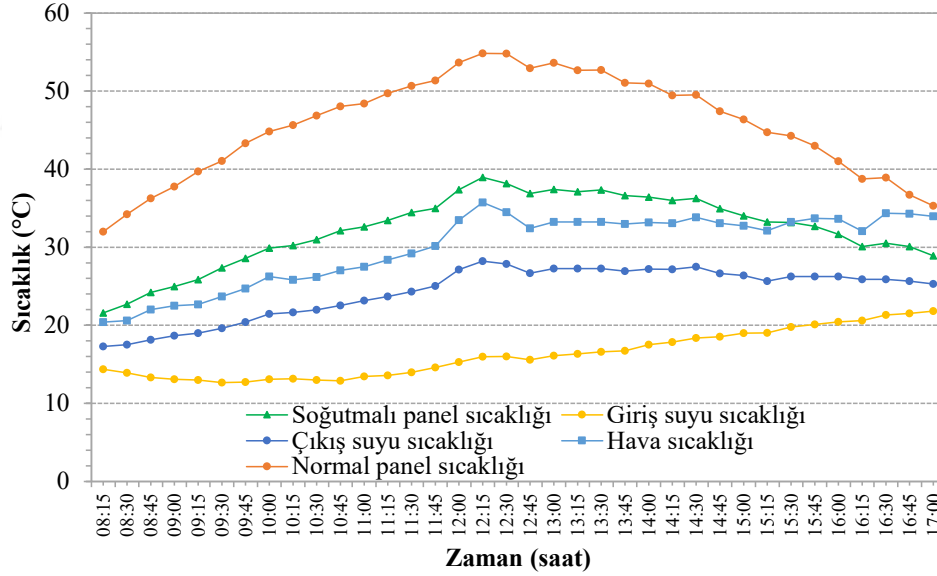


Şekil 7.10. Net kümülatif enerji değerleri – TG-2

Şekil 7.10’da TG-2 boyunca elde edilen verilere göre, normal işletme şartlarında işletilen modül tarafından üretilen toplam enerji miktarı, 79,02 Wh, soğutulan modül tarafından üretilen elektriksel ve termal enerjinin toplamı ise 1395,33 Wh olarak kaydedilmiştir. TG-2 değerlerine göre, soğutmalı modülün PV/T hibrit bir model olarak kullanılması durumunda, normal modülün 17,66 katı değerinde bir enerji ürettiği anlaşılmaktadır. Buna göre TG-2’de net enerji kazancı %1665 oranında gerçekleşmiştir.

7.3. Test Günü 3 Verileri

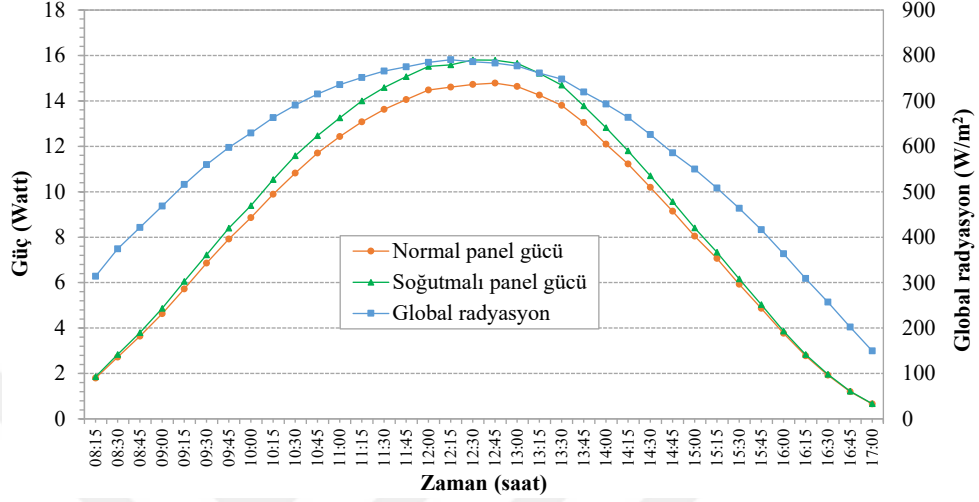
Deney seti TG-3 için 29.09.2021 tarihinde, modüllerin yüzeyleri tamamen güneye bakacak şekilde test sürecine hazır hale getirilmiştir. Bu test gününde DC-DC dönüştürücünün gerilim değeri, daha önce debi değeri 0,584 lt/dk olarak saptanan 7 V’a ayarlanmıştır. Deney seti üzerinde DC motorun çalışma akımını gösteren ampermetre bu gerilim değerinde 0,300 A değeri okunmuştur. Bu test günü boyunca kaydedilen hava sıcaklığı, normal panel sıcaklığı, soğutmalı panel sıcaklığı, giriş suyu sıcaklığı ve çıkış suyu sıcaklığının 08.00 ila 17.00 saatleri arasındaki değişimi Şekil 7.11’de gösterilmiştir.



Şekil 7.11. Sıcaklık değerlerinin değişimi – TG-3

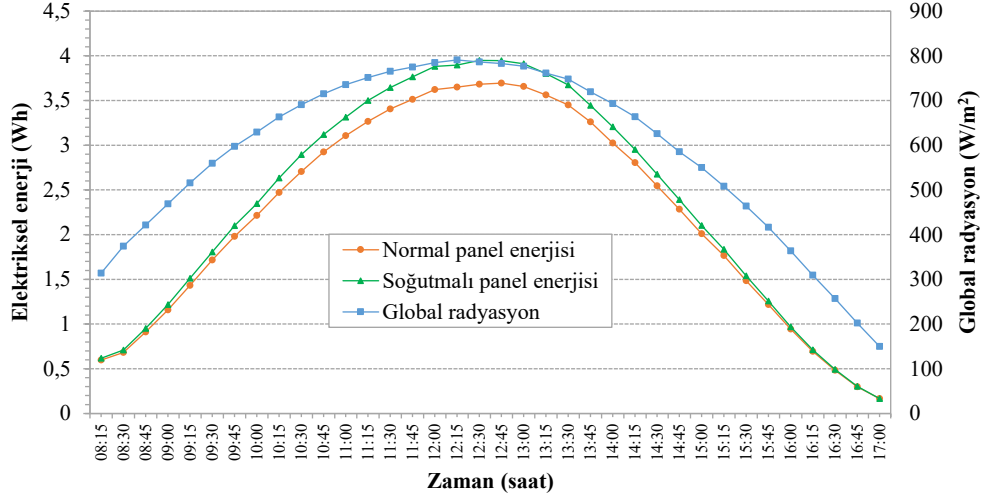
Motor bu test günü boyunca anlık 2 W gibi küçük bir güç değeriyle gerekli sirkülasyonu sağlayabilmiştir. Bu test gününde 20,4 °C ile başlayan hava sıcaklığı, saat 13.00 sularında 33 °C’ye ulaşmış ve gün sonuna kadar bu civarda seyretmiştir. Normal ve soğutmalı panellerin yüzey sıcaklıkları arasındaki fark, güneş ışıınım değerinin görece düşük sayılabileceği günün ilk saatleri ve akşama doğru düşerken, ışıınım değerinin yüksek olduğu saatlerde bu farkın arttığı görülmektedir. Normal modüle ait azami yüzey

sıcaklığı saat 13.15'te 54,82 °C olarak kaydedilmişken, soğutma işlemi uygulanan modülün yüzey sıcaklığı aynı saatte 38,96 °C olarak kaydedilmiştir. Şekil 7.12'de TG-3'te normal ve soğutulan modül tarafından üretilen güç değerlerinin gün boyu değişimi güneş ışıınımlı ile beraber verilmiştir.



