



FOTOVOLTAİK (PV) PANELDE ISI TAŞINIMININ ANALİZİ

Özgür İNANÇ

**2020
DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Sezayi YILMAZ**

FOTOVOLTAİK (PV) PANELDE ISI TAŞINIMININ ANALİZİ

Özgür İNANÇ

T.C

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında

Doktora Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Sezayi YILMAZ

KARABÜK

Haziran 2020

Özgür İNANÇ tarafından hazırlanan “FOTOVOLTAİK (PV) PANELDE ISI TAŞINIMININ ANALİZİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Sezayi YILMAZ

.....

Tez Danışmanı, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 01/06/2020

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Ziyaddin RECEBLİ (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Sezayi YILMAZ (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Kamil ARSLAN (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Ali Etem GÜREL (DÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Volkan KIRMACI (BÜ)

.....

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

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



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

Özgür İNANÇ

ÖZET

Doktora Tezi

FOTOVOLTAİK (PV) PANELDE ISI TAŞINIMININ ANALİZİ

Özgür İNANÇ

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Sezayi YILMAZ

Haziran 2020, 126 sayfa

Bu çalışmada; çevre sıcaklığını ve güneş ışınımını dikkate almak suretiyle, polikristal bir fotovoltaik panelde, panel arkası hava hızının soğutmaya etkisi incelenmiştir. Panellerin soğutulması; panel arkası sıcaklığının azalmasına ve böylece açık-devre geriliminin artmasına neden olmaktadır. Çevre havası sıcaklığından ve güneş ışınımından kaynaklanan panel sıcaklığı artışı, panellerdeki en önemli kayıpları oluşturur. Çalışmada; 0-5 m/s hava hızları ve 10-40 °C çevre sıcaklıkları için, panel arkası sıcaklığının değişimleri ve ayrıca, farklı panel arkası sıcaklıklarını, farklı panel arkası hava hızlarını ve farklı çevre havası sıcaklıklarını dikkate almak suretiyle, panel yüzeyinden olan ısı transferi incelenmiştir. Çevre havası ile panel arkası yüzeyi arasındaki farklı sıcaklık farklarının ısı transfer katsayısına etkisi hava hızınıninkinden

daha azdır. Çevre havası sıcaklığının 10-40 °C ve hava hızının 5 m/s olduğu durumlar için, polikristal güneş panelinin ısı transfer katsayısı 11,6 W/m²K olarak belirlenmiştir. Hesaplamalara göre; kış hava koşulları altında, panellerin sıcaklıkları soğutmanın gerekli olduğu bir seviyeye ulaşmamaktadır.

Anahtar Kelimeler : Rüzgar etkisi, PV, ısı taşınım katsayısı, hava hızı.

Bilim Kodu : 92802



ABSTRACT

Ph. D. Thesis

HEAT CONVECTION ANALYSIS IN PHOTOVOLTAIC (PV) PANEL

Özgür İNANÇ

**Karabuk University
Institute of Graduate Programs
Department of Energy Systems Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Sezayi YILMAZ

June 2020, 126 pages

In this study, regarding the ambient temperature and the solar radiation, on a polycrystalline photovoltaic panel, the effect of rear-panel air velocity on cooling has been searched. Cooling the panels causes the rear-panel temperature to drop and thus the open-circuit voltage to increase. Panel temperature increase, caused by the ambient air temperature and solar radiation, accounts for the most significant losses in the panels. In this study; for air velocities of 0-5 m/s and ambient temperatures of 10-40 °C, changes of rear-panel temperature have been investigated and also, regarding varying rear-panel temperatures, varying rear-panel air velocities and varying ambient air temperatures, the heat transfer from the panel surface has been searched. The effect of various temperature differences between ambient air and rear-panel surface on the heat transfer coefficient is less than that of air velocity. For the situations in which ambient air temperature is 10-40 °C and air velocity is 5 m/s, the heat transfer

coefficient of the polycrystalline solar panel has been determined as 11,6 W/m²K. According to the calculations; under weather conditions of winter, panels' temperatures don't reach to a level in which the cooling is necessary.

Key Words : Wind effect, PV, heat convection coefficient, air velocity.

Science Code : 92802



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteklerini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren danışman hocam sayın Prof. Dr. Sezayi YILMAZ’a ve hocalarım sayın Prof. Dr. İlhan CEYLAN ile Doç. Dr. Alper ERGÜN’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

KBÜ-BAP-FDK-2019-2065 numaralı “Fotovoltaik (PV) Panelde Isı Taşınımının Analizi” isimli proje, Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine teşekkür ederim.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgemedi yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
GÜNEŞ ENERJİSİ VE GÜNEŞ PANELLERİ	4
2.1. GÜNEŞİN YAPISI.....	4
2.2. DÜNYAYA ULAŞAN GÜNEŞ ENERJİSİ	5
2.3. DÜNYA ÜZERİNE GELEN GÜNEŞ IŞINLARININ DALGA BOYLARI.....	6
2.3.1. Ultraviyole (UV) (Morötesi Işıklar) (200-400 nm)	6
2.3.2. Optik Kısım (Işık-Görünebilen Kısım) (400-750 nm).....	6
2.3.3. Infrared (IR) Bölgesi (Termik Kısım-Isı Işıkları-Kızılötesi Işıklar)..	7
2.4. TÜRKİYE’DE GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ.....	8
2.5. GÜNEŞ IŞINIMI ÇEŞİTLERİ.....	9
2.5.1. Direkt Güneş Işınımı	10
2.5.2. Difüz (Yayılı) Güneş Işınımı	10
2.6. GÜNEŞ IŞINIMI ÖLÇÜM CİHAZLARI.....	11
2.6.1. Piranometre.....	11

	<u>Sayfa</u>
2.6.2. Pirheliometre.....	11
2.6.3. Pirradyometre	12
2.6.4. Solarmetre.....	12
2.7. GÜNEŞ GEOMETRİSİ	13
2.7.1. Deklinasyon Açısı (δ)	13
2.7.2. Saat Açısı (w)	14
2.7.3. Zenit Açısı (Ψ)	14
2.7.4. Güneş Yükseklik Açısı (α)	15
2.7.5. Güneş Azimut Açısı (γ_s)	16
2.7.6. Yüzey Azimut Açısı (γ)	16
2.7.7. Hava Kütlesi (HK)	17
2.7.8. Geliş Açısı (θ)	17
2.8. GÜNEŞ PİLLERİ VE UYGULAMALARI.....	17
2.8.1. Monokristal (Tekli Kristal) Güneş Pilleri.....	18
2.8.2. Polikristal (Çoklu Kristal) Güneş Pilleri.....	18
2.8.3. Amorf Silisyum Güneş Pilleri	19
2.8.4. Güneş Pillerinin Birleştirilmesi ve Kapsüllenmesi.....	20
2.8.5. Epoksi Kaplama Güneş Paneli Uygulaması	20
2.8.6. Silikon Kaplama Güneş Paneli Uygulaması.....	21
2.8.7. Dünyada Güneş Paneli Kullanımı	22
2.8.8. Güneş Pili Verimlerinin Sıcaklık ve Işınmaya Bağlı Değişimi.....	24
2.9. BATARYALAR.....	25
2.9.1. Batarya Kapasitesi	27
2.9.2. Batarya Seçimi.....	27
2.9.3. PV Uygulamalarında Sıkça Kullanılan Bataryalar	27
2.10. GÜÇ DENKLEMİ İLE VOLTAJ VE AKIM ARASINDAKİ BAĞINTI.....	28
2.10.1. Güç.....	28
2.10.2. Enerji.....	28
2.11. GÜNEŞ PANELLERİ VOLTAJ VE AKIM ÖLÇÜMLERİ	28
2.11.1. Açık Devre Voltajı (V_{oc}).....	29
2.11.2. Maksimum Güç Voltajı (V_{mp})	29

	<u>Sayfa</u>
2.11.3. Nominal Voltaj (V_{nom})	29
2.11.4. Kısa Devre Akımı (I_{sc})	30
2.11.5. Maksimum Güç Akımı (I_{mp})	30
2.12. GÜNEŞ PANELLERİNDE SICAKLIK İLE MEYDANA GELEN VERİM KAYIPLARI	31
2.13. PV/T SİSTEMLER	34
2.13.1. Hava Soğutmalı PV/T Sistemler	34
2.13.2. Su Soğutmalı PV/T Sistemler	37
 BÖLÜM 3	 39
KAYNAK ARAŞTIRMASI	39
 BÖLÜM 4	 102
MATERYAL VE METOT	102
4.1. DENEY DÜZENEĞİ	102
4.2. KULLANILACAK DENKLEMLER	104
4.3. HESAPLAMALARIN GÖSTERİMİ	107
 BÖLÜM 5	 111
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	111
KAYNAKLAR	119
 ÖZGEÇMİŞ	 126

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Güneş ışınlarının dağılımı.....	8
Şekil 2.2. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası.....	8
Şekil 2.3. Türkiye’de aylık ışıınım şiddeti değerleri ve aylık güneşlenme süreleri.....	9
Şekil 2.4. Direkt, difüz ve yansıtılmış güneş ışıınımları	10
Şekil 2.5. Piranometre	11
Şekil 2.6. Pirheliometre.....	11
Şekil 2.7. Pirradyometre.....	12
Şekil 2.8. Solarmetre	12
Şekil 2.9. Deklinasyon açısının yılın günlerine göre değışimi.....	13
Şekil 2.10. Monokristal güneş paneli	18
Şekil 2.11. Polikristal güneş paneli	19
Şekil 2.12. Amorf silisyum güneş paneli	19
Şekil 2.13. Epoksi güneş paneli	21
Şekil 2.14. Güneş pili teknolojilerinin payları	22
Şekil 2.15. Sıcaklığa bağılı olarak akım ve voltajın değışimi	24
Şekil 2.16. Işıınıma bağılı olarak akım ve voltajın değışimi.....	25
Şekil 2.17. Akım ve voltaj arasındaki ilişkinin grafiksel ifadesi	31
Şekil 2.18. Çatıya entegre edilmiş geçirgen PV modüller	35
Şekil 2.19. Hava soğutmalı bir BEPV/T sistemi.....	36
Şekil 2.20. Su soğutmalı bir PV/T sistemi	37
Şekil 4.1. Güneş ışıınıma, çevresel sıcaklığa ve rüzgar hızına bağılı olarak panel arkası sıcaklıklarını ölçmek için kurulan test düzeneğı.....	103
Şekil 5.1. Zamana bağılı PV modül sıcaklığı (0 m/s hava hızı için).....	111
Şekil 5.2. Zamana bağılı PV modül sıcaklığı (2 m/s hava hızı için).....	112
Şekil 5.3. Zamana bağılı PV modül sıcaklığı (3 m/s hava hızı için).....	113
Şekil 5.4. Zamana bağılı PV modül sıcaklığı (4 m/s hava hızı için).....	114
Şekil 5.5. Zamana bağılı PV modül sıcaklığı (5 m/s hava hızı için).....	115

Şekil 5.6. Hava hızına bağlı olarak PV panel üzerindeki ısı taşınım katsayısının değişimi	116
---	-----



ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Türkiye’de bölgelere göre güneş enerjisi dağılımı	6
Çizelge 2.2. Seri bağlı hücre sayısına bağlı olarak açık devre voltajı ve maksimum güç voltajı değerleri.	29
Çizelge 4.1. Ölçüm verilerine göre yapılan ısı hesaplamalar	109
Çizelge 5.1. Çevre havası sıcaklığına, ölçülen panel sıcaklığına ve hava hızına göre hesaplanmış ortalama Nusselt sayısı ve h değerleri.....	116

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Nu_x	: Herhangi bir x konumundaki yerel Nusselt sayısı
ρ	: Havanın yoğunluğu (kg/m ³)
u_∞	: Havanın levhadan yeterince uzaktaki dik mesafedeki hızı (m/s)
μ	: Havanın dinamik viskozitesi (Pa.s)
Pr	: Prandtl sayısı
Re_x	: Herhangi bir x konumundaki yerel Reynolds sayısı
k	: Havanın ısı iletim katsayısı (W/mK)
h_x	: Herhangi bir x konumundaki yerel ısı taşınım katsayısı (W/m ² K)
h	: Ortalama ısı taşınım katsayısı (W/m ² K)
Nu	: Ortalama Nusselt sayısı
L	: Levhanın boyu (m)
T_y	: Levhanın yüzey sıcaklığı (°C)
T_∞	: Havanın levhadan yeterince uzaktaki dik mesafedeki sıcaklığı (°C)
T_f	: Havanın film sıcaklığı (°C)
$\dot{q}$	: Panelin birim yüzey alanından gerçekleşen ısı güç (W/m ²)
Re_L	: x=L konumundaki yerel Reynolds sayısı değeri

KISALTMALAR

PV	: Photovoltaic (Fotovoltaik)
PV/T	: Photovoltaic Thermal (Fotovoltaik Termal)
BIPV/T	: Building Integrated Photovoltaic Thermal (Bina Entegreli Fotovoltaik Termal)
HK	: Hava Kütlesi
EVA	: Etilen Vilanül Asetat
PCM	: Phase Change Material (Faz Değiştiren Malzeme)
COP	: Coefficient of Performance (Etkenlik Katsayısı)
TPT	: Tedlar/Polyethylene Terephthalate/Tedlar (Tedlar/Polietilen Tereftalat/ Tedlar)
HIT-PV	: Heterojunction Photovoltaic (Heterobirleşimli Fotovoltaik)
HIT-PVT	: Heterojunction Photovoltaic Thermal (Heterobirleşimli Fotovoltaik Termal)
HIT	: Heterojunction (Heterobirleşimli)
S-CHP	: Solar Combined Heat and Power (Güneş Enerjili Bütünleşik Isı ve Güç)
EG	: Ethylene Glycol (Etilen Glikol)
PVT-CPC	: Photovoltaic Thermal-Compound Parabolic Concentrator (Fotovoltaik Termal-Bileşenli Parabolik Yoğunlaştırıcı)
FPC-CPC	: Flat Plate-Compound Parabolic Concentrator (Düz Plakalı Bileşenli Parabolik Yoğunlaştırıcı)
VAR	: Vapor Absorption Refrigeration (Buhar Absorpsiyonlu Soğutma)
FPC	: Flat Plate Collector (Düz Plakalı Kollektör)
MWCNT	: Multi Walled Carbon Nanotube (Çoklu Duvarlı Karbon Nanotüp)
PVT/TE	: Photovoltaic Thermal/Thermoelectric (Fotovoltaik Termal/Termoelektrik)
PVT-TEC	: Photovoltaic Thermal Integrated Thermoelectric Cooler (Fotovoltaik Termal Entegreli Termoelektrik Soğutucu)
HWB	: Hottel-Whillier-Bliss

RMSE	: Root Mean Squared Error (Ortalama Karekök Hatası)
MBE	: Mean Bias Error (Ortalama Sapma Hatası)
t-stat	: t-statistics (t-İstatistik)
MABE	: Mean Absolute Bias Error (Ortalama Mutlak Sapma Hatası)
SVM	: Support Vector Machine (Destek Vektör Makinesi)
k-NN	: Kernel-Nearest Neighbor (Kernel En Yakın Komşu)
GHGe	: Greenhouse Gas Emissions (Sera Gazı Salınımları)
ASHP	: Air Source Heat Pump (Hava Kaynaklı Isı Pompası)
PVTAHPD	: Photovoltaic/Thermal Assisted Heat Pump Drying (Fotovoltaik/Termal Destekli Isı Pompalı Kurutma)
HTF	: Heat Transfer Fluid (Isı Transfer Akışkanı)
A-PV/T	: Absorbing Plate Photovoltaic/Thermal (Absorbe Edici Plakalı Fotovoltaik Termal)
G-PV/T	: Glass Cover Photovoltaic/Thermal (Cam Örtülü Fotovoltaik/Termal)
FPV-SAHP	: Solar Assisted Heat Pump with Fresnel PV (Fresnel PV'ye Sahip Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompası)
TEG	: Thermoelectric Generator (Termoelektrik Jeneratör)
FPV/TEG-SAHP	: Solar Assisted Heat Pump with Fresnel PV Plus TEG (Fresnel PV ile Termoelektrik Jeneratöre Sahip Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompası)
DX-SAHP	: Direct-Expansion Solar Assisted Heat Pump (Doğrudan- Genişlemeli Güneş Enerjisi Destekli Isı Pompası)
NOCT	: Normal Operating Cell Temperature (Hücresinin Normal Çalışma Sıcaklığı)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Bir sistemin ısı ve iş verme yeteneğine “enerji” denir. Enerji türleri farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Farklı enerji türleri birbirine dönüştürülebilmektedir. Enerjinin kullanılabilirliğinin veya dönüşebilme yeteneğinin ölçüsü “ekserji” kavramı ile ifade edilir. Ekserji; belirli termodinamik koşullarda belirli bir miktar enerjinin diğer bir enerji biçimine dönüştürülebilen en yüksek miktarıdır. Belirli termodinamik koşullarda diğer bir enerji biçimine dönüştürülemeyen enerjiye de “anergi” adı verilir [1].

Enerjiler kaynaklarına göre; “biyokütle (biyomas), güneş, rüzgar, jeotermal, nükleer, hidrolik enerjiler ile katı, sıvı ve gaz yakıtlar olarak sınıflandırılabilir. Fiziksel açıdan; kimyasal, fiziksel, elektriksel, elektromanyetik, mekanik (potansiyel ve kinetik), termal enerjiler olarak sınıflandırılabilir. Herhangi bir değişime veya dönüşüme uğrayıp uğramadığına göre enerjiler iki gruba ayrılabilir: Bunlardan ilki Primer (Birincil) enerjilerdir; primer enerji, “doğal enerji” olarak da adlandırılır ve doğadaki enerjilerin herhangi bir değişim veya dönüşüm göstermemiş şeklidir. Güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidrolik enerji, petrol enerjisi, kömür enerjisi, jeotermal enerji, nükleer enerji buna örnek verilebilir. Diğerleri ise İkincil (Sekonder) enerjilerdir; ikincil enerji, “türetilen enerji” olarak da adlandırılır ve birincil ya da ikincil enerjilerin dönüştürülmesi sonucu elde edilmektedir. Bunlar; elektriksel, termal, mekanik, kimyasal, elektromanyetik ve ışık enerjisidir [1].

Enerji hammaddelerinin özgül enerji içeriklerine göre “yoğun enerjiler” ve “yoğun olmayan enerjiler” olmak üzere iki farklı sınıflandırma çeşidi vardır. Yoğun enerjilere örnek olarak; petrol ve ürünleri, kömür, hidrolik enerji, toryum ve uranyum verilebilir. Yoğun olmayan enerjilere örnek olarak; güneş ve rüzgar enerjileri verilebilir. Enerji hammaddesinin depolanabilme özelliğine göre; “tam olarak depo edilebilenler” ve

“kısmen depo edilebilenler ile hiç depo edilemeyenler” olmak üzere iki farklı sınıflandırma çeşidi vardır. Tam olarak depo edilebilenlere örnek olarak; kömür, petrol ve ürünleri, bitümlü şistler, toryum ve uranyum verilebilir. Kısmen depo edilebilenler ile hiç depo edilmeyenlere örnek olarak; doğalgaz, su ve güneş verilebilir [1].

Enerji maddesinin kullanımı sırasında çevreye etkisi açısından; “temiz enerjiler” ve “temiz olmayan enerjiler” olmak üzere iki farklı sınıflandırma çeşidi vardır. Temiz enerjilere örnek olarak; güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, biyo-kütle enerjisi, hidrolik enerjiler verilebilir. Temiz olmayan enerjilere örnek olarak; petrol, kömür, bitümlü şistler verilebilir [1].

Enerji türleri için bir diğer sınıflandırma kriteri, enerji maddesinin alternatif olup olmamasına göre yapılan sınıflandırmadır. Alternatif enerji; doğal çevreden sürekli ya da periyodik olarak akan enerjiden elde edilen enerjidir. En yaygın olanı güneş enerjisidir ve güneş enerjisi 24 saat tekrarlamalı bir enerjidir. Yenilenemeyen enerji ise; insan müdahalesi olmadıkça salınmaz ve bağlı bulunan statik enerji depolarından elde edilen enerjidir. Yenilenemeyen enerjiye örnek olarak; nükleer ve fosil yakıtlar (kömür, petrol, doğalgaz...) verilebilir. Bu enerjiyi harekete geçirmek için bir dış etkiye ihtiyaç vardır; çünkü uygulamada, yalıtılmış bir potansiyele sahiptir [1].

Bu çalışmanın amacı; PV panel üzerinden alınmış olan farklı ölçüm sonuçlarından oluşan farklı durumlar için yerel Nusselt sayısının yüzey üzerindeki ortalaması ($Nu_{yüzey\ ortalaması}$), ortalama Nusselt sayısı (Nu), ortalama ısı taşınım katsayısı (h) ve birim yüzey alanından gerçekleşen ısı güç ($\dot{q}$) değerlerini hesaplayarak panelin ısı analizini gerçekleştirmektir. Bu hesaplama için; ısı transferi kitaplarında mevcut olan, üzerine sabit ısı akısı gelen düzlem yüzeyler için geçerli olan yerel Nusselt sayısı ifadesinden faydalanılacaktır; çünkü çalışmamızda kullanılan PV panel, her bir bağımsız ölçüm için bu şekilde uymaktadır. Üzerine sabit ısı akısı gelen düzlem yüzeyler için geçerli olan yerel Nusselt sayısı ifadesi kullanılarak, yukarıda bahsedilen tüm değerler hesaplanabilmektedir. Bununla birlikte; kullanılacak olan yerel Nusselt sayısı ifadesi laminar akış ve $Pr \geq 0,6$ durumunda geçerli olduğundan, bu formülden türetilen diğer tüm formüller de laminar akış ve $Pr \geq 0,6$ durumunda geçerli olacaktır; bu nedenle yerel Nusselt sayısı bağıntısının ve bu bağıntıdan türetilen diğer

tüm bağıntıların, ölçüm sonuçları için kullanılabilmesi için her bir ölçüm sonucunun laminar akış ve $Pr \geq 0,6$ olma koşulunu sağladığı da gösterilmelidir. Bunlardan; akışın tüm levha üzerinde laminar olması koşulunun sağlanıp sağlanmadığının gösterimi, işlemler esnasında hesaplanan Re_L (PV panelin ucundaki Reynolds sayısı) aracılığıyla yapılacaktır.



BÖLÜM 2

GÜNEŞ ENERJİSİ VE GÜNEŞ PANELLERİ

2.1. GÜNEŞİN YAPISI

Güneş; hidrojen ve helyum gazlarından oluşur. Döteryum ve trityum hidrojenin izotoplarıdır ve bu iki izotopun 1 milyon °C sıcaklığın üzerindeki bir sıcaklık değerinde birleşmesi ile helyum oluşur. Helyum oluşumu esnasında açığa çıkan enerji değeri çok yüksektir. Dört hidrojen çekirdeği bir helyum çekirdeğini meydana getirir. Hidrojen çekirdekleri çok yüksek sıcaklıkta birleşir ve bu olaya “füzyon” adı verilir. Bu olay; atom çekirdeği yardımıyla yüksek sıcaklıkta olduğundan “Termonükleer reaksiyon” olarak adlandırılır. Dolayısıyla güneş; iç kısmını döteryum ve trityumun oluşturduğu, yakıtı hidrojen ve ürünü helyum olan büyük bir fırındır. Güneşin yüzey sıcaklığı 6000 °C’dir ve merkeze doğru bu değer 20 milyon °C’ye yaklaşır. Güneşin merkezinde bir saniyede 564 milyon ton hidrojen, 560 milyon ton helyuma dönüşür. Uzaya yayılan ısı ve ışık enerjisi, aradaki 4 milyon ton farktan kaynaklanır. Güneşin yüzey sıcaklığının 6000 °C olduğu düşünülürse, Stefan-Boltzmann kanununa göre çok yüksek değerde radyasyon yaymaktadır [2].

Stefan-Boltzmann kanunu Eşitlik 2.1’de verilmiştir [3].

$$E = \sigma T^4 \quad (2.1)$$

Buradaki büyüklükler şunlardır:

- E: Birim yüzey alanı başına ısı gücü miktarı (W/m^2)
- σ : *Stefan – Boltzmann sabiti* ($5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$)

- T: Cismin mutlak sıcaklığı (K).

Döteryum ve trityum dünyada bol miktarda bulunmaktadır. Bu enerjinin dünyada üretilmesi için 1 milyon °C'nin üzerinde bir sıcaklık oluşturularak güneş gibi sonsuz bir enerji kaynağı oluşturulmak istenmektedir. Bu sıcaklığa yoğun manyetik alan ile çıkılmaya çalışılmaktadır; çünkü 1 milyon °C'nin üzerine çıkabilecek herhangi bir malzeme bilinmemektedir [2].

2.2. DÜNYAYA ULAŞAN GÜNEŞ ENERJİSİ

Dünyanın güneşe uzaklığı yaklaşık 150 milyon km'dir. Dünya bir taraftan kendi çevresinde, bir taraftan da güneş çevresinde eliptik bir yörüngede dönmektedir. Dolayısıyla, dünyaya güneşten gelen enerji hem yıllık olarak hem de günlük olarak değişir. Dünyanın kendi çevresinde dönüşünün sebep olduğu güneş enerjisi değişimi ile gece gündüz oluşurken, güneş çevresinde dönüşünün sebep olduğu güneş enerjisi değişimi mevsimleri oluşturur. Dünyanın kendi çevresindeki dönüş eksenini, güneş çevresindeki dolanma yörüngesi düzlemiyle 23,50 derecelik bir açı yapmaktadır. Bu durum mevsimleri oluşturmaktadır ve ayrıca gece ve gündüz uzunluklarının yıl boyunca değişmesine neden olmaktadır. Dünyaya bir günde gelen güneş enerjisi, güneşin toplam enerjisinin yalnızca milyarda biridir. Bunun değeri $1,5 \cdot 10^{16}$ MJ'dür. Dünya-güneş mesafesi yıl boyunca değiştiğinden, güneş ışınlarına dik birim alanına, atmosfer dışında, bütün dalga boylarında ve bir anda gelen güneş ışınımının değeri sabit değildir ve bu nedenle ortalama dünya-güneş uzaklığındaki güneş radyasyonu kullanılır. Bu değer %1 hata ile 1367 W/m^2 'dir ve "güneş sabiti" olarak adlandırılır. Dünyaya gelen güneş enerjisi 130 trilyon ton kömüre eşdeğerdir ve dünyada tüketilen toplam enerjinin 15000 katına eşdeğerdir. Ülkemize bir yılda gelen güneş enerjisi $3,517 \cdot 10^{15}$ MJ değerindedir (Çizelge 2.1). Bu değer ülkemizin elektrik santrallerinin yıllık kurulu gücünün 500 katını aşmaktadır. Ülkemiz 36-42° kuzey enlemleri arasında ve güneş kuşağı içerisinde yer almaktadır. Yıllık ortalama güneşlenme süresi 2609 saattir; bu değer yılın %29,8'ine karşılık gelir [1].

Çizelge 2.1. Türkiye’de bölgelere göre güneş enerjisi dağılımı [1].

Bölgeler	Yıllık Toplam Güneş Enerjisi (MJ/m ² -yıl)	Günlük Toplam Güneş Enerjisi (MJ/m ² -gün)	Yıllık Toplam Güneşlenme Süresi (h/yıl)
Güneydoğu Anadolu	5256,0	14,3	2993
Akdeniz	5004,0	13,9	2956
Ege	4694,4	13,5	2738
İç Anadolu	4730,4	13,7	2628
Doğu Anadolu	4914,0	13,4	2664
Marmara	4204,8	10,9	2409
Karadeniz	4032,0	10,3	1971
Türkiye Ortalaması	4719,6		2640

2.3. DÜNYA ÜZERİNE GELEN GÜNEŞ IŞINLARININ DALGA BOYLARI

Görünür bölge, ultraviyole ve infrared dünya üzerine gelen güneş ışınlarının dalga boyları içerisinde bulunmaktadır. Yani; güneş ışınımının dalga boyları 200 nm-24000 nm arasındadır [1].

2.3.1. Ultraviyole (UV) (Morötesi Işımlar) (200-400 nm)

- UV-C bölgesi (200-280 nm): Atmosferden geçmez, ozon tabakasında absorbe edilir.
- UV-B bölgesi (280-320 nm): Bu da absorbe edilir.
- UV-A bölgesi (320-400 nm): Atmosferden geçip bize ulaşabilir [1].

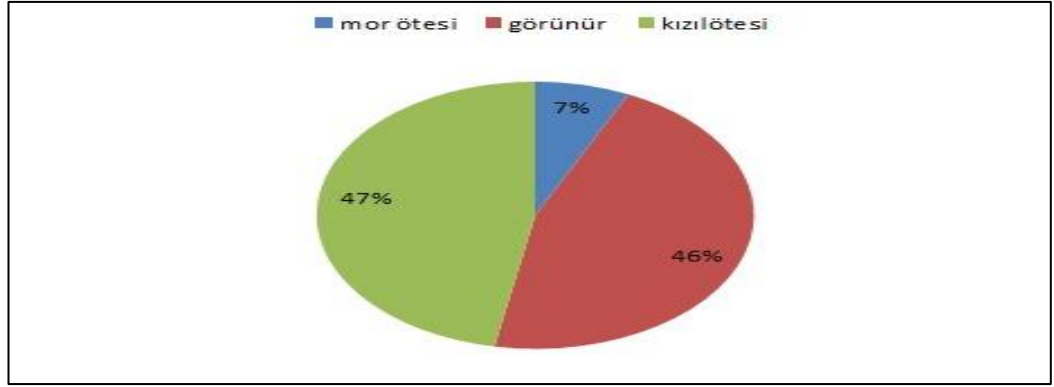
2.3.2. Optik Kısım (Işık-Görünebilen Kısım) (400-750 nm)

- A bölgesi (400-520 nm): (Menekşe-Yeşil) renktedir.
- B bölgesi (520-620 nm): (Yeşil-Kırmızı) renktedir.
- C bölgesi (620-750 nm): (Kırmızı) renktedir [1].

2.3.3. Infrared (IR) Bölgesi (Termik Kısım-Isı Işınları-Kızılötesi Işınlr)

- IR-A (750-1400 nm)
- IR-B (1400-3000 nm) (yakın infrared)
- IR-C (3000-24000 nm) (orta infrared) [1].

Optik ve termik kesim güneşten gelen enerjinin %96,5'ini oluşturur. Her dalga boyunun şiddeti farklıdır. Dalga boylarının, şiddetlerine göre değişimlerine bakıldığında, güneş yaklaşık 6000K yüzey sıcaklığına sahip bir kara cisimdir. UV (morötesi) ışınlar yüksek enerjili ışınlardır ve canlılara zarar verici özelliktedir. Bu nedenle, morötesi ışınların ozon katmanında soğurulması, canlıların sağlığıyla doğrudan ilişkilidir. Görünür bölge ve infrared (kızılötesi) bölgesindeki ışınlar, havadaki gaz molekülleri ve toz parçacıklarıyla etkileşerek saçılır; bu saçılma her yöndedir ve dolayısıyla güneş enerjisinin bir kısmı yeryüzüne ulaşmadan uzaya geri gider. En kısa dalga boyundaki ışınların saçılması daha belirgindir, yani mavi renge karşılık gelen dalga boylarının saçılması, kırmızı renge karşılık gelenlere kıyasla daha fazladır; bu sebeple yeryüzünden bakıldığında gökyüzü mavi görünür. Işınımın saçılmasında su damlacıkları da etkilidir. Gelen ışınımın %80'i yoğun bulutlar nedeniyle saçılarak ve yansıtılarak yeryüzüne ulaşması önlenir. Bulutlar dolayısıyla güneş enerjisinde önemli bir kayıp ortaya çıkmaktadır; çünkü dünyanın ortalama bulut örtüsü %50 civarındadır. Gelen güneş ışınlarının görünür bölgede kalan kısmı (400-750 nm) için atmosfer saydam özellik gösterir. Bununla birlikte, bazı toz ve kirleticiler bu bölgedeki ışınımı soğurur. Havadaki su buharı ve CO₂, yakın kızılötesi bölgeye düşen ışınların (750-24000 nm) yaklaşık %20'sini soğurur. Bu soğurmalar sonucunda havaküre ısınır. Güneş ışınlarının atmosfer ile bu şekilde etkileşmesinden dolayı, yeryüzüne ulaşan güneş radyasyonu, atmosfer dışına gelen şiddetin yarısından biraz fazla olur. Atmosfer etkileri, güneş ışınlarının havada aldıkları yola bağlıdır; eğik gelen güneş ışınları, dik gelenlere göre daha uzun yol alacakları için bu etkiler artar. Dolayısıyla “doğrudan ışıınım” ve “yayınık ışıınım” kavramları ortaya çıkmaktadır. Yayınık ışınlar; bulutlar ve tozlar nedeniyle saçılmaya uğramış ışınlardır. Doğrudan ışınlar ise bu tür etkilere uğramamış ışınlardır. Güneşten gelen ışınların dağılımı Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Bu ışınların %7'si morötesi bölgede, %46'sı görünür ışınım bölgesinde ve geri kalan %47'si kızılötesi bölgede bulunur [1].

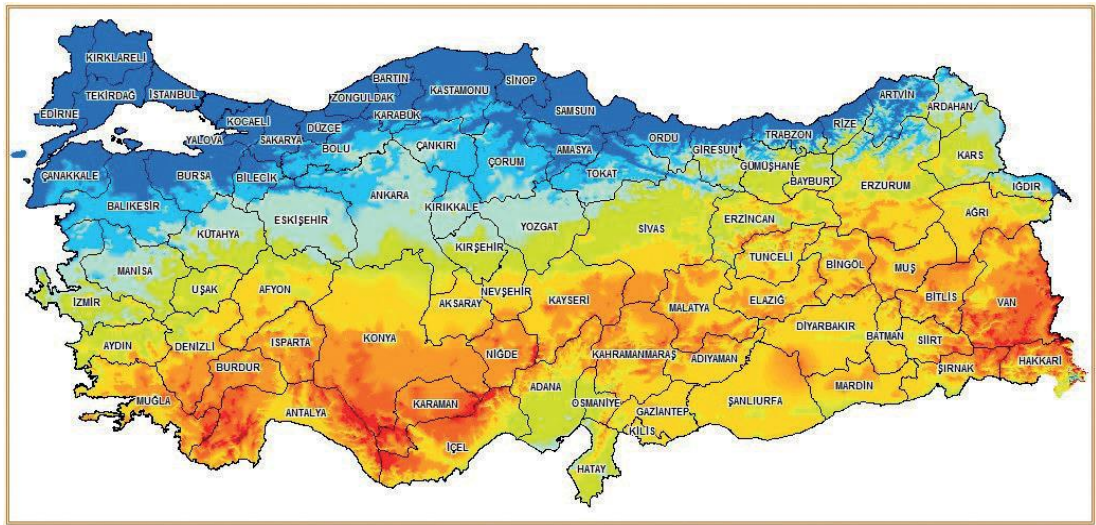


Şekil 2.1. Güneş ışınlarının dağılımı [1].

Güneşten gelen enerjinin yaklaşık %30'u yansıma ve saçılmalarla uzaya geri gider, yaklaşık %20'si havakürede soğurulur, geri kalan %50'si de yeryüzünde soğurulur [1].

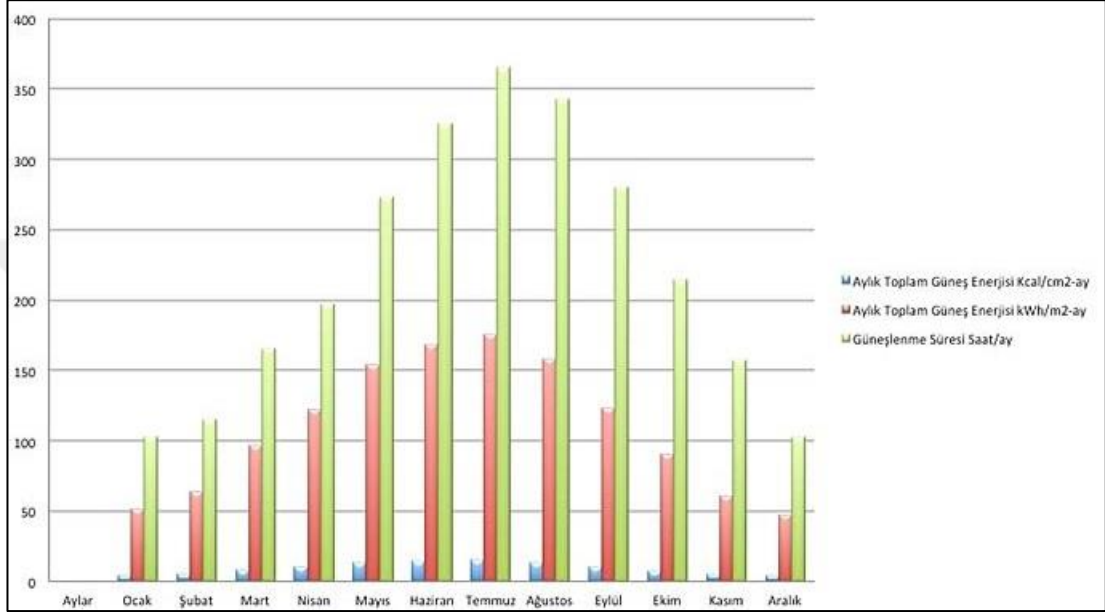
2.4. TÜRKİYE'DE GÜNEŞ ENERJİSİ POTANSİYELİ

Ülkemiz, güneş enerjisi bakımından birçok ülkeye göre avantajlıdır (Şekil 2.2). Avrupa ülkeleri içerisinde yalnızca İspanya'nın güneş enerjisi potansiyeli bizim ülkemizden fazladır. Ülkemizin güneş enerjisinden faydalanma potansiyeli ortalama olarak 1400-1800 kWh/m²-yıl değerlerindedir. Ülkemizde özellikle Güneydoğu Anadolu ve Akdeniz bölgelerinde güneş enerjisi potansiyeli yüksektir [2].



Şekil 2.2. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası [4].

Ülkemizde özellikle Haziran ve Temmuz aylarında güneşlenme süresi uzundur ve dolayısıyla yüksek bir güneş enerjisi potansiyeli vardır (Şekil 2.3). Bu potansiyel, güneş enerjili su ısıtma sistemlerinde önemli düzeyde değerlendirilmektedir; ancak, güneş enerjisinin diğer uygulama alanlarında hala yeteri kadar değerlendirilememektedir.



Şekil 2.3. Türkiye’de aylık ışınlam şiddeti değerleri ve aylık güneşlenme süreleri [5].

2.5. GÜNEŞ IŞINIMI ÇEŞİTLERİ

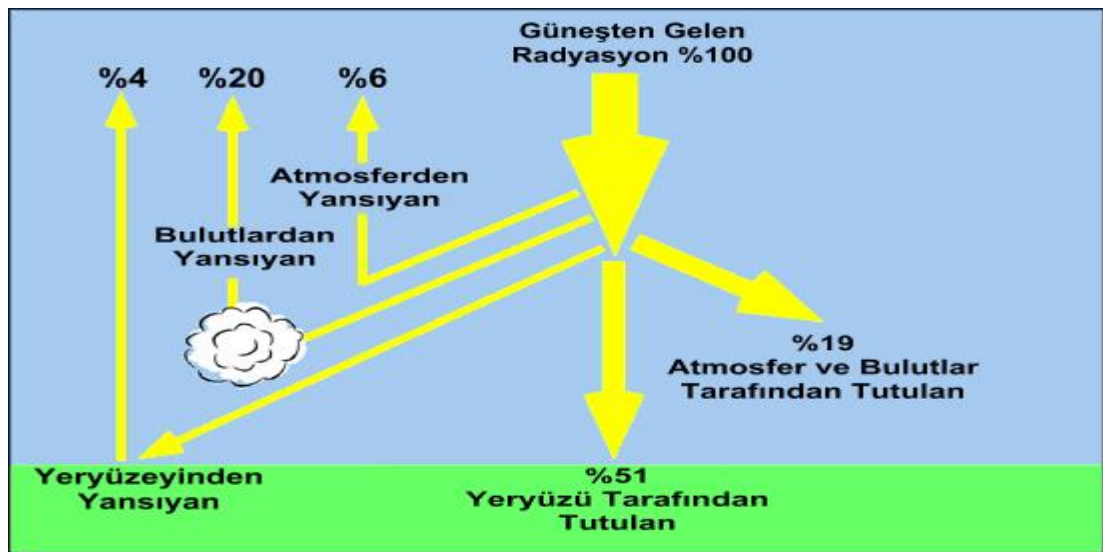
Sıcaklığı mutlak sıfırın ($-273,15^{\circ}\text{C}$) üzerinde olan bütün cisimler ısı ışınlam yayarlar. Işınlam; elektromanyetik dalgalar veya fotonlar aracılığı ile gerçekleşen enerji aktarım şeklidir. Elektromanyetik dalgalar veya fotonlar; maddenin atom veya moleküllerinin elektron düzeninde olan değişimler sonucu yayılır. Işınlamla ısı geçişi, elektromanyetik dalga aracılığıyla olduğundan, cisimler arasında boşluk olması durumunda da gerçekleşebilir ve bu yönüyle, ısı aktarımının diğer şekillerinden farklıdır (Şekil 2.4). Işınlamla ısı aktarımının yayılma hızı ışık hızına eşittir. Dünyamızdan yansıyarak uzaya yayılan ışınlam kızılötesi ışınlamdır. Atmosferde biriken ışınlam kızılötesi ışınlamdır ve bu ışınlam, karbondioksit tarafından emilir. Atmosferde biriken karbondioksit, dünyamızdan yansıyan kızılötesi radyasyonu emerek yerkürenin sıcaklığını arttırdığında küresel ısınma meydana gelir [2].

2.5.1. Direkt Güneş Işınımı

Doğrudan güneşten gelen, atmosferde herhangi bir dağılmaya uğramayan ışıdır. Gelen ışınlar direkt olarak düşünölebilir; çünkü güneş ve dünya arasındaki mesafe çok fazladır. Belirli bir noktaya güneşli bir günde gelen ışıının yaklaşık %80'i direkt güneş ışıınıdır [2].

2.5.2. Difüz (Yayı) Güneş Işınımı

Atmosferdeki partiköller ve moleköller, su buharı ve bulutlar tarafından yansıtılan ve her yönden gelen ışıım şeklidir. Güneşli bir günde güneş ışıınının %15-20'si difüz güneş ışıınıdır; bulutlu bir günde ise tamamı difüz güneş ışıınıdır. Direkt ve difüz güneş ışıınının toplamı, toplam güneş ışıını olarak ifade edilir. Yatay düzleme düşen ışııma “global ışıım” da denir ve güneş ışıını ölçömleri çoğunlukla bu şekilde yapılır. Direkt ve difüz güneş ışıını kavramlarının yanında bir de “yansıtılmış güneş ışıını” kavramı vardır. Yeryüzündeki elemanlar tarafından yansıtılan güneş ışıınına “yansıtılmış güneş ışıını” denir. Yansıtılmış güneş ışıını; bölgenin özelliklerine ve çevre şartlarına bağıdır. Yatay bir yüzey için direkt ve difüz ışıının toplamı toplam ışıım iken, yeryüzü üzerinde herhangi bir eğik yüzey için direkt, difüz ve yansıtılmış güneş ışıınılarının toplamı, toplam ışıındır [2].



Şekil 2.4. Direkt, difüz ve yansıtılmış güneş ışıınıları [6].

2.6. GÜNEŞ IŞINIMI ÖLÇÜM CİHAZLARI

2.6.1. Piranometre

Toplam (direkt ve difüz) güneş ışınlamını ölçmek için kullanılır. Üzerine, direkt güneş ışınlamını engelleyecek metal bir bant takılarak yalnızca difüz güneş ışınlamı ölçümü de yapılabilir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Piranometre [7].