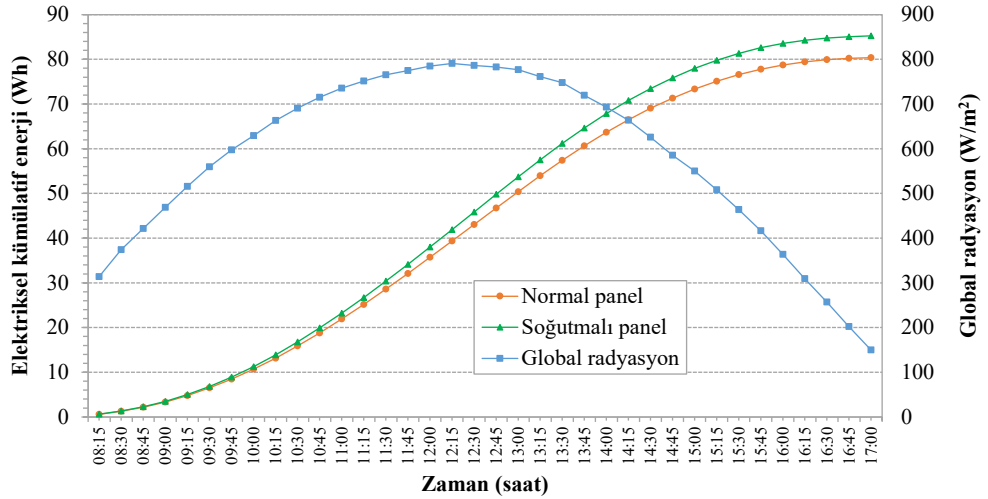
Şekil 7.12. Modüllerin ürettiği güç değerleri – TG-3

Şekil 7.12'deki verilere göre, güneş ışıınımlı değeri normal ve soğutmalı modüllere ilişkin elektriksel güç değeri üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir. Aynı zamanda iki modülün ürettiği güç değerleri arasındaki farkın da güneş ışıınımlı miktarı ile sıkı ilişki içinde olduğu anlaşılmaktadır. Modüllerin gün boyunca ürettiği güç değerleri arasındaki en yüksek fark, 1,08 W değeriyle saat 12.30'da gerçekleşmiştir. Bu saatte normal modül 14,72 W güç üretirken, soğutulan modül 15,8 W güç üretmiştir. Üretilen bu güç değerlerine göre TG-3 boyunca en yüksek elektriksel verim artışı saat 12.30'da %7,34 oranında gerçekleşmiştir. %7,34 verim artışının sağlandığı ilgili saatte modül yüzey sıcaklıkları arasındaki fark 16,63 °C olarak kaydedilmiştir. Buna göre bu saatte 1 °C'lık sıcaklık düşüşü, verimi %0,44 oranında artırmıştır. Soğutulan modülün TG-3 boyunca sağladığı anlık verim artışlarının %1,51 ile %7,34 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Şekil 7.13'te normal ve soğutulan modül tarafından 15 dakikalık periyotlar içinde üretilen enerji miktarlarının TG-3 boyunca değişimi, güneş ışıınımlı ile beraber verilmiştir.



Şekil 7.13. Modüllerin ürettiği enerji değerleri – TG-3

Şekil 7.13'te her iki modülün 15'er dakikalık periyotlar boyunca ürettikleri enerjilerin TG-3 boyunca değişimi görülmektedir. Modüller tarafından üretilen enerji değerleri arasındaki azami fark saat 12.30'da 0,27 Wh olarak kaydedilmişken, 12.15 ile 12.30 arasındaki 15 dakikalık sürede normal modülün ürettiği enerji miktarı 3,68 Wh olarak, soğutulan modülün ürettiği enerji miktarı ise 3,95 Wh olarak kaydedilmiştir. Bu durumda, doğal olarak güç üretiminde olduğu gibi enerji üretiminde de %7,34 oranında bir verim artışı gerçekleşmiştir.

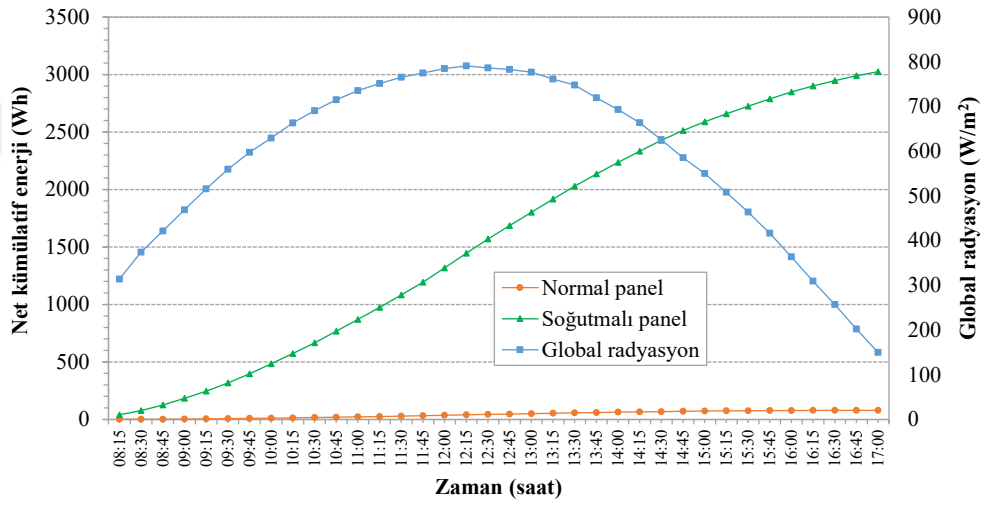


Şekil 7.14. Elektriksel kümülatif enerji değerleri – TG-3

Şekil 7.14'te, normal ve soğutulan modül tarafından üretilen elektriksel enerji miktarlarının TG-3 boyunca kümülatif değişimi sunulmuştur. Şekil 7.13'te sunulan grafikteki verilerin kullanılmasıyla oluşturulan Şekil 7.14'e göre, normal işletme şartlarında çalışan modül ile soğutma işlemi uygulanan modül tarafından üretilen

elektriksel enerji miktarlarının kümülatif değerlerindeki değişim hızı ile güneş ışınlama miktarı arasında sıkı bir ilişki mevcuttur.

TG-3 boyunca elektriksel kümülatif enerji değişimi, güneş ışınlamının yüksek olduğu saatlerde görece yüksek artışlar göstermiştir. Elde edilen verilere göre, TG-3 sonunda normal modül tarafından üretilen enerji miktarı 80,37 Wh, soğutulan modül tarafından üretilen enerji değeri ise 85,23 Wh olarak kaydedilmiştir. Bu değerlere göre, soğutulan modülde, normal modüle göre TG-3 içerisinde %6,05 civarında bir verim artışı gerçekleşmiştir. Şekil 7.15'te TG-3 boyunca, normal modül ve soğutulan modül tarafından üretilen net enerji miktarlarına ilişkin kümülatif değişim gösterilmiştir.



Şekil 7.15. Net kümülatif enerji değerleri – TG-3

Şekil 7.15'te TG-3 boyunca elde edilen verilere göre, normal işletme şartlarında işletilen modül tarafından üretilen toplam enerji miktarı 80,37 Wh, soğutulan modül tarafından üretilen elektriksel ve termal enerjinin toplamı ise 3024 Wh olarak kaydedilmiştir. TG-3 değerlerine göre, soğutmalı modülün PV/T hibrit bir model olarak kullanılması durumunda, normal modülün 38 katı değerinde bir enerji ürettiği anlaşılmaktadır. Buna göre TG-3'te net enerji kazancı %3662 oranında gerçekleşmiştir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

En önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisinden PV teknolojileri aracılığıyla elektrik üretimi, dünya genelinde özellikle son on yıl içinde artan bir ivmeyle devam etmektedir. 2010 yılında küresel elektrik enerjisi üretiminin sadece %0,15'lik kısmı güneş enerjisinden karşılanırken 2021 yılı içinde bu oran %3,68 gibi görece yüksek değerlere ulaşmıştır. Girişimciler için sağlanan teşvik, hibe ve yasal kolaylıklar sayesinde bu ivmeden Türkiye de payını almaktadır. 2010 yılı itibarıyla Türkiye'de elektrik enerjisi üretiminde güneş enerjisinin hiçbir payı yokken, 2021 yılı içinde üretilen elektrik enerjisinin %3,91'lik oranı güneş enerjisi kullanılarak sağlanmıştır. Çevreye zarar vermemesi ve sonsuz sayılabilecek potansiyeli sebebiyle, güneş enerjisinden dünya genelinde daha fazla faydalanılması beklenmektedir.

PV uygulamalarının performansı, temelde en önemli sistem bileşenlerinden olan modüllerin enerji dönüştürme oranıyla yakından ilgilidir. PV hücre teknolojilerinin verimleri gün geçtikçe artmasına rağmen, bu artış umulan hızda gerçekleşmemektedir. Bu durum PV sistemlerin beklenen düzeyin altında performanslara sahip olmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı bir PV modülün standart şartlar altında sunduğu enerji değerinin üstünde enerji elde etmek üzere, çeşitli güneş takip sistemleri, modül yüzeyine daha çok ışıının gelmesini sağlayan yansıtıcılar ve hücre sıcaklığını düşürerek enerji dönüşüm oranının artmasını sağlayan soğutma teknikleri sıklıkla kullanılmakta ve önerilmektedir.

PV hücre üreticilerinin ürünlerinin güçlerine ilişkin verdikleri karakteristik değerler, standart test koşulları olan 1000 W/m^2 ışıının, 25°C ortam sıcaklığı ve 1,5 hava kütlesi için geçerlidir. Çeşitli soğutma teknikleri aracılığıyla hücre sıcaklığının düşürülmesiyle PV sistemlerin verimleri kayda değer bir oranda artırılabilir.

PV sistemlerde soğutma yöntemleri genel olarak pasif ve aktif soğutma olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Pasif soğutma yöntemleri, hava ile pasif soğutma, su ile pasif soğutma ve iletim ile soğutma olmak üzere üç grup şeklindedir. Pasif soğutma tekniklerinde fan ve pompa benzeri zorlanmış taşınım bileşenleri mevcut değildir. Bundan dolayı hava ve suyun doğal taşınımı yoluyla gerçekleştirilen soğutma teknikleri en kolay ve ucuz yöntemlerdir. Aktif soğutma teknikleri ile pasif soğutma teknikleri arasındaki en temel fark, aktif soğutmada genel olarak soğutma işleminde kullanılan sıvı veya gaz akışkanının taşınması için pompa, fan ve benzeri bileşenlerin kullanılmasıdır.

Aktif soğutma tekniklerinde harici bir enerji kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. PV sisteminde gerçekleştirilecek soğutma işlemi sayesinde elde edilecek verim artışı ile zorlanmış taşınım için harcanan enerjinin doğru bir şekilde koordine edilmesi gerekmektedir. Aktif soğutma tekniklerinde genellikle, hava, su veya çeşitli nanoakışkanlar kullanılmaktadır.

Bu tez kapsamında; su ile aktif soğutma yöntemi ile soğutulan bir PV modül ile normal şartlar altında çalışan bir PV modülün ürettikleri elektriksel enerji değerleri arasındaki fark ile beraber, bir enerji kazancı olarak panelin arka kısmında soğutma sıvısı olarak kullanılan suya aktarılan ısı enerjisi miktarı ölçülmek üzere bir deney düzeneği tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan bütün elektriksel ve mekanik teçhizat küçük boyutlarda ancak uyum içinde seçilmiştir. Bunun nedeni, mekanik işlerdeki kolaylık ve elektriksel ölçme işlemlerindeki hassasiyet ve doğruluk oranlarının kabul edilebilir aralıkta olmasını sağlayan bir prototip geliştirmektir. Çalışmada, debinin etkisi de araştırılmak istendiğinden, testler üç gün için üç farklı debi ile gerçekleştirilmiştir. Testlerden elde edilen veriler ve bu veriler üzerinde yapılan hesaplamalara ait bulgular grafik ve tablolar şeklinde sunulmuştur. Farklı debi değerleri için gerçekleştirilen testlerde genel olarak; normal ve soğutulan panellere ait elektriksel güç, elektriksel enerji, kümülatif elektriksel enerji ve elektriksel ve termal enerjinin toplamını ifade eden net kümülatif enerji değerlerinin test günleri boyunca değişimi grafik olarak sunulmuştur.

0,245 lt/dk debi değeri ile gerçekleştirilen testte, sirkülasyon pompasını çalıştıran motor gün boyunca 3,25 Volt gerilim altında, 0,165 Amper akım çekmiştir. Test süresince ortalama hava sıcaklığı 24,86 °C, ortalama güneş ışıınımı değeri ise 553 W/m² olarak ölçülmüştür. Bu test gününde soğutulan modülde, normal modüle göre %1,5 ile %7,18 arasında değişen anlık verim artışları sağlanmıştır. En yüksek verim artışının sağlandığı zamanda, modül yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı 16,16 °C olarak kaydedilmiştir. Bu test gününde, normal modülün ürettiği elektrik enerjisi 80,24 Wh, soğutulan modülün ürettiği elektrik enerjisi ise 85,076 Wh olarak kaydedilmiştir. Bu değerlere göre soğutma işlemi modül verimini %6,03 oranında artırmıştır. Bu test gününde, soğutulan modülün ürettiği elektrik enerjisi ve modül yüzeyinden suya aktarılan günlük termal enerjinin toplamı yaklaşık 1111 Wh değerindedir. Soğutulan modülün PV/T hibrit bir sistem olarak düşünülmesi halinde, normal modüle göre net enerji kazancı %1285 olarak bulunmuştur.

0,402 lt/dk debi değeri ile gerçekleştirilen testte, sirkülasyon pompasını çalıştıran motor gün boyunca 5 Volt gerilim altında, 0,250 Amper akım çekmiştir. Test süresince

ortalama hava sıcaklığı 22,37 °C, ortalama güneş ışıını değeri ise 560 W/m² olarak ölçülmüştür. Bu test gününde soğutulan modülde, normal modüle göre %1,52 ile %7,19 arasında değışen anlık verim artışları sağlanmıştır. En yüksek verim artışının sağlandığı zamanda, modül yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı 16,32 °C olarak kaydedilmiştir. Bu test gününde, normal modülün ürettiğı elektrik enerjisi 79,02 Wh, soğutulan modülün ürettiğı elektrik enerjisi ise 83,89 Wh olarak kaydedilmiştir. Bu değerlere göre soğutma işlemi modül verimini %6,16 oranında artırmıştır. Bu test gününde, soğutulan modülün ürettiğı elektrik enerjisi ve modül yüzeyinden suya aktarılan günlük termal enerjinin toplamı yaklaşık 1395 Wh değerindedir. Soğutulan modülün PV/T hibrit bir sistem olarak düşünülmesi halinde, normal modüle göre net enerji kazancı %1665 olarak bulunmuştur.

0,584 lt/dk debi değeri ile gerçekleştirilen testte, sirkülasyon pompasını çalıştıran motor gün boyunca 7 Volt gerilim altında, 0,300 Amper akım çekmiştir. Test süresince ortalama hava sıcaklığı 29,97 °C, ortalama güneş ışıını değeri ise 581 W/m² olarak ölçülmüştür. Bu test gününde soğutulan modülde, normal modüle göre %1,51 ile %7,34 arasında değışen anlık verim artışları sağlanmıştır. En yüksek verim artışının sağlandığı zamanda, modül yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı 16,63 °C olarak kaydedilmiştir. Bu test gününde, normal modülün ürettiğı elektrik enerjisi 80,37 Wh, soğutulan modülün ürettiğı elektrik enerjisi ise 85,23 Wh olarak kaydedilmiştir. Bu değerlere göre soğutma işlemi modül verimini %6,05 oranında artırmıştır. Bu test gününde, soğutulan modülün ürettiğı elektrik enerjisi ve modül yüzeyinden suya aktarılan günlük termal enerjinin toplamı yaklaşık 3024 Wh değerindedir. Soğutulan modülün PV/T hibrit bir sistem olarak düşünülmesi halinde, normal modüle göre net enerji kazancı %3662 olarak bulunmuştur.

Yukarıda üç farklı debi ile gerçekleştirilen test günlerine ait özet niteliğindeki veriler incelendiğinde; Test günü 1 ve Test günü 2'ye ait sıcaklık ve güneş ışıını değerlerinin gün boyunca birbirine yakın seyrettiğı görülmektedir. Bu iki test günü arasındaki en etkili farkın debi değeri olduğu söylenebilir. 0,245 lt/dk ve 0,402 lt/dk ile yapılan test günlerinde günlük elektriksel enerji üretimi ve soğutma işleminin sağladığı verim artışı birbirine son derece yakınken, elektriksel ve termal enerjinin toplamı 1111 Wh ve 1395 Wh olarak elde edilen net kümülatif enerji değerleri arasında kayda değer bir fark görülmektedir. Test günü 3'te elde edilen veriler incelendiğinde, bu test günü boyunca hem ortalama hava sıcaklığının hem ortalama güneş ışıınıının test günü 1 ve test günü 2'ye göre önemli ölçüde yüksek olduğu görülmektedir. 0,584 lt/dk debi değeri ile gerçekleştirilen bu test gününde de günlük elektriksel enerji üretimi ve soğutma işleminin sağladığı verim artışı diğeri test günlerine yakın değerdeyken, günlük net

kümülatif enerji miktarı 3024 Wh değeriyle diğer test günlerinin oldukça üzerinde olduğu görülmektedir. Test günü 3'ün bu yüksek değerinin bir nedeni ortalama hava sıcaklığı ve güneş ışıınımı değerindeki önemli yükseklikten diğer nedeni görece yüksek debi değeridir. Bu sonuçlar bir arada incelendiğinde, kullanılan tüm debi değerlerinin modül sıcaklığını soğutma suyu sıcaklığına kadar indirebildiği anlaşılmaktadır. Bundan dolayı tüm test günlerine ait modül verimindeki artış değerleri ve günlük elektriksel enerji üretim değerleri birbirine yakın değerdedir. Günlük üretilen net enerji miktarları incelendiğinde, debi değerinin termal enerji eldesinde çok önemli bir parametre olduğu anlaşılmaktadır.

7.2. Öneriler

PV sistemlerde hücre sıcaklığının verime olan etkilerini ve soğutulan bir PV modülün PV/T hibrit bir model olarak tasarlanması halinde sağlanacak termal enerjiyi de hesaba katarak net enerji eldesinin araştırıldığı bu tez çalışmasında, gerek literatür araştırması yapılırken gerekse deneysel süreç yönetilirken elde edilen tecrübelerle dayanılarak, bu alanda çalışmalar yürütmeyi düşünen araştırmacılara ışık tutacağı tahmin edilen ileride yapılabilecek çalışmalar kapsamında bazı öneriler aşağıda verilmiştir.