2.6.2. Pirheliometre

Direkt güneş ışınlamını ölçmek için kullanılır. Bu cihaz; güneş izleyici sistem ile birlikte güneş ışınlamını sürekli dik alacak şekilde yerleştirilerek kullanılır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Pirheliometre [8].

2.6.3. Pirradyometre

Direkt, difüz ve yansıtılmış güneş ışınlamalarının bileşenlerinin tümünü ölçen cihazdır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Pirradyometre [9].

2.6.4. Solarmetre

Direkt güneş ışınlamını ölçer (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Solarmetre [10].

2.7. GÜNEŞ GEOMETRİSİ

Güneş ışınları ile yeryüzündeki çeşitli düzlemlerin yaptığı açılar güneş geometrisini oluşturur. Bunlar; deklinasyon, saat, zenit, azimut, güneş yükseklik ve geliş açılarını içerir.

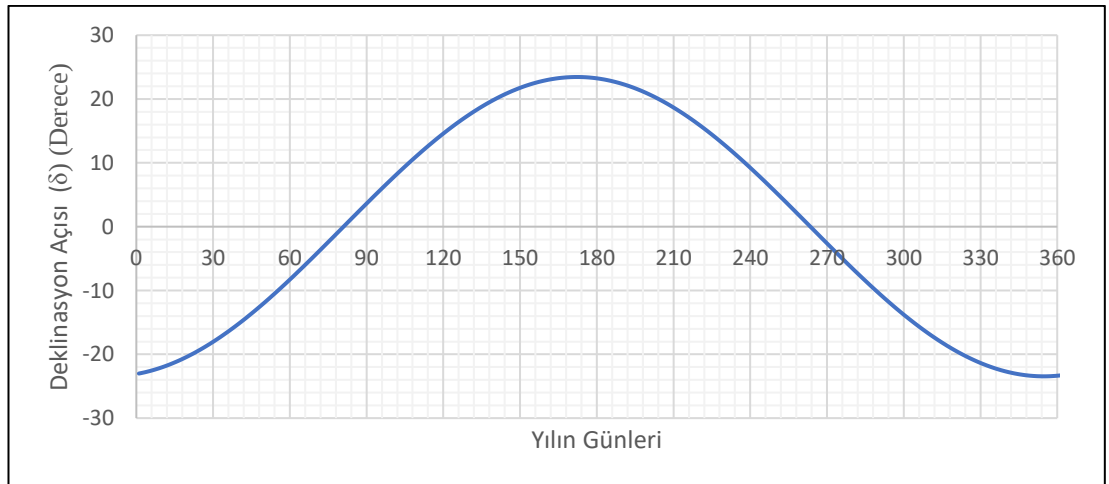
2.7.1. Deklinasyon Açısı (δ)

Aylara ve mevsimlere göre güneş ışınlarının dünyaya geliş açısına “deklinasyon açısı” denir (Şekil 2.9). Bu açı; 21 Haziran’da $23,45^\circ$ en yüksek değeri ve 21 Aralık’ta $-23,45^\circ$ en düşük değeri alır. Deklinasyon açısı; dünyanın kendi çevresinde ve güneşin çevresinde dönüşü sırasında oluşan açıdır. Güneş ışınlarının öğle vakti dik olarak alındığı bir bölge ile ekvator arasındaki enlem derecesi farkı da deklinasyon açısının bir başka tanımıdır [2].

Deklinasyon açısı (δ); “Cooper eşitliği” olarak bilinen Eşitlik 2.2 ile hesaplanabilir [11].

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (2.2)$$

Eşitlikte n; hesap yapılacak gün sayısıdır.



Şekil 2.9. Deklinasyon açısının yılın günlerine göre değişimi [12].

Deklinasyon açısı negatif değerde iken güney yarımkürede yaz mevsimi yaşanmaktadır ve bu durum 23 Eylül-21 Mart tarihleri arasında gerçekleşmektedir. Deklinasyon açısı pozitif değerde iken kuzey yarımkürede yaz mevsimi yaşanmaktadır ve bu durum 21 Mart-23 Eylül tarihleri arasında gerçekleşmektedir. Gün uzunluğu ve güneşin doğuş-batış saatleri deklinasyon açısına bağlı olarak hesaplanabilir. Kuzey yarımkürede kış olduğunda deklinasyon açısı negatif olur. Dolayısıyla güneş, kuzey yarımkürede kış olduğunda ufka daha yakın bir yol izler. Bu açı; dikkate alınan bir gün için sabit kabul edilebilir. En yüksek değeri $23,45^\circ$ olup 21 Haziran'da gerçekleşir; en düşük değeri $-23,45^\circ$ olup 21 Aralık'ta gerçekleşir [2].

2.7.2. Saat Açısı (w)

Dünyanın kendi eksenini etrafında öğleden önce negatif, öğleden sonra pozitif olmak üzere, saatte 15° dönmesi nedeniyle yerel meridyenin doğusu ve batısı yönünde güneşin açısal yer değiştirmesi olarak ifade edilebilir. Güneş saat açısının hesaplanması için yerel saat kullanılır [2].

Saat açısı Eşitlik 2.3 ile belirlenir [13].

$$w = 15x(GS - 12) \quad (2.3)$$

Burada GS; güneş saatidir.

2.7.3. Zenit Açısı (Ψ)

Yatay yüzey ($\beta = 0$) için güneş geliş açısıdır. Yatay düzlemin normali ile doğrudan güneş ışıınımı arasındaki açıdır; yani, yatay düzlem için tanımlanan güneş geliş açısıdır. Zenit açısı güneşin hareketine göre 0° 'den 90° 'ye kadar değişebilir. Zenit açısı; güneş doğarken ve batarken yaklaşık 90° iken, öğlen vakti 0° 'ye eşittir veya çok yakındır [2].

Zenit açısı Eşitlik 2.4 ile ifade edilebilir [14].

$$\psi = 90 - \alpha \quad (2.4)$$

Burada α ; güneş yükseklik açısıdır.

Zenit açısının enlem açısına bağlı olarak hesaplanması için Eşitlik 2.5 kullanılır [13].

$$\psi = \cos^{-1}[\sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(w)] \quad (2.5)$$

Eşitlikte δ deklinasyon açısıdır, φ enlem açısıdır ve w saat açısıdır.

2.7.4. Güneş Yükseklik Açısı (α)

Yatay düzlem ile doğrudan güneş ışıınımı arasındaki açıdır.

Güneş yükseklik açısı Eşitlik 2.6 ile hesaplanır [14].

$$\alpha = 90 - \psi \quad (2.6)$$

Yerel yatay düzlem ile güneşin herhangi bir anda bulunduğu noktaya doğru varsayılan çizgi arasındaki açı güneş yükseklik açısıdır.

Güneş yükseklik açısı, enlem açısına bağlı olarak Eşitlik 2.7 ile belirlenebilir [13].

$$\alpha = \sin^{-1}[\sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(w)] \quad (2.7)$$

Eşitlikte; δ deklinasyon açısıdır, φ enlem açısıdır ve w saat açısıdır. Gündoğumu ve günbatımında güneş yükseklik açısı sıfırdır. Öğle vaktinde ise bu açı yaklaşık 90°'dir. Güneşin doğuş ve batış zamanları, güneş batış saat açısı ile bulunur [2].

Güneş batış saat açısı Eşitlik 2.8 ile hesaplanır [13].

$$w_s = \cos^{-1}[-\tan(\delta)\tan(\varphi)] \quad (2.8)$$

Eşitlikte; δ deklinasyon açısıdır ve φ enlem açısıdır. Güneşin batış saati, yukarıdaki eşitlikten derece olarak bulunur. Bulunan derece 15 ile bölünerek, güneşin yerel öğle saatinden kaç saat sonra battığı bulunur. Bulunan sayının, 12'ye göre saat ibresinin tersi yönde alınması ile güneşin doğuş zamanı bulunur. Güneş öğle vakti ile güneşin doğuşu ve batışı arasındaki süre aynıdır. Sürenin aritmetik toplamı, günün toplam uzunluğunu verir. Gün uzunluğu Eşitlik 2.9 kullanılarak da bulunabilir [2]:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}[-\tan(\delta)\tan(\varphi)] = \frac{2}{15} w_s \quad (2.9)$$

Eşitlikte; δ deklinasyon açısıdır, φ enlem açısıdır ve w_s güneş batış saat açısıdır [2].

2.7.5. Güneş Azimut Açısı (γ_s)

Herhangi bir bölgede ve zamanda, güneşe doğru uzandığı varsayılan doğrunun yatay düzlemdeki izdüşümü ile güney doğrultusu arasındaki açıdır. Güneyden batıya doğru pozitif, doğuya doğru negatif kabul edilebilir.

Azimut açısı; Eşitlik 2.10 ile belirlenebilir [15].

$$\gamma_s = \sin^{-1} \left[\frac{\cos(\delta)\sin(w)}{\cos(\alpha)} \right] \quad (2.10)$$

Eşitlikte; δ deklinasyon açısıdır, w saat açısıdır ve α yükseklik açısıdır.

2.7.6. Yüzey Azimut Açısı (γ)

Yüzeyin normalinin yatay düzlemdeki izdüşümü ile güney doğrultusu arasındaki açıdır ve -180° ile $+180^\circ$ arasında değişebilir. Güneye bakan yüzeyler için sıfır derece; batıya bakan yüzey için (-) ve doğuya bakan yüzey için (+) değer alır [2].

2.7.7. Hava Kütlesi (HK)

Işınımın geçtiği atmosfer kütlesinin, güneş tam tepede iken ışınımın geçeceği atmosfer kütlesine oranıdır. Hava kütlesi (air mass); güneş ışınlarının herhangi bir açıda atmosferdeki geçtikleri hava kütlesinin, güneşin dik olduğu durumda atmosferden geçtiği hava kütlesine oranıdır.

Hava kütlesi; Eşitlik 2.11 kullanılarak hesaplanabilir [2].

$$HK = \frac{1}{\cos(\psi)} \quad (2.11)$$

Eşitlikte; ψ zenit açısıdır. Zenit açısının $\psi = 0^\circ$ ve $\psi = 48^\circ$ karşılık gelen HK=1 ve HK=1,5 değerleri, PV teknolojisi ile ilgili çalışmalarda yaygın olarak kullanılır [2].

2.7.8. Geliş Açısı (θ)

Direkt güneş ışınımı ile yüzeyin normali arasındaki açı, “güneş geliş açısı” olarak adlandırılır. Eğik düzlemde doğrudan ışınımın geliş açısı, eğik düzlemin normali ile güneş ışınları arasındaki açıdır.

Güneye bakan eğik yüzeyler için geliş açısı; Eşitlik 2.12 ile hesaplanabilir [2].

$$\theta = \cos^{-1}[\cos(\delta)\cos(\varphi - \beta)\cos(w) + \sin(\delta)\sin(\varphi - \beta)] \quad (2.12)$$

Eşitlikte; δ deklinasyon açısıdır, φ enlem açısıdır, w saat açısıdır ve β yüzeyin eğim açısıdır.

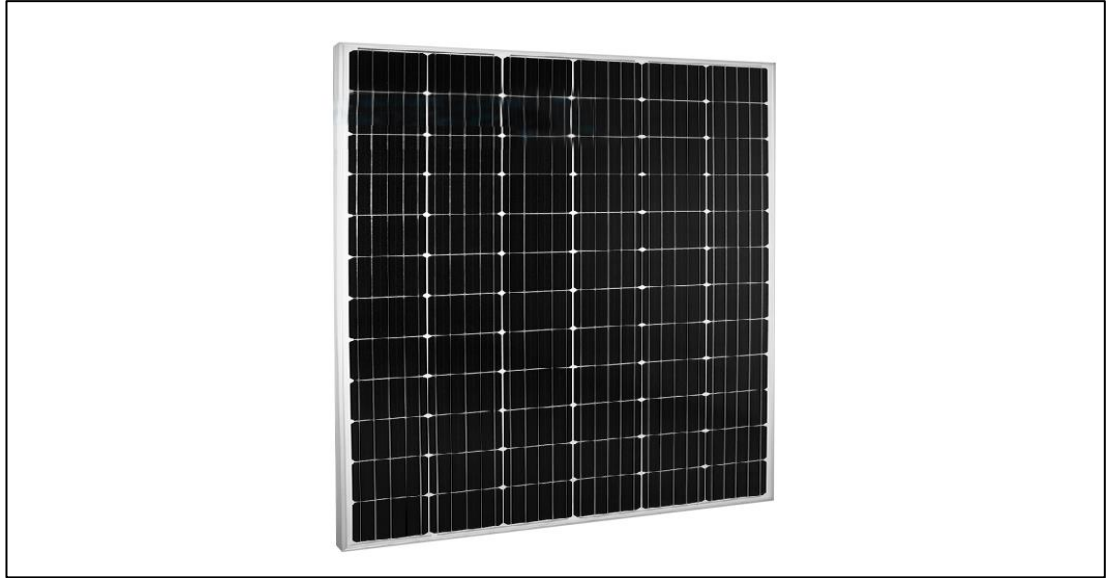
2.8. GÜNEŞ PİLLERİ VE UYGULAMALARI

Güneş pilleri; “güneş pili”, “fotovoltaik panel”, “güneş paneli” veya “solar panel” gibi çok çeşitli şekillerde adlandırılır. Güneş pilleri, güneş kolektörlerinden farklı olarak çalışır. Güneş kolektörleri; güneşten gelen ışınımı toplayıp pasif veya aktif yolla ısı enerjisine dönüştürür. Güneş pilleri; fotovoltaik etkiye göre çalışır. Güneş pilleri,

yüzeyine gelen güneş ışığını (fotonu) doğrudan elektriğe dönüştüren yarı iletken maddelerdir. Güneş pillerinin üretiminde, yarı iletken silisyum hammadde olarak kullanılır. Silisyum hammadde olarak sınırsız bir kaynaktır; bununla birlikte güneş pillerinin üretiminde kullanılan saf silisyum yeterince üretilmemektedir. Dünyada yalnızca birkaç şirket saf silisyum üretebilmektedir.

2.8.1. Monokristal (Tekli Kristal) Güneş Pilleri

Bu tür güneş pillerinin verimi yaklaşık %20'dir. Ancak; polikarbon yüzey kaplamasının geçirgenliği, absorpsiyon oranı, paketleme faktörü (packing factor) gibi etkenlerin sebep olduğu kayıplar nedeniyle verimleri %15'e kadar düşer (Şekil 2.10). Verimlilik ve kalite açısından monokristal güneş pilleri en üstün olanlardır, ancak üretiminde teknik zorluklar vardır ve dolayısıyla fiyatları yüksektir; bununla birlikte uzun vadeli yatırım için en ideal olanlardır [2].



Şekil 2.10. Monokristal güneş paneli [16].

2.8.2. Polikristal (Çoklu Kristal) Güneş Pilleri

Bu güneş pillerinin ortalama verimi %15'tir. Polikarbon yüzey kaplamasının geçirgenliği, absorpsiyon oranı, paketleme faktörü (packing factor) gibi etkenlerin sebep olduğu kayıplardan dolayı uygulama verimleri %12'ye kadar düşmektedir (Şekil

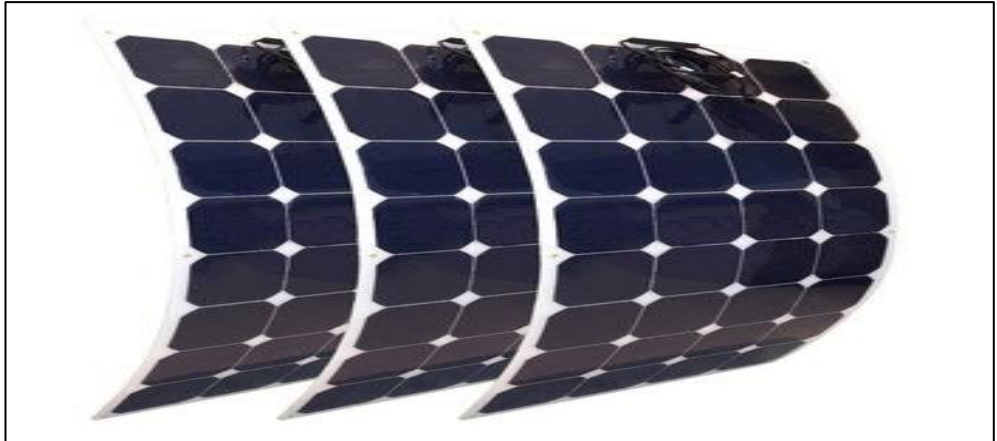
2.11). Kalite ve verimlilik açısından monokristal güneş pilleri kadar iyi değildir; buna rağmen, düşük maliyetli olmasından dolayı en fazla üretilen güneş pili türüdür [2].



Şekil 2.11. Polikristal güneş paneli [17].

2.8.3. Amorf Silisyum Güneş Pilleri

“İnce tabakalı güneş pilleri” olarak da adlandırılır ve teorik verimleri yaklaşık %10’dur. Uygulama verimleri ise %7 civarındadır. Kristal yapılı değildir; ancak incedir ve aynı tür silikon atomlarından oluşur. Amorf silikon, ışığı kristal silikonlardan daha verimli bir şekilde absorbe eder. Esnek yapılı olmasından dolayı, halı gibi yuvarlanabilir ve dolayısıyla daha küçük hacimlerde daha fazla depolanabilir (Şekil 2.12). Hafif olmasından dolayı, çatı ve bina yüzeylerinde tercih edilir. Sağlam, dayanıklı, esnek ve hafif olmasından dolayı özel uygulamalar için avantajlıdır [2].



Şekil 2.12. Amorf silisyum güneş paneli [18].

2.8.4. Güneş Pillerinin Birleştirilmesi ve Kapsüllenmesi

Güneş pillerinin voltajı 0,5 ile 0,6 V arasında değişir. Bu değer, güneş pillerinin üzerine gelen güneş ışınımına bağlıdır. Bahsedilen gerilim değeri, güneş panelinin boyutu ne olursa olsun değişmemektedir. Akım değeri, güneş pilinin yüzey alanına bağlı değişebilmektedir. Bir güneş paneli içerisinde, güneş pilleri genellikle seri olarak bağlanmaktadır. 36 hücrenin birbirine seri bağlanması ile 18-21 V çıkışlı bir panel oluşturulur. Seri piller; uygun çıkış voltajının elde edilmesi için yapılmaktadır ve bu esnada akım sabit kalmaktadır. Güneş pillerini birbirine lehimlemek için “tab” teller kullanılır; birbirine bağlı hücrelerin kendi aralarındaki bağlantısında ise “bus” teller kullanılır ve “bus” teller biraz daha kalındır. Tab tellerini pil üzerine lehimlemek için yüksek sıcaklık gerekir. Bu nedenle; “lehim tabancası” ve lehim kolaylaştırmak için çam reçineli flux tercih edilmelidir [2].

Hücreler birleştirilirken arka kısımları diğer panelin ön kısmına gelecek şekilde tab telleri kullanılır. Hücrelerin arkasından çıkan pozitif kutuplu tab telleri, diğer hücrenin negatif kutuplu ön tarafı ile lehimle birleştirilir. Lehimleme işlemi esnasında çam reçineli flux kullanılırsa, lehim teline ihtiyaç duyulmaz. Lehimleme işlemi için yüksek güçte ve sıcaklıkta bir lehim tabancasının kullanılması ve tabanca ucunun pirinç başlıklı olması önerilir.

Fabrikasyon üretimlerde, birleştirmeleri biten hücrelerin ön ve arka kısımlarına önce EVA (Etilen Vilanül Asetat) ve daha sonra arka kısımlarına TPT veya TEDLAR ile kaplama uygulanır. Panellerin ön kısmı polikarbon levha ile sarılmaktadır ve üretim işlemi, alüminyum çerçeve ile bitirilmektedir. Bu işlemlerin sonrasında paneller, bir sistem içerisinde fırınlanır; bu sistem, katmanların arasında oluşabilecek havayı absorbe etmektedir. Panellerin düzlem veya çatı üzerinde birbirine bağlanması ile “diziler” oluşturulur.

2.8.5. Epoksi Kaplama Güneş Paneli Uygulaması

Epoksi güneş panelleri ve silikon kaplı güneş panelleri, endüstriyel uygulamaların dışında yapılan güneş panelleridir (Şekil 2.13). Güneş hücrelerinin lehimlenmesi

bittikten sonra, polikarbon üzerine yerleştirilen güneş panellerinin üst kısmı şeffaf epoksi ile ince bir tabaka halinde kaplanır ve kurumaya bırakılır. Bundan sonra üzerine başka bir katman eklenmez. Üste yapılan epoksi uygulaması donduktan sonra uygun mukavemeti sağlar. Bu işlemde cam kullanılması kesinlikle önerilmez. Cam; panelin sıcaklığını yükseltir ve kaplanmış epoksi eriyerek panelin zarar görmesine neden olur. Polikarbon yerine pleksiglas (akrilik) kullanılabilir. Epoksi kaplama güneş paneli uygulaması katmanları şöyledir:

- Polikarbon
- Güneş hücreleri
- Epoksi uygulaması



Şekil 2.13. Epoksi güneş paneli [19].

2.8.6. Silikon Kaplama Güneş Paneli Uygulaması

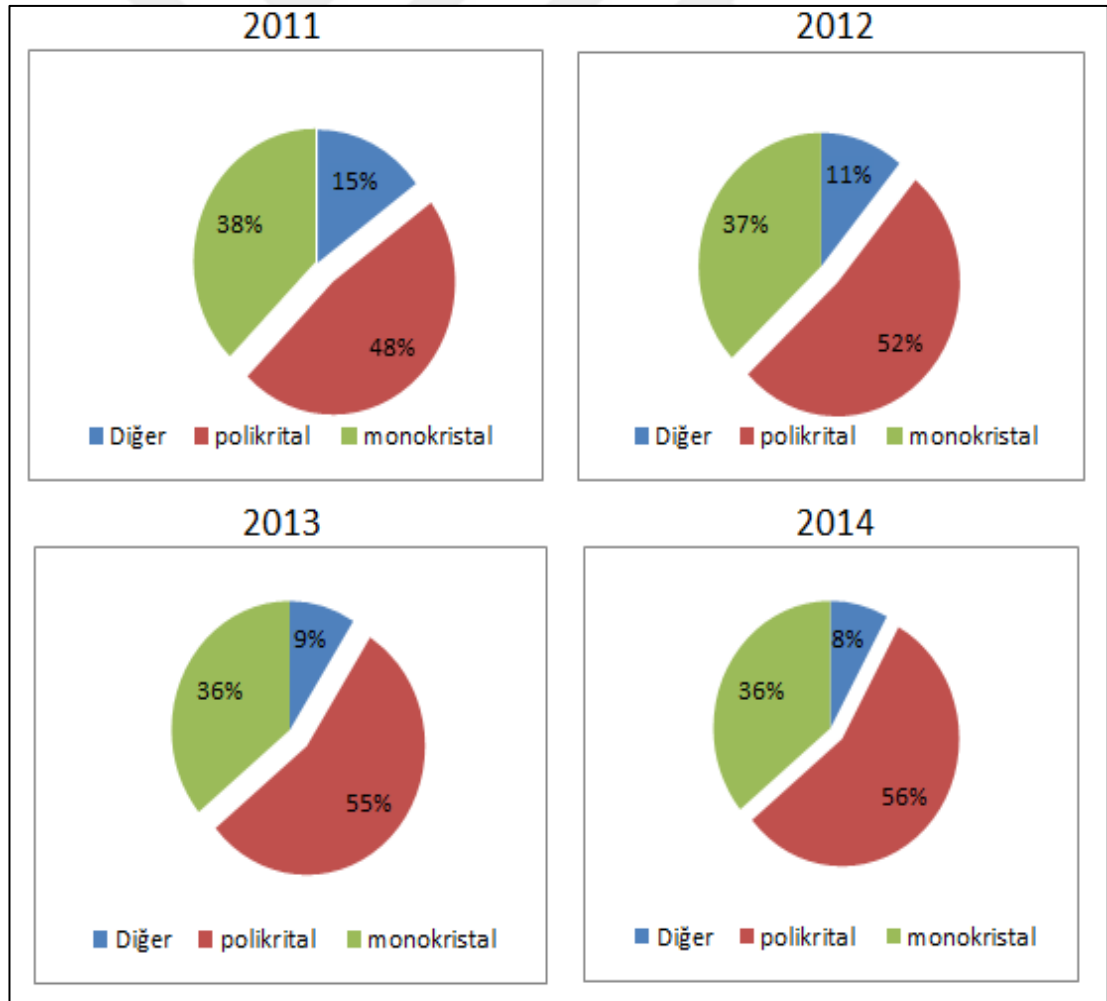
Polikarbon veya pleksiglas üzerine yerleştirilmiş olan panellerin şeffaf medikal silikon ile kaplandığı uygulama ise bir diğer uygulamadır. Kaplama kuruduktan sonra, üstü

polikarbon veya pleksiglas ile örtülür ve böylece kapsülleme sonlandırılır. İki polikarbon arasına hava girmemesi için poliüretan mastik ile kapatma yapılabilir. Silikon kaplama güneş paneli uygulaması katmanları şöyledir:

- Polikarbon
- Güneş hücreleri
- Şeffaf medikal silikonu
- Polikarbon

2.8.7. Dünyada Güneş Paneli Kullanımı

Güneş pili teknolojilerinin yıllara göre olan payları Şekil 2.14’de görülmektedir:



Şekil 2.14. Güneş pili teknolojilerinin payları [2].

Güneş panellerinin sanayide ve evsel uygulamalarda kullanılmasının çeşitli üstünlüklerinden ve sakıncalarından bahsetmek mümkündür. Günümüzde elektriksel enerji üreten makinelerin verimleri yaklaşık olarak şöyledir:

- Gaz Türbinleri: %30
- Dizel Motorlar: %35-40
- Yakıt Hücreleri: %45
- Fosil Yakıtlı Güç Santralleri: %40
- Stirling Motoru: %20
- Rüzgar Türbini: %40
- Otto Motorları (Buji Ateşlemeli Motorlar): %25-30
- Nükleer Yakıtlı Güç Santralleri: %35 [2].

Ticari olarak kullanılan monokristal güneş pillerinin verimleri %20'dir. Bu değer, güç santralleri ve türbinlerle karşılaştırıldığında düşüktür. Bununla birlikte, aşağıdaki üstünlüklerden dolayı paneller tercih edilmektedir. Güneş panellerinin üstünlükleri şunlardır:

- İşletme maliyetleri düşüktür.
- Yüksek sıcaklıklara gerek yoktur, çevre sıcaklıklarında çalışabilirler.
- Yıllık enerji çıktıları tahmin edilebilir.
- Yakıt kaynakları sonsuzdur.
- Montajı oldukça hızlı bir şekilde yapılabilir.
- Enerjinin tüketildiği yerde üretilme avantajı vardır.
- Sessiz çalışırlar.
- Hareket eden herhangi bir parçası yoktur.
- Boyutları kolayca değiştirilebilir, modülerdirler.
- Binaya entegrasyonları, binanın yapımı tamamlandıktan sonra gerçekleştirilebilmektedir.
- 30 yıla kadar garantili paneller bulunmaktadır, dolayısıyla oldukça güvenlidirler.

- Emisyon ve radyoaktif atık üretmezler, bu nedenle küresel ısınmaya etkileri yoktur [2].

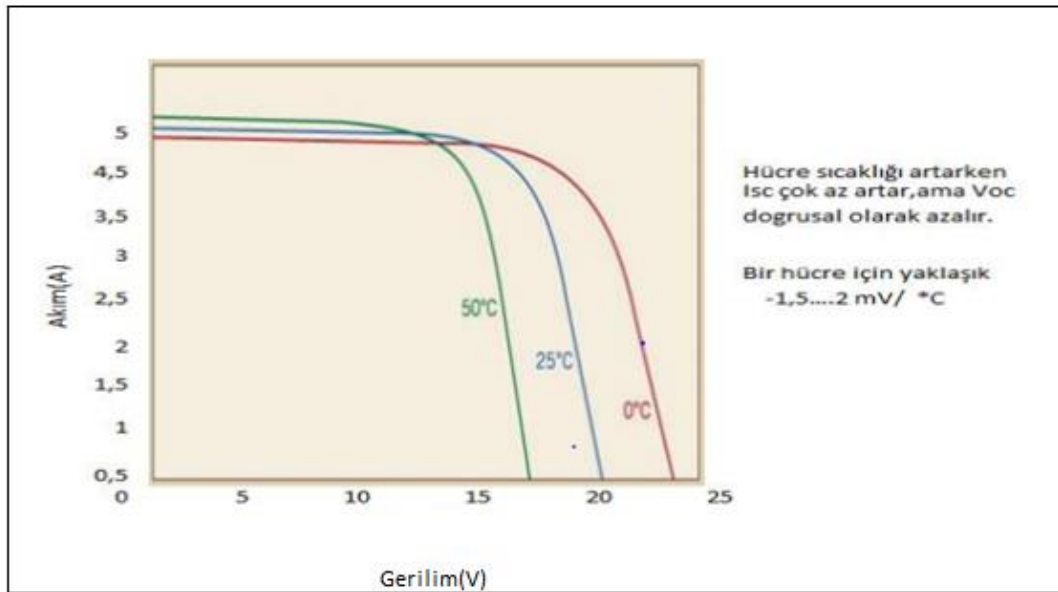
Güneş pillerinin sakıncaları şunlardır:

- İlk yatırım maliyetleri yüksektir.
- Enerjinin bataryalarda depolandığı sistemler oldukça verimsizdir.
- Şebekeye paralel (on-grid) sistemlerin kullanımı, yasal düzenleme ile mümkün olmaktadır.
- Saatlik veya günlük enerji çıktıları öngörülemez.
- Yakıt kaynağı difüzyondur [2].

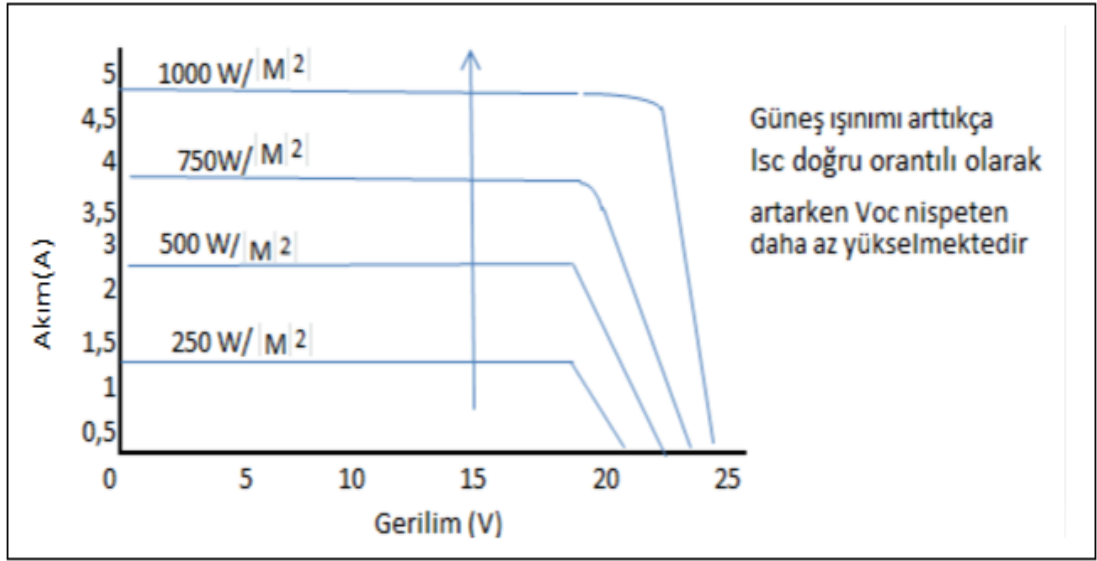
2.8.8. Güneş Pili Verimlerinin Sıcaklık ve Işınıma Bağlı Değişimi

Hücre sıcaklığına ve üzerlerine gelen ışınmaya bağlı olarak, güneş pillerinin verimi değişir.

Fotovoltaik panellerde sıcaklığa bağlı olarak akım ve voltajın değişimi Şekil 2.15’de ve güneş ışınlamına bağlı olarak akım ve voltajın değişimi Şekil 2.16’da görülmektedir:



Şekil 2.15. Sıcaklığa bağlı olarak akım ve voltajın değişimi [2].



Şekil 2.16. Işınmaya bağlı olarak akım ve voltajın değişimi [2].

Yukarıdaki şekle göre, hücre sıcaklığının akım üzerinde etkisi yoktur ve her bir derece sıcaklık artışına bağlı olarak gerilim 1,5-2 mV'luk bir kayba uğramıştır [2].

2.9. BATARYALAR

Elektrik enerjisini kimyasal enerji olarak depolayan cihazlardır. Bataryalar, çok sayıda amaç için elektrik sağlar. Hareket eden parçaları yoktur ve sessizdirler. Bataryaların üstünlükleri aşağıdaki gibidir:

- Taşınabilir bir elektrik enerjisi kaynağı sağlarlar. Herhangi bir enerji hattına erişilemeyen yerlerde kullanabilmek için bu enerji oldukça önemlidir.
- Çok büyük güç değerlerini kısa sürelerde üretebilirler.
- Kullanılan güç kaynağı kesilirse, güvenilir ve acil bir güç kaynağı olurlar; böylece işlemin devamlılığı sağlanır.
- Normal bir besleme sisteminde filtre gibi davranırlar. Laboratuvarlar ve diğer özel amaçlar için ayrı ve bağımsız bir besleme kaynağı olarak davranırlar. Böylece saf bir doğru akım kaynağı sağlarlar.

Bunun gibi kendilerini farklı kılan özelliklerinden dolayı bataryalar çok sayıda uygulama için oldukça kullanışlıdır. Günümüzde PV sistemlerinde kurşun-asit

(PbA) ve nikel-kadmiyum (NiCd) piller yaygın olarak kullanılır. Yüksek sıcaklıktaki sodyum-kükürtlü piller ve farklı redoks akışlı pil türleri gibi gelişmekte olan bazı pil teknolojileri, yenilenebilir enerjinin depolanması için uygun olabilir. Bataryalar; gün boyunca üretilen ve yükler tarafından kullanılmayan enerjiyi depolar. Üretilen bu enerji; geceleri ya da hava şartlarının uygun olmadığı günlerde kullanılabilir. Fotovoltaik sistemlerdeki pillerin daha güçlü ihtiyaçları karşılaması beklenir; çünkü genel olarak şarj edilebilir özelliktedirler. En sık kullanılan klasik kurşun asitli (PbA) piller, özellikle derin deşarj gerektiren PV sistemler için üretilir. Nikel metal hidrür (NiMH) veya nikel-kadmiyum (NiCd) gibi diğer pil türleri, taşınabilir cihazlar dışında nadiren kullanılır. Hermetik piller; genel olarak jel formunda bir elektrolitten oluşur. Bu tür piller bakım gerektirmez. Sıcaklık, şarj/deşarj döngüleri ve diğer etkenlere bağlı olarak, tipik güneş sistem pillerinin ömrü 3 yıldan 5 yıla kadar uzar. Pilin şarj/deşarj edilmesi ne kadar sık olursa kullanım ömrü o kadar kısalmır. Batarya kapasitesi, en önemli batarya parametresidir ve amper-saat (Ah) ile ölçülür. Batarya kapasitesi, deşarj akımına göre değişir; deşarj akımı ne kadar yüksek olursa kapasite de o kadar azalır veya tersi olur. Bataryaların şarj edilmesi, birçok farklı yöntem kullanmak suretiyle olur. Bunlar; “sabit gerilim yöntemi” veya “sabit akım yöntemi” gibi yöntemlerdir. Şarj yöntemi batarya türüne bağlıdır. Klasik otomobil bataryalarına kıyasla, güneş sistemlerinde kullanılan bataryaların fiyatları daha yüksektir. Ancak güneş sistemlerinde kullanılan bataryalar, ömürlerinin uzun olması ve deşarj oranlarının düşük olması nedeniyle avantajlıdır. Dolayısıyla; fotovoltaik sistemlerde kullanılan bataryaların bakım ve onarım maliyetleri daha düşüktür. PV sistemlerde kullanılan bataryaların özellikler şöyledir:

- Kendi kendine düşük deşarj
- Düşük deşarj oranında yüksek kapasite
- Yüksek yaşam döngüsü
- Uygun yatırım maliyeti
- Farklı şarj durumlarında yüksek Wh ve Ah verimi
- Geniş işletme sıcaklığı aralığı
- Döngüsel deşarj koşullarında iyi güvenilirlik
- Uzun ömür, sağlam tasarım ve düşük bakım ihtiyacı [2].

2.9.1. Batarya Kapasitesi

Bir bataryanın enerji sunma yeteneğine “batarya kapasitesi” denir. Batarya kapasitesi çoğunlukla amper-saat (Ah) cinsinden ifade edilir. Bunun yanında, bir bataryanın kapasitesini etkileyen diğer etkenler dikkate alınmadığında 200 Ah gibi basit bir sayı çok az önem taşır. Kapasiteyi etkileyen birincil etkenler şunlardır:

- Özgül ağırlık
- Son voltaj
- Deşarj oranı
- Sıcaklık [2].

2.9.2. Batarya Seçimi

Batarya seçimi için çoğu durumda en düşük fiyat esas alınır. Bunun sonucunda, yetersiz ve yanlış batarya seçilerek sistemin güvenilirliği ve dayanıklılığı azaltılır. Bir PV batarya seçimi için birçok yaklaşım izlenebilir. Pil voltajı ve amper saatte en yüksek akım tahliye kapasitesi, deşarj hızının etkisi, aşırı sıcaklıkta performans, kendi kendini boşaltma oranı, batarya ömrü, bakım gereksinimleri, birim hacim başına Wh ve Wh başına maliyet, ağırlık başına Wh gibi etkenler optimum batarya seçimi için önemlidir. Geleneksel olarak, çoğu PV sistemde bir kurşun-asit otomobil aküsü kullanılır. Son yıllarda, farklı tasarımlarda endüstriyel kurşun-asit bataryalar da kullanılmaktadır. Bununla birlikte; nikel-kadmiyum bataryalar, kurşun-asit bataryalara göre daha iyi performans özelliklerine sahiptir. Tamamen bakım gerektirmeyen çalışma şartlarından ve daha uzun hizmet ömründen dolayı diğer alkalın batarya sistemleri de PV uygulamaları için kurşun-asit bataryalarla yarışabilmektedir.

2.9.3. PV Uygulamalarında Sıkça Kullanılan Bataryalar

Kurşun-asit batarya; PV uygulamaları için en yaygın kullanılan batarya türüdür. Şimdilik yalnızca nikel-kadmiyum bataryalar, PV uygulamaları için kabul edilebilir performans özelliklerine, kullanım ömrüne ve uygun maliyetlere sahip olsa bile alkalın

bataryalar da PV uygulamaları için uygundur. PV sistemlerinde çoğunlukla otomotiv tipi ve jel bataryalar kullanılır. PV sistemlerinde otomotiv aküleri, sokak aydınlatması gibi uygulamalarda kullanılır. Otomotiv akülerinin 2-4 yıl ömürleri vardır. Jel aküler, tamamen bakımsız aküler olup gözetimsiz PV sistemleri için oldukça uygundur [2].

2.10. GÜÇ DENKLEMİ İLE VOLTAJ VE AKIM ARASINDAKİ BAĞINTI

2.10.1. Güç

Güç; watt cinsinden ölçülür ($1000W=1kW$). Watt; birim zamandaki enerji miktarının ölçüsüdür. Enerji akışının birim zamandaki değerine “güç” denir ($1Watt= 1 Joule/s$) [2].

2.10.2. Enerji

Gücün zaman ile çarpımıdır, kWh olarak ölçülür. PV sistemlerinde, gücün birimi Watt’tır, enerjinin değeri kilowatt-saattir ve gerçek farkı oluşturan değer de budur. Gücün güneşlenme süresi ile çarpımı sonucu gün boyunca ve buradan da yıl boyunca elde edilen enerji kWh/yıl olarak bulunacaktır. Güç denklemi nispeten basittir ve Ohm kanunu ile alakalıdır. Akım ve voltajın güç ile ilişkisi Ohm yasasının bir uzantısıdır.

Ohm yasası $P = I \cdot V$ şeklindedir; burada, P güçtür (W), I akımdır (Amper) ve V (Volt) gerilimdir.

2.11. GÜNEŞ PANELLERİ VOLTAJ VE AKIM ÖLÇÜMLERİ

Güneş panelleri için panel arkası etiketlerde okunabilecek parametreler şunlardır:

- V_{oc} : Açık devre voltajı
- V_{mp} : Maksimum güç voltajı
- V_{nom} : Nominal voltaj
- I_{sc} : Kısa devre akımı
- I_{mp} : Maksimum güç akımı.

2.11.1. Açık Devre Voltajı (V_{oc})

Açık devre voltajı; basit bir voltmetre ile veya multimetre ile ölçülmektedir. Voltmetrenin veya multimetrenin panele paralel bağlanması ile panel hiçbir yüke bağlanmadan ölçüm yapılabilir. Açık devre voltajının en yüksek değeri 48,3 voltur [2].

Bir modül içerisinde birbirine seri olarak bağlanan hücre sayısına göre ölçülebilecek açık devre voltajları Çizelge 2.2’de verilmiştir:

Çizelge 2.2. Seri bağlı hücre sayısına bağlı olarak açık devre voltajı ve maksimum güç voltajı değerleri [2].

Nominal Voltaj, V_{nm}	Açık Devre Voltajı, V_{oc}	Maksimum Güç Voltajı, V_{mp}	Seri Bağlı Hücre Sayısı
12	21	17	36
18	30	24	48
18	33	26	54
20	36	29	60
24	42	35	72

2.11.2. Maksimum Güç Voltajı (V_{mp})

Maksimum güç voltajı; modül maksimum güçte (standart test koşullarında) iken ölçülen değerdir. Maksimum güç voltajının ölçülmesi için modül maksimum güçte ve maksimum yükte olmalıdır. Batarya yükleri ve diğer yükler değişkenlik gösterebileceği için, modül sisteme bağlı olsa bile bu değer kolay bir şekilde ölçülemez. Her bir hücre; standart test koşullarında çoğunlukla 0,5V üretir. Pratik olarak V_{mp} , hücre sayısına göre buradan hesaplanabilir. Maksimum güç voltajı en yüksek 39,8 voltur [2].

2.11.3. Nominal Voltaj (V_{nom})

Şebekeden ayırık (off-grid) sistemlerde kullanılan şarj regülatörü, panelden gelen voltajın regülasyonundan sonraki durumudur ve bu yönüyle MPPT cihazlarına benzer.