Tez kapsamında soğutma işlemi çok kristalli silikon bazlı modüller kullanıldı. Bu modül teknolojisinin tercih edilmesinin en önemli sebebi PV sistem kurulumlarında %50'lik kullanılma oranıyla hâlâ pazarın lideri konumunda olmasıdır. Benzer deneyler tek kristalli silikon modüller veya ince film hücre teknolojisine sahip modüller üzerinde gerçekleştirilebilir. Daha kapsamlı bir çalışma olarak, birçok hücre teknolojisi bir arada testlere tabi tutulabilir.

Tezin genel yapısı deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin değerlendirilmesi şeklindedir. PV hücrelere ilişkin geçerliliğini ispatlamış matematiksel hücre modelleri kullanılarak, önerilen hücre modellerinin PV/T uygulamadaki geçerliliğini sınavan çalışmalar yürütülebilir.

PV hücrelerin verimi üzerinde az da olsa etkili olduğu bilinen rüzgâr hızı, rüzgâr yönü ve bağıl nem oranı gibi meteorolojik parametrelerin etkileri bu tez çalışmasının kapsamı dışında tutulmuştur. Bu parametrelerin de etkilerini ele alan çalışmalar yapılabilir.

Kaynak araştırması kısmında incelenen çalışmalardan da anlaşılabileceği üzere, güneş ışıınımı başta olmak üzere, farklı meteorolojik rejimlere sahip bölgelerde yürütülen çalışmalardan elde edilen sonuçlar arasında önemli farklar olabilmektedir. Bu çalışma görece sıcak, karasal iklime sahip Batman'da gerçekleştirilmiştir. Meteorolojik

değişkenlerin Batman ilinden yeterince farklı olduğu coğrafyalarda özellikle termal enerji kazancını inceleyen araştırmaların yapılmasının literatüre önemli katkılar sunacağı düşünülmektedir.

Çalışma kapsamında, PV modülü soğutma işleminde, barındırdığı avantajlar nedeniyle arka kısımdan su ile aktif soğutma tekniği uygulanmıştır. Gerek diğer aktif soğutma teknikleri, gerekse pasif soğutma tekniklerinin bir arada uygulandığı karşılaştırmalı çalışmalar yürütülebilir.



KAYNAKLAR

- [1] Anonim, "USA EIA Key World Energy Statistics 2021, <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/supply> (Erişim tarihi: 03.06.2022)."
- [2] Görez, A. ve Alkan, A., 2005. Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynakları ve hidroelektrik enerji potansiyeli, *III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, Antalya, Türkiye, Ekim 2005, s. 21-22.
- [3] Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi. 2009. Dünya'da ve Türkiye'de Güneş Enerjisi, ISBN: 978-605-89548-2-3. DEKTMK Yayın No: 0011/2009, EKC Form Ofset, Ankara.
- [4] Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü. 2015. "Meteoroloji Laboratuvarı/Yenilenebilir Enerjiler/Güneş Enerjisi"
- [5] Wilson, R. and Jones, W. J., 1975. Energy ecology and environment, Academic Press, New York, ISBN: 0-127-57550-2.
- [6] Doğan, H., Aktaş, M. ve Menlik, T., 2004. Güneş enerjisi sistemlerinde kanatçık yüzeyindeki sıcaklık dağılımının sonlu farklar metodu ile analizi, *Teknoloji Dergisi*, 3, 407-414.
- [7] Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 1991. Solar Engineering of thermal Process, Willey-Interscience Publication, New York.
- [8] Thekaekara, M.P., 1976. Solar radiation measurement: techniques and instrumentation, *Solar Energy*, 18, 309-325.
- [9] Kayri, İ., & Gencoglu, M. T. (2019). Predicting power production from a photovoltaic panel through artificial neural networks using atmospheric indicators. *Neural Computing and Applications*, 31(8), 3573-3586.
- [10] Borhanazad, H., Mekhilef, S., Saidur, R. and Boroumandjazi, G., 2013. Potential application of renewable energy for rural electrification in Malaysia, *Renewable Energy*, 59, 210-219.
- [11] Juswanto, W. and Ali, Z., 2016. Renewable Energy and Sustainable Development in Pacific Island Countries, *Adbi Institute*, 5, 1-6.
- [12] Goldemberg, J. and Bioethanol, S.B., 2003. Energy and sustainable development, in *Worlds Apart: Globalization and the Environment*, pp. 53-65, Ed. Speth, J.G., Island Press, Washington.
- [13] Kaya, M.N., Aksoy, M.H. and Kose, F., 2017. Renewable energy in Turkey: potential, current status and future aspects, *Ann Faculty Eng Hunedoara*, 15(1), 65.
- [14] Hasanuzzaman M, Malek ABMA, Islam MM, Pandey AK, & Rahim NA. Global advancement of cooling technologies for PV systems: A review. *Solar Energy*, 2016;137:25-45.
- [15] Rahman MM, Hasanuzzaman M, Rahim NA. Effects of various parameters on PV-module power and efficiency. *Energy Convers Management*, 2015;103:348-58.

- [16] Shan F, Tang F, Cao L, Fang G. Comparative simulation analyses on dynamic performances of photovoltaic/thermal solar collectors with different configurations. *Energy Convers Management*, 2014;87:778-86.
- [17] Markvart Tom, Castaner Luis, editors. Practical handbook of photovoltaics; 2003.
- [18] Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar energy*, 83(5), 614-624.
- [19] Anonim, "T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/> (Erişim tarihi: 05.06.2022)."
- [20] Thomas R., Fordham M., 2001, Photovoltaics and architecture, Spon Press, London and New York.
- [21] Fıratoglu, Z. A., & Yeşilata, B. (2003). Lineer elektriksel yüke bağlı PV panellerin optimizasyonu ve bölgesel uygulanabilirliğinin araştırılması. *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 1(1), 65-72.
- [22] Engin D. ve Çolak M., 2005, Yarı saydam güneş pili termal toplayıcı PVT hibrit sistemin İzmir koşullarında analizi, *Celal Bayar Üniversitesi Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 2(10);10-12.
- [23] S. Krauter, Increased Electrical Yield Via Water Flow Over The Front of Photovoltaic Panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 82(1-2) (2004) 131–137. Doi:10.1016/j.solmat.2004.01.011
- [24] Fraisse, G., Menezo, C., Johannes, K., 2007, Energy performance of water hybrid PV/T collectors applied to combisystems of direct solar floor type, *Solar Energy*, 81;1426-1438.
- [25] Kumar, K., Sharma, S. D., Jain, L., & Al Khaimah, R. (2007). Standalone Photovoltaic (PV) module outdoor testing facility for UAE Climate. Submitted to CSEM-UAE Innovation Centre LLC.
- [26] Ji, J., Lu, J. P., Chow, T. T., He, W., & Pei, G. (2007). A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation. *Applied Energy*, 84(2), 222-237.
- [27] Keçel S., Güçlü Yavuzcan H., 2008, Türkiye deki bölgesel sıcaklık değişimlerinin güneş panellerinin verimliliklerine etkisi, *Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi*, 22;12-20.
- [28] Hassan, A. (2010) Phase Change Materials for thermal Regulation of Building Integrated Photovoltaics. Doctoral thesis. *Dublin Institute of Technology*. doi:10.21427/D7461W.
- [29] Kostić, L. T., Pavlović, T. M., & Pavlović, Z. T. (2010). Optimal design of orientation of PV/T collector with reflectors. *Applied Energy*, 87(10), 3023-3029.
- [30] Rosa-Clot M., Rosa-Clot P., Tina G.M., Scandura P.F., 2010, Submerged photovoltaic solar panel: SP2, *Renewable Energy*, 35;1862-1865.

- [31] Sarhaddi F., Farahat S., Ajam H., Behzadmehr A., 2010, Exergetic performance assessment of a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector, *Energy and Buildings*, 42(11);2184-2199.
- [32] Kane, A. N., & Verma, V. (2013). Performance enhancement of building integrated photovoltaic module using thermoelectric cooling. *International Journal of Renewable Energy Research*, 3(2), 320-324.
- [33] Moharram, K. A., Abd-Elhady, M. S., Kandil, H. A., & El-Sherif, H. (2013). Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling. *Ain Shams Engineering Journal*, 4(4), 869-877.
- [34] Kolhe, M., Bin, D., & Hu, E. (2012). Water cooled concentrated photovoltaic system. *Int J Smart Grid Clean Energy*, 2, 2-6.
- [35] Huang, C. Y., Sung, H., & Yen, K. L. (2013). Experimental study of photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid system. *Int. J. Smart Grid Clean Energy*, 2(2), 147-151.
- [36] Kabul, A., & Duran, F. (2014). Isparta ilinde fotovoltaiik/termal (PV/T) hibrit sistemin performans analizi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 6(1), 31-43.
- [37] Alzaabi, A. A., Badawiyeh, N. K., Hantoush, H. O., & Hamid, A. K. (2014). Electrical/thermal performance of hybrid PV/T system in Sharjah, UAE. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 3(4), 385-389.
- [38] Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M. H., Ruslan, M. H., Ibrahim, A., & Kazem, H. A. (2014). Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors. *Energy conversion and management*, 78, 641-651.
- [39] Sabri, L., Benzirar, M., & Student, P. G. (2014). Effect of ambient conditions on thermal properties of photovoltaic cells: crystalline and amorphous silicon. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(12), 17815-17821.
- [40] Smith, M. K., Selbak, H., Wamser, C. C., Day, N. U., Krieske, M., Sailor, D. J., & Rosenstiel, T. N. (2014). Water cooling method to improve the performance of field-mounted, insulated, and concentrating photovoltaic modules. *Journal of Solar Energy Engineering*, 136(3).
- [41] Zhu, L., Raman, A., Wang, K. X., Anoma, M. A., & Fan, S. Radiative cooling of solar cells. *Optica*. 2014; 1 (1): 32.
- [42] Musthafa, M. M. (2015). Enhancing photoelectric conversion efficiency of solar panel by water cooling. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, 5(4), 1-5.
- [43] Chander, S., Purohit, A., Sharma, A., Nehra, S. P., & Dhaka, M. S. (2015). Impact of temperature on performance of series and parallel connected mono-crystalline silicon solar cells. *Energy Reports*, 1, 175-180.
- [44] Sahay, A., Sethi, V. K., Tiwari, A. C., & Pandey, M. (2015). A review of solar photovoltaic panel cooling systems with special reference to Ground coupled central

- panel cooling system (GC-CPCS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 306-312.
- [45] Du, Y., Fell, C. J., Duck, B., Chen, D., Liffman, K., Zhang, Y., ... & Zhu, Y. (2016). Evaluation of photovoltaic panel temperature in realistic scenarios. *Energy Conversion and Management*, 108, 60-67.
 - [46] Grubisic-Cabo, F., Nizetic, S., & Giuseppe Marco, T. (2016). Photovoltaic panels: A review of the cooling techniques. *Transactions of FAMENA*, 40(SI-1), 63-74.
 - [47] Peng, Z., Herfatmanesh, M. R., & Liu, Y. (2017). Cooled solar PV panels for output energy efficiency optimisation. *Energy conversion and management*, 150, 949-955.
 - [48] El Mays, A., Ammar, R., Hawa, M., Abou Akroush, M., Hachem, F., Khaled, M., & Ramadan, M. (2017). Improving photovoltaic panel using finned plate of aluminum. *Energy Procedia*, 119, 812-817.
 - [49] Rawat, P., & Dhiran, T. S. (2017). Comparative analysis of solar photovoltaic thermal (PVT) water and solar photovoltaic thermal (PVT) air systems. *International Journal of Civil, Mechanical and Energy Science*, 3(1), 8-12.
 - [50] Benato, A., & Stoppato, A. (2019). An experimental investigation of a novel low-cost photovoltaic panel active cooling system. *Energies*, 12(8), 1448.
 - [51] Özkan, A. O., & Demir, H. B. (2019). Fotovoltaik Panellerde Sıcaklık ve Zenit Açısının Panel Güç Üretimine Etkisi. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(1), 1-9.
 - [52] Ceylan, İ., Yilmaz, S., İnanç, Ö., Ergün, A., Gürel, A. E., Acar, B., & Aksu, A. İ. (2019). Determination of the heat transfer coefficient of PV panels. *Energy*, 175, 978-985.
 - [53] Akman, Ö. (2019). Fotovoltaik Panellerde Sıcaklığın Elektriksel Verime Etkileri ve Termal Güç Eldesi, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği*, Karabük.
 - [54] Gül, M., & Akyüz, E. (2019). Fotovoltaik-termal (PV/T) bir sistemin deneysel performansının incelenmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(1), 444-458.
 - [55] Kerem, A., Atik, M., , & Bayram, a. (2020). Fotovoltaik (PV) panel sisteminde yüzey soğutma işleminin elektrik üretimine etkisinin deneysel incelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 12(2), 565-578.
 - [56] Elbreki, A. M., Sopian, K., Fazlizan, A., & Ibrahim, A. (2020). An innovative technique of passive cooling PV module using lapping fins and planner reflector. *Case Studies in Thermal Engineering*, 19, 100607.
 - [57] Hernandez-Perez, J. G., Carrillo, J. G., Bassam, A., Flota-Banuelos, M., & Patino-Lopez, L. D. (2021). Thermal performance of a discontinuous finned heatsink profile for PV passive cooling. *Applied Thermal Engineering*, 184, 116238.

- [58] Bhakre, S. S., Sawarkar, P. D., & Kalamkar, V. R. (2021). Performance evaluation of PV panel surfaces exposed to hydraulic cooling—A review. *Solar Energy*, 224, 1193-1209.
- [59] Shalaby, S. M., Elfakharany, M. K., Moharram, B. M., & Abosheisha, H. F. (2022). Experimental study on the performance of PV with water cooling. *Energy Reports*, 8, 957-961.
- [60] Rizzi, F., van Eck, N. J., & Frey, M. (2014). The production of scientific knowledge on renewable energies: Worldwide trends, dynamics and challenges and implications for management. *Renewable Energy*, 62, 657-671.
- [61] Vine, E. (2008). Breaking down the silos: the integration of energy efficiency, renewable energy, demand response and climate change. *Energy efficiency*, 1(1), 49-63.
- [62] Manish, S., Pillai, I. R., & Banerjee, R. (2006). Sustainability analysis of renewables for climate change mitigation. *Energy for sustainable development*, 10(4), 25-36.
- [63] Santika, W. G., Anisuzzaman, M., Bahri, P. A., Shafiullah, G. M., Rupf, G. V., & Urme, T. (2019). From goals to joules: A quantitative approach of interlinkages between energy and the Sustainable Development Goals. *Energy Research & Social Science*, 50, 201-214.
- [64] Ludin, N. A., Mustafa, N. I., Hanafiah, M. M., Ibrahim, M. A., Teridi, M. A. M., Sepeai, S., ... & Sopian, K. (2018). Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 11-28.
- [65] Qazi, A., Hussain, F., Rahim, N. A., Hardaker, G., Alghazzawi, D., Shaban, K., & Haruna, K. (2019). Towards sustainable energy: a systematic review of renewable energy sources, technologies, and public opinions. *IEEE access*, 7, 63837-63851.
- [66] Ang, T. Z., Salem, M., Kamarol, M., Das, H. S., Nazari, M. A., & Prabakaran, N. (2022). A comprehensive study of renewable energy sources: classifications, challenges and suggestions. *Energy Strategy Reviews*, 43, 100939.
- [67] Kardooni, R., Yusoff, S. B., Kari, F. B. (2016). Renewable energy technology acceptance in Peninsular Malaysia. *Energy policy*, 88, 1-10.
- [68] Letcher, T. M. (Ed.). (2020). Future energy: improved, sustainable and clean options for our planet. Elsevier.
- [69] Anonim, "A. Energy, Hydroelectric power, Alternative Energy, <https://www.homeowner.com/energy-science/hydroelectric-power> (Erişim tarihi: 09.11.2022)"
- [70] Breeze, P. Chapter 11 - Wind Power, Power Generation Technologies (second ed.), Newnes, London (2014), pp. 223-242
- [71] Herbert, G. J., Iniyar, S., Sreevalsan, E., & Rajapandian, S. (2007). A review of wind energy technologies. *Renewable and sustainable energy Reviews*, 11(6), 1117-1145.

- [72] Rashad, A., Kamel, S., & Jurado, F. (2017). The basic principles of wind farms. *Distributed Generation Systems*, 21-67.
- [73] Breeze, P. (2019). Power generation technologies. Newnes. London (2019), pp. 251-273
- [74] Belyakov, N. Bioenergy; Sustainable Power Generation, Academic Press, Cambridge, United States (2020), pp. 461-474
- [75] Pishvae, M. S., Mohseni, S., & Bairamzadeh, S., (2021). An overview of biomass feedstocks for biofuel production Biomass to Biofuel Supply Chain Design and Planning under Uncertainty, Academic Press, Cambridge, United States, pp. 1-20
- [76] Sharmina, M., McGlade, C., Gilbert, P., & Larkin, A. (2017). Global energy scenarios and their implications for future shipped trade. *Marine Policy*, 84, 12-21.
- [77] Sun, Y., Gao, B., Yao, Y., Fang, J., Zhang, M., Zhou, Y., ... & Yang, L. (2014). Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties. *Chemical engineering journal*, 240, 574-578.
- [78] Kumar, A., Bhattacharya, T., Hasnain, S. M., Nayak, A. K., & Hasnain, M. S. (2020). Applications of biomass-derived materials for energy production, conversion, and storage. *Materials Science for Energy Technologies*, 3, 905-920.
- [79] Lago, C., Caldés, N., & Lechón, Y. Key challenges and opportunities: The Role of Bioenergy in the Emerging Bioeconomy, Academic Press, Cambridge, United States (2019), pp. 297-378
- [80] Turcotte, D. L. & Schubert G. Geodynamics (second ed.), Cambridge University Press, Cambridge (2002)
- [81] Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and sustainable energy reviews*, 6(1-2), 3-65.
- [82] Li, K., Bian, H., Liu, C., Zhang, D., & Yang, Y. (2015). Comparison of geothermal with solar and wind power generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1464-1474.
- [83] Badescu, V. (2007). Economic aspects of using ground thermal energy for passive house heating. *Renewable energy*, 32(6), 895-903.
- [84] Lund, J. W., & Toth, A. N. (2021). Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, 90, 101915.
- [85] Bahadori, A., Zendehboudi, S., & Zahedi, G. (2013). A review of geothermal energy resources in Australia: current status and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21(0), 29-34.
- [86] El Haj Assad, M., Bani-Hani, E., & Khalil, M. J. G. E. (2017). Performance of geothermal power plants (single, dual, and binary) to compensate for LHC-CERN power consumption: comparative study. *Geothermal Energy*, 5(1), 1-16.
- [87] Anonim, "IEA: International Energy Agency, (2019). World energy balances"