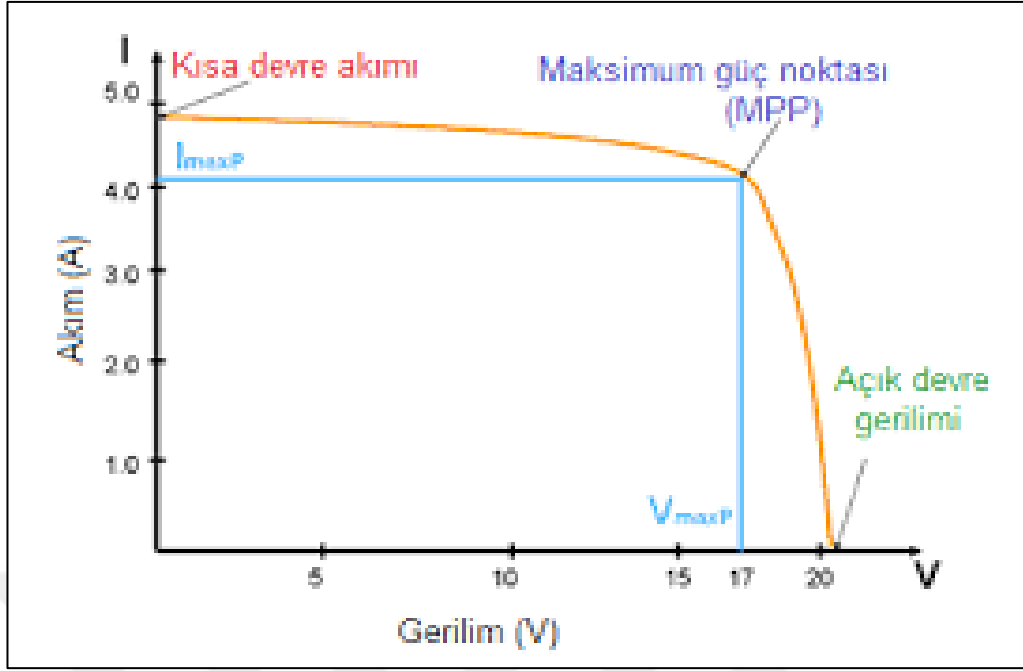
Birçok sistem 12-14 V_{nom} voltaja sahiptir ve 36-72 seri bağlı hücreden oluşur. Batarya ya da akünün seri veya paralel olarak gruplandırılması, 12 veya 24 volt nominal çıkışlı paneller tercih edildiğinde mümkün olmaktadır. Nominal voltaj; şarj regülatörünün batarya çıkışından ölçülebilir. Bunun için güneş modülünün yükte olması gerekir; aksi halde, yanlışlıkla batarya voltajı ölçümü yapılacaktır. 12 voltluk sistemlerde nominal voltaj 12-13 V_{nom} arasında değişmektedir [2].

2.11.4. Kısa Devre Akımı (I_{sc})

Modül herhangi bir yüke bağlanmadan bir voltmetre veya multimetrenin modüle seri bağlanması sonucu, kısa devre akımı ölçülür. Yani; modülün negatif ve pozitif uçları arasına multimetre seri olarak bağlanır ve uçlar birleştirilir. Kısa devre akımının en yüksek değeri 5,8 A'dır [2].

2.11.5. Maksimum Güç Akımı (I_{mp})

Güneş modülü tarafından standard test koşullarında maksimum yükte çekilen akımdır ve panel etiketlerinden okunabilir. Çevre şartlarında modül üzerinden ölçülemez. Bu nedenle, test şartlarında elde edilen değerler kullanılır. Uygulamada bir modül üzerinden; açık devre voltajı (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}) değerleri okunur (Şekil 2.17). Maksimum güç akımı (I_{mp}) ve maksimum güç voltajı (V_{mp}), modüllerin standard test koşullarında elde edilen değerler olduğundan panel etiketlerinden okunabilir ve teorik olarak ulaşılabilecek en üst sınırı gösterir.



Şekil 2.17. Akım ve voltaj arasındaki ilişkinin grafiksel ifadesi [20].

2.12. GÜNEŞ PANELLERİNDE SICAKLIK İLE MEYDANA GELEN VERİM KAYIPLARI

Güneş panellerindeki en önemli kayıplar sıcaklık artışı ile olmaktadır.

Sıcaklık artışından kaynaklanan verim kayıpları; Eşitlik 2.13 ile hesaplanır [2].

$$\eta_h = \eta_{stk} [1 - \beta(T_h - 25)] \quad (2.13)$$

Burada; η_h hücre verimidir, η_{stk} standard test koşullarındaki verimdir, β sıcaklık katsayısıdır ve T_h ise ölçülen an için PV hücre sıcaklığıdır. β değeri güneş pilinin yapısına bağlı olarak 0,002 ile 0,0045 arasında değişir [2].

Bu durumda modül verimi, hücre sıcaklığına bağlı olarak; Eşitlik 2.14 ile hesaplanabilir [2].

$$\eta_m = \eta_h \cdot \tau_g \cdot \alpha_h \cdot PF \quad (2.14)$$

τ_g : Güneş panelinin geçirgenlik katsayısı (polikarbon yüzey kaplaması için 0,90 alınabilir)

α_h : Güneş ışınımının absorpsiyon oranı (yaklaşık olarak 0,95 alınabilir)

PF: Paketleme faktörü (packing factor, genellikle 0,90 olarak alınabilir) [2].

Paketleme faktörü (packing factor); bir güneş paneli içerisindeki hücrelerin alanının, panel alanına oranı olarak ifade edilir.

Paketleme faktörü; Eşitlik 2.15 ile hesaplanabilir [2].

$$PF = \frac{\text{Toplam hücre alanı}}{\text{Toplam modül alanı}} = \frac{c.d.hücre sayısı}{a.b} \quad (2.15)$$

Açık devre voltajı, doldurma faktörü ve kısa devre akımlarına bağlı olarak modül verimi için kullanılan diğer ifade Eşitlik 2.16'daki gibidir [2].

$$\eta_m = \frac{P_{mak}}{A_m \cdot I(t)} \quad (2.16)$$

Eşitlikte P_{mak} , panelden elde edilecek maksimum güçtür ve Eşitlik 2.17 ile hesaplanır [2].

$$P_{mak} = DF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc} = I_{mp} \cdot V_{mp} \quad (2.17)$$

Eşitlikte DF, doldurma faktörüdür. Doldurma faktörü; Eşitlik 2.18 ile hesaplanır [2].

$$DF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.18)$$

Buradaki büyüklükler şu şekildedir:

- A_m : Panel alanı (m^2)
- $I(t)$: Güneş ışınımı (W/m^2)

- DF: Doldurma faktörü. Aynı zamanda “açı faktörü” olarak da bilinir ve silisyum güneş panelleri için 0,78 alınabilir.
- V_{mp} : Maksimum voltaj (V)
- I_{mp} : Maksimum akım (A)
- V_{oc} : Açık devre voltajı (V)
- I_{sc} : Kısa devre akımı (A) [2].

Bir güneş panelinden elde edilebilecek elektriksel kazanç; Eşitlik 2.19 ile hesaplanabilir [2].

$$\dot{E}_{net} = \eta_m \cdot A_m \cdot I(t) \quad (2.19)$$

Buradaki büyüklükler aşağıdaki gibidir:

- η_m : Modül verimi
- A_m : Modül yüzey alanı (m^2).

Bir modülden elde edilebilecek toplam güç; Eşitlik 2.20 ile hesaplanır [2].

$$P_m = P_{stk} [1 - \beta(T_h - 25)] \quad (2.20)$$

Buradaki büyüklükler aşağıdaki gibidir:

- $P_{stk} = P_{mak}$: Standart test koşullarındaki panel gücü (W)
- η_{ref} : Standart test koşullarındaki panel verimi (%)
- T_h : Çalışma şartlarındaki hücre sıcaklığı ($^{\circ}C$).

Sistemden elde edilecek yıllık gücü bulmak için; Eşitlik 2.21 kullanılabilir [2].

$$P_{yıl} = P_m \cdot GS_{ort} \cdot \eta_{inv} \cdot 365 \quad (2.21)$$

Buradaki büyüklükler aşağıdaki gibidir:

- P_m : Kurulu güç (kW)
- GS_{ort} : Yıllık ortalama güneşlenme süresi (saat)
- η_{inv} : İnvertör verimi (%).

2.13. PV/T SİSTEMLER

Bir PV/T kollektör yalnızca elektrik enerjisi üretmez; bunun yanında ısı emici bir sistem olarak da işlev görür. Bu sistemlerde elektriksel güç ve ısı enerjisi aynı anda üretilir. Elektrik enerjisi ile ısı enerjisini bir arada elde etmek oldukça mantıklıdır; çünkü, bu iki enerji türüne sürekli ihtiyaç vardır ve her ikisi birbirini tamamlar. PV modüllerinin düşük sıcaklıkta çalıştırılması gerekir, çünkü PV hücrenin elektriksel verimliliği yeterli seviyede tutulmalıdır. Bu; PV/T sistem uygulamalarında elektrik üretiminin ana öncelik olması nedeniyle gereklidir. Bu gereklilik, PV/T sisteminin çalışma alanını sınırlar. Dolayısıyla; elde edilen ısı binalarda su ısıtma, ön ısıtma ve hacim ısıtma gibi uygulamalarda kullanılabilir. Su soğutmalı PV/T sistemlerin uygulamaları şimdiye kadar sınırlı kalmıştır; ancak, evlerde su ısıtma için pratik sistemlerdir. Hava soğutmalı PV/T sistemleri binalarda, çoğunlukla bina dış cephelerine bütünleşik biçimde veya eğimli çatılarda kullanılır. Bu sistemler; yaz aylarında havalandırma ihtiyaçlarını, kışın ise ısıtma ihtiyaçlarını karşılayabilir. Aynı zamanda, aşırı ısınmayı engelleyerek elektrik çıkışını yeterli düzeyde tutar.

2.13.1. Hava Soğutmalı PV/T Sistemler

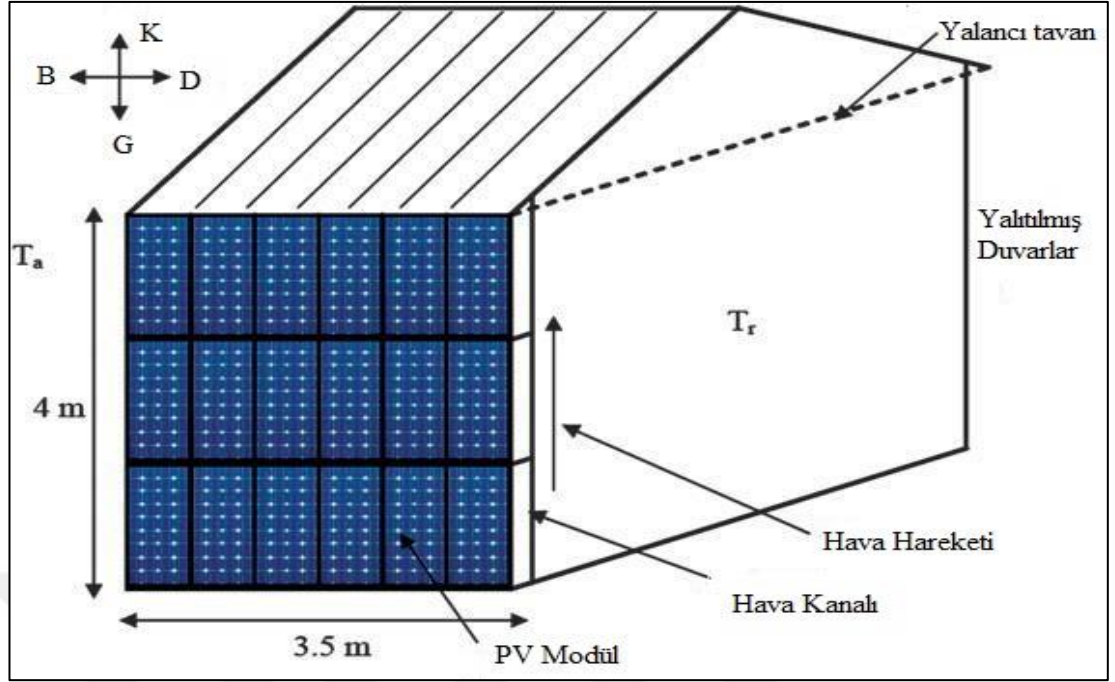
Hava soğutmalı PV/T sistemler yoğun olarak, binalara entegre PV (BEPV) sistemler olarak kullanılır. BEPV uygulamalarında PV modül ile yapı malzemesi arasındaki hava boşluğunda dolaştırılan hava PV modülü soğutmak için kullanılır. Böylece ön ısıtma yapılmış olan bu hava, binanın ısıl ihtiyacını karşılamak için kullanılabilir. İşçilik maliyetlerini dengeleyerek ilk kurulum maliyetlerinin düşürülebilmesi ve yapı malzemesi kullanımı, bina cephesine bütünleşik sistemlerin üstünlüklerinden birisidir. Bununla birlikte, BEPV sistemleri; diğer güneş enerjisi sistemleri seçeneklerine göre daha estetik bir görünüme sahiptirler ve genellikle bina dış cephelerine daha iyi uyum sağlar. Bu üstünlüklerinden ötürü BEPV, PV sanayisinin en hızlı gelişen dallarından birisidir. Geçirgen güneş panelleri; aydınlatma, sıcaklık kontrolü ve güç üretimi gibi

işlemler için kullanılır ve geleneksel pencere camlarının yerini alır. Geçirgen güneş pilleri; görünür ışığın kendi içinden geçmesine izin verir ve elektrik üretmek için UV ışınlarını kullanır (Şekil 2.18). Geleneksel güneş pillerinin çoğu elektrik üretmek için kızılötesi ışığı ve görünür ışığı kullanır.



Şekil 2.18. Çatıya entegre edilmiş geçirgen PV modüller [21].

BEPV sistemlerinde de PV/T hava kolektörlerine benzer şekilde, havanın ısı transferi ısıtım performansı için çok önemlidir. PV sistemleri için ısıtım verimlerinin %14-%60 arasında olduğu bulunmuştur. Aralığın geniş olmasının sebebi, hava hızı artınca ısı transferinin de artabilmesidir. Hava soğutmalı PV/T uygulamalarının birçoğunda hava; sistemin ısı yalıtımı arasından ve PV modüllerin arka yüzeyinden dolaştırılır. Diğer bazı uygulamalarda ise hava seri veya paralel akışlı olarak dolaştırılır ve bu işlem PV modüle bütünleştirilen kanallar sayesinde yapılır (Şekil 2.19). Bu hava; “doğal” veya “fanlı” olarak sistemde dolaştırılabilir [2].



Şekil 2.19. Hava soğutmalı bir BEPV/T sistemi [21].

BEPV/T sistemlerinde rüzgar çok önemli bir etkindir ve hava hızları çoğunlukla düşüktür. Kanal tasarımı ve sistemde dolaştırılan havanın hızı, modül verimleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu sistemlerde ısı transferini arttırmaya yönelik düşük maliyetli ve etkili yöntemler araştırılmalı ve uygulanmalıdır. Soğutma yapılmayan sistemlere kıyasla, bu sistemlerin elektriksel verimleri yaklaşık %10 daha iyidir [2].

PV modülünün geçirgenlik-emisililik değeri temelli olarak bir BEPV/T sisteminin ısı verimi; Eşitlik 2.22 ile hesaplanır [2].

$$\eta_{\text{ısı}} = F_t \left((PF \cdot \tau \alpha_{PV}) + (1 - PF) \tau \alpha_T \right) - F_t \cdot U_{\text{kayıp}} \cdot \frac{T_{\text{çıkış}} - T_{\text{çevre}}}{I(t)} \quad (2.22)$$

Eşitlikteki büyüklükler şöyledir:

- PF: PV modülün paketleme faktörü
- F_t : Isı taşınım faktörü
- $\tau \alpha_{PV}$: PV modülün geçirgenlik-emisililik değeri

- $\tau\alpha_T$: Tedların geçirgenlik-emcilik değeri
- $U_{kayıp}$: Toplam kayıp katsayısı.

2.13.2. Su Soğutmalı PV/T Sistemler

Su soğutmalı PV/T sistemler; PV modüllerin ısısının, dolaştırılan suya aktarıldığı sistemlerdir (Şekil 2.20). Bu sayede hem PV modüllerinin elektriksel verimlerinin düşmesi önlenir hem de ısınan bu su, düşük sıcaklık gerektiren evsel uygulamalarda kullanılabilir. Hava soğutmalı PV/T sistemlerine kıyasla, su soğutmalı PV/T sistemler daha yüksek performansa sahiptir. Sistemlerin indirekt ısıtmalı olması önerilir; çünkü kışın panellerin arkasındaki ısı değiştiricilerdeki su donarak panellere zarar verebilir ve bu tehlikenin önlenmesi gerekir.



Şekil 2.20. Su soğutmalı bir PV/T sistemi [2].

PV/T kollektör sisteminin üstünlükleri şöyledir:

- Hibrit bir PV/T sisteminin kurulduğu alandan daha fazla ısı ve elektrik enerjisi elde edilir. Evlerin çatı alanları genellikle küçük olduğundan bu önemli bir özelliktir.
- Bir hibrit kollektör, çatıda mimari bir bütünlük sağlar ve daha estetik bir görüntüye sahiptir; çünkü iki ayrı sistem kullanımı gerektirmez.

- Isıl kollektörlerin ve PV modüllerin birbirinden bağımsız kurulmasından çok daha az maliyetlidirler.
- Standart bir PV modüle kıyasla, hibrit PV/T modüllerin işletme sıcaklıkları çoğunlukla daha azdır. Bu nedenle elektrik üretim kapasiteleri daha yüksektir.



BÖLÜM 3

KAYNAK ARAŞTIRMASI

Sakellariou ve Axaopoulos'un 2018 yılında yaptıkları çalışmada; güçlendirilmiş bir PVT kollektör için birinci mertebe dinamik bir model, deneysel veri aracılığıyla geliştirilmiştir ve doğrulanmıştır. Model; iteratif bir süreç aracılığıyla, absorberin ortalama sıcaklığını tahmin etmek amacıyla, kollektörün enerji denge denkleminin analitik çözümünü kullanmaktadır. Toplam ısı kayıp katsayısı ve kollektör verim faktörü gibi tüm kollektörün temel parametreleri; tüm simülasyon zaman-adımı için tahmin edilmektedir, bununla birlikte, PVT'nin optik verimi, optiğin temel yasaları aracılığıyla analitik olarak hesaplanmaktadır. Simülasyon sonuçlarının; deneysel veri ile iyi uyum içerisinde olduğu bulunmuştur. Daha ayrıntılı olarak, kollektör çıkış sıcaklığı için RMS sapması; kararlı hava şartları için %0,66 olarak tahmin edilmiştir ve aralıklı kısa süreli yağmurlara sahip son derece geçici rejim koşulları için %4,22 olarak tahmin edilmiştir. Ayrıca, güç üretimi için olan farklılık; kararlı ve geçici rejim hava koşulları için sırasıyla %5,05 ve %14,91 olarak bulunmuştur. Dahası, yağmurun olmadığı ama debide ani değişimlerin olduğu kararsız hava için, modelin; su çıkış sıcaklığı için %2,06 ve güç üretimi için %4,15 RMS sapmasıyla yeterli hassasiyette olduğu bulunmuştur. Son olarak, kollektör enerji denge denklemi üzerine absorbe edicinin ısı yükünü dikkate almak suretiyle; kararlı-durum versiyonunun aksine, modelin hassasiyeti üzerine pozitif bir katkı elde edilebilir. PVT-su tabanlı bir boyutlu dinamik analitik bir modeli doğrulamak amacıyla bir deney yürütülmüştür. Modelin; $T_{çıkış}$ değerini, kararlı hava koşulları için %0,6 RMSD ile ve kararsız koşullar için %4,22 RMSD ile tahmin edebilme kabiliyetinde olduğu bulunmuştur. RMSD için olan Pe değeri kararlı hava için %5,05'tir ve aralıklı yağışın olduğu kararsız hava için %14,91'dir. Modelin, debi değişimlerine ve ayrıca rüzgar hızındaki beklenmedik artışlara karşı yanıt verici olduğu kanıtlanmıştır; 2 Mayıs'ta elde edilen sonuçlar, $T_{çıkış}$

için %2,06 RMSD ve Pe için %4,15 RMSD ile birlikte yeteneğini doğrular. Modelin doğrulanmasına paralel olarak, önerilen model ile daimi rejim versiyonu arasında bir kıyaslama yer almıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, enerji denge denklemindeki absorbe edici ısı durağanlığını dikkate almak suretiyle model, PVT performansını daha iyi hassasiyetle tahmin eder. Ayrıntılarda; tam geçiş rejimi havası için dinamik ve daimi rejim modeli arasındaki $T_{çıkış}$ için olan en yüksek RMSD ıraksaması %0,8 idi, bununla birlikte, daimi rejim için, fark %0,25'e düşmüştür. Pe için iki model arasındaki RMSD farkı; geçici rejim ve kararlı hava koşulları için sırasıyla %0,03 ve %0,02 ile çok daha küçüktür. Modelin; kollektör verimi için gerekli olan parametreleri hesaplama yeteneğine bağlı olarak, PVT'nin ısı, optik ve elektriksel kısmına yönelik parametrik analiz için uygun olduğu bulunmuştur. Ayrıca; evsel ısınma suyu kullanımı durumunda akış debisi ve ısı depolama tankı kapasitesi gibi en uygun çalışma değerlerini ve sistem boyutlarını tahmin etmek için gelecekteki çalışmaların yürütülmesi gerektiği sonucuna varılmıştır [22].

Fayaz vd.'nin 2019 yılında yaptıkları çalışmada; eşsiz bir ısı kollektör, ısı transferini ve performansı geliştirmek için PVT ve PVT/PCM sistemleri olarak tasarlanmıştır. Bu çalışmada; 3D sayısal analizi, COMSOL Multiphysics yazılımı aracılığıyla yapılmaktadır ve giriş suyu ve çevre sıcaklığını 27 °C'de ve güneş ışımasını 1000 W/m²'de sabit tutma koşullarında deneysel inceleme aracılığıyla 0,5 LPM'den 3 LPM'ye kadar farklı hacimsel debilerde doğrulanmaktadır. Deney; modülün pasif soğutulması aracılığıyla, kontrol edilen çalışma parametreleri ve koşullar altında iç ortam havasında yürütülmektedir. Sırasıyla sayısal ve deneysel olarak, en yüksek %12,4 ve %12,28 PVT elektriksel verimi başarılmaktadır. Benzer şekilde; PVT/PCM için, deneysel ve sayısal durumlar için sırasıyla %12,75 ve %12,59 elektriksel verim elde edilmektedir. PVT sistemi için; %10,13 ve %9,2 elektriksel performans geliştirilmektedir. PVT/PCM için; elektriksel performans geliştirmesi, sayısal olarak ve deneysel olarak sırasıyla %12,91 ve %12,75 olarak elde edilmektedir. Mevcut çalışma için sayısal sonuçların deneysel doğrulanması; 27 °C çevre ve giriş sıcaklıklarındaki asma tank düzeneğini kullanan suyun pasif akış devresi ile birlikte, kontrol edilen iç ortam koşullarında yürütülmektedir. Araştırmadan şu bulgular çıkarılmıştır: En yüksek hücre sıcaklıkları; sayısal ve deneysel sonuçlarda PV, PVT ve PVT/PCM sistemleri için sırasıyla 82,4 °C ile 82,9 °C, 71,05 °C ile 74,59 °C ve 67 °C

ile 69,13 °C olarak elde edilmektedir. Elektriksel verim; PV, PVT ve PVT/PCM için sırasıyla, sayısal olarak %11,35, %12,4 ve %12,75 olarak başarılmaktadır ve deneysel analiz için %11,15, %12,28 ve %12,59 olarak başarılmaktadır. En yüksek PVT ve PVT/PCM toplam verimi; deneysel durumda sırasıyla %89,6 ve %83,59 olarak elde edilmektedir. Elektriksel verimdeki en yüksek artış; PVT ve PVT/PCM için sırasıyla, deneysel sonuçlar durumunda %9,2 ve %12,75 olarak elde edilmektedir. Çıkış gücünde 1,125 W ve 1,04 W'lık bir artış gerçekleştirilmektedir ve benzer şekilde elektriksel verim, her 1 °C'lik azalma için sayısal ve deneysel sonuçlarda yaklaşık %0,068 ve %0,063 artmaktadır. Sonuçlardan şu çıkarım yapılabilir ki, PCM'nin artmış soğutma etkisine bağlı olarak, elektriksel verim açısından, PVT'ye kıyasla PVT/PCM daha iyi performans göstermektedir [23].

Al-Waeli vd.'nin 2019 yılında yaptıkları çalışmada; yeni bir nanoakışkan/nano-PCM PVT sistemi için matematiksel bir model önerilmiştir. Deneyler; matematiksel model sonuçlarını doğrulamak için yürütülmüştür. Karşılaştırma; önerilen matematiksel modelin deneysel sonuçları tatmin edici bir biçimde simüle etme ve bu sonuçlarla tatmin edici bir biçimde eşleşme yeteneğini doğrulamıştır. Deneysel ve matematiksel model sonuçları göstermektedir ki elektriksel ve ısı verimleri sırasıyla %13,7 ile %13,2 ve %72 ile %71,3'tür. Ancak; cam, PV hücresi, balmumu ve nanoakışkanda kaydedilen en yüksek sıcaklığın sırasıyla 41,2 °C, 39,92 °C, 38,8 °C ve 36,5 °C olduğu bulunmaktadır. Önerilen matematiksel modelin hassasiyeti deneysel sonuçlarla karşılaştırılmaktadır ve doğrulanmaktadır ve iyi bir tutarlılık ve uyum göstermektedir. Bu makalede; nanoakışkan ve nano-PCM PVT sistemi için bir enerji dengesi matematiksel modeli önerilmiştir ve yürütülen deneysel çalışma sonuçları aracılığıyla doğrulanmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, ölçülen ve model elektriksel ve ısı verimleri arasındaki fark sırasıyla %3,72 ve %5,05 idi. Böylece model, tatmin edici simülasyon sonuçları elde edebilir. Ayrıca, farklı aşamalardaki sıcaklıklar; matematiksel model sonuçlarını doğrulamak için ölçülmüştür. Sonuçlar göstermektedir ki akışkan sıcaklığı; 60,45 °C'lik en yüksek sıcaklık olacak şekilde, farklı aşamalardaki ısı transferi aracılığıyla yükselmektedir. Son olarak, toplam PVT sistem verimi; yüksek sıcaklık uygulamaları için umut verici olan %85,7'ye yükselmiştir [24].

Tiwari vd.'nin 2018 yılında yaptıkları çalışmada; fotovoltaiik termal (PVT) hava kollektörleri ve PVT hava kollektör entegreli sera gazı kurutma sistemi üzerine mevcut olan literatür incelenmiştir. Güneş enerjili kurutma; tahılları uzun süreliğine korumak için en iyi yöntemlerden birisidir. Gelişmekte olan ve gelişmemiş ülkelerde; kişi başına elektrik üretimi düşüktür, bu nedenle ısıtma amaçlı elektrik kullanımları ekonomik olarak ve çevresel olarak değerlendirilebilen bir seçenek olamamaktadır. Önceki çalışmalarda; kurutma parametrelerini kontrol etmek açısından zorlanmış kurutmanın daha iyi olduğu ve enerji depolama açısından PVT hava kollektörünün, tek başına PV modülden daha iyi olduğu bulunmuştur. Mevcut çalışmada; PVT hava kollektörü ile kurutma sisteminin birleşimi tartışılmıştır. Dahası; PVT hava kollektörü entegreli sera gazı kurutma sisteminin ısıl modellenmesi ayrıntılı olarak sunulmuştur. PVT hava kollektörü için ortalama ısıl verim, elektriksel verim ve toplam ısıl verim; havanın 0,01 kg/s kütle debisinde sırasıyla %26,68, %11,26 ve %56,3 olarak bulunmaktadır. Bu makale; araştırmacılar ve bilim insanları için, farklı güneş enerjili hibrit sistemler için ısıl modeller geliştirmek için çok faydalı olabilir. PVT hava kollektörü entegreli bir sera gazı kurutma sistemini tasarlamadaki temel amaç, kurutma sistemini kendi kendine sürdürülebilir hale getirmektir; çünkü kurutma sistemi genellikle, şebeke bağlantısının mevcut olmadığı kırsal alanlarda talep edilir. Böylesi bir sistemin ısıl modellenmesi yalnızca tasarımda yardımcı olmaz; fakat ayrıca, arzu edilen iklim koşullarında en iyi muhtemel kurutucuyu seçmek için esneklik sağlamaya yardımcı olur. Yoğun araştırma çalışması geçmişte; doğal/pasif ve zorlanmış/aktif modlar altında sera gazı kurutucunun ısıl modellenmesi üzerine zaten yapılmıştı. Mevcut analizden şu çıkarımlar yapılabilir:

- PVT hava kollektörü entegreli kurutma sistemi, diğer kurutma sistemlerine göre daha iyi sıcaklık kontrol edilebilme yeteneğine sahiptir. Bu nedenle; hava kollektörü üzerinde, havanın kütsel debisini ve PV modülün paketleme faktörünü değiştirmek suretiyle, izin verilebilir farklı sıcaklıklara sahip olan farklı ürünler için bir adet kurutma sistemi kullanılabilir.
- Chauhan ve Kumar; kurulmamış olan hava kollektörüne sahip, kuzeye bakan duvarı izole edilmiş sera gazı kurutucunun, alan kullanımı açısından kurutma sistemi için daha iyi bir tasarım olabileceği fikrini vermiştir.

- Zorlanmış taşınım modu altında sera gazı kurutucunun performansının, yüksek nem içerikli tahıllar için daha iyi olduğu bulunmuştur; diğer taraftan, doğal taşınım modunun, düşük nem içerikli tahıllar için daha iyi olduğu bulunmuştur. PVT hava ısıtıcısı; ortam ısıtması ve güneş enerjili kurutma dahil çeşitli kullanımlar için havanın ön ısıtılması amacıyla uygulanabilir durumda olabilir.
- Güneş hücresi sıcaklığının artışıyla birlikte, elektriksel verim düşer.
- Elektrikli kurutucudaki Rs 41,35 yerine güneş enerjili kurutucudaki kurutmanın maliyeti Rs 17,52 idi; bu durum güneş enerjili kurutucunun, elektrikli kurutucuya göre iki kat daha ucuz olduğu anlamına gelir.
- Ortalama ısı verim (η_{th}), elektriksel verim (η_{el}) ve toplam ısı verim ($\eta_{ov,th}$); Azaizia ve arkadaşları ile neredeyse aynı olan 0,01 kg/s hava kütleli debisinde sırasıyla %26,68, %11,26 ve %56,3 olarak bulunmuştur [25].

Guarracino vd.'nin 2019 yılında yaptıkları çalışmada; yoğunlaştırıcı olmayan PVT kollektörlerin, dış ortam koşulları altındaki performans karakterizasyonuna odaklanılmaktadır. Yeni bir bakış açısı; düz plakalı ve boşaltılmış tüplü güneş enerjili/ısı kollektörler için olan ilgili uluslararası standartlardan PVT kollektörlere adapte edilmiş olan mevcut yöntemlerin uygulanmasını, günümüzde resmi olarak belirlenmiş test yöntemi mevcut olmadığından dikkate almaktadır. Üç farklı tür PVT kollektör; çalışma esnasında elektriksel ve ısı performanslarını etkileyen tasarım parametrelerine yönelik odaklanmayla birlikte test edilmektedir. Diğer sonuçlar içerisinde; açık devre moduna kıyasla en yüksek güç noktasına elektriksel dönüşüm yakın iken ısı verimindeki %10'luk bir azalmadan PVT kollektörün muzdarip olduğu gösterilmektedir ve şu da gösterilmektedir ki PV tabakası ile bakır absorbe edici arasındaki zayıf bir ısı teması, ısı performansta önemli bir azalmaya yol açabilir. Bir cam kaplamanın eklenmesi ısı verimi artırır, ama cam geçirgenliğiyle ve güneş gelme açısıyla değişen elektriksel performans kayıplarına yol açar. Büyük gelme açılarında elektriksel verim azalması; örneğin su ısıtma uygulamalarında, artan sıcaklıklara bağlı olarak bundan dolayı önemlidir. Dinamik performans; kollektör zaman sabitini ve etkin ısı kapasiteyi ölçmek için ışıınımdaki bir adım değişimini uygulamaya koymak suretiyle karakterize edilir. Bu çalışma; PV tabakasının ilave ısı yüküne bağlı olarak klasik düz plakalı güneş enerjili/ısı kollektörlere kıyasla, PVT kollektörlerin yavaş bir ısı yanıt ile karakterize edildiğini göstermektedir. Düz plakalı bir güneş enerjili/ısı

kollektör için olan 2 dakikadan daha aza kıyasla, ticari bir PVT modül için 8 dakikalık bir zaman sabiti ölçülmektedir. PVT kollektörün ısı yükünü temsil etmek için; toplu haldeki, birinci mertebeden dinamik bir modelin kullanımının belli ısıtım rejimleri altında uygun olmadığı ve sistem performansının hassas olmayan tahminine yol açabileceği de sonuca bağlanmıştır. Bu çalışma; bir coğrafik düzenleme aralığında yıllık performans tahminleri sağlamak için; güneş kollektörlerinin test edilmesi ve karakterizasyonu için bir prosedürün taslağını oluşturur, çeşitli PVT kollektör tasarımları için değerli daimi rejim ve dinamik performans karakterizasyon verisi sağlar ve ayrıca bu verinin bir sistem modelinde uygulanması için bir çerçeve sağlar. Bu makalede; PVT kollektörlerin bir aralığının elektriksel ve ısı performansını karakterize etmek için dış ortam testleri serisinden elde edilen veri sunulmaktadır. Bu çalışmanın benzersiz olan bir yönü; özellikle PVT kollektörler için olan adanmış bir test yokluğunda güneş enerjili/ısı kollektörler için mevcut Avrupa standardı EN 12975-2'den uyarlanmış daimi rejim ve dinamik test yöntemlerinin uygulanmasıdır. Dış sırlama, kaplama faktörü (PV alanının ısı emici alanına oranı) ve PV ile emici tabakalar arasındaki ısı temasını artırılmasını içeren çeşitli tasarım özellikleri araştırılmıştır. Temel bulgular şöyledir:

- Cam kaplamanın eklenmesi; birinci mertebe ısı kayıp katsayısı a_1 'in, 75 °C'ye kadar kollektör sıcaklıklarında %30'dan daha fazla verimle sonuçlanacak şekilde, 7,07 W/m²K'den 2,17 W/m²K'e azalmasıyla birlikte, sırlanmamış olan bir kollektöre kıyasla ısı performansta dikkate değer bir gelişmeyle sonuçlanır. Ancak; sırlanmış tabakanın eklenmesi aracılığıyla tanıtılan yansıma kayıpları, büyük güneş gelme açılarında en çok fark edilir olan elektriksel çıktıda %10-20'lik bir azalmaya yol açar. Elektriksel verimdeki azalma; kollektör sıcaklığını 30 °C'den 60 °C'ye arttırmanın bir sonucu olarak gözlenenden 3 kat daha fazladır. Bu nedenle, yüksek geçirgenliğe sahip camların (ve bazı durumlarda izleme sistemlerinin) kullanımı; PVT sistemler için daha yüksek verimleri başarmak için faydalı olabilir.
- Daimi rejim koşulları altında ısı verim; elektrik yükünün olmadığı açık devrede çalıştırılmaya kıyasla, PVT kollektör en yüksek güç noktasında elektrik üretirken daha düşüktür. Çalışma gerilimindeki küçük değişimler, elektriksel güç çıktısında büyük değişimlere yol açabilir ve bu nedenle hassas

bir en yüksek güç noktası izleme cihazı (gömülü güç izleme yeteneğine sahip bir dönüştürücü gibi) PVT kollektörlerin hem elektriksel hem de ısı performans testi için kullanılmalıdır.

- PV tabakası ile arka emici arasındaki ısı temasının kalitesinin hem elektriksel hem de ısı performansı belirlemede önemli bir etken olduğu bulunmuştur. Zayıf ısı teması; dolaşan akışkana daha az ısı transferi ile ve daha yüksek PV sıcaklıkları ile sonuçlanır ki bu da daha düşük elektriksel performans ile ve uzun zaman periyotları süresince PV tabakasının ısı bozulması ile sonuçlanır. Elektriksel verim sıcaklık katsayısının da PV hücre sıcaklığını kullanmak suretiyle beklenene kıyasla ortalama kollektör akışkanı sıcaklığını kullanmak suretiyle değerlendirildiğinde, çok daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu çalışmada test edilen ticari PVT modül için, PVT emici ısı temasına yönelik geliştirmeler; elektriksel verimde %6-8'lik bir artışla ve PV tabakasında ölçülen sıcaklıkta yaklaşık 10 °C'lik bir azalmayla sonuçlanmıştır. Isı veriminde küçük bir artış da gözlenmiştir.
- Dinamik test; geleneksel yalnızca ısı kısmından oluşan düz plakalı bir kollektörle kıyaslandığında (<2 dakika) ticari PVT kollektör için daha yavaş bir ısı cevap (8 dakikaya kadarlık mertebede zaman sabiti) ortaya koymuştur. Dahası; deneysel yöntem, daha geniş kullanılan ağırlıklı bileşen hesaplama yönteminden elde edilenden 2-5 kat daha fazla olan bir etkin ısı kapasite değeriyle sonuçlanır. Dinamik test sonuçlarının, çalışma koşullarına karşı oldukça yüksek düzeyde hassas olduğu bulunmuştur ki bu durum özellikle dış ortam dinamik testini özellikle zor ve zaman alıcı yapmaktadır.
- Bu çalışmanın bulgularından tahmin edilmektedir ki; EN 12975-2'de tanımlanan yöntemlere göre dış ortam koşulları altında bir PVT kollektörün tam kararlı durum ve dinamik ısı performans karakterizasyonu en az 5 gün gerektirir (sürekli bulutsuz hava koşulları kabul edilerek). Önceki çalışmalar, güneş kollektörü testi için gereken zaman ve çabayı azaltmaya yönelik ihtiyacı tanımlamıştır; böylece, PVT kollektör tasarımlarının değerlendirilmesi için, doğrulanmış olan tahmini bir model burada maliyet-verimli bir alternatif olarak önerilmektedir.
- Araştırmacılar tarafından daha önceki çalışmada geliştirilen üç boyutlu bir PVT kollektör modeli; mevcut çalışmada geliştirilen toplu haldeki birinci

mertebe dinamik modeller için olan 0,7K ve 1,7K'lık en yüksek hatalara kıyasla, simülasyon süreci esnasında kollektör boyunca olan tahmin edilen sıcaklık artışındaki 0,5K'lık en yüksek hatayla birlikte, aralıklı olarak bulutlu hava koşulları altındaki çalışmanın çok iyi bir tahminini sağlamak için gösterilmektedir [26].

Zhou vd.'nin 2019 yılında yaptıkları çalışmada; tek kademeli sıkıştırmaya sahip silindir-bağlı PVT ısı pompası (RB-PVTHP) sistemi önerilmektedir ve deneysel olarak incelenmektedir. Fotovoltaik modül ile ve tek taraflı silindir bağli buharlaştırma ısı değıştiricisi tabakalaması ile birlikte bütünleştirilmiş olan silindir bağli PVT (RB-PVT) birimi ayrıntılı olarak tanıtılmaktadır. Aynı zamanda, sistem çalışma karakteristiklerini keşfetmek için çeşitli görüntüleme sensörleri ile donatılmış olan tasarlanmış deneysel sistem; 4 parça RB-PVT biriminden, 1HP ısı pompası biriminden ve 150L ısı depolama tankından oluşur. Daha sonra, birimin ve sistemin performans değıerlendirme yöntemi önerilmektedir. Yaz boyunca Kuzey Çin'deki sistemin yeniden üretim performansı üzerine olan deneysel inceleme; birimin ısı verimi, elektriksel verimi, ısı tabanlı toplam verimi ve sistemin ısıtma COP değıeri açısından eş zamanlı olarak yürütölmektedir. Çalışma karakteristiklerini görüntüleme sonuçları göstermektedir ki sistem gün boyunca dikkate değıer yeniden üretim performansı ile uzun süreli kararlı bir koşulda çalışmaktadır. Ayrıntılı performans parametreleri bu makalede verilmiştir. Bu çalışma; RB-PVTHP sisteminin, Kuzey Çin'de geniş ölçekli pratik olarak uygulanabilir uygulama değıerine sahip olduğunu göstermektedir. Bu makale; ısı verimi ile elektriksel enerjiyi eş zamanlı olarak üretebilen, soğutkanı bir çalışma akışkanı olarak kullanan benzersiz bir RB-PVT biriminden oluşan tek kademeli sıkıştırmalı RB-PVTHP sistemini önermektedir. Çalışma; yaz boyunca Kuzey Çin'de deneysel yöntem aracılığıyla sistemin yeniden üretim performansına odaklanmıştır. Deneysel araştırma sonuçları göstermektedir ki sistem; test periyodu esnasında, dikkate değıer yeniden üretim performansı ile birlikte kararlı bir durumda çalışır. Fotovoltaik gücün ve ısıtma gücünün; güneş ışı nımı yoğunluğu ile değııştiğı bulunmuştur. Fotovoltaik güç ve elektriksel verimi içeren elektriksel performans; sırasıyla 286 W ve %11,8 ortalama değıerlerine sahip güneş ışı nımı yoğunluğu olarak benzer bir değıişim eğilimine sahip olmuştur. Günlük birikimli güç üretimi güneşli günlerde yaklaşık 2 kWh idi, bununla birlikte bulutlu günlerde 1,5 kWh idi. Ancak,

ısıtma performansı yalnızca hava şartlarına bağlı değildir; fakat aynı zamanda yoğuşma sıcaklığından da etkilenir. Ayrıca, sistem çalıştıkça ve yoğuşma sıcaklığı arttıkça kademeli bir aşağı doğru eğilim gösteren ısıtma gücü, güneş ışımasını yoğunluğuyla birlikte dalgalanır. Benzer şekilde, birimin ısıtma verimi ve sistemin ısıtma COP değeri, ısıtma gücüyle birlikte benzer bir eğilim göstermiştir. Isıtma gücünün, birim ısıtma verimin ve sistem ısıtma COP değerinin ortalama değeri sırasıyla 4,7 kW, %120 ve 6,16'dır. Genel olarak, 150 L hacimdeki su sıcaklığını 35 °C'ye yükseltmek yaklaşık 70 dakika alır. Birimin ısıtma tabanlı toplam verimi de bu çalışmada, birimin yeniden üretim performansını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Hesaplamaya göre, ortalama değer yaklaşık %150 idi. Dahası, sistemin çalışma karakteristiklerini görüntülemek suretiyle şu çıkarım yapılabilir ki yüksek yoğuşma sıcaklığındaki aşırı ısıtma derecesi ve daha düşük sıkıştırma oranı; RB-PVTHP sisteminin uzun vadeli sürekli çalışmasına pozitif bir katkıyı gösterir. Yukarıdaki sonuç göstermektedir ki RB-PVT birimine sahip RB-PVTHP sistemi; Kuzey Çin'de geniş ölçekli, pratik olarak uygulanabilir uygulama değerine sahiptir. Ancak; birimin toplam veriminin geliştirilmesi, daha iyi yeniden üretim performansı başarmak için tüm sistemin optimizasyonu, sistem çalışma potansiyelini ve ayrıca silindir-bağlı buharlaştırma ısı değiştirici ile RB-PVT biriminin dayanıklılığını arttırmaya yönelik yöntem gibi sistemle ve birimle alakalı araştırılacak olan çok sayıda can alıcı konu hala mevcuttur. Buna rağmen; soğuk iklim bölgesinde temiz bir biçimde ısıtmayı amaçlamak üzere, bina enerji korunumu alanındaki enerji kesintisi ve çevresel kirlenme sorunu için RB-PVTHP sisteminin iyi bir çözüm olduğu açıktır. Dikkate değer yeniden üretim performansı, yıl boyunca, binanın enerji ihtiyacını karşılayabilir. Bir kere düzgün bir biçimde tasarlandığında, sistemin; bina entegreli fotovoltaiik termalin (BIPVT) hedefini gerçekleştirmesi kolaydır. Bu nedenle; gelecekte, önemli mühendislik uygulaması değerine ve sürdürülebilir gelişme değerine sahip olacaktır [27].