- [88] Ultanir, M. O. (1997). Hidrojenin yakıt olarak kullanımı ve özellikleri. *Çevre-Enerji Kongresi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası*, 195-315.
- [89] Koohi-Fayegh, S., & Rosen, M. A. (2020). A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage*, 27, 101047.
- [90] Rosen, M. A., & Scott, D. S. (1998). Comparative efficiency assessments for a range of hydrogen production processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23(8), 653-659.
- [91] Marchetti, C. (2006). Long-term global vision of nuclear-produced hydrogen. *International Journal of Nuclear Hydrogen Production and Applications*, 1(1), 13.
- [92] Dincer, I., & Rosen, M. A. (2004). Exergy as a driver for achieving sustainability. *International journal of green energy*, 1(1), 1-19.
- [93] Midilli, A., Rzaev, P., Olgun, H., & Ayhan, T. (2000). Solar hydrogen production from hazelnut shells. *International journal of hydrogen energy*, 25(8), 723-732.
- [94] González, A., McKeogh, E., & Gallachoir, B. O. (2004). The role of hydrogen in high wind energy penetration electricity systems: The Irish case. *Renewable energy*, 29(4), 471-489.
- [95] Alhuyi Nazari, M., Salem, M., Mahariq, I., Younes, K., & Maqableh, B. B. (2021). Utilization of data-driven methods in solar desalination systems: a comprehensive review. *Frontiers in Energy Research*, 541.
- [96] Diakaki, C., Grigoroudis, E., Kabelis, N., Kolokotsa, D., Kalaitzakis, K., & Stavrakakis, G. (2010). A multi-objective decision model for the improvement of energy efficiency in buildings. *Energy*, 35(12), 5483-5496.
- [97] Huang, J., He, Y., Hu, Y., & Wang, X. (2018). Steam generation enabled by a high efficiency solar absorber with thermal concentration. *Energy*, 165, 1282-1291.
- [98] Ayadi, O., & Al-Dahidi, S. (2019). Comparison of solar thermal and solar electric space heating and cooling systems for buildings in different climatic regions. *Solar Energy*, 188, 545-560.
- [99] Yahya, K., Salem, M., Iqteit, N., & Khan, S. A. (2020). A Thermoelectric Energy Harvesting System. In *Renewable Energy-Resources, Challenges and Applications*. IntechOpen.
- [100] Yashim, M. M., Sainorudin, M. H., Mohammad, M., Fudholi, A., Asim, N., Razali, H., & Sopian, K. (2021). Recent advances on lightweight aerogel as a porous receiver layer for solar thermal technology application. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 228, 111131.
- [101] Bhatia, S. C. (2014). Solar thermal energy. In *Advanced Renewable Energy Systems, (Part 1 and 2)* (pp. 111-160). WPI Publishing.
- [102] Chang, C., Wang, Z., Fu, B., & Ji, Y. (2020). High-efficiency solar thermoelectric conversion enabled by movable charging of molten salts. *Scientific reports*, 10(1), 1-8.

- [103] Kayri, İ. (2017). Güneş panelleri ile üretilen enerjinin ortam bilgileri kullanılarak yapay sinir ağlarıyla tahmini, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ.
- [104] Carstensen, J., Popkirov, G., Bahr, J., & Föll, H. (2003). CELLO: an advanced LBIC measurement technique for solar cell local characterization. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 76(4), 599-611.
- [105] Fahrenbruch, A., & Bube, R. (2012). Fundamentals of solar cells: photovoltaic solar energy conversion. Elsevier.
- [106] Sutton, G.W., 1966. Direct Energy Conversion, McGraw-Hill, New York.
- [107] Bughneda, A., Salem, M., Richelli, A., Ishak, D., & Alatai, S. (2021). Review of multilevel inverters for PV energy system applications. *Energies*, 14(6), 1585.
- [108] Enslin, J. H. R. (1990, November). Maximum power point tracking: a cost saving necessity in solar energy systems. In [Proceedings] IECON'90: 16th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (pp. 1073-1077). IEEE.
- [109] Chambouleyron, I. (1986). A third world view of the photovoltaic market. *Solar energy*, 36(5), 381-386.
- [110] Hussein, K. H., Muta, I., Hoshino, T., & Osakada, M. (1995). Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 142(1), 59-64.
- [111] Singh, G. K. (2013). Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review. *Energy*, 53, 1-13.
- [112] Shockley, W., & Queisser, H. J. (1961). Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *Journal of applied physics*, 32(3), 510-519.
- [113] Singh, B. P., Goyal, S. K., & Kumar, P. (2021). Solar PV cell materials and technologies: Analyzing the recent developments. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2843-2849.
- [114] Green, M., Dunlop, E., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2021). Solar cell efficiency tables (version 57). *Progress in photovoltaics: research and applications*, 29(1), 3-15.
- [115] Anonim, "Solar Cell Efficiency Tables (Versions 1 to 60), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 1993-2022. Graph: Fraunhofer ISE 2022. Date of Data: May 2022"
- [116] Tan Bayar, M. (2022). Fotovoltaik sistemlerde tozlanmanın panel verimi üzerindeki etkilerinin deneysel olarak araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Batman.
- [117] Sharma, S., Jain, K. K., & Sharma, A. (2015). Solar cells: in research and applications—a review. *Materials Sciences and Applications*, 6(12), 1145.

- [118] Ganesamoorthy, R., Sathiyar, G., & Sakthivel, P. (2017). Fullerene based acceptors for efficient bulk heterojunction organic solar cell applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 161, 102-148.
- [119] Srinivas, B., Balaji, S., Nagendra Babu, M., & Reddy, Y. S. (2015). Review on present and advance materials for solar cells. *International Journal of Engineering Research-Online*, 3, 178-182.
- [120] Anonim, "GreenTech Renewables, <https://www.greentechrenewables.com/article/monocrystalline-cells-vs-polycrystalline-cells-whats-difference> (Erişim tarihi: 30.10.2022)."
- [121] Chopra, K. L., Paulson, P. D., & Dutta, V. (2004). Thin-film solar cells: an overview. *Progress in Photovoltaics: Research and applications*, 12(2-3), 69-92.
- [122] Köroğlu, T., 2010, Güneş paneli sistemlerinin tasarımı, *Elektrik Mühendisliği Dergisi*, Cilt 409, Temmuz, Sayfa 98-104.
- [123] Imamzai, M., Aghaei, M., Thayoob, Y. H. M., & Forouzanfar, M. (2012, November). A review on comparison between traditional silicon solar cells and thin-film CdTe solar cells. *In Proceedings of National Graduate Conference* (Nat-Grad (pp. 1-5).
- [124] Anonim, "İnvento Türkiye, İnce Film Güneş Paneli, <http://solar.inventoturkiye.com/a-si-thin-film-solar-panel-a-si-ince-film-gunes-paneli/> (Erişim tarihi: 30.01.2021)."
- [125] Bradshaw, A. M., Reuter, B., & Hamacher, T. (2013). The potential scarcity of rare elements for the Energiewende. *Green*, 3(2), 93-111.
- [126] Li, S. S. (2012). Semiconductor physical electronics. Springer Science & Business Media.
- [127] Bertolli, M. (2008). Solar cell materials. Course: Solid State II. Department of Physics, University of Tennessee, Knoxville.
- [128] Anonim, "Emiliano Bellini, CdTe facade solar panel with 18.2% efficiency, <https://www.pv-magazine.com/2020/09/25/cdte-facade-solar-panel-with-18-2-efficiency/> (Erişim tarihi: 12.11.2021)."
- [129] Sethi, V. K., Pandey, M., & Shukla, M. P. (2011). Use of nanotechnology in solar PV cell. *International journal of chemical engineering and applications*, 2(2), 77.
- [130] Anonim, "www.solarfeeds.com, Copper Indium Gallium Selenide (CIGS), <https://www.solarfeeds.com/mag/wiki/copper-indium-gallium-selenide/> (Erişim tarihi: 15.06.2022)."
- [131] Yu, X., & Qu, H. (2010). Wind power in China-Opportunity goes with challenge. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8), 2232-2237.
- [132] Anonim, "Roper, L.D., 2012. Future world energy, <http://www.roporld.com/science/energyfuture.htm> (Erişim tarihi: 18.08.2022)."

- [133] Martins, F., Felgueiras, C., Smitkova, M., & Caetano, N. (2019). Analysis of fossil fuel energy consumption and environmental impacts in European countries. *Energies*, 12(6), 964.
- [134] Anonim, "ourworldindata.org, Global CO2 emissions from fossil fuels, <https://ourworldindata.org/co2-emissions> (Erişim tarihi: 23.08.2022)"
- [135] Anonim, "ourworldindata.org by Hannah Ritchie and Max Roser, Energy mix, <https://ourworldindata.org/energy-mix> (Erişim tarihi: 23.08.2022)"
- [136] Anonim, "ourworldindata.org by Hannah Ritchie and Max Roser, Energy mix, <https://ourworldindata.org/electricity-mix> (Erişim tarihi: 25.08.2022)"
- [137] Anonim, "T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/> (Erişim tarihi: 10.10.2022)."
- [138] Anonim, "Enerji Atlası, Güneş Enerji Santalleri <https://www.enerjiatlası.com/gunes/> (Erişim tarihi: 10.10.2022)"
- [139] Ekici, S., & Kopru, M. A. (2017). Investigation of PV system cable losses. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 7(2), 807-815.
- [140] Salem, F., & Awadallah, M. A. (2016). Detection and assessment of partial shading in photovoltaic arrays. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 3(1), 23-32.
- [141] Roberts, S., & Guariento, N. (2009). Backmatter. In *Building Integrated Photovoltaics* (pp. 173-181). Birkhäuser.
- [142] Kayri, İ., & Tan Bayar, M.T. (2021). Toz faktörünün fotovoltaiik panellerin verimi üzerindeki etkisinin araştırılması: Batman örneği. *Uluslararası Mühendislik, Doğa ve Sosyal Bilimler Sempozyumu (ISENS-21)*, 25-28 Kasım 2021, Batman, pp(88-96).
- [143] Maghami, M. R., Hizam, H., Gomes, C., Radzi, M. A., Rezadad, M. I., & Hajighorbani, S. (2016). Power loss due to soiling on solar panel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1307-1316.
- [144] Deniz E (2013). Güneş Enerjisi Santrallerinde Kayıplar. *III. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi Bildirileri*, 21-24 Kasım 2013, İzmir.
- [145] Koutroulis, E., & Blaabjerg, F. (2012). Methodology for the optimal design of transformerless grid-connected PV inverters. *IET Power Electronics*, 5(8), 1491-1499.
- [146] Burger, B., & Rüther, R. (2006). Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature. *Solar Energy*, 80(1), 32-45.
- [147] Tamrakar, V., Gupta, S. C., & Sawle, Y. (2015, October). Study of characteristics of single and double diode electrical equivalent circuit models of solar PV module. In *2015 International Conference on Energy Systems and Applications* (pp. 312-317). IEEE.

- [148] Saloux, E., Teyssedou, A., & Sorin, M. (2011). Explicit model of photovoltaic panels to determine voltages and currents at the maximum power point. *Solar energy*, 85(5), 713-722.
- [149] Ishaque, K., Salam, Z., & Taheri, H. (2011). Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules. *Solar energy materials and solar cells*, 95(2), 586-594.
- [150] Tsai, H. L. (2010). Insolation-oriented model of photovoltaic module using Matlab/Simulink. *Solar energy*, 84(7), 1318-1326.
- [151] Quaschnig, V. (2005). Understanding Renewable Energy Systems: Earthscan. *Renewable energy*, 3, 224-228.
- [152] Tonui, J. K., & Tripanagnostopoulos, Y. (2007). Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation. *Renewable energy*, 32(4), 623-637.
- [153] Vittorini, D., & Cipollone, R. (2019). Fin-cooled photovoltaic module modeling—Performances mapping and electric efficiency assessment under real operating conditions. *Energy*, 167, 159-167.
- [154] Grubišić-Čabo, F., Nižetić, S., Čoko, D., Kragić, I. M., & Papadopoulos, A. (2018). Experimental investigation of the passive cooled free-standing photovoltaic panel with fixed aluminum fins on the backside surface. *Journal of Cleaner Production*, 176, 119-129.
- [155] Brinkworth, B. J., Cross, B. M., Marshall, R. H., & Yang, H. (1997). Thermal regulation of photovoltaic cladding. *Solar energy*, 61(3), 169-178.
- [156] Tina, G. M., Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., & Scandura, P. F. (2012). Optical and thermal behavior of submerged photovoltaic solar panel: SP2. *Energy*, 39(1), 17-26.
- [157] Anonim, “Astrasun Solar, Floating PV plant, <https://astrasun.solar/articles/213-floating-pv-plant-astrasun-is-ready-for-the-challenge> (Erişim tarihi: 12.10.2022)”
- [158] Brahim, T., Dhaou, M. H., & Jemni, A. (2014). Theoretical and experimental investigation of plate screen mesh heat pipe solar collector. *Energy conversion and management*, 87, 428-438.
- [159] Zhang, T., Yan, Z. W., Xiao, L., Fu, H. D., Pei, G., & Ji, J. (2019). Experimental, study and design sensitivity analysis of a heat pipe photovoltaic/thermal system. *Applied Thermal Engineering*, 162, 114318.
- [160] Moradgholi, M., Nowee, S. M., & Abrishamchi, I. (2014). Application of heat pipe in an experimental investigation on a novel photovoltaic/thermal (PV/T) system. *Solar Energy*, 107, 82-88.
- [161] Ramkiran, B., Sundarabalan, C. K., & Sudhakar, K. (2021). Sustainable passive cooling strategy for PV module: A comparative analysis. Case Studies in *Thermal Engineering*, 27, 101317.
- [162] Nižetić, S., Čoko, D., Yadav, A., & Grubišić-Čabo, F. (2016). Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response. *Energy conversion and management*, 108, 287-296.

- [163] Bahaidarah, H., Subhan, A., Gandhidasan, P., & Rehman, S. (2013). Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions. *Energy*, 59, 445-453.
 - [164] Kumar, P., & Dubey, R. (2018). Efficiency Improvement of Photovoltaic Panels by Design Improvement of Cooling System using Back Water Cooling Tubes. *Int. J. Eng. Res. Technol*, 7(01), 74-77.
 - [165] Pinto, R. V., & Fiorelli, F. A. S. (2016). Review of the mechanisms responsible for heat transfer enhancement using nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 108, 720-739.
 - [166] Al-Shamani, A. N., Sopian, K., Mat, S., Hasan, H. A., Abed, A. M., & Ruslan, M. H. (2016). Experimental studies of rectangular tube absorber photovoltaic thermal collector with various types of nanofluids under the tropical climate conditions. *Energy Conversion and Management*, 124, 528-542.
 - [167] Aydın, A., Kayri, İ., & Aydın, H. (2022). Determination of the performance improvement of a PV/T hybrid system with a novel inner plate-finned collective cooling with Al₂O₃ nanofluid. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 44(4), 9663-9681.
 - [168] Mazón-Hernández, R., García-Cascales, J. R., Vera-García, F., Káiser, A. S., & Zamora, B. (2013). Improving the electrical parameters of a photovoltaic panel by means of an induced or forced air stream. *International Journal of Photoenergy*, 2013.
- 

EKLER

Ek 1. CR1000 data logger özellikleri

Özellik	CR1000
İşletme sıcaklık aralığı	-55° to +85°C
Maksimum tarama hızı	100 Hz
Hafıza	4 MB
Analog giriş sayısı	16
İletişim/Veri/Depolama portları	1 CS I/O 1 RS-232 1 paralel
Anahtarlı 12 V	1
Dijital portlar	8 I/O veya 4 RS-232 COM
Giriş gerilimi aralığı	0 ~ ±5 Vdc
Analog gerilim hassasiyeti	± %0.06 (Okunan değer, 0° - 40°C)
Çıkış sinyali aralığı	0 V ~ Uyarım gerilimi
Analog çözünürlük	0.33 µV
A/D Bitleri	13
Güç kaynağı	9.6 to 16 Vdc
Gerçek zamanlı saat hassasiyeti	±3 min. (Her yıl)
Desteklenen protokoller	PakBus, Modbus, DNP3, FTP, HTTP, XML, POP3, SMTP, Telnet, NTCIP, NTP, SDI-12, SDM
Ebat	23.8 x 10.1 x 5.4 cm
Ağırlık	1 Kg