Aste vd.'nin 2017 yılında yaptıkları çalışmada; enerji bakış açısıyla, aynı zamanda farklı kanal düzenlemeleri ile karakterize edilen iki adet alüminyum silindir bağlı emiciyle eşleştirilmiş farklı PV hücreleri ile gerçekleştirilen örtülü ve örtüsüz PVT sulu kollektörleri arasında bir kıyaslama yapmayı amaçlamışlardır. Performans analizi; Politecnico di Milano Test Merkezi'nde deneysel veriye dayanılarak doğrulanan iki adet matematiksel modelle birlikte gerçekleştirilen enerji

simülasyonlarına dayanmaktadır. Simülasyonlardan elde edilen sonuçlar göstermektedir ki ısı ve elektriksel verimin toplam bir miktarı olarak değerlendirilen her iki kollektörün yıllık toplam verimi; örtülü PVT kollektör için neredeyse %35'e eşittir ve örtüsüz olan için neredeyse %36'ya eşittir. Daha detaya inildiğinde, örtülü PVT'nin yıllık elektriksel verimi %6'dır; bununla birlikte örtüsüz kollektör %14,2'lik günlük bir verime sahiptir. Ancak; yıl boyunca, örtülü kollektör %29,4'e eşit yıllık bir verimle daha fazla ısı enerji üretme yeteneğine sahiptir. Yine de yukarıda tanımlanan toplam verim parametresi; hibrit PVT bileşeninin performans değerlendirmesi için yanıltıcı olabilir. Bu nedenle; elektriksel enerji ile ısı enerjisi karşılaştırmaya imkan vermesi için faydalı bir parametre olan birincil enerji açısından iki güneş enerjisi teknolojisinin yıllık performansını değerlendirmek önemlidir. Böylesi bir parametre şöyle hesaplanabilir:

$$\eta_{PES} = \eta_{th} + \eta_{el} / \eta_{T,power} \quad (3.1)$$

Burada η_{th} ısı verim, η_{el} elektriksel verim ve $\eta_{T,power}$ ulusal güç sisteminin ortalama elektrik üretim verimidir. Elektrik enerjisinin tüm referans bağlamda üretildiği moda bağlıdır. Örneğin; 0,46'lık bir değer, İtalya'da elektrik üretimi için tipik bir yakıt karışım sistemine karşılık gelir. Böylece, sonuçlar göstermektedir ki örtülü kollektör güneş enerjisini birincil enerjiye %42,3'lük bir yıllık verimle dönüştürme yeteneğine sahiptir, bununla birlikte örtüsüz olan %52,6 değerine ulaşır. Doğal olarak, sonuçlar temel olarak, benimsenmiş olan farklı PV teknolojileriyle alakalıdır. Gerçekte μ c-Si diğer teknolojilerle karşılaştırıldığında en yüksek watt değeri başına genellikle daha düşük maliyete sahip olmasına rağmen, genellikle daha düşük bir elektriksel verimle karakterize edilir. Ancak; şunu not etmek önemlidir ki, ısı tavlama henüz analitik bir formüle dönüştürülmediğinden mevcut çalışma, PVT bileşeninin elektrik üretimini %10'a kadar çıkarabilecek olan, ısı tavlama olarak bilinen, gerçekleşmesi mümkün olan yeniden üretim olayını dikkate almaz. Dahası, her bir kollektörün sırasıyla tepe gücüyle ve açıklık alanıyla alakalı olan elektriksel ve ısı enerji üretimini analiz etmek suretiyle, şunu not etmek ilginçtir ki, örtülü kollektör; site sakinlerinin oturduğu binadan olan ısı talebinin genellikle daha yüksek olduğu soğuk aylarda daha verimlidir. Gerçekte; cam kaplama, çıkan akışkan sıcaklığını ve böylece ısı enerji üretimini örtüsüz kollektöre kıyasla %84'e kadar arttırmak üzere,

ısı kayıpları azaltma yeteneğine sahiptir. Ancak; aynı zamanda, kış boyunca, cam ile örtülü olan kollektörün elektriksel performansı örtüsüz olandan görece olarak daha düşüktür, çünkü camın geçirgenlik özellikleri, ışıının gelme açısına göre değişir. Özel olarak, gelen ışıının ile cam yüzeyine dik olan yön arasındaki açı daha büyük oldukça, yansıyan kesir daha yüksek olmaktadır. Mevcut yüzeylerin sıklıkla sınırlı olduğu ve elektrik ihtiyaçları ile beraberinde sıcak su ihtiyaçlarının dikkate değer düzeyde olduğu bina uygulamaları için özellikle; PVT sistemler yakın gelecekte fosil yakıtlarla enerji tüketimini sonlandırmaya katkı sağlayabilir. Çok sayıda kollektör mevcuttur, ama son zamanlarda en çok inceleneni, ısı transfer akışkanı olarak suyu kullanan sistemlere dayanmaktadır. Bu sebeplerden dolayı, enerji bakış açısıyla; aynı zamanda farklı kanal düzenlemesi aracılığıyla karakterize edilen iki adet alüminyum silindirik bağlı absorbe ediciye gömülü farklı PV hücreleriyle birlikte gerçekleştirilen, en yaygın türler olan örtülü ve örtüsüz PVT sulu kollektörler arasındaki bir kıyaslamayı bu çalışma amaçlamaktadır. Enerji simülasyonunun sonuçları göstermiştir ki her iki modül de neredeyse aynı toplam verime sahiptir. Ancak; birincil enerji verimi açısından, örtülü olmayan kollektör, örtülü olana göre daha verimlidir. Doğal olarak sonuç; daha yüksek bir verime sahip olan örtüsüz modülün PV teknolojisine bağlıdır. Ancak özellikle, ısıtma ve DHW için enerji talebinin çok olduğu kış mevsiminde olmak üzere; örtülü kollektörün ısı performansını örtüsüz kollektörden her zaman daha yüksektir. Son olarak; en verimli teknolojiyi seçmek için ısıtma, soğutma ve DHW tüketiminin ayrıntılı bir analizi gerçekleştirilmelidir [28].

Pang vd.'nin 2019 yılında yaptıkları çalışmada; aşırı ısınmadan korumak suretiyle performansı geliştirmek için sırasıyla camlı Tedlar/Polietilen tereflatat Tedlarlı (TPT) ve alüminyum alt tabakalı üç adet hetero-birleşimli fotovoltaiik modüller tasarlanmıştır. Bu HIT-PV modüllerinin verimleri; dört farklı dış ortam iklim koşulu altında incelenmektedir. Alüminyum modül en iyi ısı kaybı göstermektedir; bununla birlikte cam modül/TPT modül daha iyi elektriksel verime ve elektriksel enerjiye sahiptir, çünkü cam ve TPT alt tabakaların yüzeyleri üzerinde, alüminyum alt tabakaya göre daha yüksek yansıtıcı tabaka vardır. HIT-PV modüllerinin çıkış gücünü arttırmak için, HIT güneş hücreleri ve alüminyum ısı kollektöre dayanan hetero-birleşimli bir fotovoltaiik/termal (HIT-PVT) sistemi tasarlanmaktadır. HIT-PVT sisteminin ölçülen sonuçları göstermektedir ki soğutkan dolaşımı, çıkış gücünü artırır ve HIT-PVT

modülü, dış ortam koşulları altında 51,2 °C'ye kadar evsel sıcak su temini sağlayabilir. Ayrıca, HIT-PVT sistemlerinin maliyeti, geleneksel fotovoltaik sistemlerinkinden çok daha düşüktür ve yatırım geri ödeme süresi 3 yıldan daha az olabilir. Bu makalede; daha verimli olan ve sıcaklığı, diğer iki modülünden (cam alt tabaka ve TPT alt tabaka) yaklaşık 2 °C daha aşağı düşüren alüminyum bir alt tabaka, kristal yapıli silikon hetero-birleşimli fotovoltaik (HIT-PV) modülde uygulanmıştır. Alüminyum modülden ölçülen çıkış gücü; diğer iki modülünkilerle aynıdır. Ancak, alüminyum modülün elektriksel enerjisi 0,426-1,375 kWh'tir ki cam ve TPT alt tabakalara sahip modüllerinkinden daha azdır. İlginç bir biçimde, alüminyum modül, hepsi içinde hala en yüksek elektriksel verimi (%10,84) korumaktadır. Bu nedenle; modül sıcaklığını daha fazla azaltan ve çıkış gücü ile elektriksel enerjinin performansını daha çok arttıran, HIT-PVT modülde soğutkan dolaşımıyla, alüminyum bir ısıl kollektör entegre edilmiştir. HIT-PVT sistemlerinin elektriksel ve ısıl verimleri sırasıyla %12,91 ve %30,31'i yakalayabilir. HIT-PVT'nin gelecekteki düşük maliyetli ve geniş potansiyelli uygulamalarını dikkate almak suretiyle, 3 yıldan daha az olan ve geleneksel Si-tabanlı PV sistemlerinden çok daha kısa olan yatırım geri ödeme süresi değerlendirilmiştir [29].

Al-Waeli vd.'nin 2019 yılında yaptıkları çalışmada; bir PVT sisteminin tekno-ekonomik bir değerlendirmesi yapılmıştır. PV soğutma sistemi; ısıl iletkenliğini yükseltmek için nano-SiC ile karıştırılmış olan PCM (balmumu) ile doldurulmuş olan panel arka yüzeyine tutturulmuş bir tanktan oluşmaktadır ve depo, nanoakışkana (su+nano-SiC) yeniden çevrim yaptırmak suretiyle soğutulmaktadır. Ekonomik değerlendirme için MATLAB programı kullanılmıştır. Isı transferini daha fazla geliştirmek için, çalışılan PVT bileşeninde nano-PCM'lerle birlikte nanoakışkan kullanılmıştır. Mevcut çalışmada kullanılan nano-malzeme silikon karbid (SiC) idi ve seçilen PCM balmumu idi. Ekonomik değerlendirme boyutu; yaşam süresi boyunca olan maliyeti, parça başına maliyeti ve sistemin yüzdesel maliyetini temin etmiştir. Teknik yön; sırasıyla %97,3, 190,4 kWh/kWp ve %25,9 olan dönüştürücü verimini, özgül kazancı ve kapasite faktörünü ortaya koymuştur. Sistemin çıkış gücü, elektriksel ve ısıl verimlerinin sırasıyla 12,7W, %13,7 ve %72 olduğu bulunmuştur. Elektrik maliyeti ve geri ödeme süreleri sırasıyla 0,125 \$/kWh ve 5-6 yıl idi. Sonuçlar göstermiştir ki çalışılan sistem ekonomik olarak uygulanabilir ve büyük bir umut

vermektedir. Bu çalışma; Bangi, Malezya’da nano-PCM ile ve boruları içerisinde akan nano-akışkan ile dolu olan bir tanka sahip PVT kollektörün benzersiz bir tasarımı için tekno-ekonomik bir değerlendirme sunmuştur. Önerilen bu sistem; sistemin verimliliğini doğrulamak için test edilmiştir, değerlendirilmiştir ve üç adet rakip tasarımıyla karşılaştırılmıştır. Diğer sistemler; geleneksel PV, su dolu bir tank ile içerisinde su akan borulara sahip PVT ve PCM dolu bir tank ile içerisinde su akan borulara sahip bir PVT’dir. Nano-PCM ve nano-SiC-su nano-akışkanının termofiziksel özellikleri değerlendirilmiştir ve SiC kütleli kesrinin ve debisinin optimum sonuçları sırasıyla %0,1 nano-SiC ve 0,175 kg/s’dir. Performans değerlendirmesinin sonuçları; özgül kazancı, kapasite faktörünü ve invertör verimini sırasıyla 190,4 kWh/kWp, %25,9 ve %97,3 göstermektedir. Bu tasarımın ekonomik boyutu da çalışılmıştır. Enerji üretim analizi ve toplam maliyet azalması; ekonomik etkenlerin bazılarını elde etmek için kullanılmıştır. LCC, CoE ve PBP’nin sırasıyla 1288,37 USD, 0,112 USD/kWh ve 4,4-5,3 yıl olduğu bulunmaktadır. Son olarak; işlem esnasında ve yüksek çalışma sıcaklıklarına bağlı olarak, geleneksel PV için PV verimi %7,1 olarak kaydedilmiştir; bununla birlikte, önerilen sistem tarafından kaydedilen en yüksek verim, 120,7 W’lık elektriksel bir güçle birlikte %13,7 idi. Başarılan en yüksek ısı güç ve çıkan akışkanın sıcaklığı sırasıyla 13,8 kW ve 39,52 °C idi. Önerilen sistem için en yüksek ısı verim %72’dir. Önerilen sistemin elektriksel, ısı ve ekonomik sonuçları, literatürdeki PVT sistemine kıyasla umut verici bulunmuştur [30].

Singh vd.’nin 2019 yılında yaptıkları çalışmada; fotovoltai termal (PVT) sistemin performansını çalışmak için gerçekçi bir matematiksel model sunulmaktadır. Model; PVT sisteminin verimini optimize etmek için şekil faktörü (Z) ve kütleli debi ($\dot{m}$) gibi kontrol parametrelerinin etkisini eşzamanlı olarak dikkate almaktadır. İteratif yöntemeye dayanan simülasyon süreci; V-oluklu ve eğri şekil oluklardan oluşan farklı tür absorbe edici plaka şekillerine uygulanmaktadır. Bildiğimiz kadarıyla, eğri oluklu absorbe edici plakalar geçmişte dikkate alınmamıştır. Fotovoltai ve çıkış sıcaklığı, elektriksel ve ısı enerjisi ve ekserji verimleri, basınç düşüşü; farklı Z değerleri için Nusselt ve Reynolds sayısını kullanmak suretiyle kütleli debinin bir fonksiyonu olarak değerlendirilmektedir. Sonuçlar; artan kütleli debiyle birlikte hem PV hem de çıkış sıcaklığında azalmaya ve enerji ve ekserji değerleri ile basınç düşümünde artmaya işaret etmektedir. Z ’nin değeri, absorbe edici plakadaki eğri şekilli oluklara

karşılık gelen aralıkta ($1,3 \leq Z < 2$) kaldığında PVT sisteminin veriminin geliştirilebildiği tahmin edilmektedir. Dahası; absorbe edici plakadaki eğri şekilli olukların, düşük ve yüksek $\dot{m}$ değerleri için V-oluklarla yer değiştirmek için iyi bir seçenek olabileceği bulunmaktadır. Önerilen tekli modelin hem düşük hem de yüksek $\dot{m}$ değerleri için enerji-ekserji verimi değerlerini tahmin edebileceği sonucuna varılmıştır. Kütleli debinin ve absorbe edici plaka şekil faktörünün; PVT sistem tasarımında en önemli parametreler olduğu bulunmuştur. $\dot{m}$ 'deki artışla birlikte T_{PV} ve $T_{çıkış}$ değerlerinde bir azalma olmuştur ve dahası şu bulunmuştur ki $Z=1,3$ için, T_{PV} ve $T_{çıkış}$ en yüksek değerleri göstermektedir. Havaya olan ısı transferi ve PVT sistemindeki basınç düşümü, $\dot{m}$ değeriyle birlikte artmıştır. $\dot{m}$ ile birlikte enerji verimliliğinde bir artış olmuştur ve şu sonuca varılabilir ki $\eta_{(Z=1,3)} > \eta_{(Z=1,5)} > \eta_{(Z=2)}$. Z değeri; absorbe edici plakadaki eğri şekilli oluklara karşılık gelen $1,3 \leq Z < 2$ aralığına düştüğünde PVT sisteminin veriminin arttırılabildiği tahmin edilmiştir. Absorbe edici plakadaki eğri oluk, V-oluklarla yer değiştirmek için iyi bir seçenek olabilir. Deneysel gözlem; yakın gelecekte absorbe edici plakanın oluklarının şeklini gerçekçi olarak karşılaştırmayı çalışmak için yapılacaktır [31].

Tomar vd.'nin 2019 yılında yaptıkları çalışmada; farklı fotovoltaiik/termal (PVT) kurulumlarının, bina uygulamalarıyla birlikte verimlilikleri için teorik ve deneysel analiz üzerinde durulmaktadır. Özellikle, dört adet tasarlanmış özdeş prototip test hücrelerinin; bina entegreli fotovoltaiik/termal (BiPVT) sistemleri vurgulaması üzerine bir deney gerçekleştirilmiştir. Özdeş test hücreleri üzerine entegre edilmiş olan dört farklı muhtemel PVT kurulumunun karşılaştırmalı bir analizi yapılmıştır. Bunlar şöyledir: Durum 1: Bir test hücresine entegre edilmiş kanala sahip camdan-cama PV, Durum 2: Bir test hücresine entegre edilmiş kanala sahip olmayan camdan cama PV, Durum 3: Bir test hücresine entegre edilmiş kanala sahip camdan tedlara PV, Durum 4: Bir test hücresine entegre edilmiş kanala sahip olmayan camdan tedlara PV. Farklı durumlar için elektriksel ve ısı performansın analitik modeli geliştirilmiştir ve dış ortam şartlarında deneysel olarak doğrulanmıştır. Korelasyon katsayısı (r) ve ortalama karekök yüzde sapması (e) temelinde; teorik olarak hesaplanmış ve deneysel olarak gözlenmiş değerler arasında iyi bir uyum gerçekleştirilmiştir. Camdan cama PV modül; Durum 1 ve Durum 2 için sırasıyla %12,65'lik ve %12,7'lik saatlik ortalama

η_m 'ye sahip daha iyi elektriksel ve ısı performans verir. Benzer şekilde, saatlik ortalama η_{ith} , Durum 1 ve Durum 2 için sırasıyla %32,77 ve %25,44 olarak gözlemlenmiştir. Dahası; değişken paketleme faktörüne sahip ısı yük seviyelemesi, PV entegreli kanal içerisinden olan hava kütsel debisi, emicilik (indirgeme etkisi) ve aktarma yeteneği (toz etkisi) de tartışılmaktadır. Bu çalışmada, prototip test hücrelerine entegre edilmiş dört farklı PVT kurulumunun performansı; bina entegreli PVT (BIPVT) sistemlerinin verimini kavramak için araştırılmıştır. Test hücrelerinin elektriksel verimleri, oda havası sıcaklığı ve ısı verimleri için analitik bir model, korelasyon katsayısına (r) ve kök ortalama kare sapmasına (e) bağlı olarak geliştirilmektedir ve deneysel olarak doğrulanmaktadır ve sırasıyla $r=0,867-0,915$, $e=2,51-3,42$ aralığında ve $r=0,871-0,921$, $e=2,82-3,44$ aralığında bulunmuştur. Kanallı kurulumu; camdan tedlara PV modül için saatlik ortalama $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile çalışma sıcaklığı T_c 'yi azaltmaya yardımcı olur. Bununla birlikte, camdan cama PV modül için, çalışma sıcaklığı T_c ; kanal kesiti içerisindeki ön-ısıtılmış havanın sıkışmasına bağlı olarak kanalsızdan $1,07\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik bir ortalama ile fazla olmaktadır. Kanalsızla kıyasla, kanallı camdan tedlara PV modül %0,28'lik bir ortalama ile birlikte daha yüksek elektriksel verime sahiptir; bununla birlikte, aksine, kanalsız camdan cama PV modül, kanallıya göre ortalama %0,55 daha yüksek elektriksel verime sahiptir. Camdan tedlara PV modüle kıyasla camdan cama PV modüller; kanallı ve kanalsız durumlar için %0,72'lik ve %1,05'lik bir ortalama ile daha yüksek elektriksel verime sahiptir. Elektriksel enerjiler; Ocak ayının tipik bir günü için Durum 1, Durum 2, Durum 3 ve Durum 4 için sırasıyla 0,583 kWh, 0,584 kWh, 0,505 kWh ve 0,488 kWh olarak bulunmuştur. Benzer şekilde; karşılık gelen ısı enerjiler Durum 1, Durum 2, Durum 3 ve Durum 4 için sırasıyla 3,74 kWh, 2,90 kWh, 2,78 kWh ve 1,06 kWh'dir. Kanallı durumda; Durum 1, Durum 3'e kıyasla $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 0,13 kWh daha yüksek olan en yüksek oda havası sıcaklık kazancına ve en yüksek günlük faydalı güneş ısı kazancına sahiptir; bununla birlikte, kanalsız durumda, Durum 2, Durum 4'e kıyasla $2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 0,25 kWh daha yüksektir. Paketleme faktörünün artışıyla birlikte ve PV entegreli kanal içerisinden olan hava kütsel debisinin artışıyla birlikte ısı kararlılık azalır. Dahası; fotovoltaik modülün indirgenmesi (emicilik yeteneğindeki azalmalar) ve toz etkileri (aktarım yeteneğindeki azalmalar); farklı PVT kurulumlarının ısı kararlılığı üzerinde zararlı etki oluşturur. Geliştirilen modele ve onun deneysel doğrulanmasına dayanarak; analitik model, tasarımcı için çok faydalı bir araç olabilir

ve yük ihtiyaçlarına göre en uygun sistemi yeniden tasarlamak için mimara çok faydalı bir araç olabilir. Eğer bu tür sistemler bina çatısı olarak veya bina yüzeyiyle bütünleşik olarak kurulursa Durum 1'in tasarımı verimlidir; bu, elektriksel ve ısıl ihtiyaçları eş zamanlı olarak karşılayacaktır. Kontrol edilemeyen ısıtmaya kıyasla Durum 2'nin tasarımı, elektrik üretimi açısından faydalıdır; buna rağmen, güneş ışıınımı, bu durumda ilave faydalıdır. Önerilen model de markette mevcut olan farklı çeşit PV teknolojileri için doğrulanmalıdır. Isıl konforu elde etmek için veya test hücresi içerisinde veya bina entegreli PVT sistemi içerisinde arzu edilen sıcaklığı elde etmek için, kanal içerisindeki havanın kütsel debisi ihtiyaca göre optimize edilmelidir. Hem camdan cama hem de camdan tedlara PV modül için ve ayrıca şeffaf kanalın mümkün olan uygulanabilir kullanımı için de gün ışıınımı parametrelerini dikkate alarak, toplam bir ekserji analizi yürütülmelidir [32].

Herrando vd.'nin 2019 yılında yaptıkları çalışmada; hibrit PV/Termal (PVT) güneş kollektörleri için 26 adet alternatif absorbe edici/ısı değıştirici tasarımları önerilmektedir ve referans bir durum olan levhalı ve tüplü ticari PVT kollektör ile kıyaslanmaktadır. Kollektörler; geleneksel plakalı ve tüplü kuruluma dayanan ve ayrıca kollektörlerin toplam ağırlığında ve maliyetinde azalmalar gerçekleştirirken ısı transferini ve toplam (ısıl ve elektriksel) performansı korumak ve hatta geliştirmek amaçlı alternatif polimer yapılı malzemelerden yapılmış olan yeni bir düz kutulu yapıya dayanan farklı geometrik tasarım özelliklerini içermektedir. Bu çalışmanın temel katkıları şunları içerir: Çoklu fizik süreçlerini (ısı transferi, akış dinamiğı ve katı mekaniğı) içeren önerilen PVT kollektör tasarımlarının ayrıntılı bir üç boyutlu hesaplamalı sonlu eleman modelinin geliştirilmesi ve doğrulanması; önerilen PVT tasarımlarının karşılaştırmalı tekno-ekonomik analizlerinden çıkan sonuçlar; önerilen kollektörlerin ısıl gerilim ve yapısal deformasyon analizlerinden çıkan, uzun yaşam sürelerini garanti etmek için gerekli olan ve özellikle polimer yapılı kollektörler durumunda önemli olan daha fazla kavrayışlar. Sonuçlar göstermektedir ki genel olarak, ince bir emici plaka ile karakterize edilen düz kutulu tasarımlar; kanal akışı boyutuna veya yapı malzemesine, en azından araştırma aralığı içerisinde duyarlı değildir. 3x2 mm dikdörtgen kesitli kanallara sahip poli-karbonat (PC) düz kutulu tasarıma sahip bir PVT kollektör; %4 daha yüksek optik verimli ve %15 daha az lineer ısı kayıp katsayılı referans duruma kıyasla oldukça gelişmiş bir ısıl performansı

başaran, bununla birlikte aynı zamanda ağırlığı yaklaşık %9 azaltan ve kollektör yatırım maliyetini yaklaşık %21 azaltan ticari PVT kollektörlere özellikle umut verici bir alternatif olarak görünmektedir. Yapısal analiz göstermektedir ki PC düz kutulu kollektörün absorbe edici/ısı değiştiricisinde deneyimlenen en yüksek von Mises gerilimi; PC absorbe edici/ısı değiştiricisinin daha büyük ısıl genişmesine atfedilen, daha düşük gerilimlere yol açan, bakır plakalı ve tüplü kollektöründekinden dikkate değer düzeyde daha düşüktür (malzemenin akma gerilmesinin %13'ünden ile %64'üne kadar daha küçük). Bu nedenle; önerilen PC düz kutulu tasarımın, ticari olarak mevcut olan PVT kollektörden daha büyük uzamalardan muzdarip olması beklenmemektedir. Performans, ağırlık ve maliyetin en uygun dengesine sahip olan geliştirilmiş hibrit PVT kollektörlerin potansiyeli ve üretimin kolaylığı; güneş enerjisi kaynağının en uygun bir kullanımını gerçekleştirme teşebbüsü olarak araştırılmıştır. Bakır plaka-tüp kollektörlerin analizi şunu göstermiştir ki boru çapı, bu kollektör tasarımının ısı verimi üzerinde önemli bir etkiye sahip değildir; bununla birlikte, yükseltici tüplerin sayısındaki artış, ısı ve elektriksel verimlerini, her iki verimin de ötesinde sonsuz gittiği, yaklaşık 20-25 boruya kadar ciddi anlamda arttırır. Ancak, daha fazla yükseltici borulara sahip kollektörler; %2,3'e kadarki oldukça daha iyi olan ısı performansları sayesinde ağır basmayan daha yüksek yatırım maliyetlerine bağlı olarak daha büyük geri ödeme sürelerine sahiptir. Alüminyum plakalı ve tüplü (Al-S&T) kollektörler için benzer sonuçlar elde edilmiştir; buna rağmen, bu durumda, daha düşük malzeme ücreti, alüminyumun daha düşük ısıl iletkenliğinden kaynaklanan absorbe edici/ısı değiştiricinin oldukça daha kötü olan ısı performansına ağır basan daha düşük yatırım maliyetlerine izin vermektedir. Böylece, referans bakır durumuna ilginç bir alternatif olarak alüminyum bir tasarım dikkate alınmaktadır, çünkü kollektörün yatırım maliyetini %3,7 azaltırken ve kollektör ağırlığını %11,7 azaltırken elektriksel/ısı verimleri sabit tutar. Tüm düz kutulu kollektörler; absorbe edici ile akışkan arasındaki artmış ısı transfer alanına bağlı olarak, referans S ve T kollektörlerine üstün gelmiştir. Dahası, PV hücreleri üzerindeki sıcaklık dağılımı; S&T tasarımlarında gözlemlenenlere kıyasla, sıcak noktaları hafifleten ve daha düşük hücre sıcaklıklarına sebep olan düz kutulu tasarımlarında daha üniormdur. Sonuç olarak, dikkate alınan polimerlerin ısıl iletkenliği bakırınkinden dikkate değer seviyede daha düşük olmasına rağmen, düz kutulu tasarımların tamamı, referans kollektöre kıyasla, %4,8'e kadar daha yüksek bir optik verim (τ_o) ve %15,7'ye kadar daha düşük bir ısı kayıp katsayısı

(a₁) gerçekleştirir. Kanal boyutlarının ve katı yapı malzemesinin; kollektör performansına etkileri de çalışılmıştır. Sonuçlar göstermektedir ki, incelenen kollektörlerde iyi bir ısı ve elektriksel performans gerçekleştirmede kritik etken; ısı direnci en aza indirmekten ziyade ısı transfer alanının en üst değere çıkarmaktır, böylece absorbe edici/ısı değiştiriciden en yüksek ısı miktarını çekmektir. Şu not edilmelidir ki önerilen tasarımlar ince bir absorbe edici plakaya (1mm) ve düşük akışkan hızlarına sahiptir, ki bu durum laminar akışlarla sonuçlanır. Bu nedenle, malzemeleri ve kanal boyutlarını değiştirmenin PVT kollektör performansı üzerindeki etkisi, bu çalışmada önerilen çalışma aralığında gözlemlenebilir iken küçüktür ve önemli olduğu düşünülmez. Seçili kollektör tasarımlarının pek göze çarpmayan ilk yapısal analizi göstermiştir ki önerilen düz kutulu tasarımlar; kollektör uzunluğunun %1'inden azının burulmasına ve daha düşük en yüksek von-Mises gerilimlerine bağlı olarak, küçük düşey yer değiştirmelere sahip referans S&T kollektöre karşı umut verici alternatiflerdir. Böylece; bu düz kutulu tasarımların, ticari olarak mevcut olan kollektörlere göre daha yüksek uzamalardan muzdarip olmaksızın, daha düşük yatırım maliyetlerinde daha yüksek ısı verimleri ve bu nedenle daha düşük geri ödeme süreleri gerçekleştireceği beklenmektedir. Son olarak, ekonomik bir analiz şunu ortaya koymuştur ki bakır ve alüminyum düz kutulu tasarımların oldukça daha iyi ısı ve elektriksel performansı, onların daha yüksek yatırım maliyetlerini karşılamamaktadır. Ayrıca bulunmuştur ki ısı iletkenliği arttırmak için katkı maddelerine sahip polimer yükleme, kollektör maliyetini dikkate değer düzeyde artırır; bununla birlikte yalnızca, absorbe edici ince plakanın rolü ile alakalı gözlemlerle uyumlu bir biçimde marjinal maliyet tasarruflarını başarır. Sonuç olarak; satışa hazır polimerlerden olan önerilen düz kutulu tasarımlar, katkı maddesiz ticari kollektörlere umut verici bir alternatiftir. Bu kurulumlar kollektörün ısı ve elektriksel performansında bir gelişme gerçekleştirebilir; bununla birlikte, yatırım maliyetini %22'ye kadar ve ağırlığı %10'a kadar düşürebilir. Özellikle; sonuçlar göstermiştir ki, enerji tüketiminde ve kollektör üretim, taşıma ile kurulumu ile alakalı maliyetlerde umut verici bir azalmaya işaret eden, aynı zamanda toplam kollektör ağırlığında %9'luk bir azalmaya neden olan daha düşük yatırım maliyetine (%21 daha düşük) ve daha iyi ısı/elektriksel verimlere (%5,9, %2,9 ve daha yüksek) bağlı olarak PC 3x2 mm düz kutulu tasarım, en düşük geri ödeme süresini (referans Cu-S&T kollektörden %24,6 daha düşük) başarabilir. Taşıma, kurulum ve diğer maliyetler, mevcut araştırmada dikkate alınmadığı halde, bu

maddeler; yaşam döngüsü enerjisi ve yapı malzemelerinin çevresel etkisi, yeniden dönüştürülebilirlik özelliği gibi şeylerle birlikte önemlidir. Bu nedenle; performans açısından, ekonomik ve çevresel açılardan, önerilen benzersiz tasarımları tam olarak karakterize etmek için daha fazla çalışma olarak, yaşam döngüsü etkisi değerlendirmeleri önerilmektedir. Ayrıca, daha fazla çalışma da şunlar için gereklidir: 1) PVT kollektörün yan taraflarının etkisini de dikkate almak için, 3 boyutlu CFD-SEY modelindeki tüm PVT kollektörün yapısal performansını ve enerji performansını ayrıntılı analiz etmek 2)Önerilen PVT kollektör tasarımının bir prototipini imal etmek ve gerçek performansını değerlendirmek üzere deneysel analize girişmek 3)Bir binaya kurulduğunda, komple bir PVT tabanlı güneş enerjisi birleşimli ısı ve güç (S-CHP) sisteminin tüm yıl boyunca enerji performansını değerlendirmek [33].

Kazemian vd'nin 2018 yılında yaptıkları çalışmada; cam kaplamanın ve çalışma akışkanının fotovoltaiik/termal (PVT) sistem performansı üzerine etkisinin deneysel bir çalışması sunulmaktadır. Birisi cam kaplamalı diğeri cam kaplamasız iki adet benzer fotovoltaiik/termal sistem, deneyleri gerçekleştirmek için tasarlanmaktadır ve üretilmektedir. Dikkate alınan çalışma akışkanları; sudan, etilen glikol (EG)/su karışımından (%50 su) ve saf etilen glikolden oluşmaktadır. Dış ortam deneyleri; İran, Maşad'da, Maşad Ferdavsi Üniversitesi'nde Ağustos'ta, seçili olan günlerde gerçekleştirilmektedir. PVT sisteminin elektriksel ve ısı verimlerini değerlendirmek için enerji ve ekserji analizleri yürütülmektedir. Dahası, EG/su karışımı için olan sonuçlar, saf de-iyonize su kullananlarla karşılaştırılmaktadır. Şu gözlemlenmektedir ki çalışma akışkanı olarak EG/su karışımı (%50 su); saf etilen glikole kıyasla yalnızca daha düşük bir donma noktasına sahip değildir, aynı zamanda saf etilen glikolünkilere kıyasla daha yüksek toplam enerji ve ekserji verimine sahiptir. Bu nedenle, EG/su karışımı (%50 su), soğuk iklim şartları için uygun bir çalışma akışkanı olarak önerilir. Geniş kapsamlı sonuçlar ayrıca şunu göstermektedir ki, elektriksel enerji ana ilgi konusu olduğunda, sırlanmamış PVT sisteminin elektriksel verimi sırlanmış PVT'nin elektriksel veriminden daha yüksek olduğundan, sırlanmamış PVT tercih edilmektedir. Ancak, eğer daha yüksek bir toplam enerji verimi talep edilirse, sırlanmış PVT sistemi önerilir. Mevcut çalışma; cam kaplama kullanmanın, PVT sistemlerinin performansları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada dikkate alınan çalışma

akışkanları; saf su, EG/su (%50 su) ve saf etilen glikoldü. Bu çalışmanın bulguları şöyle özetlenebilir:

- Ortalama ısııl enerji verimi; PVT/su, PVT/EG-su (%50 su) ve PVT/saf etilen glikolün sırlanmamış durumları için sırasıyla %63,37, %59,95 ve %44,68'e eşittir. Sırlanmış sistemler için bu değerler sırasıyla %70,89, %68,27 ve %53,75'e eşittir.
- Isıl verimin dışında, su ve etilen glikol kullanarak bir PV birimini soğutmak, sistemin elektriksel verimini geliştirmiştir. Dahası; diğer çalışma akışkanlarına sahip PVT sisteme kıyasla, PVT/su sistemi için hem elektriksel hem de ısııl enerji verimleri daha fazladır.
- Etilen glikol; suda çözündüğünde hidrojen bağıını kırar. Saf etilen glikol yaklaşık 12,5 °C'de donar, ama suyla karıştırıldığında, karışım kolayca kristalleşmez. Böylece EG/su karışımının (%50 su) donma noktası -36,5 °C'ye düşer. Sonuç olarak, çalışma akışkanı olarak EG/su karışımını (%50 su) kullanmak, saf etilen glikole kıyasla yalnızca daha düşük donma noktasına sahip değildir; ayrıca, saf etilen glikole kıyasla daha yüksek toplam enerji ve ekserjiye sahiptir. Bu nedenle, EG/su karışımı (%50 su) soğuk iklim koşulları için daha uygun bir çalışma akışkanı olarak önerilmektedir.
- Sırlanmamış PVT sisteminin elektriksel verimi sırlanmış PVT'nin elektriksel veriminden daha yüksek olduğundan, elektriksel enerji ana ilgi konusu olduğunda, sırlanmamış PVT tercih edilir. Ancak, daha fazla toplam enerji (elektriksel ve ısııl enerjilerin toplamı) talep edilirse, sırlanmış PVT sistemi önerilir, çünkü sırlanmamışa kıyasla daha yüksek toplam verime sahiptir [34].

Özetle, toplam enerji ve ekserji verimlerinin azalmasına bakılmaksızın, suya etilen glikol eklenmesi, donma noktasını düşürür ki bu durum çalışma akışkanının soğuk iklim koşullarında donmasını önler. Ayrıca, PVT sisteme bir cam kaplama eklemek suretiyle, sistemin ısııl performansı geliştirilmektedir [34].

Tiwari vd.'nin 2018 yılında yaptıkları çalışmada; N-tam örtülü yarı saydam fotovoltaiik/termal bileşenli parabolik yoğunlaştırıcı (PVT-CPC) kollektörün, sabit toplama sıcaklığı modu için çalışma parametreleri, toplam ekserji analizi temelinde

analiz edilmiştir. Verilen tasarım ve iklim parametreleri için, önerilen sistem; buhar absorpsiyonlu soğutma sistemine uygulanabilir olacaktır. Analizler; her bir bileşenin, yani güneş hücresinin, absorbe edici plakanın, yoğunlaştırıcının, akan akışkanın temel enerji dengesi üzerine kuruludur. Sayısal hesaplamalar; MATLAB R2015a kullanmak suretiyle New Delhi iklim koşulları için yürütülmüştür. Önerilen sistemin performansı da fotovoltaik/termal düz plakalı kollektörün (PVT-PFC), geleneksel düz plakalı bileşen parabolik yoğunlaştırıcı kollektörün (FPC-CPC) ve geleneksel düz plakalı kollektörün (FPC) performansı ile karşılaştırılmıştır. Şu çıkarımlar yapılmıştır:

- N-tam örtülü yarı saydam PVT-CPC sisteminin toplam ekserjisi, sabit toplama sıcaklığındaki artışla birlikte azalır.
- N-tam örtülü yarı saydam PVT-CPC sisteminin toplam ısı enerjisi, paketleme faktöründeki azalma ile artar.
- Tam örtülü yarısaydam malzemeye sahip PVT-CPC ve PVT-FPC, buharlı absorpsiyon soğutma sistemi için kullanmak amacına yönelik olarak kendiliğinden çalışan kollektörlerdir [35].

Önerilen sistem; buhar absorpsiyonlu soğutma (VAR) sistemleri için en uygun olacaktır. Çalışmadan ayrıca şu çıkarımlar ve öneriler yapılmıştır:

- Hem önerilen hem de Durum 1'deki sistemler; buhar absorpsiyon soğutma (VAR) sistemi için kendiliğinden çalışmaktadır.
- Isıl enerji bakış açısıyla, önerilen sistem uygundur; ancak, elektriksel bakış açısıyla Durum 1 uygundur.
- Bu nedenle; hem önerilen sistem hem de Durum 1 için, verilen bir buhar absorpsiyonlu soğutma (VAR) sistemi kapasitesi için, kollektör sisteminin boyutunu optimize etmeye güçlü bir ihtiyaç vardır.
- Isıl ve elektriksel gücün optimizasyonu için paketleme faktörü (β_c) en önemli rolü oynayacaktır.
- Sistem boyutunu ekserji bakış açısıyla optimize etmek her zaman daha iyidir [35].

Nasrin vd.'nin 2018 yılında yaptıkları çalışmada; kontrol edilen çalışma koşulları ve parametreler altında bir PV modülün iç ortam deneyi gerçekleştirilmiştir. PVT'nin ısı performansını arttırmak için, ısı kollektörün benzersiz tasarımı tanıtılmıştır, komple bir PVT sistemi monte edilmiştir ve su/MWCNT nanoakışkan kullanılmıştır. PVT sistemi için aktif bir soğutma, santrifüj pompa kullanmak suretiyle sağlanmıştır ve tavsiye edilen giriş sıcaklığını korumak için nanoakışkanın ısını çevreye atmak için çevrimde bir radyatör kullanılmıştır. SEY tabanlı COMSOL Multiphysics yazılımı ile 3 boyutlu sayısal simülasyon yürütülmüştür ve 0,5 L/dak hacimsel debi ile 32 °C giriş sıcaklığını korurken, 200 W/m²'den 1000 W/m²'ye değişen farklı ışınlam seviyelerinde, %0'dan %1'e değişen farklı ağırlık kesirlerinde iç ortam deneysel araştırması aracılığıyla doğrulanmıştır. Sayısal sonuçlar; deneysel ölçümlere pozitif bir yanıt göstermektedir. Deneysel durumda, artan PV performansının yüzdesi, sulu soğutma sistemini kullanmak suretiyle %9,2 olarak bulunmaktadır. Su yerine nanoakışkan kullanmak suretiyle sayısal ve deneysel çalışmalarda sırasıyla yaklaşık %4 ve %3,67 olarak daha yüksek ısı performans elde edilmektedir. 1000 W/m² güneş ışınlamında nanoakışkan aracılığıyla işletilen PVT sisteminde, sayısal ve deneysel toplam verimler sırasıyla %89,2 ve %87,65 olarak bulunmaktadır. Deney; kontrol edilen iç ortam çalışma şartlarında, aktif soğutma sistemi aracılığıyla yürütülmüştür. Su/MWCNT nanoakışkan tarafından çalıştırılan PVT'nin gelişmiş tasarımının verimini doğrulamak için deneysel doğrulama kullanılmıştır. Testler göstermektedir ki deneysel olarak ölçülen değerler, sayısal olarak tahmin edilenleri desteklemektedir. Çeşitli ağırlık kesirleri, farklı ışınlamalar; PVT sisteminin performansını incelemek için uygulanmıştır. Soğutucu akışkanın hacimsel debisi, giriş akışkan sıcaklığı, çevre sıcaklığı; 0,5 L/dak'da, 32 ve 25 °C'de sabit tutulmuştur. Deneysel ve sayısal araştırmalara dayanarak sonuçlar şöyle yazılabilir:

- Deneysel durumda, PV performansının yüzdesi; soğutma sistemi (su) kullanmak suretiyle yaklaşık %9,2 gelişmektedir.
- %1'den daha az MWCNT ağırlık kesri; PVT sistemi için avantajlı olarak gözlenmektedir.
- %1 yoğunlaştırılmış su/MWCNT nanoakışkan kullanan PVT'nin elektriksel gücü; güneş ışınlamadaki her 100 W/m² artış için deneysel ve sayısal olarak sırasıyla yaklaşık 17,48 ve 17,66 W artar.

- Su/MWCNT nanoakışkanı (%1 ağırlık kesri) tarafından çalıştırılan PVT'nin ısı enerjisi; güneş ışınlamındaki 100 W/m^2 'lik her artış için deneysel olarak ve sayısal olarak sırasıyla yaklaşık $113,14 \text{ W}$ ve $114,84 \text{ W}$ artmaktadır.
- Isıl ve elektriksel verim; deneysel araştırmada su yerine su/MWCNT nanoakışkanı tarafından çalıştırılan PVT sistemi için sırasıyla yaklaşık %0,14 ve %3,67 daha yüksek olur.
- PVT toplam performansı; su yerine su/MWCNT nanoakışkanı kullanmak suretiyle sayısal ve deneysel sonuçlar için sırasıyla yaklaşık %3,81 ve %4,11 daha yüksek elde edilmektedir [36].

Mevcut deneysel ve sayısal araştırma ısı enerjisi, çıkış gücü ve toplam verim açısından; yeni tasarım bir ısı değiştiricisinin geliştirilmesi suretiyle PV modülün soğutma sisteminin kurulumuna, su/MWCNT nanoakışkan kullanmak suretiyle PVT performansının değerlendirilmesine odaklanmaktadır [36].

Gupta vd.'nin 2018 yılında yaptıkları çalışmada; düz plakalı kollektörün (FPC) Hottel-Whillier-Bliss denklemine benzer olan N-eşdeğer tam örtülü fotovoltaiik termal (PVT) bileşenli parabolik yoğunlaştırıcı kollektör (CPC) entegreli güneş enerjili damıtma sistemi için analitik karakteristik denklemin geliştirilmesiyle ilgilenilmektedir. Kısmen örtülü PVT şöyle dezavantajlara sahiptir: Daha yüksek üst kısım kayıp katsayısına bağlı olarak ısı performans daha düşüktür, bakım maliyeti daha yüksektir ve üretim daha pahalıdır [37].

Bu sorunlar; aynı en yüksek watt değeri için tam örtülü PVT durumunda tamamen işaret edilmektedir. Önerilen sistem için analitik karakteristik denklemin geliştirilmesi, çeşitli bileşenleri için enerji denge denklemlerini yazmaktan oluşur. Önerilen N-PVT-CPC entegreli aktif güneş enerjili damıtma sisteminin (Durum 1) sonuçları; tam örtülü N-özdeş PVT-FPC entegreli güneş enerjili damıtma sistemi (Durum 2) ile ve geleneksel N-özdeş FPC aktif güneş enerjili damıtma sistemi (Durum 3) ile karşılaştırılmıştır. Durum 1'in ortalama anlık veriminin Durum 2'den %10,60 daha yüksek olduğu, ama Durum 3'ten %20,74 daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Tamamen örtülü N-özdeş PVT-CPC kollektörlerin entegre olduğu güneş enerjili damıtma birimi için analitik ifade geliştirilmiştir ki bu ifade ayrıca tamamen örtülü N

adet özdeş düz plakalı kollektörlerin entegre olduğu güneş enerjili damıtma sistemi için ve geleneksel N adet özdeş düz plakalı kollektörlerin entegre olduğu güneş enerjili damıtma sistemi için de geçerlidir. Önerilen sistem için anlık verim, Mayıs ayındaki tipik bir gün için $N=6$, $\dot{m}_f = 0,03 \text{ kg/s}$ ve su derinliği $=0,14 \text{ m}$ 'de değerlendirilmiştir. Durum 1'deki önerilen sistemin sonucu; Durum 2 ve Durum 3'deki sistemlerin sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. Durum 1'in anlık veriminin ve saatlik içilebilir su kazancının, Durum 2'den daha yüksek, ancak Durum 3'den daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, önerilen güneş enerjili damıtıcı biriminin anlık verimi, PV modülün paketleme faktörü arttırıldıkça azalır [37].

Yandri'nin 2017 yılında yaptığı çalışmada; yalnızca ısı enerjisinin üretildiği (T-modu) durumla kıyaslamak suretiyle hem ısı hem de elektriksel enerjilerin üretildiği durumda (PVT-modu) ısı verimi geliştirmek için ilave ısı olarak Joule ısınmasının kullanımına odaklanmak suretiyle hibrit bir fotovoltaiik ve termal (PVT) kollektörün performansı tartışılmaktadır. En yüksek güç noktası ve tepe değerdeki güneş ışıınımı esnasında, PV malzemedeki sıcaklık farkı; akımdaki artışa bağlı olarak artmıştır. Joule ısınması veya iç ısınma da elektrik akımının karesiyle doğru orantılı olarak artmıştır. PV yüzey üzerinden PVT kollektördeki ısı absorbe ediciye iletilen ısı da artar. Bu nedenle deney; daha yüksek güneş ışıınımı kullanmak suretiyle, örneğin 12°C , 15°C , 20°C ve 25°C olmak üzere dört farklı giriş suyu sıcaklıklarında daha büyük bir PVT kollektör ile gerçekleştirilmiştir. Suyun debisi $6,7 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{sn}} \approx 4 \text{ L/dak}$ idi. Işıınım verisi; daimi rejim ısı performansını korumak için ve ayrıca gecikme etkisini en aza indirmek için 12:00'dan 13:00'a kadar bir saat boyunca toplanmıştır. Mevcut PVT kollektörü sisteminde ve kurulumunda sonuç göstermiştir ki 1m/s 'nin altındaki orta değerdeki bir rüzgar hızı bile, ısı verimde ihmal edilemez bir kayıpla sonuçlanmaktadır. Giriş suyu sıcaklığı çevre havası sıcaklığına yakın olduğunda veya toplam güneş ışıınımı yüksek olduğunda, birinci mertebeden ısı verim gradyanının daha düşük aralığında PVT-modunda PVT kollektörün ısı verimi T-modundan daha yüksektir. PVT-modun ısı veriminin davranışı da çalışma esnasında iç kısmın ısınması gibi diğer etkenler tarafından kayda değer bir biçimde etkilenmiş görünmektedir. Daha yüksek güneş ışıınımı süreleri esnasında, Joule ısınma etkisi; PVT modun ısı verimini %13'e kadar arttırma potansiyeline sahiptir. PV hücresindeki

işsel ısınma hem etkin absorpsiyon katsayısını hem de ısı kayıp katsayısını açıkça etkiler. Joule ısınmasının gerçek hayattaki bir PVT sistemi ile pratik ilgisi; yüzme havuzu ısıtması, düşük sıcaklık kaynaklı ısı pompaları ve zemin ısıtması gibi düşük sıcaklık uygulamaları dolayısıyladır. Görece daha küçük bir $0 < \frac{(T_i - T_a)}{I} < 0,020$ aralığı için üst yüzey cam kaplamasına ve arka yüzey yalıtımına sahip bir PVT kollektör için deneyler serisi yürütülmüştür. Dört adet giriş suyu sıcaklığı kabul edilmiştir; örneğin 12 °C, 15 °C, 20 °C ve 25 °C. Esas sonuçlar şöyle özetlenmektedir:

- Mevcut PVT kollektör sisteminde, 1m/s'nin altındaki orta değerdeki bir rüzgar hızı bile ısı veriminin ihmal edilemez düzeyde bir kaybı ile, örneğin % 6-9 ile, sonuçlanmaktadır.
- Giriş suyu sıcaklığı çevre havası sıcaklığına yakın olduğunda ve yaklaşık 1000 W/m²'ye yakın olan daha yüksek güneş ışınlamı ile desteklendiğinde, daha düşük $(T_i - T_a)/I$ değerinde, PVT modunda PVT kollektörün ısı verimi T-modundan daha yüksektir.
- PVT-modun ısı verim davranışının; çalışma esnasında oluşan iç ısınma etkisini veya Joule ısınmasını kayda değer düzeyde etkilediği görülmektedir.
- Joule ısınma etkisi; PVT-modunun ısı verimini %13'e kadar artırma potansiyeline sahiptir. Bu durumda, PV hücresindeki Joule ısınması; ısı verimin tanımındaki, yaygın bir biçimde kullanılan hem etkin absorpsiyon katsayısı a_e 'yi hem de ısı kayıp terimi olan $U_L(T_i - T_a)/I$ 'yı belirgin bir biçimde etkiler.
- PVT modu, T-modu ile karşılaştırıldığında, a_e ve U_L katsayıları sırasıyla 1,15 ve 1,75 kat artar. PVT modu tarafından dönüştürülen, güneş enerjisinin yaklaşık %72'sidir ve T-modu tarafından dönüştürülen %54'üdür [38].

Son olarak; özellikle düşük sıcaklık uygulamaları için, daha yüksek güneş ışınlamı (PVT-modu) esnasında daha fazla ısı enerji üretmek için olan bir stratejiyle birlikte PVT kollektörün verimini artırma potansiyeli vardır. Bu çalışma; özellikle ekonomik hesaplamaların maliyetiyle uğraşan önceki bazı çalışmalarda rapor edildiği gibi, düzenli çalışma modu için tamamlayıcı bir sonuç olarak düşünülebilir. PVT kollektörün özel türü, boyutu, sistemi vb... için olan Joule ısınması değerlerinin hesaplanması için daha

kapsamlı araştırma gerekmektedir. Daha fazla araştırmanın; bu diğer yönleri analiz etmek için de yapılması gerekmektedir [38].

Fayaz vd.'nin 2018 yılında yaptıkları çalışmada; su ve MWCNT-su nanoakışkan kullanan PVT sistemlerinin üç boyutlu bir sayısal analizi; SEY tabanlı COMSOL Multiphysics yazılımı aracılığıyla tamamlanmıştır. Güneş ışımasını 1000 W/m^2 'de sabit, giriş akışkanı ve çevresel sıcaklığı sırasıyla 32°C ve 25°C 'de sabit tutarken 30 'dan 120 L/h 'e kadar farklı kütleli debilerde iç ortam deneysel araştırması aracılığıyla sayısal bir inceleme doğrulanmıştır. 120 L/h debide nanoakışkan soğutmasına sahip PV'nin elektriksel veriminin yüzdesel artışı; sayısal ve deneysel durumlar için sırasıyla yaklaşık $\%10,72$ ve $\%12,25$ olarak elde edilmektedir. Ağırlık konsantrasyonu için nanoakışkanın optimizasyonu, $\%0,75$ MWCNT-su değerinde gerçekleştirilmektedir. Güneş hücresi sıcaklığı; her 10 L/h debi artışı başına deneysel olarak yaklaşık $0,72^\circ\text{C}$ ve sayısal olarak yaklaşık $0,77^\circ\text{C}$ azalmaktadır. Sayısal ve deneysel çalışmalarda 10 L/h debi artışı başına, sırasıyla yaklaşık $7,74 \text{ W}$ ve $6,89 \text{ W}$ ısı güç artışı olmaktadır. Su/MWCNT nanoakışkanı tarafından çalıştırılan PVT sistemi için ısı verimin yüzdesel artışı, suya kıyasla sayısal olarak $\%5,62$ olarak ve deneysel olarak $\%5,13$ olarak bulunmaktadır. Su ve MWCNT-su nanoakışkanı tarafından çalıştırılan bir PVT sisteminin performans değerlendirmesi ve karşılaştırması, bu çalışmada hem sayısal olarak hem de deneysel olarak sunulmuştur. SEY tabanlı COMSOL Multiphysics yazılımı sayısal simülasyonu gerçekleştirmiştir. Deney; kontrollü iç ortam koşullarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel doğrulama; soğutucu akışkan olarak MWCNT-suyun kullanımı ile birlikte önerilen tasarımın verimini doğrulamak için kullanılmıştır. Mevcut çalışmada şu bulgular elde edilmiştir:

- Deneysel olarak ölçülen veriler; sayısal olarak tahmin edilen değerleri destekler. PV modülün elektriksel verimi; 1000 W/m^2 'de, sayısal ve deneysel durumlar için sırasıyla yaklaşık $\%11,29$ ve $\%11,02$ olarak bulunmaktadır; bununla birlikte en yüksek hücre sıcaklığı sayısal ve deneysel durumlar için yaklaşık 81 ve 84°C 'dir.
- Hücre sıcaklığındaki her 1°C düşüş için; çıkış gücü ve verim sayısal olarak $1,01 \text{ W}$ ve $\%0,067$ artar ve deneysel olarak $0,95 \text{ W}$ ve $\%0,064$ artar.

- Elektriksel performanstaki yüzdesel artış; 120 L/h debiyle birlikte %0,75 MWCNT-su kullanan PV’de soğutma sistemini uygulamak suretiyle, deneysel ve sayısal durumlar için sırasıyla %10,72 ve %12,25 olarak başarılmaktadır.
- Su/MWCNT nanoakışkanının optimize edilmiş ağırlık kesri yaklaşık %0,75 olarak bulunmaktadır.
- Sayısal olarak yaklaşık %81,24 ve deneysel olarak yaklaşık %79,1 ısı verim; 120 L/h debideki nanoakışkan tarafından çalıştırılan PVT sistemi için gözlemlenmektedir.
- Toplam verimin yüzdesel artışı; MWCNT-su nanoakışkan kullanmak suretiyle, suya kıyasla, 120 L/h debide sayısal olarak %6,26 olarak ve deneysel olarak %5,73 olarak başarılmaktadır. Mevcut araştırmada, MWCNT-su; PVT sisteminin artmış çıkış sıcaklığı ve toplam verimi için yeni ısı kollektör tasarımıyla soğutucu akışkan olarak kullanılmıştır.
- Geliştirilmiş olan bu yeni ısı sistemin; geleneksel bir ısı kollektör sisteminden daha verimli olduğu bulunmuştur. Isı kollektör sisteminin tasarımı (metal ve çap seçimi), maliyeti ve ağırlığı azaltabilir ve ayrıca ölçekleme, sızıntı, PVT sisteminin doyması gibi birkaç teknik problemi de azaltabilir.
- MWCNT-suyun kullanımı; güneş enerjisi sistemlerini daha verimli ve kompakt yapan, ısı enerjisi ve ayrıca elektriksel gücü dikkate alan önemli üstünlükler sağlar [39].

Fayaz vd.’nin 2019 yılında yaptıkları çalışmada; ısı kollektörünün alüminyum malzemesi PVT ve PVT-PCM sistemlerine monte edilen, ısı transfer performansını arttırmaya yönelik olan benzersiz bir tasarımı tanıtmak suretiyle kullanılmaktadır. Kütleli debiyi 0,5 LPM’de sabit ve giriş suyu sıcaklığını 32 °C’de sabit tutarken, 200 W/m²’den 1000 W/m²’ye değişen güneş ışımasını seviyelerinde COMSOL Multiphysics aracılığı ile 3 boyutlu SEY-tabanlı sayısal analiz için deneysel doğrulama gerçekleştirilmektedir. Deney; asılı bir su tankı düzeni aracılığıyla modülün pasif soğutması sayesinde, dış ortam serbest hava koşullarında yürütülmektedir. Sayısal ve deneysel sonuçlarda iyi bir uyum; deneysel doğrulama aracılığıyla başarılmaktadır. PVT-PCM sistemi durumunda PV modülden 12,6 °C ve 10,3 °C’lik hücre sıcaklığı azalması başarılmaktadır. Başarılan en yüksek elektriksel verim değeri; sayısal ve deneysel olarak sırasıyla PV için %13,72 ile %13,56’dır ve PVT için %13,85 ile

%13,74'tür. Benzer şekilde, PVT-PCM için, elektriksel verim; sayısal olarak ve deneysel olarak sırasıyla %13,98 olarak ve %13,87 olarak başarılmaktadır. Sayısal olarak ve deneysel olarak sırasıyla; PVT sistem durumunda elektriksel performans %6,2 ve %4,8 olarak artar ve PVT-PCM için %7,2 ve %7,6 olarak artar. Bu araştırmada; alüminyum boru serpantin tasarımına sahip PV, PV/T ve PVT-PCM sistemlerinin sayısal ve deneysel performansının değerlendirmesi sunulmaktadır. SEY'e dayanan sayısal analiz; kontrol edilen çalışma koşulları altında yürütülen dış ortam deneyleriyle birlikte COMSOL Multiphysics kullanmak suretiyle yapılmaktadır. Mevcut araştırma çalışmasından elde edilen temel bulgular aşağıda verilmektedir:

- Önerilen tasarımın ısı ve elektriksel veriminin doğrulanması için, deneysel bir doğrulama gerçekleştirilmektedir. Testler göstermektedir ki deneysel sonuçlar; farklı kütleli debiler için sayısal analizle tatmin edici bir uyum içerisindedir.
- Sayısal olarak ve deneysel olarak; PV için, başarılan en yüksek hücre sıcaklığı 75,6 °C ve 75,1 °C'dir ve PVT için 67 °C ve 69,3 °C'dir. Ayrıca, PVT-PCM için, en yüksek hücre sıcaklığı; sayısal olarak ve deneysel olarak sırasıyla 63 °C ve 64,8 °C olarak gerçekleşmektedir.
- PVT durumunda 8,3 °C'lik ve 8,1 °C'lik en yüksek hücre sıcaklığı azalması ve PVT-PCM sistemi durumunda 12,8 °C'lik ve 12 °C'lik en yüksek hücre sıcaklığı azalması, PV modülünden gerçekleştirilmektedir.
- 200 W/m²'de PV, PVT ve PVT-PCM'nin elektriksel verimi sırasıyla sayısal olarak %13,72, %13,85 ve %14 olarak gerçekleştirilmektedir ve deneysel araştırma için %13,56, %13,74 ve %13,87 olarak elde edilmektedir.
- Sayısal olarak ve deneysel olarak sırasıyla; PVT için, en yüksek toplam verim %89,9 ve %88,84'tür ve PVT-PCM için en yüksek toplam verim %85,88 ve %82,87 olarak elde edilmektedir.
- Sayısal olarak ve deneysel olarak sırasıyla; PVT sistem durumunda elektriksel performans %6,2 ve %4,8 olarak gelişmektedir ve PVT-PCM durumunda %7,2 ve %7,6 olarak gelişmektedir.
- 200 W/m²'de sayısal olarak ve deneysel olarak sırasıyla; PVT'nin elektriksel verimi için en yüksek değer %13,744 ve %13,852 olarak gerçekleşmektedir ve

benzer şekilde PVT-PCM için elektriksel verim %13,829 ve %13,987 olarak gerçekleşmektedir [40].

Nazri vd.'nin 2019 yılında yaptıkları çalışmada; güneş enerjili ısı sistemlerin ekserji ve gelişme potansiyelinin yeniden gözden geçirilmesi sunulmaktadır. Yeniden gözden geçirme çalışması; fotovoltaik termal PV/T sistemlerinin, güneş enerjili kurutma sistemlerinin ve güneş kolektörlerinin ekserji analizini içerir. Güneş enerjili ısı sistemlerin en temel bileşeni olan güneş kolektörleri; güneş enerjisini alır ve ısı enerjisiye dönüştürür. Güneş enerjili PVT kolektör sistemi; sürdürülebilirliğin tasarımı dikkate alındığında, en temel bileşendir. Ayrıca; hibrit fotovoltaik termal/termoelektrik (PVT/TE) hava kolektörünün teorik ve deneysel performansı incelenmektedir. Hibrit bir PVT/TE hava kolektörünün kararlı hal ısı analizi; hava çıkış ve fotovoltaik (PV) sıcaklıklarını tahmin etmek için geliştirilmektedir. Tahmin edilen sonuçlar; deneysel çalışma ile iyi bir uyum içerisindedir. Teorik ve deneysel değer arasında hava çıkış ve PV sıcaklıklarının yüzdesel hatası sırasıyla %1,1 ve %2,6'dır. Diğer taraftan; simüle edilen model, 0,001 kg/s ile 0,15 kg/s arasında değişen kütleli debi ve 600 W/m^2 güneş ışınımı için ekserji analizini kullanmak suretiyle, daha sonradan, hibrit bir PVT/TE hava kolektörünün performanslarını çalışmak için kullanılmaktadır. Ekserji verimi üzerine kütleli debinin etkisi gözlemlenmektedir. PVT/TE'nin en uygun ekserji verimi görece olarak 0,38 olarak elde edilmektedir [41].

Boutina vd.'nin 2018 yılında yaptıkları çalışmada; yeni bir hibrit fotovoltaik termal güneş kolektörü kavramındaki güneş panelinin soğutulması için türbülanslı doğal taşınımın baca kulesi entegrasyonu ile iki boyutlu sayısal bir modellemesi analiz edilmiştir. Hidrodinamik akış alanı akış bölgesinde Navier-Stokes denklemleri ile ve ısı alan enerji denklemi ile yönetilmektedir. Standard $k - \varepsilon$ türbülans modeli; hızların ve skaler büyüklüklerin türbülanslı salınımlarını tanımlamak için kullanılmaktadır. Kolektör çap oranı (D_c^*), absorbe edici uzunluğu (L_a^*) ve baca kulesi çap oranı ve baca kulesi yüksekliği (D_t^* , H_t^*) gibi boyutsuz geometrik parametrelerin akış özellikleri ve ısı transfer oranı üzerine etkileri sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki önerilen yeni hibrit sistemin en uygun boyutsuz geometrik parametreleri ($L_a^*=0,625$, $D_c^*=3$, $H_t^*=0,625$ ve $D_t^*=2$), $Ra=5.10^6$ temel durumuna

kıyasla % 78,13'lük bir ısı transferi artışı meydana getirmektedir. Ortalama Nusselt sayılarının korelasyonları elde edilmektedir ve tartışılmaktadır [42].

Sahota ve Tiwari'nin 2017 yılında yaptıkları çalışmada; çeşitli RE sistemlerinin enerji ve ekonomik performansının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bunlar; şu şekildedir: N-fotovoltaik termal düz plakalı kollektör (N-PVT-FPC) (su ve hava), N fotovoltaik termal bileşenli parabolik yoğunlaştırıcı (N-PVT-CPC) su kollektörü, PVT sera kurutucusu ve bina entegreli fotovoltaik termal (BiPVT) (çatı üstü ve dış cephe) sistemi. Tüm RE sistemlerinin ısıl modellemesi; gerçek toplam birincil enerji (ısı ve elektriksel enerji) gereksinimi için performanslarını araştırmak için modellenmiştir ve simüle edilmiştir. Ayrıca; güneş enerjili ısı sistemleri geliştirmek için farklı güneş hücresi teknolojileri ve son teknikler vurgulanmıştır. Gözlemlenmiştir ki SPV entegreli güneş enerjili ısı sistemler; kırsal sektörlerde kendi kendine çalışabilir ve ekonomiktir [43].

Nasrin vd.'nin 2018 yılında yaptıkları çalışmada; kontrol edilen çalışma koşulları ve parametreler altında bir PV modülün, iç ortam deneyi yürütülmüştür. PVT'nin ısı performansını arttırmak için termal kollektörün benzersiz bir tasarımı tanıtılmıştır, bütün bir PVT sistemi monte edilmiştir ve su/MWCNT nanoakışkanı kullanılmıştır. PVT sistemi için aktif bir soğutma, santrifüj bir pompa kullanmak suretiyle sağlanmaktadır ve tavsiye edilen giriş sıcaklığını sürdürmek amacıyla nanoakışkanın ısınıp çevreye vermek için çevrimde kullanılmıştır. 200'den 1000 W/m²'ye farklı ısıtım seviyelerinde, %0'dan %1'e ağırlık kesrinde, kütleli debiyi 0,5 L/dak'da ve giriş sıcaklığını 32 °C'de sabit tutarak, 3 boyutlu sayısal simülasyon SEY tabanlı COMSOL Multiphysics yazılımı aracılığıyla yürütülmüştür ve iç ortam deneysel çalışması aracılığıyla doğrulanmıştır. Sayısal sonuçlar; deneysel ölçümlere pozitif bir yanıt vermektedir. Deneysel durumda; artmış PV performansı yüzdesi, su soğutma sistemi kullanmak suretiyle %9,2 olarak bulunmaktadır. Daha yüksek ısı performans; sayısal ve deneysel çalışmalarda, su yerine nanoakışkan kullanmak suretiyle, sırasıyla yaklaşık %4 ve %3,67 olarak elde edilmektedir. 1000 W/m² ısıtımında nanoakışkan aracılığıyla çalıştırılan PVT sisteminde; sayısal ve deneysel toplam verim sırasıyla %89,2 ve %87,65 olarak bulunmaktadır [44].

Dimri vd.'nin 2019 yılında yaptıkları çalışmada; üç farklı tür PV modülü, yani opak, yarı saydam ve alüminyum tabanlı kollektörü dikkate almak suretiyle, fotovoltaiik termal entegreli termoelektrik soğutucu (PVT-TEC) kollektör analiz edilmiştir. Analiz, iki modele, yani ısı model ve yapay sinir ağı modeline dayanmaktadır. YSA modelinin avantajı; ısı modelin aksine, çok sayıda parametreye ve karmaşık hesaplamalara ihtiyaç duymamasıdır. Opak PVT-TEC kollektörün performansı; çalışma akışkanları olarak havayı ve suyu dikkate almak suretiyle çalışılmıştır. Çalışma akışkanının su olduğu durumdaki toplam elektriksel verim ve ısı verim, çalışma akışkanının hava olduğu duruma göre, sırasıyla, % 1,9-2,8 ve % 20,8-21,8 daha yüksektir. Ayrıca; PV modülün taban kapak malzemesinin etkisi, opak PVT-TEC su kollektörünün, yarı saydam PVT-TEC su kollektörünün ve alüminyum taban PVT-TEC su kollektörünün performanslarını değerlendirmek ve karşılaştırmak suretiyle tartışılmıştır. Sonuçlar göstermektedir ki; günlük toplam elektriksel enerji kazancı, günlük ısı enerji oranı ve günlük toplam ekserji kazancı, alüminyum taban PVT-TEC su kollektörü için en yüksektir. Dahası; ısı modelden hesaplanan sonuçlar YSA modeli ile karşılaştırılmıştır ve iyi bir uyum gerçekleştirilmiştir [45].

Özakın ve Kaya'nın 2019 yılında yaptıkları çalışmada; havalı PVT sisteminin enerji ve ekserji analizleri incelenmiştir. Ayrıca, panel yüzeyinin sıcaklık dağılımı ve soğutma kanalının hava hızı dağılımı, ANSYS-Fluent aracılığıyla analiz edilmiştir ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Deneyler; kanatçıksız, sık kanatçıklı ve seyrek kanatçıklı durumlar için gerçekleştirilmiştir. Kanatçıksız duruma kıyasla seyrek ve sık kanatçıklar kullanmanın bir sonucu olarak, polikristal ve monokristal panellerin ekserji verimi sırasıyla yaklaşık %70 ve %30 artmaktadır. Isıl verimleri sırasıyla %55 ve %70 artar. Tüm kurulumlar için panel yüzey sıcaklığının yaklaşık 10 °C ile 15 °C arasında azaldığı gözlemlenmiştir. ANSYS-Fluent aracılığıyla elde edilen sıcaklık kontör görüntüleri, deneysel olarak elde edilen değerlerle uyum içerisindeydi. Kanatçıkların yanındaki bölgelerin hava hızı, sürtünme etkisinden ve viskoz kuvvetlerden dolayı daha düşüktür; hava kanalının giriş-çıkışındaki bölgelerde ve kanatçıklar arasındaki bölgelerde daha hızlıdır ve daha az laminardır. Bu çalışmada; fotovoltaiik panellere uygulanan zorlanmış hava soğutma süreci incelenmiştir ve enerji verimliliği, ekserji verimliliği ve panel yüzey sıcaklığı üzerine etkisi incelenmiştir. Hava; fotovoltaiik panelin arka yüzeyinin yerleştirildiği yer olan kanal içerisinde fan

aracılığıyla dolaştırılmıştır. Isı transferini arttırmak için ve daha etkili soğutma sağlamak için, havalı soğutma kanalına silindirik alüminyum kanatçıklar yerleştirilmiştir. Deneyler; hava kanalının sık, seyrek kanatçıklı ve kanatçıksız durumları için gerçekleştirilmiştir ve termodinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Panel yüzeyinin ısı kamera görüntüleri elde edilmiştir ve ANSYS Fluent'ten elde edilen kontör görüntüleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- Tüm deneysel koşullarda; panel yüzey sıcaklığı 10-15 °C arasında azalmıştır ve ANSYS-Fluent aracılığıyla elde edilen sıcaklık kontörü görüntüleri, deneysel olarak elde edilen değerlerle uyum içerisindeydi. Böylece hem panel verimi artar hem de ısıl gerilim azalır.
- Kanatçıksız, seyrek kanatçıklı ve sık kanatçıklı durumlar için, soğutma sürecinden sonra, polikristal panelin ısı verimi sırasıyla %33-35, %51-54 ve %56-59 aralığında değişmiştir. Aynı üç farklı durum için monokristal panelin ısı verimi sırasıyla %38-40, %58-60,5 ve %64-65,5 aralığında değişmiştir.
- Kanatçıksız, seyrek kanatçıklı ve sık kanatçıklı durumlar için, soğutma sürecinden sonra, polikristal panelin ekserji verimi sırasıyla %25-28, %43-45 ve %45-46 aralığında değişmiştir. Aynı üç farklı durum için monokristal panelin ekserji verimi sırasıyla %35-36, %43-45 ve %47-48 aralığında değişmiştir.
- Gözlemlenmiştir ki kanatçıkların bitişiğindeki bölgedeki hava akış hızı, sürtünme etkisi ve viskoz kuvvetler nedeniyle daha düşük iken, hava kanalının giriş-çıkışındaki bölgelerde ve kanatçıklar arasındaki bölgelerde daha hızlıdır ve daha az laminardır [46].

Nazri vd.'nin 2018 yılında yaptıkları çalışmada; termoelektrik (TE) üzerine olan kavramlar ile tanımlamaları ve ayrıca, yürütülen önceki çalışmaları sunmaktadır. PVT-TE hava kollektörlerinin teorik bir çalışması da gerçekleştirilmektedir. Matriks dönüşüm yöntemine dayanan iteratif süreci kullanmak suretiyle matematiksel modeller önerilmektedir ve çözülmektedir. TE güneş kollektörü teknolojisini kullanmak suretiyle enerji eşiklerinde bir artış elde edilebilir, çünkü TE cihazları; sistemin enerji dönüşüm verimini artırır. PVT-TE hava kollektörlerinin yıllık maliyeti ve yıllık enerji kazancı belirlenmektedir. Maliyet-fayda oranı veya yıllık enerji kazancı

başına yıllık maliyet; kütleli debinin ve TE sayısının farklı kombinasyonları için, en düşük yıllık maliyet/yıllık enerji kazancına karşılık gelen en uygun tasarım özelliklerini belirlemekte kullanıcıların fizibilitesini arttırmak için sunulmaktadır [47].

Tiwari vd.'nin 2018 yılında yaptıkları çalışmada; tam örtülü fotovoltaik termal bileşenli parabolik yoğunlaştırıcı (N-PVT-CPC) kolektörünün N-sayısı için modifiye edilmiş Hottel-Whillier-Bliss (HWB) denklemi geliştirmeye yönelik bir teşebbüs yapılmıştır. Analiz; tasarım ve iklim parametrelerinin bir fonksiyonu olarak sistemin her bir bileşeni için temel enerji denge denklemlerine dayanmaktadır. Geliştirilen modifiye edilmiş Hottel-Whillier-Bliss (HWB) denklemi; çeşitli kurulumlar için, yani, geleneksel düz plakalı bileşen parabolik yoğunlaştırıcı (FPC-CPC), tam örtülü fotovoltaik termal-düz plakalı kolektörler (PVT-FPC) ve geleneksel düz plakalı kolektörler (FPC) için, uygulanabilir ısı ve elektriksel verim için karakteristik eğri de; bu makalede dikkate alınan tüm durumlar için geliştirilmektedir. Dahası; N=1 için deneysel bir doğrulama da, iç ortam simülasyon koşulu altında yürütülmektedir [48].

Fudholi vd.'nin 2019 yılında yaptıkları çalışmada; güneş enerjili ısı sistemlerin ekserji ve sürdürülebilirliğinin bir gözden geçirmesi sunulmaktadır. Gözden geçirme çalışması; güneş kolektörlerinin, güneş kurutma sistemlerinin ve fotovoltaik termal (PVT) sistemlerinin ekserji analizlerini içermektedir. Güneş enerjili ısı sistemlerin en önemli bileşenlerinden olan güneş kolektörleri; güneş enerjisini alır ve ısı enerjisiye dönüştürür. PVT kolektör; güneş enerjisini kullanmanın popüler bir yoludur. Bir PVT kolektör; elektriksel ve ısı enerjileri eşzamanlı olarak üretebilir. 7-oluklu bir absorbe ediciye sahip bir PVT hava kolektörü için deneysel ve teorik yaklaşımlar, bu çalışmada incelenmektedir. PVT hava kolektörünün kararlı hal enerji analizi; fotovoltaik (PV) ve hava çıkış sıcaklıklarını tahmin etmek için gerçekleştirilmektedir. Deneysel sonuçlar; teorik çalışmanın sonuçları ile iyi uyum içerisindedir. PV ve hava çıkış sıcaklıklarının deneysel ve teorik değerler arasındaki bağıl hataları sırasıyla % 5,49 ve % 3,73 olarak hesaplanmıştır. 7-oluklu absorbe ediciye sahip PVT hava kolektörünün PVT ekserji verimi; teorik ve deneysel çalışma için sırasıyla % 13,36 ve % 12,89'dur. Dahası; bir sürdürülebilirlik indeksi önerilmektedir. PVT hava kolektörünün sürdürülebilirlik indeksi; teorik ve deneysel çalışma için, sırasıyla, 1,168 ve 1,148'dir [49].

Zuhur vd.'nin 2019 yılında yaptıkları çalışmada; yoğunlaştırıcı fotovoltaiik soğutma sistemi tasarlanmıştır ve bir prototip üretilmiştir. Bu sistem; sıcak yaz günlerinde, bu sistemin uygulandığı binanın soğutma ve elektrik ihtiyacını karşılamak amaçlıdır. Üretilen prototip; bir yoğunlaştırıcı kullanarak ve kullanmaksızın test edilmiştir. Elde edilen veri; enerji, ekserji ve çevresel maliyeti analiz etmek için kullanılmıştır. Deneylerin gerçekleştirilmesi esnasında, bir yoğunlaştırıcı kullanmak ısııl enerji kazancını etkilememiştir ve toplam ısııl enerji kazancı sistemde yaklaşık 30W olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte, yoğunlaştırıcının kullanımı; ekserji verimini arttırmıştır. Yoğunlaştırıcı kullanmak panellerin arka yüzey sıcaklığını arttırmıştır, böylece yoğunlaştırıcının bulunmadığı sistemlere göre elektriksel performans daha düşüktür. Sistem; CO₂'nin azaltılmış üretimine bağlı olarak saatte yaklaşık 0,1£ tasarruf yapmaya izin verir. Bu deneysel çalışmadan ve hesaplamalardan şu sonuçlar ve değerlendirme çıkarılabilir:

- Tasarlanan yoğunlaştırıcının geometrisine bağlı olarak, eğimli panel için yoğunlaştırma katsayısı, güneş ışınlarının dik bir şekilde geldiği saatlerde 1,18 civarındaydı. Düz panel için yoğunlaştırma katsayısı, güneşe olan konumu nedeniyle 1,06 civarındaydı.
- Dış ortam sıcaklığı ile soğutucudan gelen hava sıcaklığı arasındaki fark, deneyler esnasında yaklaşık 11,2 °C idi.
- Sistemde bir soğutucunun kullanımı çok etkiliydi. Yoğunlaştırıcı kullanıldığında ısııl ekserji çıktısı ve elektriksel ekserji çıktısı yükselmiştir, böylece ekserji verimi %11'den %16'ya artmıştır.
- Sistemin ısııl enerji verimi yaklaşık %5 idi. Yoğunlaştırıcıya sahip sistemlerin elektriksel veriminin ortalaması %10 idi, bununla birlikte yoğunlaştırıcıya sahip olmayan sistemlerin elektriksel veriminin ortalaması %11'e yükselmiştir. Ancak; yoğunlaştırıcıya sahip olmayan sistemler için elektriksel kazanç yaklaşık 79W idi ve yoğunlaştırıcıya sahip sistemler için 83 W idi. Enerjinin üretimi açısından, verim; yoğunlaştırıcıya sahip sistemler için hassas bir gösterge değildir. Yoğunlaştırıcıya sahip sistemler için önemli parametre, elektriksel kazanç veya ekserji verimidir.

- Çevresel-ekonomik analiz için olan sonuçlar göstermektedir ki CO₂ azalmasına bağlı olarak sistem tarafından gerçekleştirilen tasarruf saatte yaklaşık 0,1£ idi [50].

Ağbulut vd. 'nin 2020 yılında yaptıkları çalışmada; ilk aşamada, yoğunlaştırıcı bir fotovoltaik sistem için dört farklı boyutta tabaka tasarlanmıştır ve üretilmiştir. Bu tabakalar; sistemin konsantrasyon oranını ve alan oranını değiştirmek için kullanılmıştır. Dahası; sistemin performansının belirlenmesi için yeni bir güç katsayısı denklemi, bu makaleyle birlikte, literature önerilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında; çalışmada ölçülen güç çıktıları dört adet makine-öğrenmesi algoritması aracılığıyla, yani destek vektör makinesi, yapay sinir ağı, kernel ve en yakın komşu ve derin öğrenme aracılığıyla, tahmin edilmiştir. Bu makine öğrenmesi algoritmalarının başarısını değerlendirmek için; korelasyon katsayısı (R^2), ortalama karekök hatası (RMSE), ortalama sapma hatası (MBE), t istatistik (t-stat) ve ortalama mutlak sapma hatası (MABE), bu çalışmada tartışılmıştır. Deneysel sonuçlar göstermiştir ki yoğunlaştırıcı için çift-tabakalı uygulama, daha iyi sonuçları garanti etmiştir ve gücü %16 artırmıştır. Çift -tabaka için ortalama konsantrasyon oranının 1,8 olduğu hesaplanmıştır. Bu veriye dayanılarak; bu V-oluklu yoğunlaştırıcı için optimum alan oranının 9 olduğu belirlenmiştir. Dahası; güç katsayısı, en uygun alan oranı değeri için 1,35 olarak hesaplanmıştır. Tüm algoritmaların R^2 'si 0,96'dan daha büyüktür. Destek vektör makinesi algoritması genel olarak; özellikle sırasıyla 0.9921, 0.7082, 0.3357 ve 0.6238'lik çok tatmin edici R^2 , RMSE, MBE ve MABE ile birlikte daha iyi tahmin sonuçları sunmuştur. Daha sonra; sırasıyla, kernel-en yakın komşu, yapay sinir ağı ve derin öğrenme algoritmaları tarafından yakın bir biçimde izlenmektedir. Sonuç olarak; bu makale şunu bildirmektedir ki önerilen yeni güç katsayısı yaklaşımı, makine öğrenmesi algoritmaları ile yüksek düzeyde tahmin edilebilen yoğunlaştırılmış fotovoltaik sistemlerin verim değerlerinden ve güç çıktısı değerlerinden daha güvenilir sonuçlar vermektedir [51].

Mevcut araştırmaya dayanılarak şu çıkarımlar yapılmaktadır:

- Çift-tabaka için yapılan deneylerde; güneş ışınımının daha yoğun olduğu görülmektedir. PV modül gücü, güneş ışınım yoğunluğu (ortalama 6.8 W) ile

birlikte artmıştır; ancak, PV modül sıcaklığındaki artış nedeniyle, PV modül verimi azalmıştır.

- Bu iki deneysel sonuca (tek tabakalı ve çift tabakalı) dayanarak, görülebilir ki; verim gerçekte, yoğunlaştırılmış PV sistemler için çok güvenilir sonuçlar sunmamaktadır. Örneğin; üç-tabakanın deneyleri esnasında panel arkası sıcaklığı 111 °C'ye yükselmiştir. Bu noktada; güneş ışınımı 2654 W/m²'ye yoğunlaştırılabilir. Ölçülen panel gücünün test şartlarının 2,5 katına (12,5 W) ulaşmış olmasına rağmen; PV modül veriminin bu noktada %8 olduğu hesaplanmıştır. Benzer şekilde, çift-tabaka uygulaması için ortalama PV modül veriminin %7 olduğu hesaplanmıştır; bununla birlikte ortalama modül gücü, bu tabakada en yüksekti.
- “Güç katsayısı”; yoğunlaştırılmış PV modüller için hücre veya modül veriminden ziyade, çok daha hassas bir yaklaşım olacaktır. Tabaka sayısının artışı ve PV modül gücünün artışı arasında bir ilişki; sistemde gözlemlenmiştir. PV modülden olan en yüksek gücün; çift-tabakada 14 W olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda; alan oranı 9'dur ve konsantrasyon oranı 1,8'dir. Üç ve dört tabakalı uygulamalardaki güneş ışınımı ve PV modül gücü artışları; tek ve çift tabakalı uygulamalardaki değişim kadar önemli değildi. Böylelikle; şu sonuca varılabilir ki çift-tabakanın kullanımı, bu sistem için en uygun yaklaşımdır.
- Yüksek PV modül sıcaklığına yoğunlaştırıcı ile ulaşılabilir. Bu durum; hem sistemin verimini etkileyebilir hem de PV module yönelik ısıl zararlara yol açabilir. Bu nedenle; aktif veya pasif hücre soğutma yöntemleri, böylesi sistemlere uygulanmalıdır. Burada kazanılan ısı; bir diğer proseste kullanılabilir.
- Yaklaşık 3'lük bir konsantrasyon oranına sahip bir panelin sıcaklığı 120 °C'ye ulaşabilir ve ticari güneş panellerinin dış tarafında kullanılan polikarbonat, herhangi bir bozulma olmaksızın 120 °C'ye kadar dayanabilir. Ancak, sıcaklıktaki daha fazla artışla birlikte, ısıl indirgeme mümkün olabilir. Bu nedenle; 3'den daha yüksek bir konsantrasyon oranına sahip yoğunlaştırıcıya sahip panellerin kullanılması önerilmemektedir.
- R² açısından, güç çıkışının tahmininde kullanılan tüm algoritmaların, çok başarılı tahmin sonuçları sunduğunu söylemek mümkündür. Farklı istatistiksel

ölçümler birlikte analiz edildiğinde görülmektedir ki, özellikle iki algoritma öne çıkmaktadır. Bunlar; SVM ve k-NN'dir. Tüm algoritmalar için genel bir değerlendirme yapıldığı zaman görülmektedir ki, bir CPV sisteminin güç çıkışının tahmininde SVM en iyi sonuçları vermektedir [51].

Özetlemek gerekirse, CPV sistemlerinin verimini Pratik uygulamalarla arttırmak mümkündür. Bu çalışmada; 4 tabakalı V-oluklu tipte yoğunlaştırıcı tabakaları tasarlanmaktadır ve bu tabakalar, bir PV sistemi üzerine bir bir monte edilmektedir. Sonuçlar kanıtlamıştır ki; tabakaların kullanımı, güç çıkışındaki artışları belli bir noktaya kadar garantiler. Bu araştırmada, PV sisteminden olan güç çıkışı; çift tabaka uygulamasıyla birlikte %16'ya kadar çıkmıştır. Bu bakış açısıyla; güneş sisteminden olan artan güç miktarı, fosil-tabanlı yakıt tüketimini azaltmak için çok umut verici bir çözüm vermektedir ve daha temiz üretimin daha fazla miktarını garantilemektedir [51].