Ek 2. Data logger programlama komutları

```
'CR1000
'Created by Short Cut (3.0)

'Declare Variables and Units
Public BattV
Public PTemp_C
Public Ruz_Yon
Public Ruz_Hiz
Public Hav_Sic
Public Hav_Nem
Public Glob_Rad
Public SolarkJ
Public NormalP
Public SogutmaliP
Public NormalPOrta
Public SogutPOrta
Public SogutPGiris
Public SogutPCikis

Units BattV=Volts
Units PTemp_C=Deg C
Units Ruz_Yon=degrees
Units Ruz_Hiz=meters/second
Units Hav_Sic=Deg C
Units Hav_Nem=%
Units Glob_Rad=kW/m^2
Units SolarkJ=kJ/m^2
Units NormalP=mV
Units SogutmaliP=mV
Units NormalPOrta=Deg C
Units SogutPOrta=Deg C
Units SogutPGiris=Deg C
Units SogutPCikis=Deg C

'Define Data Tables
DataTable(Table1,True,-1)
    DataInterval(0,5,Min,10)
    WindVector (1,Ruz_Hiz,Ruz_Yon,FP2,False,0,0,0)
    FieldNames("Ruz_Hiz_S_WVT,Ruz_Yon_D1_WVT,Ruz_Yon_SD1_WVT")
    Average(1,Hav_Sic,FP2,False)
    Sample(1,Hav_Nem,FP2)
    Average(1,Glob_Rad,FP2,False)
    Totalize(1,SolarkJ,IEEE4,False)
    Average(1,NormalP,FP2,False)
    Average(1,SogutmaliP,FP2,False)
    Average(1,NormalPOrta,FP2,False)
    Average(1,SogutPOrta,FP2,False)
    Average(1,SogutPGiris,FP2,False)
    Average(1,SogutPCikis,FP2,False)
EndTable
DataTable(Table2,True,-1)
    DataInterval(0,1440,Min,10)
    Minimum(1,BattV,FP2,False,False)
EndTable
'Main Program
BeginProg
    'Main Scan
    Scan(5,Sec,1,0)
```

```

'Default Datalogger Battery Voltage measurement 'BattV'
Battery(BattV)
'Default Wiring Panel Temperature measurement 'PTemp_C'
PanelTemp(PTemp_C,_60Hz)
'NRG #200P Wind Direction Sensor measurements 'Ruz_Yon'
BrHalf(Ruz_Yon,1,mV2500,1,1,1,2500,True,0,_60Hz,360,0)
If Ruz_Yon>=360 Or Ruz_Yon<0 Then Ruz_Yon=0
'NRG #40 Wind Speed Sensor measurements 'Ruz_Hiz'
PulseCount(Ruz_Hiz,1,1,1,1,0.752,0.38)
If Ruz_Hiz<0.36 Then Ruz_Hiz=0
'HC2S3 (constant power) Temperature & Relative Humidity Sensor measurements 'Hav_Sic' and
'Hav_Nem'
VoltSE(Hav_Sic,1,mV2500,2,0,0,_60Hz,0.1,-40)
VoltSE(Hav_Nem,1,mV2500,3,0,0,_60Hz,0.1,0)
If Hav_Nem>100 And Hav_Nem<103 Then Hav_Nem=100
'CMP3/CMP6/CMP11 Pyranometer measurements 'SolarkJ' and 'Glob_Rad'
VoltDiff(Glob_Rad,1,mV250,3,True,0,_60Hz,1,0)
If Glob_Rad<0 Then Glob_Rad=0
SolarkJ=Glob_Rad*0.295858
Glob_Rad=Glob_Rad*59.1716
'Generic Single-Ended Voltage measurements 'NormalP'
VoltSE(NormalP,1,mV5000,4,True,0,_50Hz,1,0)
'Generic Single-Ended Voltage measurements 'SogutmaliP'
VoltSE(SogutmaliP,1,mV5000,7,True,0,_50Hz,1,0)
'Type K (chromel-alumel) Thermocouple measurements 'NormalPOrta'
TCDiff(NormalPOrta,1,mV2_5C,5,TypeK,PTemp_C,True,0,_60Hz,1,0)
'Type K (chromel-alumel) Thermocouple measurements 'SogutPOrta'
TCDiff(SogutPOrta,1,mV2_5C,6,TypeK,PTemp_C,True,0,_60Hz,1,0)
'Type K (chromel-alumel) Thermocouple measurements 'SogutPGiris'
TCDiff(SogutPGiris,1,mV2_5C,7,TypeK,PTemp_C,True,0,_60Hz,1,0)
'Type K (chromel-alumel) Thermocouple measurements 'SogutPCikis'
TCDiff(SogutPCikis,1,mV2_5C,8,TypeK,PTemp_C,True,0,_60Hz,1,0)
'Call Data Tables and Store Data
CallTable(Table1)
CallTable(Table2)
NextScan
EndProg

```

Ek 3. CR1000 data logger teknik özellikleri

NRG #200P - Ruz_Yon

CR1000

Signal	1H
Shield	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)
Ground	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)
Power	VX1 or EX1

NRG #40 - Ruz_Hiz

CR1000

Shield	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)
Ground	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)
Signal	P1

HC2S3 (CP) - Hav_Sic, Hav_Nem

CR1000

Brown	1L
White	2H
Green	12V
Clear	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)
Yellow	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)
Gray	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)

CMP3/CMP6/CMP11 - Glob_Rad, SolarkJ

CR1000

White	3H
Black	3L
Clear	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)
	3L
Jumper	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)

VoltsSE (1) - NormalP

CR1000

Signal	2L
Ground	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)
Shield	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)

VoltsSE (2) - Sogutmalip

CR1000

Signal	4H
Ground	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)
Shield	$\frac{1}{\equiv}$ (Ground)

Type K TC (1) - NormalPOrta

CR1000

Yellow	5H
Red	5L

Type K TC (2) - SogutPOrta

CR1000

Yellow	6H
Red	6L

Type K TC (3) - SogutPGiris

CR1000

Yellow	7H
Red	7L

Type K TC (4) - SogutPCikis

CR1000

Yellow	8H
Red	8L

Ek 4. CMP6 piranometre teknik özellikleri

Özellik	CR1000
İşletme sıcaklık aralığı	-55° to +85°C
Maksimum tarama hızı	100 Hz
Hafıza	4 MB
Analog giriş sayısı	16
İletişim/Veri/Depolama portları	1 CS I/O 1 RS-232 1 paralel
Anahtarlı 12 V	1
Dijital portlar	8 I/OS veya 4 RS-232 COM
Giriş gerilimi aralığı	0 ~ ±5 Vdc
Analog gerilim hassasiyeti	± %0.06 (Okunan değer, 0° - 40°C)
Çıkış sinyali aralığı	0 V ~ Uyarım gerilimi
Analog çözünürlük	0.33 µV
A/D Bitleri	13
Güç kaynağı	9.6 to 16 Vdc
Gerçek zamanlı saat hassasiyeti	±3 min. (Her yıl)
Desteklenen protokoller	PakBus, Modbus, DNP3, FTP, HTTP, XML, POP3, SMTP, Telnet, NTCIP, NTP, SDI-12, SDM
Ebat	23.8 x 10.1 x 5.4 cm
Ağırlık	1 Kg

Ek 5. HC2S3 sıcaklık ve nem sensörü teknik özellikleri

Genel bilgiler	
Filtre açıklaması	Polietilen (standart), Teflon (opsiyonel)
Akım tüketimi	< 4.3 mA (@ 5 Vdc) < 2.0 mA (@ 12 Vdc)
Gerilim kaynağı	5 ~ 24 Vdc
Başlama zamanı	1,5 s
Maksimum başlama akımı	< 50 mA
Analog çıkışlar	±3 mV
Ebat	15x85 mm (Çap, Uzunluk)
Ağırlık	10 g
Hava sıcaklığı	
Sensör tipi	PT100 RTD, IEC 751 1/3 Class B
Ölçüm aralığı	-40° ~ +60°C (varsayılan) -50° ~ +100°C (mümkün)
Çıkış sinyali aralığı	0 ~ 1 Volt
Hassasiyet	±0,1 °C (standart yapılandırma, 23°C)
Uzun vade kararlılığı	< 0.1 °C/yıl
Sensör zaman sabiti Standart PE filtre	≤ 22 s
Sensör zaman sabiti Opsiyonel teflon filtre	≤ 30 s
Bağıl nem	
Sensör tipi	Rotronic® Higrometre IN-1
Ölçüm aralığı	0 to %100 RH (yoğuşmasız)
Çıkış sinyali aralığı	0 ~ 1 Volt
Hassasiyet	±%0,8 RH (standart yapılandırma, 23°C)
Uzun vade kararlılığı	< %1 RH (her yıl için)
Sensör zaman sabiti Standart PE filtre	≤ 22 s
Sensör zaman sabiti Opsiyonel teflon filtre	≤ 30 s