Kaya vd.'nin 2019 yılında yaptıkları çalışmada; saf methanol (CH_3OH)'e 50 nm çapında bakır oksit (CuO) eklemenin etkilerini belirlemek için, vakum tüplü ısı borusuna sahip yoğunlaştırılmış bir hava kollektörünün enerjistik ve ekserjistik analizi üzerine, farklı hava hızlarında (1,2 m/s ve 3 m/s) deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Deneysel sonuçlar açıkça göstermiştir ki nanoakışkan uygulaması, ısı özellikleri geliştirmiştir ve ısı borusu uygulamaları için daha iyi performans sağlamıştır. Tüm hava hızlarını birlikte dikkate almak suretiyle, saf methanol ve CuO -Methanol nanoakışkanı için ortalama verim sırasıyla %65 ve %64 olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca; saf methanol ve CuO -Methanol nanoakışkanı için olan ortalama özgül ekserji değerleri sırasıyla 206 J/kg ve 298 J/kg olarak hesaplanmıştır. Deneylerde görülmektedir ki CuO -Methanol nanoakışkanını kullanan sistemin verim değerleri, güneş ışıınımı değerleri daha yüksek oldukça, daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Sonuç olarak; bu makale belirgin bir biçimde şunu önermektedir ki temel akışkanda bakır oksitin varlığı, vakum tüplü ısı borusuna sahip yoğunlaştırılmış bir hava kollektöründe, özellikle yüksek ışıınım şartlarında kullanılabilir ve sistemin performansını pozitif etkiler. Mevcut çalışmadan şu sonuçlar çıkarılabilir:

- Çalışma akışkanı olarak methanolü tek başına kullanan ısı borusu deneylerinde; ortalama çevre sıcaklığı, ortalama 8 °C iken, yoğunlaştırılmış hava kollektörünün çıkış sıcaklığı 12 °C olarak ölçülmüştür. Bu durumda; ısı borusunun çıkış sıcaklığı 18 °C'ye kadar yükselmiştir.
- Çalışma akışkanı olarak CuO-Methanol nanoakışkanı kullanan ısı borusu deneylerinde, ortalama çevre havası sıcaklığı 9 °C iken, hibrit sistemin (yoğunlaştırılmış hava kollektörü+ısı borusu) çıkış havası sıcaklığı 20 °C olarak ölçülmüştür.
- Tüm hava hızlarını birlikte dikkate almak suretiyle, çalışma akışkanı olarak tek başına methanolü kullanan sistemin ortalama verimi %65 idi, bununla birlikte, çalışma akışkanı olarak CuO-Methanol nanoakışkanını kullanan sistemin ortalama verimi %64 olarak gerçekleştirilmiştir.
- Yoğunlaştırılmış güneş ışıınının miktarı tüm hesaplamalar esnasında ortalama olarak 1065 W/m² olarak hesaplanmıştır.
- Güneş ışıını değėrlerinin daha yüksek olduğu durumlarda; CuO-Methanol nanoakışkanı kullanan ısı borusunun verim değėrleri de daha yüksek olarak elde edilmiştir. Böylece, řu sonuca varılmıştır ki bu nanoakışkanlar, özellikle yaz mevsimlerinde yüksek güneş ışıını değėrlerinde kullanılabilir, çünkü temel akışkanın ısı iletkenliği ile birlikte yoğunluğunu da arttırmışlardır.
- Sistemden olan her iki akışkan türü için de ekserji çıkışı; çıkış havası sıcaklığına bağlı olarak artmıştır. Ortalama özgül ekserji çıkışı; çalışma akışkanı olarak yalnızca methanolü kullanan sistem için 2 m/s'de en yüksek olarak elde edilmiştir. Diğer taraftan, çalışma akışkanı olarak CuO-Methanol nanoakışkanı kullanan sistemde, bu hava hızı 1 m/s olarak belirlenmiştir. Ortalama özgül ekserji çıkış değėrleri sırasıyla 206 J/kg ve 298 J/kg olarak hesaplanmıştır.
- Sistemin performansını etkileyen iki temel çalışma parametresi olduğu görölmektedir. Ekserji analizi sonuçlarını dikkate almak suretiyle, řu sonuca varılmaktadır ki güneş ışıını, bu iki parameter arasında daha önemli bir parametredir.
- Çalışmadaki geliştirilen matematiksel modeller, oldukça başarılı sonuçlar sunmuştur [52].

Gürel vd.'nin 2020 yılında yaptıkları çalışmada; enerji tüketimini azaltmak için eşsiz bir ev tipi soğutucu tasarımı önerilmektedir. Önerilen tasarımda, soğutma süreci için gerekli hava; uygun hava şartında dış ortamdan sağlanacaktır. Kompresör çalışması, bu nedenle, bu yolla azalacaktır ve enerji tüketiminde bir azalmaya katkı sağlayacaktır. Sonuçlar göstermiştir ki 63 bölgedeki bu sistem 1 ile 4 ay arasında etkili bir biçimde kullanılabilir ve yalnızca 1 yıllık periyotta kullanımla birlikte Türk elektrik enerjisi faturasında 36 milyon \$ azaltmaya yardımcı olur. Ayrıca; Türkiye’de yıllık yaklaşık 850000 ton CO₂ azalması, bu çalışmada önerilen tasarımı uygulamak suretiyle başarılabilir. Bu nedenle; Türkiye yalnızca sürdürülen ekonomik gelişmeye değil fakat aynı zamanda, ülkedeki elektrik üretim yöntemlerinden ortaya çıkan zararlı gaz salınımlarını azaltmaya da katkı sağlayabilir. Bu çalışma; dış ortam sıcaklığından faydalanabilen ev tipi bir soğutma sistemini incelemektedir. Bu sistem; düşük enerji tüketimine sahiptir ve Türkiye’de enerji tasarruf etmeyi amaçlamaktadır. Bu çalışma; önerilen bu tasarımı kullanmanın enerji verimliliğini nasıl etkilediğini araştırmaktadır. Bu makaleye dayanılarak şu sonuçlar, çıkarımlar ve tavsiyeler yapılmaktadır:

- Sistemi ve çıktıları dikkate almak suretiyle, garanti altına alınmış önemli enerji tasarrufları, Türkiye’de artmaya eğilimlidir. Bu sistem; özellikle, daha düşük dış ortam sıcaklığına ve daha yüksek kullanım zamanına sahip olan bölgeler için daha uygun sonuçlar sunmaktadır. Görülmektedir ki; kullanım periyodunun kısa ama nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde bile önemli bir tasarruf imkanı vardır. Bu tasarımda dikkate alınacak önemli bir etken; dış ortam sıcaklığının, tasarım sıcaklığının altına düşmesidir. Böylesi bir durumda, soğutucudaki ürünler donabilir. Bu problemi önlemek için; dışarıdan alınan hava iç ortam (çoğunlukla mutfak) havası ile karıştırmak suretiyle artırılabilir.
- Bu çalışmada; yalnızca ev tipi soğutucular dikkate alınmış ve hesaplanmıştır. Önerilen bu tasarım, ticari tür soğutuculara ve ayrıca soğuk depolara uygulanırsa; enerji tasarruf miktarı, bu çalışmada hesaplanandan çok daha yüksek olacaktır. Bu sistemlerde; sistemlerin kompresör güç tüketiminin ve çalışma sürelerinin, ev tipi soğutuculardan çok daha yüksek olduğu not edilmelidir.

- Aylık ortalama sıcaklık verileri çalışmada kullanılmıştı. Anlık sıcaklık verilerini kullanarak, tasarruf miktarı daha açık bir biçimde belirlenebilir. Böylesi bir hesaplamada başarılabacak olan tasarruf miktarının çok daha fazla olacağı tahmin edilmektedir.
- Bu çalışmada önerilen sistem; ekonomik gelişmeye katkı sağlayabilir ve Türkiye’de fosil yakıtların yakılmasından ortaya çıkan zararlı gaz salınımlarını azaltabilir. Özetle, önerilen sistem hem ekonomik bir sistemdir hem de çevre dostudur.
- Açıktır ki bu sistemin diğer ülkelerdeki kullanımı; elektrik tüketimini azaltmaya, ekonomik gelişmeyi sürdürmeye ve elektrik üretiminden olan zararlı gaz salınımlarını azaltmaya yardım edecektir.
- Açıktır ki önerilen tasarım, başlangıç maliyet yatırımına sahip olacaktır. Kullanıcıların ve üreticilerin bu maliyete cevabı büyük öneme sahiptir.
- Önerilen bu tasarım; doğrudan dış ortam havası kullanmak yüzünden, kirletici parçacıkları azaltmak için filtrelemeye ihtiyaç duyabilir. Bu aynı zamanda, başlangıç yatırım maliyetini de arttıracaktır [53].

Ceylan vd.’nin 2014 yılında yaptıkları çalışmada; özel işlem aracılığıyla, PV modül üzerinde çok sayıda deneysel çalışma yapılmıştır. Çalışmalar modül üzerinde özel işlem gerektirdiğinden, yalnızca laboratuvar çalışması olarak kalırlar. Bu çalışmada; fotovoltaiik modülleri soğutmak için farklı PV/T sistemleri deneysel olarak analiz edilmiştir. Aktif soğutma sağlamak için; PV modül üzerine, spiral bir ısı değiştiricisi olarak basit bir boru yerleştirilmiştir. Ayrıca, sistem; geniş-ölçekli sistemlere kolayca uygulanabilir. Deneysel araştırmanın sonucu olarak, soğutmalı modül verimi %13 olarak hesaplanmıştır ve soğutmasız modül verimi yaklaşık %10 olarak hesaplanmıştır. Ayar sıcaklığı arttıkça, modül sıcaklığı artabilir veya azalabilir. Modül sıcaklığı; güneş ışıınımına ve ayar sıcaklığına bağlı olarak değişmiştir. Bu deneysel sistemde; güneş ışıınımı arttıkça, modül sıcaklığı azalmıştır. Bu sistem için; güneş ışıınımının, ayar sıcaklığı ile hiçbir ilgisi yoktur. Bu araştırmanın bir sonucu olarak, ölçülen ve hesaplanan değerler aşağıda tartışılmıştır:

- Güneş kollektörünün önüne yerleştirilen modül, kollektör verimini azaltmıştır fakat sistem verimini arttırmıştır. Modül sıcaklığı; güneş ışıınımına ve ayar

sıcaklığına bağlı olarak değişmiştir. Bu sistemde; güneş ışınlamı arttıkça, modül sıcaklığı azalmıştır. Bu durum; 45 °C deneysel sonuçlar için görülebilir. Soğutmalı modülün verimi; soğutmasız olanına kıyasla %3 oranında daha yüksekti.

- PV/T'ye bir modülün ve kollektörün ilave edilmesi gerektiği, modüllerin birbirine paralel bir biçimde bağlanması gerektiği ve kollektörlerin birbirine seri bir biçimde bağlanması gerektiği önerilmektedir. Bu şekilde; soğutma suyu tüm modüllere aynı sıcaklıkta girecektir.
- Ayar sıcaklığı arttığında; kollektör çıkış suyu sıcaklığı arttığından verimi artmıştır. Ayar sıcaklığındaki artış; tüm sistemin ortalama ısı verimini arttırmıştır. Ayar sıcaklığındaki 45 °C'den 55 °C'ye artış; soğutmalı modülün sıcaklığını arttırmıştır.
- Güneş ışınlamı arttıkça, modül; giriş ve çıkış suyu ile soğutulmuştur. Bu nedenle; elektriksel verim artmıştır. Güneş ışınlamı azaldığında; aynı zamanda, modül sıcaklığı da azalmıştır, böylece verim artmaya devam etmiştir. Ancak; modülün çıkış gücü, güneş ışınlamının azalmasına bağlı olarak azalmıştır [54].

Ceylan vd.'nin 2016 yılında yaptıkları çalışmada; elektrik üretimini artırırken ısı enerjisinin yeniden kullanımı için tasarlanan ve kurulan PV/T sistemi incelenmiştir. Güneş ışınlamı, yoğunlaştırıcıyla birlikte yaklaşık iki kat artmıştır ve elektriksel güç kazançları artmıştır. Gizli ısıyı depolamak için, bir ısı enerji deposu olarak balmumu kullanılmıştır. Isıl enerji sera-benzeri hava kurutucu ile kombine edilmiştir ve ürünü kurutmak için kullanılmaktadır. Yoğunlaştırılmış ve yoğunlaştırılmamış panellerde ısı ve elektriksel enerji kazançları karşılaştırılmıştır ve toplam sistem verimi analiz edilmiştir. 200 W/m² ortalama güneş ışınlamında panel arkasında elde edilen en yüksek sıcaklık 37 °C olarak hesaplanmıştır ve panel verimi %11 idi. Mevcut çalışmada şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Isıl verim ve ısı enerji kazancı; yoğunlaştırılmış ve yoğunlaştırılmamış paneller için benzerliğe sahiptir.
- Gizli bir ısı deposu olarak kullanılan balmumu nedeniyle kürenin ısı enerji kazancı daha düşük olduğundan; balmumu, panel sıcaklıklarındaki artışı önlemek için ve verimi arttırmak için kullanılabilir.

- Ortalama yoğunlaştırıcı panel güneş ışıını 2000 W/m² olarak ölçülmüştür ve panel verimi %11 olarak hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen en yüksek panel arkası sıcaklığı 37 °C olarak ölçülmüştür.
- Güneş ışıınının panel üzerinde yansıması; yaklaşık iki kattan daha fazla yoğunlaşmıştır. Ancak; akım aynı anda iki kat artmadığından, güneş panelleri için verim tek başına önemli bir gösterge değildir. Elektriksel enerji kazançları; bu sistemler için daha önemli göstergelerdir [55].

Ağbulut vd.'nin 2019 yılında yaptıkları çalışmada işaret edilen temel konular; özellikle Türkiye'de sera gazı salınımlarının (GHGe) tarihi ve nükleer enerji politikası ile ilişkilerdir. Günümüzde; nükleer enerji çok daha az GHGe'ye sahiptir ve çok daha yüksek enerji verimine sahiptir ve aynı zamanda dünya birincil elektrik enerjisi ihtiyacının %10,6'sını karşılar. Bu nedenle; ülkeler, fosil yakıtlar yerine nükleer enerjiyi değerlendirmeye ciddi bir biçimde başlamaktadırlar. Buna uygun olarak; Türkiye üçüncü nükleer tesislerini kurmaya başlamıştır ve birincil elektrik enerjisi ihtiyacının en az %15'ini karşılamayı amaçlamaktadır. Böylelikle; Türkiye'nin yalnızca fosil-yakıtlara bağımlılığı azalmamaktadır fakat aynı zamanda, Kyoto protokolünü imzalamış bir ülke olarak, dikkate alınan GHGe seviyesine ulaşmayı planlamaktadır. Bu çalışma esas olarak; dünya çapında ve özellikle Türkiye'de karbondioksit salınımlarının geleceğini ve nükleer güç tesisleri ile ilgisini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda; bazı grafikler, tablo verileri ve dairesel grafikler mevcut çalışmada sunulmaktadır. Çalışmadaki verilen çıktılarına dayanılarak kısaca şu çıkarımlar yapılmaktadır:

- Nükleer, temiz bir enerji kaynağıdır ve ayrıca tüm dünya çapında zararlı gaz salınımlarını azaltmaya doğrudan yardım eder. Dünya çapında nükleer güç tesisinden daha fazla elektrik üretimi sağlamak; temel olarak CO₂ salınımlarını azaltacaktır ve kısa ve uzun vadede hava kalitesine çok pozitif bir etki sağlayacaktır.
- Nükleer enerji; dış enerji kaynaklarına ve ülkelere bağımlı değildir. Bu nedenle; uzun vadede ülkelerin ekonomisini pozitif bir biçimde doğrudan etkiler.

- Yatırım maliyeti nükleer güç tesisleri için çok yüksektir; fakat, hepsinden öte, enerji üretimi neredeyse diğer tüm yöntemlerden çok daha ucuzdur.
- Fosil yakıtların ömrü günden güne kademeli olarak azalmaktadır. Böylece; yakın gelecekte küresel bir enerji kıtlığına neden olabilir. Nükleer; enerjinin kıtlığı için umut verici çözümdür.
- Günümüzde; 450 güç reaktörü sayesinde, nükleer enerji, dünyanın elektrik ihtiyacının yaklaşık %11'ini karşılamaktadır. Şüphesiz, bu oran gelecek yıllarda artacaktır.
- Bilindiği üzere, dünya çapında karbondioksit salınımı kademeli olarak artmaktadır. Nükleer; uzun vadede karbondioksit salınımlarının azaltılması için iyi sonuçlar vermektedir ve aynı zamanda dünyanın ikinci büyük düşük-karbon güç kaynağıdır (2015'de toplamın %30'undan daha fazla).
- Geçmiş yıllardaki Chernobyl (1986) ve Fukushima Daiichi (2011) kazaları gibi olumsuz olaylar nedeniyle insanlar nükleere karşı önyargılıdır. Bu nedenle, dünya genelinde insanlar; kendi ülkelerindeki nükleer tesislere karşı ayaklanmaktadır.
- Türkiye, yakın gelecekte 3 nükleer üretim tesisini kuracaktır ve böylece bu 3 nükleer tesis aracılığıyla elektrik enerjisi ihtiyaçlarının en az %15'ini karşılayacaktır. Gelecek günlerde; Türkiye, nükleer tesislerin ve yenilenebilir enerji kaynaklarının sayısını ve kapasitelerini arttırmak suretiyle kendi elektrik enerjisi ihtiyaçlarını tamamen karşılayabilir.
- Nükleer çok umut vericidir, neredeyse hiç zararlı gaz salınımlarına sahip değildir ve yüksek enerji verimine sahiptir. Günümüzde; dünya çapında onaltı ülke, kendi elektrik ihtiyacını en az dörtte bir oranında nükleer enerjiden sağlamaktadır.
- Türkiye; dikkate değer bir uranyum oranına ve daha fazla toryum rezervlerine sahiptir (Türkiye'nin toryum rezervi dünyada altıncı sıradadır). Nükleer güç tesislerinden olan elektrik üretimini belirtmek gerekirse; Türkiye, ithalattan olan enerji kaynaklarının miktarını azaltma potansiyeline sahiptir. Dahası; Türkiye, gelecek yıllarda, uranyum kullanmak yerine nükleer güç tesislerinde yakıt olarak toryum kullanımını araştırmalıdır.
- Nükleer; Kyoto protokolünü imzalayan ülkeler tarafından, dikkate alınan sera gazı salınımları seviyesine ulaşmak için anahtar kavram olabilir [56].

Choi vd.'nin 2020 yılında yaptıkları çalışmada; çapraz üçgensel bir engele sahip havalı tip fotovoltaiik/termal (PV/T) bir güneş kollektörü ile bütünleştirilmiş bir ısı pompası su ısıtma sistemi, doğal hava şartlarında deneysel olarak incelenmiştir. Havalı tip bir PV/T güneş kollektörü ile bütünleştirilmiş olan ısı pompasının performansı; hava kaynaklı bir ısı pompası (ASHP) ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca; PVT kollektörün performansı da değerlendirilmiştir ve hava kanalında hiçbir hava akışına sahip olmayan bir PV modül ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak; PV/T kollektör, PV modülünden, yaklaşık %30,28 ilave ısı enerjisiyle birlikte, daha yüksek çıkış gücü başarmıştır. PV/T kollektörün toplam veriminin; PV modülünden 2,99 kat daha yüksek olmak üzere, %46,89 olduğu bulunmuştur. PV-T destekli bir ısı pompasının COP değerindeki ortalama ve en yüksek artmanın; bir ASHP'ye kıyasla, sırasıyla, %3,12 ve %8,57 olduğu bulunmuştur. Böylece; şu sonuca varılmıştır ki PV/T-destekli ısı pompası yalnızca ısı pompası performansında önemli bir artış sağlamaz, fakat aynı zamanda PV modülün elektriksel veriminde bir artış da sağlar. Dahası; havalı tip PV-T destekli ısı pompasının uygulanabilirliği doğrulanabilir ve bu sistem umut vericidir ve uygulanabilir. Bu çalışmada; çapraz üçgensel bir engele sahip olan havalı tip bir PV/T güneş kollektörü ile bütünleştirilmiş bir ısı pompası su ısıtma sisteminin performansı deneysel olarak değerlendirilmiştir. PV/T-destekli ısı pompasının performansı bir ASHP ile karşılaştırılmıştır ve PV/T güneş kollektörü de; hava kanalı içerisinde hiçbir hava akışına sahip olmayan bir PV modül ile kıyaslanmıştır. Deneyler; benzer hava koşullarına sahip farklı günlerde gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak; PV/T güneş kollektörünün ortalama elektriksel veriminin %16,61 olduğu, deney esnasında bulunmuştur, bununla birlikte PV/T modülünki %15,71 idi. Dahası; PV/T güneş kollektörü PV modülden yaklaşık %30,28 ilave ısı enerjisi gerçekleştirmiştir ve PV/T güneş kollektörünün toplam veriminin, PV modülünden 2,99 kat daha yüksek olmak üzere, %46,89 olduğu bulunmuştur. PV/T-destekli ısı pompasının ve ASHP'nin COP değerleri; sırasıyla 3,42 ve 3,31 ortalama değerlerle birlikte, 3,01-5,16 ve 2,95-4,75 aralığında değişmiştir. PV/T-destekli ısı pompası; test süresi esnasında ASHP'ninkinden daha iyi performansa sahip olmuştur ve COP'deki ortalama ve en yüksek artışın %3,12 ve %8,57 olduğu bulunmuştur. Yukarıdaki sonuçlardan, şu çıkarım yapılmıştır ki; PV-T destekli ısı pompası, ısı pompasının performansında ve PV modülün elektriksel veriminde önemli artış gerçekleştirebilir.

Dahası; havalı tip PV/T-destekli ısı pompasının uygulanabilirliği doğrulanabilir ve bu sistem umut vericidir ve uygulanabilirdir [57].

Shao vd.'nin 2020 yılında yaptıkları çalışmada; doğrudan genişlemeli çatı PV/T ısı pompası sisteminin gerçek çalışma performansını, farklı mevsimsel şartlar altında incelemektedir. PV/T buharlaştırıcı çatının ve tüm sistemin yapısı ve tasarımı ilk olarak sunulmaktadır; daha sonra bu, deneysel bir platformun yapısı tarafından takip edilmektedir ve son olarak sistemin çalışması, performans değerlendirme göstergeleri ve alan-testi aracılığıyla analiz edilmektedir. Deneysel sonuçlar göstermiştir ki sistem; sırasıyla ortalama %11.23, %64.25 ve % 83.32 elektriksel verim, ısı verim ve toplam verimle birlikte yazın kışa göre daha iyi performans göstermiştir. Ortalama COP; en yüksek 8,9 değeri ile 5,9 idi. Ayrıca; 1,5 m³ ısı depolama tankı içerisinde suyu 25 °C'den 60 °C'ye ısıtmak 2 saat almıştır, öyle ki, kış koşulları altındakinin iki katı kadar hızlıdır. Bu arada; çevresel etkenlerdeki değişimlerden kaynaklanan sistem performansındaki önemli bir azalma, kışın gözlemlenmektedir. Ortalama elektriksel verim; ısı verim ve toplam verim sırasıyla %11.67, %60.17 ve %78.84 idi, bununla birlikte ortalama ve en yüksek COP'ler sırasıyla 3,7 ve 5,24 idi. Bu makale; Dalion, Çin'in, iklim koşulları altında sistemin tasarımı ve konstrüksiyonu, performans değerlendirme göstergeleri ve deneysel sonuçları ile birlikte entegreli bir PV/T buharlaştırıcı çatıyı ve doğrudan- genişlemeli ısı pompası sistemini sunmaktadır. Doğrudan genişlemeli çatı PV/T ısı pompası sisteminin gerçek çalışma performansı; farklı mevsimsel hava koşulları altında test edilmiştir ve anahtar bulgular aşağıdaki belirtilmiştir:

- Elektriksel verim; çevresel etkenler tarafından daha az etkilendiğinden, görece olarak sabit kalmıştır (yazın %11,22 ve kışın %10,58), bununla birlikte, ısı ve toplam verimler, güneş ışınımının değişimine negatif bağlıydılar (yazın sırasıyla %81 ve %111, kışın sırasıyla %58 ve %86).
- Güneş ışınımının artan seviyeleri elektriksel verimi geliştirmediği halde; azalmış elektriksel verim ve toplam verime rağmen, daha yüksek miktarlarda elektrik ve ısı üretilmektedir.
- Tüm sonuçlar şunu ortaya koymaktadır ki; yoğunlaşma basıncı, yoğunlaşma sıcaklığı ve kompresör giriş gücünün tamamı, ısı depolama tankındaki suyun

sıcaklığının artışıyla birlikte, artan bir eğilim gösterir, bununla birlikte COP azalır.

- Yüksek sıcaklığa ve basınca uzun-süreli maruz kalma, ekipmanların hizmet süresini kısaltabileceği için; yüksek su sıcaklıkları, sistem performansının gelişmesine ve sistemin uzun-süreli çalışmasına yardımcı değildir.
- Bu nedenle; ısı depolama tankındaki suyun sıcaklığı, çalışma esnasındaki belli bir aralık içerisinde kontrol edilmelidir.
- Dahası; yazın PV/T modüller tarafından üretilen güç, sistemin elektrik enerjisi tüketimini aşar ve fazla elektrik diğer elektrikli ekipmanlar tarafından kullanılabilir.
- Ancak; kışın üretilen güç, güneş ışınımının mevsimsel düşük seviyelerine bağlı olarak yetersizdir.
- Bu bulgular şunu önermektedir ki; eğer enerjinin kendi kendine yeterliliği gerçekleştirilecekse sistem, tüm yıl boyunca güneş ışınımı bakımından zengin alanlarda düşük enerjili binalara uygulanabilir bir kurulum olabilir.
- Yukarıdaki çıkarımlar şunu göstermektedir ki; doğrudan genişlemeli çatı-PV/T ısı pompası sistemi, kuzey Çin’de iyi uygulama olasılıklarına sahip olduğu halde, güney Çin’de çok daha iyi sonuçlar elde edilebilir.
- Sistem; enerji kıtlığının ve çevresel kirliliğin zorluklarına belli ölçüde çözüm sağlar, bununla birlikte aynı zamanda, pratik uygulamalardaki geleneksel PV/T modüllerin önemli düzeydeki alan işgalinin olumsuzluklarının üstesinden gelir [58].

Koşan vd.’nin 2020 yılında yaptıkları çalışmada; benzersiz bir sürdürülebilir fotovoltaiik/termal destekli ısı pompası kurutucusu (PVT-AHPD) tasarlanmıştır ve test edilmiştir. Bu deneysel çalışma; iki ana kısım altında yürütülmüştür: Fotovoltaiik (PV) panelin ısı pompası (HP) ile soğutulması ve nane yapraklarının kurutulması. PV paneli soğutmak suretiyle; güneş ışınımına ve çevre sıcaklığına bağlı olarak, ortalama %12,27’lik ve en yüksek %14,02’lik bir elektrikli verim elde edilmiştir. Fotovoltaiik/termal (PV/T) sisteminin %56,37’lik ısı verim ortalaması da başarılmıştır. PTAHPD sisteminin ortalama performans katsayısı 4,18 olarak belirlenmiştir. Enerjisini güneş ışınımından temin edebilen ve yalnız başına çalışan PVT-AHPD sistemi, üretilen enerjinin yaklaşık %36’sını depolayabilir. Bu çalışmada,

PV/T destekli bir ısı pompası kurutma PVTAHDP sistemi; ısıtma, kurutma ve güç temini kapasitesi açısından tasarlanmıştır, üretilmiştir ve test edilmiştir. Sonuç olarak; şu çıkarımlar listelenebilir:

- PV/T panelin elektriksel verimi ve ısı verimi; sırasıyla, %11,96 ile %14,02 arasında ve %38,51 ile %70,56 arasında değişmiştir. Güneş ışınımının yaklaşık %65-70'i; ısı ve elektriksel enerji olarak kullanılmıştır. Böylece; PV panellerin soğutulmasının önemi daha fazla anlaşılmıştır.
- PVTAHDP sisteminin ortalama COP'si; 4,18 olarak elde edilmiştir. Bu gösterir ki; PV/T panelin, kurutma sisteminde kullanımı, artan verime neden olur.
- PVTAHDP sistemi ile; nane yaprakları çabucak kurutulmuştur ve etkin difüzyon katsayısının ortalama değeri $4,69 \cdot 10^{-11}$ ve $3,7 \cdot 10^{-11} m^2/s$ olarak gerçekleştirilmiştir.
- PVTAHDP sisteminin geri ödeme süresi; 2,32 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu geri ödeme süresi; çiftçiler tarafından önerilen sistemin kabulü açısından gerçek bir resim vermektedir.
- Sürdürülebilir bir kurutma yöntemi geliştirilmiştir ve hem elektrik hem de ısı üreten bu kurutma sisteminin; tarımsal uygulamalarda uygulanabilir olduğu bulunmuştur.
- Güneş ışınımı ile alakalı değişkenler; HP buharlaştırıcının ısı çekme karakteristiklerinde dalgalanmalara neden olur. Bu nedenle; tasarımcıların bu olayı akılda tutmaları önerilir [59].

Yu vd.'nin 2020 yılında yaptıkları çalışmada; düz plakalı PV/T sisteminin performans karakterizasyonu için 2 boyutlu benzersiz bir ışıyım-sıcaklık eşleşme modeli bu çalışmada önerilmiştir. Sonuçlar şunu önermektedir ki ışıyımın uniform olmayan dağılımı; fotovoltaiik verim üzerine önemli bir etki uygulamıştır, fakat fototermik verim üzerine orta düzey bir etki uygulamıştır. PV hücreleri üzerindeki çerçeve gölgesi oranı %0'dan %80'e değiştiğinden, fotovoltaiik verim %42,26 azalmıştır ve fototermik verim %9,81 artmıştır. Aksine; debi, fototermik verim üzerinde fotovoltaiik verimden daha güçlü bir etkiye sahip olmuştur. Debi 0,005 kg/s'den 0,03 kg/s'ye yükseldikçe (bakır tüpte hız 0,0112 m/s'den 0,0674 m/s'ye değişmek üzere), fotovoltaiik verim

%9,46'dan %9,54'e yükselmiştir ve fototermik verim %32,62'den %35,83'e yükselmiştir. Dahası, paralel bir elektrik devresi düzenlemesi; 2594,99 MJ/m²'lik bir değer ile daha yüksek bir toplam çıkışa sahiptir. Bu çalışmada; PV/T kollektörün performansı üzerine ışıının uniform olmayan dağılımının ve sıcaklığın uniform olmayan dağılımının etkilerini çalışmak için , geleneksel modellere kıyasla daha hassas bir tahmin sağlayan benzersiz 2 boyutlu bir ışıınım-sıcaklık eşleşme modeli sunulmaktadır. Sayısal sonuçlara dayanılarak, şu çıkarımlar yapılmaktadır:

- PV/T kollektörde ışıının ve sıcaklığın üniform olmayan dağılımı mevcuttur. Çerçeve gölgesi; üniform olmayan ışıınım dağılımını ciddi düzeyde etkiler. Dahası; sıcaklığın üniform olmayan dağılımı, çerçeve gölgesi tarafından ve HTF'nin debisi tarafından eş zamanlı olarak etkilenir ve üniform olmayan derece esas olarak, ikinciden etkilenir.
- Gölge alanı oranı %0'dan %80'e değıştikçe; sırasıyla, fotovoltaiik verim görece olarak %42,26 azalır ve fototermik verim görece %9,81 azalır. Genel olarak; ışıının üniform olmayan dağılımı, temel olarak, fotovoltaiik verimi etkiler.
- Daha yüksek HTF debisi; fotoelektrik ve fototermik verimi eş zamanlı olarak geliştirir. Debi 0,005 kg/s'den 0,03 kg/s'ye artınca (bakır tüpte hız 0,0112 m/s'den 0,0674 m/s'ye değışmek üzere); fotovoltaiik verim %9,46'dan %9,54'e yükselir ve fototermik verim %32,62'den %35,83'e yükselir.
- Seri devrede yıllık elektrikselle çıkış paralel devreden daha yüksektir; bununla birlikte, paralel devreden olan toplam enerji, seri devreden daha yüksektir. PV/T kollektörlerinin en uygun elektrikselle devre düzenlemesi; farklı ihtiyaçlara bağılı olarak ayarlanabilir [60].

Li vd.'nin 2020 yılında yaptıkları çalışmada; hücrelerin, cam kaplamanın arkasına tabakalar halinde eklendiğı yeni bir PV/T sistemi yapısı (G-PV/T) önerilmektedir. İki sistemin performansını belirlemek için deneysel ve sayısal incelemeler gerçekleştirilmektedir. G-PV/T; günlük %11,66 elektrikselle verim (A-PV/T'ninki %9,74'tür) ile, %28,4 ısı verim ile ve 45,6 °C son su sıcaklığı ile daha düşük bir sıcaklık ve daha iyi fotovoltaiik performans göstermektedir. Deneysel veriler ile iyi uyum gösteren iki adet 3 boyutlu dinamik termal/elektrikselle model de önerilmektedir. Çok sayıda yapısal parametrenin (PV karşılama oranı, absorbe edici plaka kalınlığı,

hava boşluğunun kalınlığı) PV/T sistemlerin her ikisine de olan etkileri tahmin edilmiştir ve kararlaştırılmıştır. Dahası; hücrelerin üzerindeki ısı gerilim dağılımlarını belirlemek için ve ayrıca iki sistemin ekonomik bir analizini gerçekleştirmek için iki adet mekanik model önerilmektedir. A-PV/T’de yüksek sıcaklıktan, ısı gerilimden, elektriksel yalıtım problemlerinden ve absorbe edici plaka deformasyonundan kaynaklanan potansiyel güvenlik problemlerinin üstesinden gelmek için; bu çalışmada, G-PV/T sistemi tasarlanmaktadır ve A-PV/T sistemi ile deneysel olarak ve teorik olarak karşılaştırılmaktadır. Sıcaklığı, elektriksel, ısı performansı ve hücreler üzerindeki ısı gerilim dağılımlarını çalışmak için; iki sistemin optik modelleriyle birlikte iki adet dinamik termal/elektriksel modeli ve iki adet mekanik modeli önerilmektedir. G-PV/T sistemine çeşitli yapısal faktörlerin etkileri tahmin edilmektedir ve A-PV/T sistemleri ile karşılaştırılmaktadır. İki sistemin ısı gerilim değerlerini belirlemek için sıcaklık gradyanları da gerçekleştirilmektedir.

- G-PV/T sisteminin PV hücrelerinin sıcaklığı A-PV/T sistemininkinden daha düşüktür ve son derece daha üniormdur ve hücreler üzerindeki eşdeğer geçirgenlik görece olarak daha yüksektir. G-PV/T sisteminin tüm günlük elektriksel verimi; önemli düzeyde artırılabilir.
- G-PV/T sisteminin hücreleri üzerindeki ısı gerilim; A-PV/T’ninkinin yalnızca yaklaşık 1/4’üdür ve elektriksel yalıtım problemi ve absorbe edici plaka deformasyonu, PV hücrelerinin güvenliğini daha fazla tehdit etmeyecektir. Sonuç olarak; PV/T sisteminin güvenilirliği artmaktadır.
- Sıcaklığın ve fotovoltaiik performansın gelişmesi, ısı performansın azalması pahasına olmasına rağmen; pratik ve değerli bir değiş-tokuş hala gerçekleştirilebilir. G-PV/T sistemlerinin son su sıcaklığı; evsel su ihtiyaçlarını karşılamak üzere, hala yaklaşık 46 °C’ye kadar olabilir. Sıcak hava bölgesi benzeri tropikal iklim bölgelerinde, insanların evsel su ihtiyacı yüksek değildir. Tasarım; evsel günlük su kullanım ihtiyaçlarını tamamen karşılayabilir. Bununla birlikte bu bölgede; yüksek sıcaklığın elektriksel performansa etkisini azaltmak, daha önemli bir konudur.
- G-PV/T sistemi için; hava boşluğunun kalınlığını azaltmak suretiyle veya ısı absorbe edici plakanın kalınlığını arttırmak suretiyle, yalnızca hücrelerin sıcaklığı azaltılmaz, fakat aynı zamanda elektriksel ve ısı performans da

arttırılabilir. Karşılama oranındaki artış; ısıl performansın azalması pahasına, fotoelektrik güç çıkışını geliştirmede etkili olabilir.

- PV hücrelerinin karşılama oranı ve hava aralığının kalınlığı; iki sistemin performansını farklı derecelerde, hatta zıt şekilde etkiler: A-PV/T’de; daha yüksek karşılama oranı daha yüksek elektriksel verime neden olur, bununla birlikte, daha ince hava aralığı, ısıl performansı azaltmaya neden olur.
- İki sistemin PV hücreleri üzerindeki ısıl gerilim; hücreleri soğutmak suretiyle azaltılabilir. İlişki yaklaşık doğrusaldır.
- PV hücrelerinin maliyetinin en yüksek payı oluşturduğu G-PV/T kollektör ve A-PV/T kollektör için toplam maliyet sırasıyla 718 Yuan ve 762 Yuan’dır. PV hücrelerinin zarar görme riskini azaltmak makuldür [61].

Wang vd.’nin 2020 yılında yaptıkları çalışmada; gölgeleme ve güç temin kazancını bütünleştirmek suretiyle, kapsamlı enerji-tasarruf etkisi üzerine araştırma gerçekleştirmektedir. Çatı üstü PV’nin üç türü, yani, yatay-monte edilmiş asma çatı üstü PV, eğik asma çatı üstü PV ve tutturulmuş çatı üstü PV; çatının ve binanın ısıtma ve soğutma yükünün ısı kazancı ve ısı kaybı üzerine, etkilerini belirlemek çalışılmaktadır. Çin’deki farklı iklim bölgelerindeki toplam enerji tasarrufunu tahmin etmek için; çatı üstü PV’nin güç üretiminin ve gölgelemesinin faydalı etkilerini dikkate alan bir toplam enerji tasarruf değerlendirme yöntemi önerilmektedir. Çin’deki iklim ve güneş ışınımı bölgelerine dayanılarak; araştırmada 13 saygın şehir dahil edilmek için seçilmektedir. Sonuçlar göstermektedir ki; PV panellerin yalnızca gölgeleme etkisi dikkate alındığında, eğik PV, ısı girişini azaltmak üzere, yazın daha uygundur, bununla birlikte, yatay monte edilmiş PV, daha fazla ısı kaybını önlemek için kışın daha etkilidir. PV panellerin hem gölgeleme hem de güç üretim etkilerini dikkate alan toplam enerji tasarrufu göz önüne alındığında; yatay monte edilmiş çatı üstü PV’ye sahip bina, yaz mevsiminde en yüksek verime sahiptir, bununla birlikte, eğik çatı üstü PV’ye sahip bina kış mevsiminde en yüksek verime sahiptir. Bu çalışmada sunulan toplam enerji tasarrufunun modeli ve analizi; çatı üstü güneş enerjili PV panellerinin Çin’deki farklı iklim bölgelerindeki uygulaması için bir rehber sağlayabilir. Bir PV çatısının hem gölgeleme hem de güç temin kazancını dikkate alarak enerji tasarruf etkisini çalışmak için; bir PV çatısının basitleştirilmiş bir ısı transfer hesaplama modeli, PV çatısının enerji tasarruf mekanizmasını analiz etmek

suretiyle önerilmektedir. Çatı üstü bir PV'nin toplam enerji tasarruf verim indeksi tanıtılmaktadır. Ayrıca; Çin'in 5 iklim bölgesindeki 13 tipik şehir, üç adet PV çatı türünün toplam enerji tasarruf performansını değerlendirmek için olan araştırmalar için seçilmektedir. Elde edilen sonuçlara dayanılarak, şu çıkarımlar yapılmaktadır:

- 13 tipik şehrin yazın toplam enerji tasarruf verim değerleri; 0,25-0,35 aralığında idi. Yatay bir PV'ye sahip çatı; 0,32'lik en yüksek verime sahip olmuştur. Kışın, toplam enerji tasarruf verimi 0,29'dan 0,97'ye değişmiştir. Tersine; yazın, eğik bir PV'ye sahip çatı, 0,97'lik en yüksek verime sahip olmuştur. Seçilen bölgeler içerisinde; geniş bir günlük sıcaklık aralığına sahip ve düşük ortalama sıcaklığa sahip, soğuk ve ciddi düzeyde soğuk bölgelerde, enerji tasarruf verimi görece olarak yüksekti.
- Elde edilen sonuçlara bağlı olarak, yatay olarak monte edilmiş bir PV çatı, yaz mevsimi için daha uygundur ve mümkün olduğunda, sıcak-yaz ve ılık-kış bölgesinde, kurulu PV modül gece kaldırılmalıdır, böylece çatı çevreye uzun-dalga ışıınımı yayabilir, böylece gölgeleme kazancını pozitif yapar. Yine de; eğik bir PV çatısı, kış mevsimi için daha uygundur. Dahası, toplam enerji tasarruf verimi; günlük sıcaklık aralığının geniş olduğu ve ortalama sıcaklığın görece düşük olduğu soğuk ve ciddi düzeyde soğuk bölgelerde, görece olarak yüksektir.
- Özetle; çatı üzeri PV'nin toplam enerji tasarruf verimine yönelik önerilen basitleştirilmiş hesaplama yöntemi ve sunulan sonuçlar, geniş uygulama aralığına sahiptir. Eğik PV çatısı için; bu makale, 30°'yi eğim açısı olarak almıştır, ama, özel kurulum ve gerçek enerji tasarruf etkisi, yerel enlem ve diğer koşullara bağlı olarak ayrıntılı analizden sonra belirlenmelidir. Ayrıca; güneş ışıınımı yoğunluğu, sıcaklık, rüzgar hızı ve diğerleri gibi, diğer yerlerdeki meteorolojik koşullar, bu çalışmada çalışılan Çin'deki 13 tipik şehrinkilere benzer veya yakın ise, bu makalede yapılan çıkarımlar, aynı zamanda, bir referans olarak kullanılabilir [62].

Yu vd.'nin 2020 yılında yaptıkları çalışmada; yüksek-verimli, otonom, hibrit güneş enerjili benzersiz bir hava arıtma, elektrik üretim ve ısı geri kazanım sistemini önermeyi ve önerilen sistem üzerine bir ön uygulanabilirlik analizi yürütmeyi

amaçlamaktadır. Ana çalışmalar şunları içerir: (1) PV/T tarafından yönlendirilen arıtma teknolojisi üzerine kısa bir gözden geçirme, (2) heterojen fotokatalitik tepkime ilkelerine dayanan PV/T tarafından yönlendirilen hava saflaştırma sistemine giriş, (3) sistem güneş spektrumu karakteristikleri üzerine, elektriksel performans üzerine ve formaldehitin çözünürlüğü üzerine TiO_2 karakterizasyonunun etkisi, (4) TiO_2 nanoakışkanlarda farklı formaldehit konsantrasyonları altında formaldehit fotokatalitik indirgeme performansı. Ana sonuçlar şöyledir: (1) PV/T teknolojisi; su veya hava arıtma sistemleri ile entegrasyona yönelik geniş bir uygulama potansiyeline sahiptir. (2) TiO_2 konsantrasyonu (0,05-0,12 g/L) yükseldikçe, kısa-devre akımının değeri, açık bir azalma eğilimi gösterir. TiO_2 nanoakışkanlar tabakasının ışık geçirgenliği kaybı; 0,05-0,08 g/L TiO_2 konsantrasyon aralığında temel olarak küçük bir değişime sahiptir, bununla birlikte, TiO_2 konsantrasyonu 0,08 g/L'den daha fazla iken büyük bir azalma vardır. (3) TiO_2 konsantrasyonu arttıkça; formaldehitin çözünürlüğü, 0,05 g/L çözünürlük haricinde azalır, ki bu durum şunu gösterir ki, TiO_2 'nin belli bir konsantrasyonu, formaldehit çözünürlüğünü geliştirebilir, çünkü TiO_2 parçacıkları, yüzeyde bol miktarda hidrofilik gruba sahiptir. (4) Formaldehit fotokatalitik indirgeme oranı; 0,05-0,15 mg/L formaldehit konsantrasyonu aralığındaki TiO_2 nanoakışkanlardaki formaldehit konsantrasyonu ile azalır. İndirgeme süreci; üç aşamaya bölünebilir [63].

Bu makalede öncelikli olarak gözden geçirilen PV/T tarafından yönlendirilen arıtma teknolojisi üzerine kısa bir araştırma sürecine dayanan; heterojen fotokatalitik tepkime ilkelerine dayanan benzersiz bir güneş enerjili PV/T tarafından yönlendirilen hava arıtma sistemi önerilmektedir. Önerilen sistemin uygulanabilirliğini incelemek için, ön deneysel analiz yürütülmüştür. Analiz; TiO_2 nanoakışkanlardaki farklı formaldehit konsantrasyonları altında sistemin güneş enerjisi spektrum karakteristiklerine, elektriksel performansına ve formaldehitin çözünürlüğüne ve formaldehitin fotokatalitik indirgeme performansına TiO_2 konsantrasyonunun etkisini içermektedir. Ana sonuçlar şöyledir:

- PV/T teknolojisi; su veya hava arıtma sistemleri ile bütünleşme üzerine büyük bir uygulama potansiyeline sahiptir. PV/T yönlendirmeli su arıtma sistemleri; PV/T yönlendirmeli hava arıtma sistemlerine kıyasla görece olarak karmaşık

yapıya ve yüksek maliyete sahiptir. Su arıtma sistemleri için; fotokatalitik su arıtma sistemlerine kıyasla fotokimyasal su dezenfeksiyon sistemleri TiO_2 tarafından güneş ışığı geçirgenliğine yönelik hiçbir etki olmadığından daha yüksek ısı ve elektriksel performansa sahiptir. Hava arıtma sistemleri için; termal katalitik arıtma teknolojisi, güneş ışığı absorbe etme performansına yönelik daha düşük etkisi nedeniyle, fotokatalitik oksidasyon teknolojisine kıyasla PV/T sistemi ile kombinasyona yönelik daha fazla potansiyele sahiptir.

- Kısa devre akımının değerleri; TiO_2 konsantrasyonları 0,02, 0,05, 0,08 ve 0,12 g/L iken, sırasıyla, %9,93, %19,67, %20,81 ve %30,8 azalmaktadır. 0,05-0,08 g/L TiO_2 konsantrasyon aralığıyla birlikte olan deneyler için; ışık geçirgenliği kaybı değeri, temel olarak, küçük bir değişime sahiptir, bununla birlikte, ışık geçirgenliği kaybında büyük bir azalma, TiO_2 konsantrasyonu 0,08 g/L'den daha fazla olduğunda gerçekleşir.
- TiO_2 konsantrasyonunun artışıyla birlikte; formaldehitin çözünürlüğü, 0,05 g/L konsantrasyon haricinde azalır. Gaz formaldehit suda iyi bir çözünürlüğe sahiptir ve bununla birlikte TiO_2 'nin belli bir konsantrasyonu, formaldehit çözünürlüğünü geliştirebilir, çünkü TiO_2 parçacıkları, yüzeyde bol miktarda hidrofilik gruplara sahiptir.
- Formaldehit fotokatalitik indirgeme oranı; 0,05-0,15 mg/L formaldehit konsantrasyonu aralığındaki TiO_2 nanoakışkanlarındaki formaldehit konsantrasyonu ile azalır. İndirgeme süreci; formaldehit indirgeme oranına bağlı olarak üç aşamaya bölünebilir [63].

Bu makale öncelikle; PV/T yönlendirmeli arıtma teknolojisi üzerine bir özet yürütmüştür ve benzersiz bir PV/T yönlendirmeli hava arıtma sistemi önermiştir. Hibrit sistem için potansiyel mekanlar; kırsal alanı ve kentsel alanı içerir ve özel ilgi konusu olan, gelişen dünyanın kentsel bölgeleridir. Gelecek çalışmalar için; ısı, elektriksel ve formaldehit indirgeme performansı açısından olan testleri yürütülecektir [63].

Song vd.'nin 2020 yılında yaptıkları çalışmada; buharlaştırıcının en uygun yapısını analiz etmek amacıyla, Fresnel PV buharlaştırıcıya sahip (FPV-SAHP), hibrit Fresnel PV ile TEG buharlaştırıcıya sahip (FPV/TEG-SAHP) ve geleneksel PV

buharlaştırıcıya sahip (PV-SAHP) üç adet doğrudan genişlemeli güneş enerjisi destekli ısı pompası karşılaştırılmaktadır ve tartışılmaktadır. Bizim için bilinmektedir ki PV’de depolanan güneş ısı, negatif korelasyondan dolayı; PV sıcaklığında bir artışa ve ayrıca elektriksel verimde bir azalmaya neden olur. Ayrıca, doğrudan genişlemeli güneş enerjisi destekli ısı pompalarındaki buharlaştırıcılar (DX-SAHP); soğutkan, ısıyı doğrudan absorbe ettiğinden düşük bir sıcaklığa sahiptir. PV ile buharlaştırıcı arasına termoelektrik jeneratör (TEG) yerleştirmek; PV’den buharlaştırıcıya iletilen ısıyı elektrik enerjisine dönüştürebilir. TEG, elektriksel enerji ürettiği halde; PV ile buharlaştırıcı arasındaki ısıl direnci artırır, ki bu, PV hücrelerinin soğutulmasına engel olur. TEG tarafından üretilen elektrik ile, PV ısı kaybını engellemekten kaynaklanan kayıp arasındaki eşleşme ilişkisi dikkate alındığında; TEG eklendikten sonra sistemin performansının gelişip gelişmediğini tartışmak ve yoğunlaştırılmış PV buharlaştırıcılara sahip doğrudan genişlemeli güneş enerjisi destekli ısı pompalarının geleneksel PV buharlaştırıcılara sahip olandan daha iyi performans sergileyip sergilemediğini tartışmak anlamlıdır. Sonuç olarak; farklı güneş ışıınımları altında üç sistem arasında kıyaslama yapılmaktadır. FPV-SAHP’nin elektriksel verimde, COP_{PVT} ’de, toplam verimde ve ekserji veriminde en iyi performansı gösterdiği, bununla birlikte, iki benzersiz FPV-SAHP sistemi ve FPV/TEG-SAHP sisteminin her ikisinin de, geleneksel PV-SAHP sisteminden daha üstün olduğu bulunmaktadır. Ayrıca; çevre sıcaklığının ve tanktaki su sıcaklığının, en uygun FPV-SAHP sistemine etkisi de tahmin edilmektedir ve tartışılmaktadır. Bu makalede; FPV/TEG buharlaştırıcısına, FPV buharlaştırıcısına ve PV buharlaştırıcısına sahip doğrudan genişlemeli güneş enerjisi destekli üç adet ısı pompası, farklı güneş ışıınımları altında karşılaştırılmaktadır ve tartışılmaktadır. En uygun FPV-SAHP sisteminin performansı üzerine çevre sıcaklığının ve su sıcaklığının etkisi de tahmin edilmektedir ve tartışılmaktadır. Sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Güneş ışıınımları arttıkça; elektriksel güç, buharlaşma ısı, yoğunlaşma ısı, sistem tüketimi ve COP_{PVT} artar. FPV/TEG-SAHP sisteminin elektriksel gücü, FPV-SAHP sistemininkinden oldukça yüksektir, PV-SAHP sistemininkinden açıkça daha yüksektir, bununla birlikte, bu üç sistemin buharlaşma sıcaklığındaki, yoğunlaşma sıcaklığındaki, sistem tüketimindeki farklılıklar küçüktür; böylece, FPV/TEG-SAHP sisteminin COP_{PVT} ’si, 10 °C çevre

sıcaklığındaki, 30 °C su sıcaklığında, 800 W/m² ışıınımda sırasıyla 7,67, 7,35 ve 5,85 değerleriyle, FPV-SAHP sisteminden oldukça yüksektir, PV-SAHP sisteminden açıkça daha yüksektir.

- Sistemlerin elektriksel verimi, ısıl verimi ve toplam verimi; güneş ışıınımla birlikte azalır. Üç sistemin ısıl verimleri neredeyse aynıdır; bununla birlikte, FPV-SAHP sisteminin elektriksel verimi ve toplam verimi, FPV/TEG-SAHP sisteminden yüksektir, PV-SAHP sisteminden çok daha yüksektir. Üç sistemin toplam verimleri; 10 °C çevre sıcaklığında, 30 °C su sıcaklığında ve 300 W/m² ışıınımda sırasıyla % 226,84, % 226,02 ve % 191,65 olmaktadır.
- FPV/TEG-SAHP sisteminin ve FPV-SAHP sisteminin ekserji verimleri; güneş ışıınımlarının artışıyla birlikte önce artar, daha sonra azalır, bununla birlikte, PV-SAHP sistemindeki daima azalır. Bununla birlikte, FPV-SAHP sisteminin ekserji verimi; FPV/TEG-SAHP sisteminden yüksektir, PV-SAHP sisteminden çok daha yüksektir. En uygun değerler; 10 °C çevre sıcaklığı ve 30 °C su sıcaklığında 700 W/m² ışıınımlı altında % 30,55, 400 W/m² ışıınımlı altında % 29,18 ve 300 W/m² ışıınımlı altında % 19,85'dir.
- Artan çevre sıcaklığı; FPV-SAHP sisteminde elektriksel güç, ısıl verim ve toplam verim üzerinde küçük bir etkiye sahiptir, COP_{PVT} üzerinde arttırmaya sahiptir, elektriksel verim ve ekserji verimi üzerinde negatif etkiye sahiptir. Artan su sıcaklığı; elektriksel güç üzerinde küçük bir etkiye sahiptir, elektriksel verim ve ekserji verimi üzerinde pozitif etkiye sahiptir, COP_{PVT}, ısıl verim ve toplam verim üzerinde negatif etkiye sahiptir. En uygun COP_{PVT}; 10 °C çevre sıcaklığında, 22 °C su sıcaklığında, 800 W/m² ışıınımda 9,17'ye ulaşabilir, bununla birlikte en uygun toplam verim 16 °C çevre sıcaklığında, 22 °C su sıcaklığında, 300 W/m² ışıınımda % 250,61 olur ve 10 °C çevre sıcaklığı, 30 °C su sıcaklığı, 800 W/m² ışıınımda en uygun ekserji verim değeri %30,52'dir [64].

Toledo vd.'nin 2020 yılında yaptıkları çalışmada; tüm bir yıl boyunca, Murcia'da (İspanya'nın güneydoğusu) bulunan bir deneysel sistem aracılığıyla elde edilen ölçümlere dayanan dört farklı PV teknolojisinin (polikristal silikon, kadmiyum tellür, amorf silikon ve organik PV) ısıl davranışının çalışmasını sunmaktadır. PV modüllerin (NOCT ve Sandia) çalışma hücre sıcaklıklarını tahmin etmek için olan iki adet tahmin modeli; BIPV sistemlerindeki uygunlukları açısından değerlendirilmiştir.

Sonuçlar; her iki modelin de, güneş ışıınımı büyüklüğüne ve yönelimine güçlü bir biçimde nasıl bağlı olduğunu göstermektedir. Dahası, çevre ve modül sıcaklığı farkı ve düzlemsel ışıınım arasındaki korelasyon; çoğunlukla teknolojiiden bağımsız olan ancak doğu ve batı yüzleri için özel bir etki ile birlikte, yönelime güçlü bir biçimde bağımlı olan ısı bir gecikme etkisini göstermektedir. Sonuçlar; BIPV sistemlerinin elektrik üretiminin daha hassas tahminleri için dikkate alınmalıdır. Murcia (İspanya)'daki dış ortam test düzeneği (PV-küpleri) için olan farklı teknolojilerdeki PV modüllerin ve bina kaplama elemanları olarak kullanılan kapsüllemelerin ısı davranışı; BIPV sisteminin enerji üretimini etkileyen modül sıcaklığını tanımlamak için olan alternatif yaklaşımların geliştirilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Modül sıcaklığını tahmin etmek için şu an kullanılan, NOCT ve SNL gibi modeller; esas olarak doğu ve batı yönelimlerini etkileyen ısı ataletine bağılı olarak PV-küplerde ölçülen değerlere kıyasla ciddi farklılıklar sunar. Çok sayıda çalışma, rüzgar etkisini içeren SNL modelin, görece küçük hatalarla modül sıcaklıklarını tahmin edebileceğini bulduğu halde; BIPV sistemlerinde mevcut olan gecikme, hassasiyetini azaltır. Yine de; SNL model, düşey yüzeyler üzerinde NOCT'a göre çok daha iyi durur. PV modüller için tahmin edilen standart test koşulları, dış ortam koşullarında nadiren karşılandığından; düzlemsel ışıınım ile çevresel ve modül sıcaklığı arasındaki fark arasındaki korelasyon, gün boyunca doğrusal bir eğilim izlemez, ama, panele ulaşan ışığın difüz ve yansıyan bileşenlerinin oranına bağılı olarak değişir. Bu nedenle; batıya yönelimlerde bulutlu günler veya sabah saatleri gibi koşullarda, Ross katsayısı, sırasıyla, güneşli günler veya akşam saatleri için olandan daha yüksektir. Diğer taraftan; bina elemanları olarak PV modüller, iç ortam ısı konforunu gerçekleştirmeyi zorlaştıran ışıınım aracılığıyla ısı transferine güçlü bir bağımlılığa sahiptir. İç ortamın aşırı ısıtılması; cihazların ısı izolasyonunu geliştirmeyi gerekli hale getirir. PV modüller; bozulmasını hızlandırmak üzerine bir etkiye sahip olabilecek güçlü bir ısı gerilime maruz kalır [65].

Terashima vd.'nin 2020 yılında yaptıkları çalışmada; yüksek sıcaklık ışıınımını bir panel kutusu içerisinde tutabilen çevre dostu bir fotovoltaiik/termal (PV/T) güneş panelinin geliştirilme ihtimali, deneysel olarak doğrulanmıştır. Panel; vakum koşulu altında çalışma akışkanının daha düşük kaynama sıcaklığını kullanmak suretiyle, PV modülden ısıyı çekebilen ve havayı ve cam kaplamayı, panel kutusu içerisinde daha

düşük sıcaklıkta tutabilen, gevşemeli-kaynatmalı bir ısı kollektörüne sahiptir. Panel ayrıca; panel kutusu içindeki PV modülden olan yüksek sıcaklık ısı ışıınımını tamamen yansıtabilen, çekiçle dövülerek işlenmiş bir cam örtüye sahiptir. Bir tek PV/T sistemi kullanan deneysel sonuçlar göstermiştir ki; Yokohama, Japonya’da PV/T güneş paneli yüzeyinden olan ısı ışıınımı sıcaklığı, yazın bile, 45 °C civarında tutulabilmektedir; debiyi kontrol etmek suretiyle en az 60 °C’de sıcak su sağlamıştır ve yazın güneş enerjisinin toplamda % 71,3’ünü elektrik olarak üretmiştir ve 40 °C sıcaklık üretmiştir. Güneş enerjisinin küçük çevresel ısı yüküyle birlikte yüksek verimli kullanımı; önerilen PV/T sistemini kullanmak suretiyle mümkün olacaktır. Hem yüksek sıcaklıktaki sıcak suyu hem de elektriği yüksek toplam verim ile sağlayabilen yeni bir PV/T sistemi kavramı geliştirilmiştir ve performansı deneysel olarak doğrulanmıştır ve sistem çevreye, yüksek sıcaklıkta ışıınım saçmamaktadır. Şimdi; onun güç verimi, bir tek PV modülünden oldukça düşüktür, çünkü çift cam örtüye sahiptir, çünkü ticari bir PV modül , sisteme uygulanmıştır. Cam kaplamaya sahip olmayan bir PV modül uygun olduğunda; çalışma esnasında daha yüksek güç ve ısı verim elde edilecektir ve yerel ve küçük çevresel ısı yükü küresel ısınmaya yönelik etkisini engelleyebilir olacaktır. Bu araştırmanın özeti şunlardır:

- Önerilen PV/T sistemi; bir PV modülünü içeren panel kutusundaki tüm elemanlardan ısıyı almak için bir gevşemeli-kaynatmalı ısı kollektörüne sahiptir, bir cam kaplamaya sahiptir ve içinde havaya sahiptir, böylece, PV modülün içinin yüksek sıcaklıktaki yüzeyini içerdiğinde bile 45 °C civarında ısı ışıınımını panel sağlar.
- Önerilen PV/T sistemi; çekiçle dövülerek işlenmiş bir cam kaplamaya ve PV modüle sahiptir. Çekiçle dövülerek işlenmiş cam kaplama; panel kutusu içindeki PV modülün yüksek sıcaklıklı yüzeyinden olan ısı ışıınımını tutabilir. Bir tek PV modülün yüzey sıcaklığı yaklaşık 60 °C’de ısı ışıınımını saçarken, önerilen PV/T sistem yalnızca yaklaşık 45 °C ışıınım sağlar, ki bu, yazın termografi aracılığıyla gözlemlenmiştir.
- Bu sistemin; 1 Ağustos 2018’de, Yokohama, Japonya’da, güneş enerjisinin toplamda % 71,3’ünü elektrik olarak dönüştürdüğü ve 40 °C ısı kaynağına dönüştürdüğü doğrulanmıştır.

- 60 °C'lik daha yüksek sıcaklıktaki sıcak su kaynağı; ısı transfer akışkanının debisini kontrol etmek suretiyle bir tek PV/T sistemi için doğrulanmıştır. PV/T güneş panellerini seri bağlamak suretiyle, çok daha yüksek sıcak su kaynağı mümkün olacaktır.
- Önerilen PV/T sistemini soğuk alanda kullanmak için; -21 °C donma noktasına sahip etanol/su çözeltisi gevşemeli-kaynamalı ısı kollektörünün çalışma akışkanı olarak kullanılabilir. Etanol/su kullanan PV/T sisteminin toplam verimi; saf su kullanma durumundakinden 4,4 kat daha azdır. Güneş enerjisinden ısı ve elektriksel enerjilere enerji dönüşümünün %50'den daha fazlası; etanol/su sistemi için kış mevsiminde doğrulanmıştır [66].

Genel olarak; ısı enerji ihtiyacı, toplam enerji tüketiminde %50'den daha fazla yer alacaktır. Önerilen PV/T güneş panellerinin etkin kullanımını gerçekleştirmek suretiyle; ısı uygulamalar için yüksek elektrik tüketim miktarı tasarruf edilecektir ve çevresel ısı yükün yüksek miktarı azaltılacaktır [66].

Abdelrazik vd.'nin 2020 yılında yaptıkları çalışmada; hibrit PV/faz değiştiren malzeme (PV/PCM) modülünün ve PV/termal (PV/T) sisteminin; sırasıyla, düşük ısı çekme ve uniform olmayan PV sıcaklık dağılımı gösterdiği rapor edilmektedir. PCM'lerin ısı davranışını geliştiren, her iki sistemi birleştirmek ve farklı yüklerde PCM'de nanoparçacıkların dahil edilmesi, potansiyel bir çözüm olarak, bu çalışmada kullanılmaktadır. Sayısal olarak doğrulanmış modeli kullanmak suretiyle; PV panelin altında bulunan nano-yükseltilmiş faz değiştiren malzemenin (nanoPCM) bir tabakasının, hibrit bir PV/termalin ısı ve elektriksel performansına etkisi değerlendirilmektedir. Farklı hava ve çalışma koşullarının etkisi de değerlendirilmektedir. Sayısal simülasyon sonuçları göstermektedir ki PCM'ye sahip hibrit PV/termal sistemi (PV/T/PCM); yalnız olan PV sistemine kıyasla daha iyi bir performansa sahiptir. Balmumu (PW) PCM'deki grafin nanopulcuklardan (GNP) farklı yüklerin dahil edilmesi; PV panelin soğutmasını artırır ve daha yüksek elektriksel verim gösterir. Nano parçacıkların yük yüzdesi arttıkça; PV panel sıcaklığı azalmaktadır ve elektriksel verim artmaktadır. Soğutucu akışkan aracılığıyla gerçekleşen ısı absorpsiyonu üzerine ve ısı verim değişimi üzerine nanoparçacıkların etkisi hava koşullarına bağlıdır. Ancak; çoğu durumda, nanoparçacıkların düşük

yükleri, daha yüksek ısı kazançlara neden olur. Dhahran (Suudi Arabistan)'da Ocak ortasındaki (kış) ve Temmuz ortasındaki (yaz) iki gün için; % 10 nanoparçacıklı hibrit PV/T nanoPCM sistemi, yalnız olan PV sistemine kıyasla (sırasıyla % 6,9 ve % 22) daha yüksek elektriksel verim gösterir. Bu çalışmada; PV/T nanoPCM'yi tanımlamak için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model; Matlab yazılımında simüle edilmiştir ve son zamanlarda yayınlanan sayısal sonuçlarla doğrulanmıştır. Doğrulama; % 3'den daha az bir sapma ile mükemmel bir uyum göstermiştir. Model; nanoparçacıkları yüklemenin, PV/T/nanoPCM performansına etkisini çalışmak için kullanılmıştır. Çalışma aynı zamanda farklı hava ve çalışma şartlarında performansı analiz etmiştir. Sonuçlar; değerlendirmenin, kullanılan PCM'ye bağlı olduğunu göstermektedir. Sonuçlar aynı zamanda göstermektedir ki PV/T/PCM; yalnız olan bir PV sistemine kıyasla performansı önemli düzeyde artırır. Buna dayanılarak; nanoPCM tabaka kalınlığının, atmosferik sıcaklığın, güneş konsantrasyonunun ve soğutucu akışkan debisinin, farklı nanoparçacık yüklerinde hibrit PV/T/nanoPCM sisteminin performansına etkisi için dört adet çalışma önerilmiştir. Dört çalışmanın sonuçları göstermiştir ki tüm performans kontrol parametreleri; daha yüksek nanoparçacık yüklemeye artmıştır. Durum 1: Daha iyi PV soğutması, daha yüksek sıcaklık kazancı ve daha yüksek elektriksel ve ısı verimleri, daha düşük nanoPCM kalınlığında başarılmıştır. Durum 2: Daha iyi PV soğutması ve daha yüksek elektriksel verim, daha düşük atmosferik sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Aksine; soğutucu akışkan üzerinde daha yüksek sıcaklık kazançları ve daha yüksek ısı verim, yüksek atmosferik sıcaklıklarda elde edilmiştir. Durum 3: Daha iyi PV soğutması ve daha yüksek elektriksel verim, daha düşük güneş konsantrasyonunda gerçekleştirilmektedir. Yüksek güneş konsantrasyonlarında, soğutucu akışkan üzerinde daha yüksek sıcaklık kazançları elde edilmiştir ve daha yüksek ısı enerjisi elde edilmiştir, amagöreceli olarak daha düşük ısı verimindedir. Durum 4: Daha iyi PV soğutması ve daha yüksek elektriksel verim, daha yüksek soğutucu akışkan debilerinde elde edilmektedir. Ancak; soğutucu akışkan üzerinde eve 36 L/sa yüksek debide daha düşük sıcaklık kazançlarına neden olmuştur, sistem ısı olarak verimsiz hale gelmiştir. PV/T/nanoPCM ve PV/T/PCM sistemlerinin performansı da; yılın iki farklı mevsiminde, yalnız olan bir PV sisteminin performansı ile karşılaştırılmıştır. PV/T/nanoPCM sistemi (% 10 su), yalnız olan PV sistemine kıyasla % 22'lik bir artışla birlikte, yazın yüksek düzeyde verimlidir, bununla birlikte

kışın, yalnızca % 6,9'luk bir artışla birlikte daha az verimli hale gelir. Son olarak, bu çalışma; farklı hava ve çalışma koşulları altında hibrit PV/T/nanoPCM sistemlerinin performansı üzerine nanoparçacık yüklemenin etkilerinin kapsamlı bir analizini temin eden ilk çalışma olarak düşünülür. PV/T/nanoPCM sistemlerinin performansını etkileyen tüm parametreleri değerlendirmek için daha fazla çalışma yürütülmelidir. Nanoparçacıkların yüklenmesinin etkisi; farklı faz değişim koşulları altında çalışılmalıdır. Ayrıca; soğutma kanalının en uygun konumu, yani nanoPCM'nin altında veya içeri gömülü ve hangi yükseklikte olduğu da, gelecek bir çalışmada değerlendirilmelidir [67].

Shao vd.'nin 2019 yılında yaptıkları çalışmada; binanın dış yüzeyi olarak, elektrik jeneratörü olarak ve ısı pompası sistemi için buharlaştırıcı olarak işlev gösteren benzersiz bir PV/T çatısı önerilmektedir. Bu PV/T çatısı; bina tarafından doğrudan kullanım için elektrik ve ısı üretir. Bu makale; elektriksel, ısı ve toplam verim dahil ve ayrıca ısı transfer mekanizması dahil, önerilen PV/T çatının deneysel performansını incelemek amaçlıdır. Çalışma; sistem bileşenlerinin tanıtımı, deneysel platform konstrüksiyonu, performans değerlendirme indeks analizi, alan-testi ve performans analizi aracılığıyla yürütülmüştür. Elektrik ve ısı üretiminin, güneş ışımasını ile benzer değişim eğilimine sahip olduğu; elektriksel verimin göreceli olarak sabit olduğu, bununla birlikte ısı verimin, güneş ışımasını değişimi ile zıt olduğu bulunmuştur. Çalışma esnasında; ortalama elektriksel, ısı ve toplam verim sırasıyla %7,2, %69,3 ve %86,8 olarak bulunmuştur. Isı transferi açısından; PV/T çatı gün boyunca gölgeleme ve yüzey ısı kaynağı rolü oynamıştır ve gece yalıtım rolü oynamıştır ve ısı kazançlarını ve soğutma ve ısı yükünü sırasıyla % 39,9 ve % 38,6 azaltmak suretiyle, kayda değer enerji tasarruf etkisi göstermiştir. Araştırma; bir PV/T çatısının ısı mühendisliğinin tasarımı için yalnızca teorik destek sağlamaz, fakat aynı zamanda, BIPV/T'nin popülerliği ve uygulaması için önemli bir referans değer sağlar. Önerilen PV/T çatısı; güneş enerjisinin çift kullanımını gerçekleştirir. Bina için elektrik, evsel sıcak su ve ısıtma sağlayabilir. Bu makalede; elektriksel ve ısı performansı ve ısı transfer karakteristiği test edilmektedir. Ana çıkarımlar aşağıdaki gibidir: PV/T çatının elektrik üretimi ve ısı üretimi; güneş ışımasını ile benzer değişim eğilimi göstermiştir, bununla birlikte, PV/T çatının elektriksel verimi, % 7,2'lik ortalama bir değer ile görece kararlıydı. PV/T çatının ısı veriminin değişimi; güneş ışımasına tersti, yani,

düşük güneş ışınlamada en yüksekti ve yüksek güneş ışınlamada en düşüktü. Toplam verim; öncelikle ısı verim tarafından etkilenmiştir. Sistem çalışması esnasında; PV/T çatının ortalama ısı ve toplam verimi sırasıyla % 69,3 ve % 86,8 idi. PV çatıya kıyasla (PV modu altındaki sistem); PV/T çatının (PV/T modu altındaki sistem) hem elektrik üretimini hem de elektriksel verimini, sırasıyla % 12 ve % 10,8 artışla birlikte, daha düşük PV/T modül sıcaklığına bağlı olarak artmıştır. PV/T çatıda; PV/T modülün sıcaklığı, orjinal çatının dış yüzeyi ve akış kanalındaki hava da güneş ışınlamı ile benzer değişim eğilimi göstermiştir. Sistem çalışmasının başlangıcında, keskin bir düşüş vardı. PV/T modül; gün boyunca gölgeleme ve yüzey ısı kaynağı rolü ve gece yalıtım rolü oynamıştır, ama, PV/T modülden orjinal çatı aracılığıyla çekilen ısı, güneş ışınlamından absorbe edilmesi gerekenden daha azdı. Geleneksel çatının aksine; PV/T çatının gün boyunca ısı kazançları ve soğutma yükü büyük miktarda azalmıştır, bununla birlikte, ısıtma yükü gece kademeli olarak artmıştır. Test esnasında; PV/T çatısı, ısıtma kazançlarını ve günlük yükü sırasıyla %39,9 ve %38,6 azaltmak suretiyle, binaların enerji tüketimi üzerine iyi bir azaltıcı etki göstermiştir. Yukarıdaki sonuçlar göstermektedir ki PV/T çatısı, kuzey Çin’de iyi bir uygulama olasılığına sahiptir. Enerji kıtlığı ve çevresel kirlilik için belli bir seviyeye kadar iyi bir çözüm sağlar ve aynı zamanda, PV/T modüllerin pratik uygulamada geniş bir alan işgal etmesi probleminin üstesinden gelir. Bu; PV/T ısı pompası sisteminin geliştirilmesine büyük bir katkıda bulunacaktır ve PV/T ile bütünleştirilmiş binanın popülerliğini artırır [68].

Wang vd.’nin 2020 yılında yaptıkları çalışmada; yenilikçi hibrit bir güneş enerjili fotovoltaik-yoğunlaştırılmış ısı (PV-CT) sistemi sunulmaktadır. PV-CT sisteminin düzenleme ve tasarım yöntemi temin edilmektedir. Spektral ışın ayırıcıları (SBS’ler) ile eşleştirilmiş çoklu-segmentli PV paneller; bu PV-CT sisteminde, güneş enerjili ısı kollektör için güneş enerjisi yoğunlaştırıcısı olarak kullanılmaktadır. Çok tabakalı film-tabanlı SBS tasarlanmaktadır. Güneş ışığının farklı sapma açıları altında, önerilen PV-CT sisteminin güneş enerjisi konsantrasyon süreçleri ve optik performansları, ışın izleme yöntemini kullanmak suretiyle incelenmektedir. Sonuçlar göstermektedir ki; güneş ışığının sapma açısı 1,0°’ye yükseldiğinde; PV-CT sisteminin toplam optik verimi % 93,8’dir. Isı kollektör yüksekliğinin ve çapının; PV-CT sisteminin yoğunlaştırılmış güneş performansına etkisi de değerlendirilmektedir. Sonuçlar göstermektedir ki; % 95’den daha büyük olan veya ona eşit olan bir ışınlama verimi

elde etmek için, ısı alıcı tüpün kurulum yüksekliği aralığı 978,0-1022,0 mm olmalıdır ve kurulum hatası 22,0 mm'yi geçmemelidir. Termodinamik analiz sonuçları şunu ortaya koymaktadır ki ısı alıcı kollektörün en uygun çalışma sıcaklığı 274,0 °C'dir, ki PV-CT sisteminin en yüksek toplam çıkış gücü ile sonuçlanabilir. Bu makalede; yenilikçi hibrit bir güneş enerjili PV-CT sistemi önerilmektedir. PV-CT sisteminin düzenleme ve tasarım yöntemi tanıtılmaktadır. Spektral ışın dağıtıcılarla eşleştirilmiş olan çoklu segmentli PV paneller; bu PV-CT sisteminde güneş enerjili ısı kollektör için yoğunlaştırıcı olarak kullanılmaktadır. Çoklu segmentli PV panel yüzeyi; parabolik oluklu eğri yüzeyden modifiye edilmektedir. Çoklu tabakalı film-tabanlı SBS tasarlanmaktadır. Güneş ışığının farklı sapma açılarında, güneş yoğunlaştırma süreçleri ve alıcı tüp kollektörü üzerinde yoğunlaştırılmış güneş ışıını dağılımının değişimi, ışın izleme yaklaşımını kullanmak suretiyle incelenmektedir. Sonuçlar göstermektedir ki; güneş ışığının sapma açısı 1,0 °C'ye yükseldiğinde, PV-CT sisteminin toplam optik verimi % 93,8'dir. Isı kollektör yüksekliğinin ve çapının, PV-CT sisteminin optik performansına etkileri de değerlendirilmektedir. Konu ile ilgili sonuçlar ortaya koymaktadır ki % 95'ten daha büyük veya ona eşit bir ışıını alma verimi sağlamak için; ısı alıcı tüpün kurulum yükseklik aralığı 978-1022 mm aralığında olmalıdır ve kurulum hatası 22 mm'yi aşmamalıdır. Termodinamik analiz sonuçları göstermektedir ki; PV-CT sisteminin en yüksek ekserji ve toplam enerji verimleri, sırasıyla, % 28,5 ve % 24,3'tür. Isı alıcı kollektörün en uygun çalışma sıcaklığı 274,0 °C'dir ki, PV-CT sisteminin en yüksek toplam çıkış gücü ile sonuçlanır. Daha ileri çalışma için; spektral ışın ayırma performansı, güneş enerjisi konsantrasyon performansı, çıkış elektrik gücü, gerçek enerji dönüşüm verimi dahil olmak üzere, önerilen PV-CT sisteminin gerçek performanslarını araştırmak için deneysel bir kurulum yapılabilir [69].

Yao vd.'nin 2020 yılında yaptıkları çalışmada; PV/T modül, yüksek enlemli alanlarda ısı uygulaması için uygun olan doğrudan genişlemeli bir güneş enerjili PV/T ısı pompasını oluşturmak için ısı pompası buharlaştırıcısı ile eşleştirilmektedir. Kararlı evsel ısıtmayı başarmak için; bina içi PCM (faz değiştiren malzeme) ısı deposu ile eşleştirilmiş bir güneş enerjili PV/T ısı pompası sistemi, bu nedenle, önerilmektedir ve simüle edilmektedir. Bununla birlikte; bina içi PCM ısı depolama sistemi ile eşleştirilmiş güneş enerjili PV/T ısı pompasının matematiksel modeli kurulmaktadır

ve doğrulanmaktadır. Simülasyon sonuçları göstermektedir ki; bina içi PCM ısı deposu kullanan yerden ısıtma sıcaklığı, dolaşan su 40 °C iken 39 saat sonra 22-31 °C'ye ulaşabilir. Dahası, ısıtma COP'si (performans katsayısı); sırasıyla, güneş ışıınının, çevresel sıcaklığın ve PV/T kollektör alanının artışıyla birlikte ve rüzgar hızının azalışıyla birlikte artar. 20 m²'lik bir PV/T panel modülü, güneş ışıınıı yoğunluğu 600 W/m² iken, güç şebekesine elektriğın %21,4'ünü verebilir ve sistemin çalışmasını sürdürürken, 100 m²'lik bir odanın ısı ihtiyacını karşılayabilir. Bununla birlikte; ısıtma COP'si, geleneksel hava şartlandırma sisteminden %70 daha yüksek olan 5,79'a ulaşabilir ve elektriksel, ısı, toplam verimler sırasıyla % 17,77, % 55,56 ve % 75,49'dur. Bu makalede; güneş enerjili PV/T ısı pompası ve bina içi PCM ısı deposu kullanan bina eşleşmeli bir yeniden üretim sistemi önerilmektedir. Sistemin matematiksel modeli kurulmaktadır ve farklı koşullar altında sistem performansını analiz etmek için doğrulanmaktadır. Ana sonuçlar şöyledir:

- Bina içi PCM ısı deposunu kullanan yerden ısıtmanın sıcaklığı; dolaşım suyunun, konut ısıtması için sabit ve uygun olarak 40 °C olduğu 39 saat sonra 22 °C'den 31 °C'ye ulaşabilir.
- Güneş ışıınıı yoğunluğu 600 W/m² iken, çevre sıcaklığı 25 °C iken, rüzgar hızı 1,5 m/s iken ve PV/T kollektör alanı 2 m² iken, bununla birlikte, elektriksel, ısı ve toplam verimler sırasıyla % 17,05, % 56,43 ve % 73,87 iken ısıtma COP'si geleneksel hava şartlandırma sisteminden %94 daha yüksek olan 6,6'ya ulaşabilir.
- 2 m²'lik bir PV/T panel; güneş ışıınıı yoğunluğu 500 W/m² iken sistemin güç ihtiyacını ve 10 m²'lik bir odanın ısı ihtiyacını karşılayabilir. Dahası; eğer panel alanı 2m²'den daha büyükse veya güneş ışıınıı yoğunluğu 500 W/m²'den daha yüksek ise, PV/T panel, güç şebekesine elektrik verebilir [70].

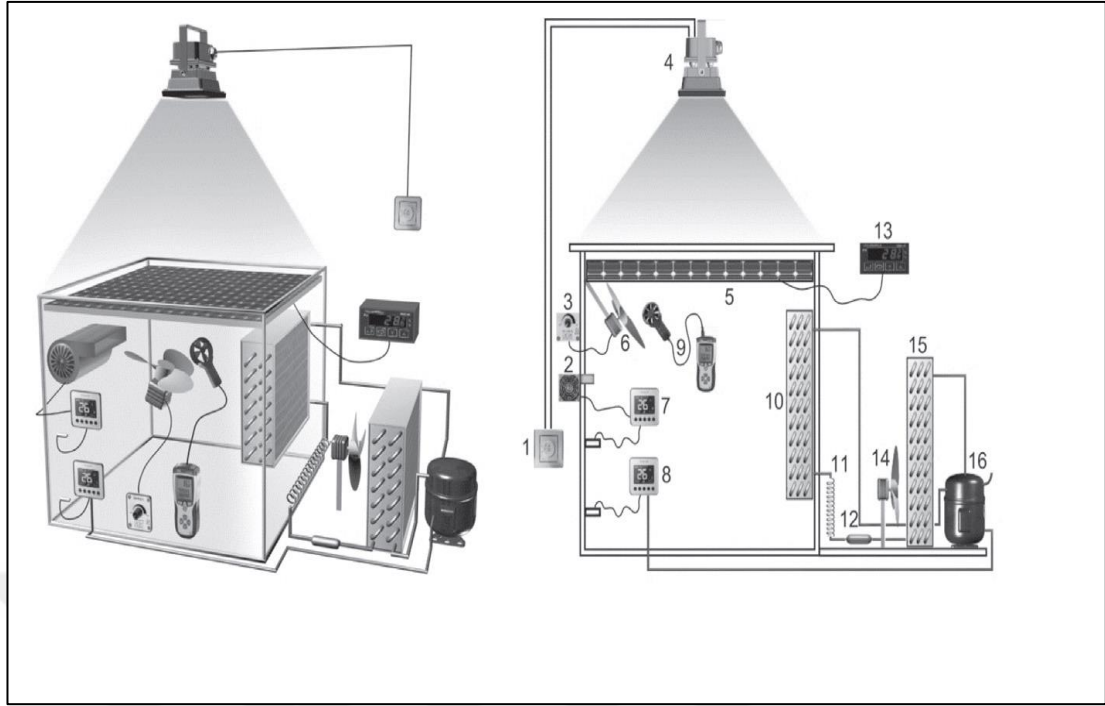
Bu makalede kurulan matematiksel model de; güneş enerjili PV/T ısı pompası sistemini analiz etmek ve optimize etmek için kullanılabilir. Ancak; bu sistemin matematiksel modeli, geçici yerine kararlı çalışma şartları içindir [70].

BÖLÜM 4

MATERYAL VE METOT

4.1. DENEY DÜZENEĞİ

Çevre sıcaklığının ve hava hızının, panel arkası sıcaklıklarına etkisinin belirlenebilmesini gerçekleştiren test cihazı Şekil 4.1’de görüldüğü gibi tasarlanmıştır. Deneysel çalışma iç ortamda gerçekleştirildiğinden, dış ortamda ölçülen güneş ışınımı değerlerine en yakın spektrumu sağlayan bir Ksenon lambası kullanılmıştır. Kapalı bir ünite içerisine yerleştirilmiş olan polikristal panelin çevresel sıcaklığının kontrolünde, elektrikli bir ısıtıcı ve mekanik sıkıştırırmalı bir soğutma sisteminin buharlaştırıcısı kullanılmıştır. Sıcaklık, ayar sıcaklığının altına düştüğünde; sıcaklığı ayar değerine yükselten elektrikli ısıtıcı aktive edilmiştir. Aksi durumda, sıcaklık, ayar değerinin üzerine çıktığında, sıcaklıkları ayar değerinde tutmak için, soğutma sisteminin buharlaştırıcısı aktive edilmiştir. Panel; 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C, 35 °C ve 40 °C oda sıcaklıklarında ve farklı hava hızlarında ve farklı güneş ışınımalarında test edilmiştir. Sıcaklık kontrol cihazı; kendiliğinden öğrenme kabiliyetine sahip, kendiliğinden ayarlı cihazdır. Kontrol türü olarak, sistemde PID kontrol gerçekleştirilmiştir. Panel arkası hava hızı; bir fan hızı kontrol edici ile ayarlanmıştır. Panel arkası havanın ortalama hızı bir anemometre ile ölçülmüştür ve 0, 2, 3, 4 ve 5 m/s hava hızlarında fan hızı kontrol edici ile ayarlanmıştır [71].



1.Ksenon lambası güç kontrol edici 2. Isıtıcı 3. Fan hızı kontrol edici 4. Ksenon lambası 5. PV modül 6. Fan 7. Isıtıcı sıcaklık kontrol edici 8. Soğutucu sıcaklık kontrol edici 9. Anemometre 10. Buharlaştırıcı 11. Kılcal tüp 12. Kurutucu 13. Dijital termometre 14. Yoğunlaştırıcı fanı 15. Yoğunlaştırıcı 16. Kompresör

Şekil 4.1. Güneş ışınımına, çevresel sıcaklığa ve rüzgar hızına bağlı olarak panel arkası sıcaklıklarını ölçmek için kurulan test düzeneği [71].

Test düzeneği hakkında şunlar söylenebilir:

- Testlerden önce; saptırıcı vanalı bir anemometre kullanmak suretiyle panel üzerindeki çeşitli noktalarda ölçümler yapılmaktadır ve arzu edilen hava hızı ayarlanmaktadır.
- Arzu edilen panel arkası sıcaklığını gerçekleştirmek için bir ksenon lambası kullanılmaktadır. Başka bir deyişle, paneli ısıtmak için kullanılmaktadır. Daha sonra; hava hızının ve çevre sıcaklığının, açık devre voltajına ve panel arkası sıcaklığına etkisi ölçülmektedir.
- Arzu edilen çevre sıcaklığı hem soğutma sisteminde hem de ısıtma sisteminde ayarlanmaktadır.
- Çevre sıcaklığı, deneyin başlangıcında arzu edilen değerden daha yüksek ise; soğutma sistemi aktive edilir ve çevresel sıcaklık, ayar değerine ulaşır. Aksi durumda; ısıtma sistemi aktive edilir ve arzu edilen değer gerçekleştirilir.

- Isıtma ve soğutma sistemlerindeki proses kontrol cihazları; PID-kontrollü cihazlardır. Bu cihazlar; ayar değerine bağlı olarak, ısıtıcının ve soğutucunun fanlarının hızını kontrol eder. Örneğin; soğutma sistemi çalışırken çevre sıcaklığı, ayar değerinin altına düştüğünde, proses kontrol cihazı bu durumu tespit eder ve ısıtma sistemini aktive eder. Böylece, ayar değeri gerçekleştirilir. Böylece, her iki sistem de; kısa bir zaman için belli aralıklarda çalışabilir [71].

4.2. KULLANILACAK DENKLEMLER

Bu bölümde ve sonraki bölümde; yüzeyine sabit ısı akısı değerlerinin geldiği bir panel yüzeyi üzerinde yapılan ısı taşınımı analizlerinin hesaplamaları gösterilmektedir. Panel üzerinde farklı ölçümler yapılmış olup her bir ölçümde bir adet ısıtım değeri bulunmaktadır. Bu ısıtım değeri; kurulmuş olan deney düzeneğindeki neon lambası aracılığıyla panel yüzeyine sağlanmaktadır. Her bir ölçümde bir adet ısıtım değeri olduğundan ve panelin ısı taşınım analizleri her bir ölçüm verisi için ayrı ayrı yapılacağından her bir ölçüm verisi, yüzeye sabit ısı akısının geldiği bir ısı taşınımı durumu olarak değerlendirilebilir ve bu nedenle hesaplamalarda, üzerine sabit ısı akısının geldiği düzlem yüzeyler için geçerli olan yerel Nusselt sayısı ifadesi kullanılabilir. Hesaplamalarda kullanılacak olan yerel Nusselt sayısı ifadesi; üzerine sabit ısı akısının geldiği düzlem yüzey üzerinde, laminar akış durumunda ve $Pr \geq 0,6$ olduğu durumda geçerli olduğundan bizim ölçüm verilerimizin laminar akış durumunu ve $Pr \geq 0,6$ olma durumunu sağladığı işlemler esnasında gösterilecektir.

Yukarıdaki açıklamalara göre işlemler esnasında yerel Nusselt sayısı için kullanılacak olan denklem aşağıdaki gibidir [72].

$$Nu_x = 0,453Re_x^{1/2}Pr^{1/3} \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1'deki Re_x sayısı herhangi bir x konumundaki yerel Reynolds sayısıdır; Pr sayısı ise akışkanın Prandtl sayısıdır. Eşitlik 4.1'deki Re_x sayısının açılması ile denklem aşağıdaki şekle dönüşür.

$$Nu_x = 0,453 \left(\frac{\rho u_\infty x}{\mu} \right)^{1/2} Pr^{1/3} \quad (4.2)$$

$$Nu_x = 0,453 \left(\frac{\rho u_\infty}{\mu} \right)^{1/2} x^{1/2} Pr^{1/3} \quad (4.3)$$

Eşitlik 4.2 ve Eşitlik 4.3'teki ρ (kg/m³) akışkanın yoğunluğu, u_∞ (m/s) akışkanın levha yüzeyinden yeterince uzak dik mesafedeki hızı, μ (Pa.s) akışkanın dinamik viskozitesi ve x (m) ise levhanın başlangıcından itibaren akışkanın hareket yönündeki mesafedir.

Böylece yerel Nusselt sayısının yüzey üzerindeki ortalaması aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$Nu_{\text{yüzey ortalaması}} = \frac{1}{L} \int_{x=0}^L Nu_x dx \quad (4.4)$$

Eşitlik 4.4'teki integralin çözülmesi ile yerel Nusselt sayısının yüzey üzerindeki ortalaması; Eşitlik 4.5'teki gibi hesaplanır.

$$Nu_{\text{yüzey ortalaması}} = 0,302 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad (4.5)$$

Ancak yerel Nusselt sayısının yüzey üzerindeki ortalamasının, ortalama ısı taşınım katsayısının hesaplanmasında kullanılan formüldeki ortalama Nusselt sayısı ile aynı olmadığı belirtilmelidir ve bu iki ortalama Nusselt sayısı arasındaki ilişki bu işlemlerin ilerleyen kısımlarında verilmiştir.

Isı taşınımında önemli bir büyüklük olan “ortalama ısı taşınım katsayısını” hesaplayabilmek için öncelikle yerel Nusselt sayısı formülünden yerel ısı taşınım katsayısı (h_x) çekilmelidir.

$$Nu_x = \frac{h_x x}{k} \rightarrow h_x = Nu_x \frac{k}{x} \quad (4.6)$$

Eşitlik 4.3'teki ifadenin Eşitlik 4.6'da yerine yazılması ile; Eşitlik 4.7 ve Eşitlik 4.8 elde edilir.

$$h_x = 0,453 \left(\frac{\rho u_\infty}{\mu} \right)^{1/2} x^{1/2} Pr^{1/3} \frac{k}{x} \quad (4.7)$$

$$h_x = 0,453 \left(\frac{\rho u_\infty}{\mu} \right)^{1/2} Pr^{1/3} k x^{-1/2} \quad (4.8)$$

Böylece ortalama ısı taşınım katsayısı, yani yerel ısı taşınım katsayısının yüzey üzerindeki ortalaması aşağıdaki denklemden hesaplanabilir.

$$h = \frac{1}{L} \int_{x=0}^L h_x dx \quad (4.9)$$

Eşitlik 4.8'deki sonuç Eşitlik 4.9'da yerine yazılarak, bu denklemden integralin çözülmesi ile yüzey üzerindeki ortalama ısı taşınım katsayısı; Eşitlik 4.10 ve Eşitlik 4.11'deki gibi hesaplanır.

$$h = 0,906 \left(\frac{\rho u_\infty L}{\mu} \right)^{1/2} Pr^{1/3} \frac{k}{L} \quad (4.10)$$

$$h = 0,906 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \frac{k}{L} = 3,0,302 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \frac{k}{L} \quad (4.11)$$

Eşitlik 4.5'teki ifadenin Eşitlik 4.11'de yazılması ile aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$h = \frac{3Nu_{\text{yüzey ortalama}} \cdot k}{L} \quad (4.12)$$

Eşitlik 4.12'den görüldüğü üzere; ortalama ısı taşınım katsayısının hesaplanmasında kullanılan formülde, yerel Nusselt sayısının yüzey üzerindeki ortalamasının 3 katının alınması gerekmiştir. Dolayısıyla daha önce bahsedildiği üzere; yerel Nusselt sayısının yüzey üzerindeki ortalaması ile ortalama ısı taşınım katsayısı formülünde doğrudan kullanılan ortalama Nusselt sayısı birbirinden farklıdır ve ikisini birbirine karıştırmamak gerekir. Bu ikisinin arasında şu anki durumda geçerli olan ilişkiyi ortaya koyabilmek için h değeri aşağıdaki gibi yazılmalıdır:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (4.13)$$

Eşitlik 4.12 ve Eşitlik 4.13'e göre mevcut durumumuz için $Nu = 3Nu_{\text{yüzey ortalaması}}$ olduğu kolaylıkla görülebilir.

Böylece panelin birim yüzey alanından gerçekleşen ısı güç şöyle hesaplanabilir.

$$\dot{q} = h(T_y - T_{\infty}) \quad (4.14)$$

Eşitlik 4.14'te T_y yüzey sıcaklığı; T_{∞} ise ısı sınır tabakası dışındaki akışkan sıcaklığıdır. $\dot{q}$ değerinin birimi W/m^2 'dir.

4.3. HESAPLAMALARIN GÖSTERİMİ

1. Durum:

Işınım: 400 W/m^2 ; Ortam Sıcaklığı: $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$; Ölçülen Panel Sıcaklığı: $23,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$; Rüzgar Hızı: 5 m/s .

Öncelikle film sıcaklığı; Eşitlik 4.15 ile hesaplanır.

$$T_f = \frac{10^{\circ}\text{C} + 23,6^{\circ}\text{C}}{2} = 16,8^{\circ}\text{C} \quad (4.15)$$

İlgili tablodan bu sıcaklıktaki termofiziksel özellikler; Eşitlik 4.16'daki gibi okunur.

$$\rho = 1,21744 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; k = 0,024897 \frac{\text{W}}{\text{mK}}; \mu = 1,81028 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}; Pr = 0,731796 > 0,6 \quad (4.16)$$

Düzlem levha üzerindeki akış için $Re_{kr} = 500000$ olduğu dikkate alınır; Eşitlik 4.17'deki sonuç elde edilir [73].

$$Re_L = \frac{\rho u_{\infty} L}{\mu} \rightarrow Re_L = \frac{1,21744 \cdot 5 \cdot 0,98}{1,81028 \cdot 10^{-5}} = 329532,2271 < 500000 \text{ (laminer)} \quad (4.17)$$

Böylece yerel Nusselt sayısının yüzey üzerindeki ortalaması; Eşitlik 4.18 ve Eşitlik 4.19'daki gibi hesaplanır.

$$Nu_{yüzey\ ortalaması} = 0,302 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad (4.18)$$

$$Nu_{yüzey\ ortalaması} = 0,302 \cdot 329532,2271^{1/2} \cdot 0,731796^{1/3} \rightarrow Nu_{yüzey\ ortalaması} = 156,23 \quad (4.19)$$

Ortalama Nu sayısı; Eşitlik 4.20'deki gibi hesaplanır.

$$Nu = 3Nu_{yüzey\ ortalaması} \rightarrow Nu = 3 \cdot 156,23 = 468,68 \quad (4.20)$$

Ortalama ısı taşınım katsayısı; Eşitlik 4.21 ve Eşitlik 4.22'deki gibi hesaplanır.

$$h = 0,906 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \frac{k}{L} \quad (4.21)$$

$$h = 0,906 \cdot 329532,2271^{1/2} \cdot 0,731796^{1/3} \cdot \frac{0,024897}{0,98} \rightarrow h = 11,9068 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.22)$$

Birim yüzey alanından taşınım ile gerçekleşen ısı gücü; Eşitlik 4.23 ile bulunur.

$$\dot{q} = h(T_y - T_\infty) \rightarrow \dot{q} = 11,9068 \cdot (23,6 - 10) \rightarrow \dot{q} = 161,9324 \text{ W/m}^2 \quad (4.23)$$

Ölçüm verilerinden birisi için işlem adımları bu şekildedir. Diğer ölçüm verileri için de; ısı analizlerinde kullanılacak olan denklemler ve işlem adımları tamamen aynı olacaktır; dolayısıyla tamamen aynı denklemleri kullanarak ve aynı işlem adımlarını uygulayarak diğer ölçüm verileri için de aynı büyüklükler hesaplanabilir ve sonuçlar Çizelge 4.1'deki gibi tablo halinde verilebilir. Ayrıca şunu belirtmek gerekir ki; denklemlerin kullanılabilme şartı olan $Pr \geq 0,6$ şartı ve akışın tüm levha üzerinde laminar olma şartı, diğer ölçüm verileri için de sağlanmaktadır.

Çizelge 4.1. Ölçüm verilerine göre yapılan ısı hesaplamalar [71].

	Işınım (W/m^2)	Ortam Sıcaklığı (°C)	Ölçülen Panel Sıcaklığı (°C)	Rüzgar Hızı (m/s)	Nu_x Sayısının Yüzey Üzerindeki Ortalaması ($Nu_{yüzey\ ortalaması}$)	Ortalama Nu Sayısı (Nu)	h (W/m^2K)	Birim Yüzey Alanından Gerçekleşen Isıl Güç) ($\dot{q}$) (W/m^2)
1. Durum	400	10	23,6	5	156,23	468,68	11,9068	161,9324
2. Durum	400	15	18	5	156,372	469,116	11,9069	35,7208
3. Durum	400	20	20,35	5	154,5889	463,767	11,9032	4,1661
4. Durum	400	25	27,3	5	151,7577	455,2665	11,8904	27,34792
5. Durum	400	30	32,8	5	149,346	448,0381	11,8792	33,2618
6. Durum	400	25	28,7	4	135,4433	406,3299	10,6338	39,34506
7. Durum	400	30	31,5	4	133,8392	401,5175	10,6261	15,93915
8. Durum	400	40	42,7	4	129,7232	389,17	10,6108	28,64916
9. Durum	400	25	31,9	3	116,723	350,169	9,20633	63,523677
10. Durum	400	30	33,7	3	115,5272	346,5817	9,201	34,0437
11. Durum	400	35	38	3	113,9437	341,8311	9,1949	27,5847
12. Durum	400	40	44,2	3	112,0971	336,2912	9,188093	38,5899
13. Durum	400	25	34,7	2	94,895	284,685	7,51477	72,8933
14. Durum	400	30	43,2	2	93,0076	279,023	7,5079	99,1055
15. Durum	400	35	44,8	2	92,1181	276,3543	7,5046	73,54508
16. Durum	400	40	47,8	2	91,0451	273,1353	7,49968	58,49752
17. Durum	800	10	26,3	5	155,5681	466,7042	11,9054	194,05802
18. Durum	800	15	19,5	5	156,0063	468,0189	11,9063	53,57835
19. Durum	800	20	24,05	5	153,7031	461,1093	11,8994	48,1927
20. Durum	800	25	30,2	5	151,0823	453,2469	11,8873	61,8139
21. Durum	800	30	33,9	5	149,1004	447,3011	11,8783	46,3252
22. Durum	800	35	35,2	5	147,7005	443,1015	11,8721	2,37443
23. Durum	800	40	43	5	144,9712	434,9137	11,86294	35,5888
24. Durum	800	25	31,9	4	134,78	404,34	10,6306	73,351
25. Durum	800	30	34,6	4	133,2197	399,6592	10,6237	48,8689
26. Durum	800	35	37,8	4	131,6091	394,8273	10,6175	29,7289
27. Durum	800	40	44,2	4	129,4385	388,3156	10,6095	44,5599
28. Durum	800	25	36,5	3	115,9081	347,7243	9,20245	105,8282
29. Durum	800	30	35,6	3	115,199	345,5971	9,1997	51,51806
30. Durum	800	35	43,9	3	112,9693	338,9079	9,1918	81,8067
31. Durum	800	40	45,6	3	111,8673	335,6019	9,187	51,4472
32. Durum	800	25	38,5	2	94,3558	283,0675	7,5127	101,4214
33. Durum	800	30	41,8	2	93,1971	279,5912	7,50805	88,595
34. Durum	800	35	48,8	2	91,5805	274,7415	7,5023	103,5317
35. Durum	800	40	53,9	2	90,2595	270,7785	7,496254	104,1979
36. Durum	1000	10	26,5	5	155,5194	466,5583	11,90533	196,4379

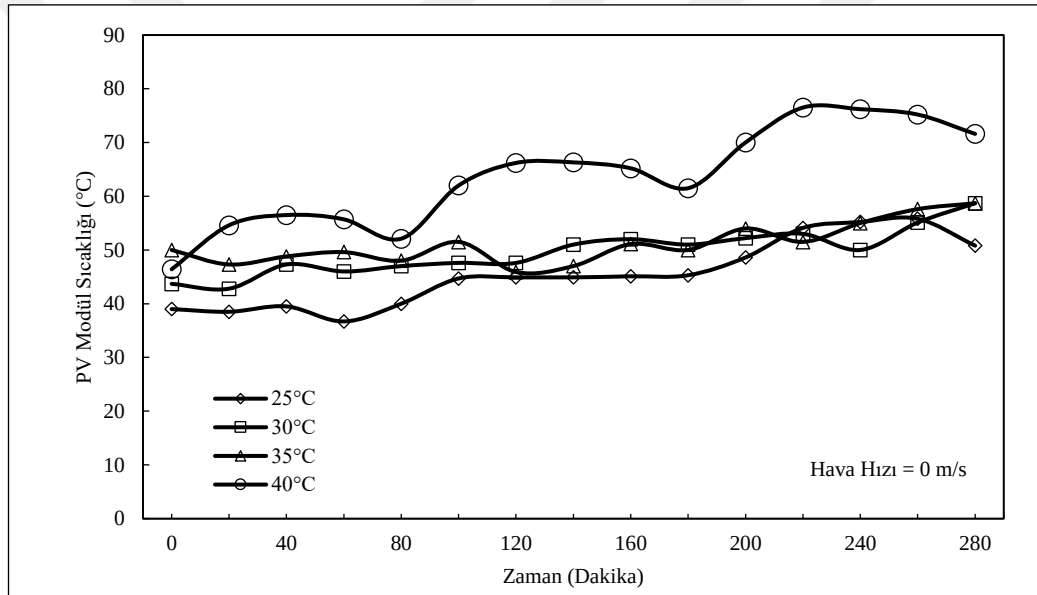
Çizelge 4.1. (devam ediyor).

37. Durum	1000	15	21,6	5	155,4951	466,4853	11,90528	78,5748
38. Durum	1000	20	21,4	5	154,3352	463,0057	11,9019	16,6628
39. Durum	1000	25	31,1	5	150,8738	452,6214	11,8863	72,5062
40. Durum	1000	30	36,8	5	148,4541	445,3624	11,8755	80,7537
41. Durum	1000	35	37,4	5	147,229	441,68713	11,8709	28,49023
42. Durum	1000	40	46,7	5	144,1874	432,5622	11,8592	79,4568
43. Durum	1000	25	31,2	4	134,9249	404,7748	10,6313	65,9139
44. Durum	1000	30	37,2	4	132,7018	398,1055	10,6215	76,4745
45. Durum	1000	35	37,2	4	131,7239	395,1719	10,6178	23,3591
46. Durum	1000	40	48,1	4	128,7005	386,1016	10,6059	85,90745
47. Durum	1000	25	36,1	3	115,9775	347,9324	9,2027	102,15
48. Durum	1000	30	41,4	3	114,209	342,627	9,19562	104,83
49. Durum	1000	35	45,8	3	112,6564	337,9692	9,1906	99,258
50. Durum	1000	40	49,7	3	111,1965	333,5895	9,18355	89,08042
51. Durum	1000	25	42,4	2	93,8062	281,4187	7,5104	130,6806
52. Durum	1000	30	47,7	2	92,4004	277,2013	7,5056	132,84951
53. Durum	1000	35	51,7	2	91,19211	273,57633	7,50043	125,25718
54. Durum	1000	40	55,6	2	90,0456	270,1368	7,49536	116,9276

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

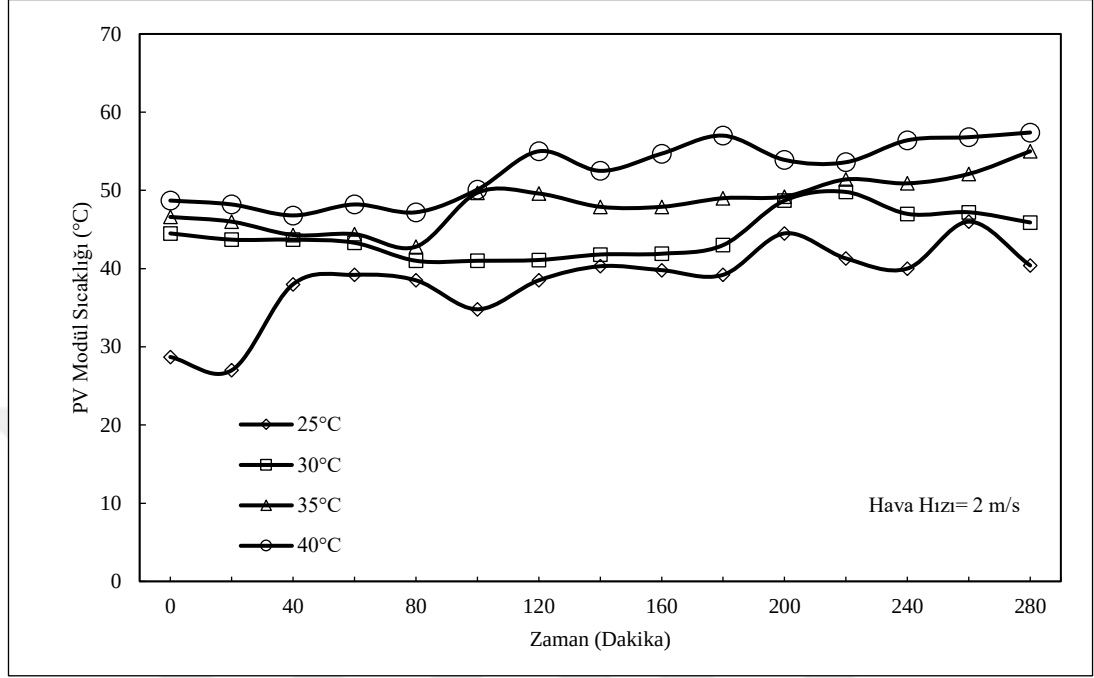
Bu bölümde; yapılan deneysel çalışmalardan ve analitik işlemlerden elde edilen sonuçlar tablo ve grafikler şeklinde düzenlenerek verilmiştir. Grafikler ve tablolar tek tek yorumlanmıştır.



Şekil 5.1. Zamana bağlı PV modül sıcaklığı (0 m/s hava hızı için).

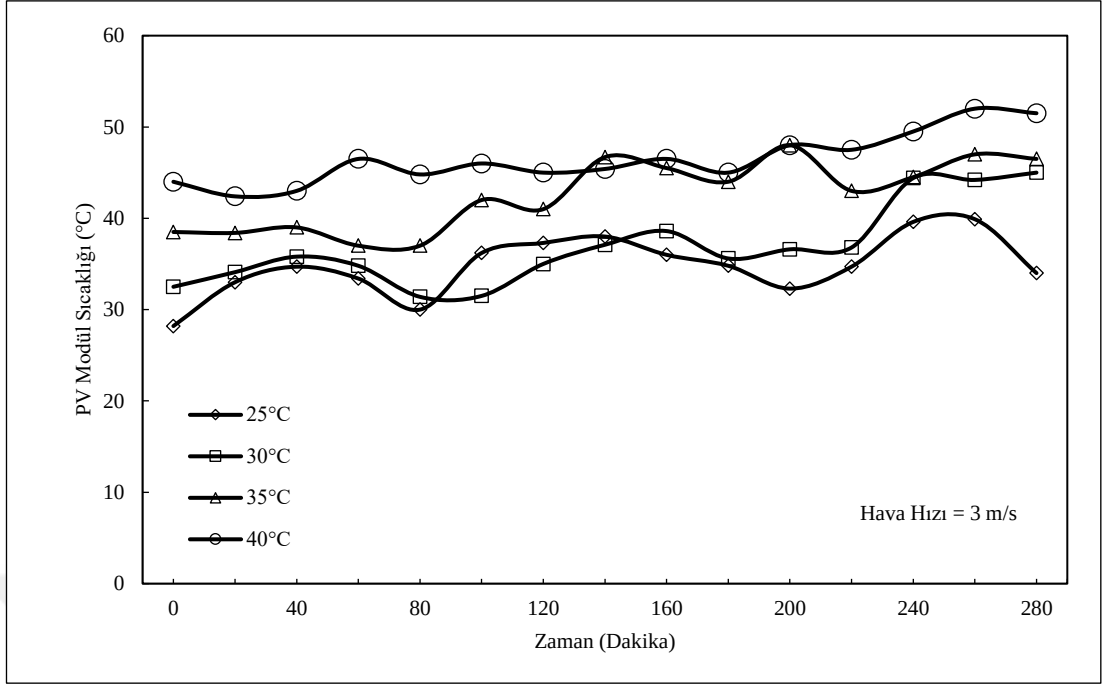
Şekil 5.1’de; 0 m/s hava hızı için, zamana ve farklı ortam sıcaklıklarına (25 °C, 30 °C, 35 °C ve 40 °C) bağlı, PV modül sıcaklığının değişimi görülmektedir. Bu grafikler incelendiğinde; 0 m/s hava hızında (yani doğal taşınım durumunda); deney süresi sonunda 25 °C hava sıcaklığında PV modül sıcaklığı 47 °C olurken, 30 °C hava sıcaklığında 55 °C, 35 °C hava sıcaklığında 55 °C ve 40 °C hava sıcaklığında 70 °C olmuştur. PV modül sıcaklıkları en düşük değerleri 25 °C ortam sıcaklığında almıştır ve ortam sıcaklığı arttıkça PV modül sıcaklıklarının değerleri de artmış olup 40 °C ortam sıcaklığında PV modül sıcaklıkları en yüksek değerleri almıştır. Buradan şu sonuca varılabilir ki; ortam havası sıcaklığı arttıkça, PV modül sıcaklıkları da

artmaktadır. Mevcut durumda, doğal taşınım ile ısı transferi olduğundan, 40 °C hava sıcaklığında, PV modülün en yüksek sıcaklık değerine (75°C) ulaştığı görülmüştür.



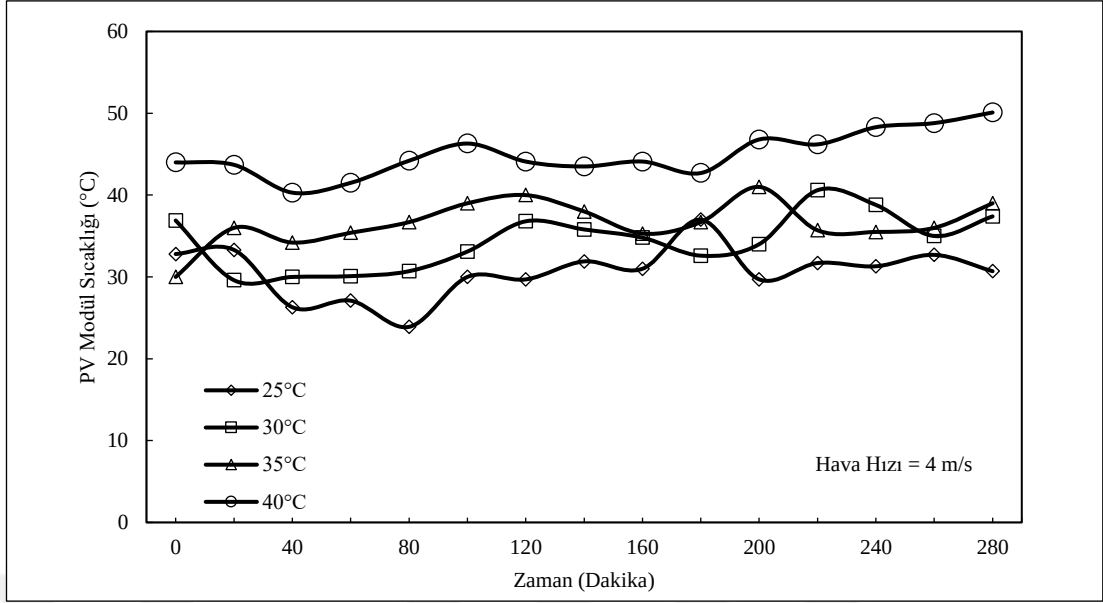
Şekil 5.2. Zamana bağlı PV modül sıcaklığı (2 m/s hava hızı için).

Şekil 5.2’de; 2 m/s hava hızı için zamana ve farklı ortam sıcaklıklarına (25 °C, 30 °C, 35 °C ve 40 °C) bağlı PV modül sıcaklığının değişimi görülmektedir. Bu grafikler incelendiğinde; 2 m/s hava hızında; deney süresi sonunda 25 °C hava sıcaklığında PV modül sıcaklığı 40 °C olurken, 30 °C hava sıcaklığında 45 °C, 35 °C hava sıcaklığında 55 °C ve 40 °C hava sıcaklığında 57 °C olmuştur. PV modül sıcaklıkları en düşük değerleri 25 °C ortam sıcaklığında almıştır ve ortam sıcaklığı arttıkça PV modül sıcaklıklarının değerleri de artmış olup 40 °C ortam sıcaklığında PV modül sıcaklıkları en yüksek değerleri almıştır. Buradan şu sonuca varılabilir ki; ortam havası sıcaklığı arttıkça, PV modül sıcaklıkları yine artmaktadır. Mevcut durumda, zorlanmış taşınım ile ısı transferi olduğundan, 40 °C hava sıcaklığına ait grafiğe bakıldığında, PV modülün ulaştığı en yüksek sıcaklık değerinin bir önceki duruma göre daha düşük (57°C) olduğu görülür. Dolayısıyla grafikler, bir önceki duruma göre, daha düşük PV modül sıcaklığı değerlerine inmiştir.



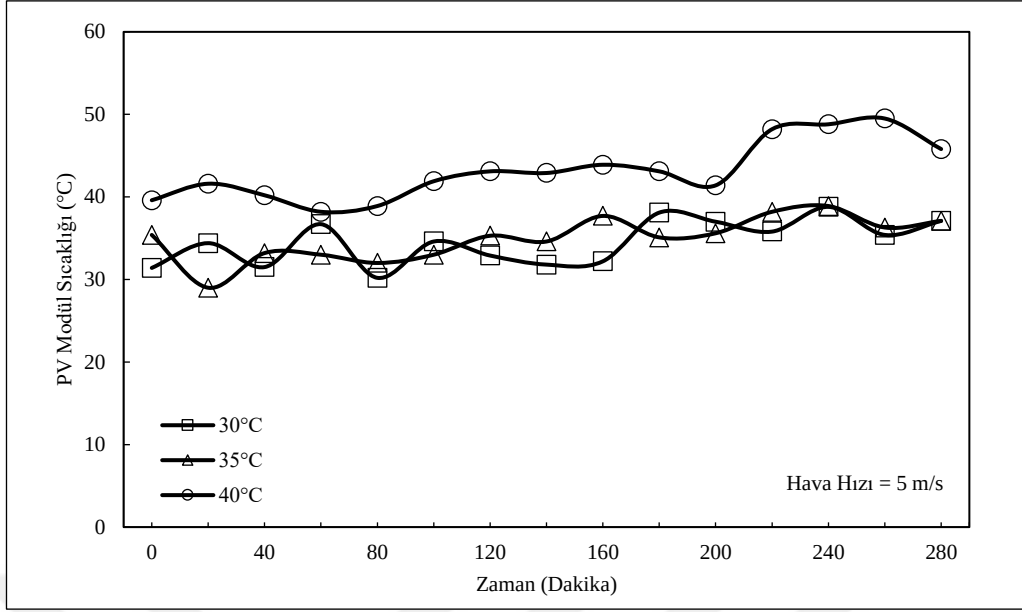
Şekil 5.3. Zamana bağlı PV modül sıcaklığı (3 m/s hava hızı için).

Şekil 5.3’de; 3 m/s hava hızı için zamana ve farklı ortam sıcaklıklarına (25 °C, 30 °C, 35 °C ve 40 °C) bağlı PV modül sıcaklığının değişimi görülmektedir. Bu grafikler incelendiğinde; 3 m/s hava hızında; deney süresi sonunda 25 °C hava sıcaklığında PV modül sıcaklığı 32,5 °C olurken, 30 °C hava sıcaklığında 45 °C, 35 °C hava sıcaklığında 46 °C ve 40 °C hava sıcaklığında 50 °C olmuştur. PV modül sıcaklığı en düşük değerleri 25 °C ortam sıcaklığında almıştır ve ortam sıcaklığı arttıkça PV modül sıcaklığının değerleri de artmış olup 40 °C ortam sıcaklığında PV modül sıcaklıkları en yüksek değerleri almıştır. Buradan şu sonuca varılabilir ki; ortam havası sıcaklığı arttıkça, PV modül sıcaklığı yine artmaktadır. Mevcut durumda, zorlanmış taşınım ile ısı transferi olduğundan ve ayrıca hava hızı bir önceki duruma göre daha yüksek olduğundan, 40 °C hava sıcaklığına ait grafiğe bakıldığında, PV modülün ulaştığı en yüksek sıcaklık değerinin bir önceki duruma göre daha düşük (52,5 °C) olduğu görülür. Dolayısıyla grafikler, bir önceki duruma göre, daha düşük PV modül sıcaklığı değerlerine inmiştir.



Şekil 5.4. Zamana bağlı PV modül sıcaklığı (4 m/s hava hızı için).

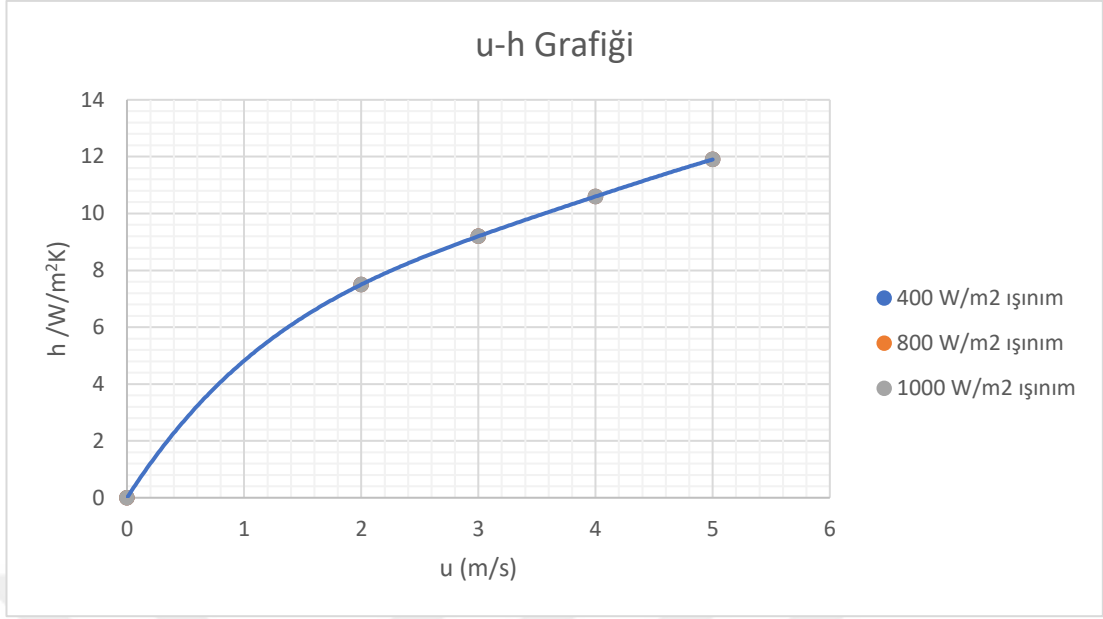
Şekil 5.4’de; 4 m/s hava hızı için zamana ve farklı ortam sıcaklıklarına (25 °C, 30 °C, 35 °C ve 40 °C) bağlı PV modül sıcaklığının değişimi görülmektedir. Bu grafikler incelendiğinde; 4 m/s hava hızında; deney süresi sonunda 25 °C hava sıcaklığında PV modül sıcaklığı 32 °C olurken, 30 °C hava sıcaklığında 37 °C, 35 °C hava sıcaklığında 38 °C ve 40 °C hava sıcaklığında 50 °C olmuştur. PV modül sıcaklığı en düşük değerleri 25 °C ortam sıcaklığında almıştır ve ortam sıcaklığı arttıkça PV modül sıcaklığının değerleri de artmış olup 40 °C ortam sıcaklığında PV modül sıcaklıkları en yüksek değerleri almıştır. Buradan şu sonuca varılabilir ki; ortam havası sıcaklığı arttıkça, PV modül sıcaklığı yine artmaktadır. Mevcut durumda, zorlanmış taşınım ile ısı transferi olduğundan ve ayrıca hava hızı bir önceki duruma göre daha yüksek olduğundan, 40 °C hava sıcaklığına ait grafiğe bakıldığında, PV modülün ulaştığı en yüksek sıcaklık değerinin bir önceki duruma göre daha düşük (50 °C) olduğu görülür. Dolayısıyla grafikler, bir önceki duruma göre, daha düşük PV modül sıcaklığı değerlerine inmiştir.



Şekil 5.5. Zamana bağlı PV modül sıcaklığı (5 m/s hava hızı için).

Şekil 5.5’de; 5 m/s hava hızı için zamana ve farklı ortam sıcaklıklarına (30 °C, 35 °C ve 40 °C) bağlı PV modül sıcaklığının değişimi görülmektedir. Bu grafikler incelendiğinde; 5 m/s hava hızında; deney süresi sonunda 30 °C hava sıcaklığında PV modül sıcaklığı 37 °C olurken, 35 °C hava sıcaklığında 37 °C ve 40 °C hava sıcaklığında 50 °C olmuştur. PV modül sıcaklıkları 30 °C ve 35 °C ortam sıcaklığında birbirine yakın değerler almıştır ve 40 °C ortam sıcaklığında PV modül sıcaklıkları en yüksek değerleri almıştır. Buradan şu sonuca varılabilir ki; ortam havası sıcaklığı arttıkça, PV modül sıcaklıkları yine artmaktadır. Mevcut durumda, 40 °C hava sıcaklığına ait grafiğe bakıldığında, PV modülün ulaştığı en yüksek sıcaklık değerinin bir önceki duruma göre aşağı yukarı aynı (50°C) olduğu görülür. Dolayısıyla grafikler, bir önceki duruma göre, aşağı yukarı aynı PV modül sıcaklığı değerlerinde kalmıştır.

Dolayısıyla hava hızının 0 m/s olduğu grafikten 4 m/s olduğu grafiğe gidiş esnasında, PV modülün ulaştığı en yüksek sıcaklık değeri ve grafikler gittikçe daha düşük değerlere inmekte iken; hava hızının 4 m/s olduğu grafikten 5 m/s olduğu grafiğe gidiş esnasında, PV modülün ulaştığı en yüksek sıcaklık değeri, bir önceki duruma göre yaklaşık aynı kalmaktadır, grafiklerde ise bir miktar değişim söz konusudur.



Şekil 5.6. Hava hızına bağlı olarak PV panel üzerindeki ısı taşınım katsayısının değişimi.

Şekil 5.6’da; hava hızına bağlı olarak PV panel üzerindeki ısı taşınım katsayısının değişimi görülmektedir. Hava hızı arttıkça ısı taşınım katsayısının arttığı görülmektedir; çünkü Re_L (panel ucundaki Reynolds sayısı) artmaktadır ve bu da ortalama Nusselt sayısını (Nu) arttırmaktadır. Bununla birlikte; panel sıcaklığı ile ortam sıcaklığının değişimi film sıcaklığını etkiler ve bu da akışkanın termofiziksel özelliklerini etkiler. Ancak buna rağmen; hava hızındaki değişimin etkisi termofiziksel özelliklerdeki değişime baskın gelmiştir ve ısı taşınım katsayısını en fazla etkileyen parametre hava hızındaki değişim olmuştur.

Çizelge 5.1. Çevre havası sıcaklığına, ölçülen panel sıcaklığına ve hava hızına göre hesaplanmış ortalama Nusselt sayısı ve h değerleri.

Panel Arkası Hava Hızının Isı Taşınım Katsayısına Etkisi				
Çevre Havası Sıcaklığı (°C)	Ölçülen Panel Sıcaklığı (°C)	Hava Hızı (m/s)	Ortalama Nusselt Sayısı (Nu)	h (W/m²K)
10	26,5	5	466,5	11,9
15	21,6	5	466,2	11,9
20	21,4	5	462,6	11,9
25	42,4	2	277,8	7,4
25	36,1	3	345	9,2
25	31,2	4	402,6	10,6

Çizelge 5.1. (devam ediyor).

25	31,1	5	450,3	11,9
30	47,7	2	271,8	7,4
30	41,4	3	337,5	9,1
30	37,2	4	393	10,5
30	36,8	5	439,8	11,8
35	51,7	2	266,7	7,3
35	45,8	3	330,6	9
35	37,2	4	388,8	10,5
35	37,4	5	434,7	11,7
40	55,6	2	261,6	7,3
40	49,7	3	324,6	9
40	48,1	4	375,9	10,4
40	46,7	5	421,5	11,6

Çizelge 5.1’de; çevre havası sıcaklığına, ölçülen panel sıcaklığına ve hava hızına göre hesaplanmış ortalama Nusselt sayısı ve h değerleri görülmektedir. Tablodaki değerlere bakıldığı zaman; h değerini etkileyen temel parametrenin hava hızı olduğu görülmektedir. Tabloya göre; çevre havası sıcaklığı ve ölçülen panel sıcaklığı değiştiği halde, hava hızı aynı olduğu zaman h değeri neredeyse aynı kalmaktadır. Örneğin; hava hızı 5 m/s iken h 11,9 W/m²K, 11,8 W/m²K, 11,7 W/m²K ve 11,6 W/m²K değerlerini almıştır; hava hızı 4 m/s iken h 10,6 W/m²K, 10,5 W/m²K ve 10,4 W/m²K değerlerini almıştır; hava hızı 3 m/s iken h 9,2 W/m²K, 9,1 W/m²K ve 9 W/m²K değerlerini almıştır; hava hızı 2 m/s iken h 7,4 W/m²K ve 7,3 W/m²K değerlerini almıştır. Çevre havası sıcaklığının ve ölçülen panel sıcaklığının değişmesi film sıcaklığını etkiler ve bu da akışkanın termofiziksel özelliklerini etkiler. Ancak şu sonuca varılabilir ki h değerini belirlemede; hava hızındaki değişim, akışkanın termofiziksel özelliklerindeki değişime baskın gelerek, h değerini belirleyen temel parametre hava hızı olmuştur.

Deneysel çalışmamız; şu sonuçları ve ilgili önerileri ortaya koymaktadır:

- Yazın, dış ortam sıcaklığı 25-30 °C iken ve güneş ışınlamı 1000 W/m² iken, en uygun sıcaklık azalması 4 m/s hava hızında gözlenmektedir.
- Panel arkası sıcaklığındaki azalma 4 m/s hava hızına kadar artmaktadır; hava hızı 5 m/s iken, sıcaklıktaki azalma fark edilebilir değildir.

- Çalışmada; polikristal (multikristal) panel kullanılmıştır; çalışma, farklı paneller kullanmak suretiyle tekrar edilebilir.
- Dış ortam sıcaklığı azaldığında; hava hızı, panelleri soğutmada daha az verimli hale gelmektedir.
- Panel arkası hava hızı; ısı taşınım katsayısının değerinde, dış ortam havası sıcaklığından, panel arkası sıcaklığından ve güneş ışıınım değerinden daha etkili olmuştur. Panel arkası hava hızı 5 m/s iken ortalama ısı transfer katsayısı 11,9 W/m²K olmuştur. 2 m/s, 3m/s ve 4 m/s hava hızlarında, ısı transfer katsayısı sırasıyla 7,4 W/m²K, 9 W/m²K ve 10,5 W/m²K olarak hesaplanmıştır.
- Deneysel çalışmada kullanılmayan hava hızları ve çevre sıcaklıkları, YSA (Yapay Sinir Ağları) yöntemi ile tahmin edilebilir.
- Çalışmadaki deneysel verilerle; paneller üzerindeki voltaj düşümü ve ısı transfer katsayıları çevre sıcaklığına, hava hızına ve panel arkası sıcaklığına dayanılarak herhangi bir alan üzerinde bulunabilir. Böylece, panelleri yerleştirmek için en uygun alan belirlenebilir.
- Hava hızı ve çevre sıcaklığı gibi değişkenlere ilave olarak, çevre havasının bağlı neminin etkisi takip eden bir çalışmada incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Acaroğlu, M., “Alternatif Enerji Kaynakları 2. bas.”, **Nobel**, Ankara, (2007).
2. Ceylan, İ. ve Gürel, A. E., “Güneş Enerjisi Sistemleri ve Tasarımı 2. bas.”, **Dora**, Bursa, (2018).
3. Halıcı, F. ve Gündüz, M., “Örneklerle Isı Geçişi, Isı Transferi 3. bas.”, **Birsan**, İstanbul, (2007).
4. İnternet: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator> (2020).
5. İnternet: <https://fatihyilmaz545.wixsite.com/solargunes/gunesenerjipotansi> yeli (2020).
6. İnternet: Meteoroloji Genel Müdürlüğü, <https://www.mgm.gov.tr/genel/meteorolojiyegir.aspx?s=7> (2020).
7. İnternet: Testone Teknoloji Çözümleri San. ve Tic. A.Ş., <https://www.testone.com.tr/urunler/04-gunes-olcumu-test-cihazlari/piranometreler/eko-ms802-secondary-class-piranometre/> (2020).
8. İnternet: https://ca.wikipedia.org/wiki/Pirheli%C3%B2metre#/media/Fitxer:DR01_pyrheliompyrh_1.jpg (2020).
9. İnternet: <https://yandex.com.tr/video/preview/?filmId=3019398086325507665&text=G%C3%BCne%C5%9F%20Enerji%20%C3%B6l%C3%A7%C3%BCm%20aletleri&path=> (2020).
10. İnternet: <https://www.ramolcu.com/SL-200-Solarimetre,PR-65.html> (2020).
11. Duffie, J.A. and Beckman, W.A., “Solar Engineering of Thermal Processes 4th ed.”, **Wiley**, New Jersey, (2013).
12. İnternet: <https://docplayer.biz.tr/317268-Gunes-enerjisi-ii-bolum.html> (2020).

13. Yücel, M., Kılıçarslan, Y. ve Yıldırım, M., “Güneş Takip Sistemiyle Çalışan Güneş Panellerinin Sulama Uygulamasında Verimlilik Düzeyleri”, **ÇOMÜ Ziraat Fakültesi**, 6: 123-130 (2018).
14. Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M. and Donner, K. J., “Fundamental Astronomy 5th ed.”, **Springer**, New York, (2007).
15. Soulayman, S., “Comments on solar azimuth angle”, **Renewable Energy**, 123: 294-300 (2018).
16. İnternet: <https://www.enerjievi.com/tommatech-320-watt-monokristal-solar-gunes-paneli/> (2020).
17. İnternet: <https://www.enerjiportali.com/polikristal-gunes-paneli-nedir/> (2020).
18. İnternet: <https://turkish.alibaba.com/product-detail/a-grade-amorphous-silicon-thin-film-flexible-solar-panel-100w-manufacturer-china-60607762687.html> (2020).
19. İnternet: <https://tr.dhgate.com/product/hot-2w-9v-solar-cell-epoxy-polycrystalline/389288696.html> (2020).
20. İnternet: Elektronik Mühendisleri Odası, “Güneş Enerjisinden Fotovoltaik Yöntemle Elektrik Üretiminde Güç Dönüşüm Verimi ve Etkili Etmenler”, http://www.emo.org.tr/ekler/3a921ffad054cb0_ek.pdf (2020).
21. Tiwari, G.N. and Dubey, S., “Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications 2nd ed.”, **RSC**, New Delhi, (2010).
22. Sakellariou, E. and Axaopoulos, P., “An experimentally validated, transient model for sheet and tube PVT collector”, **Solar Energy**, 174: 709-718 (2018).
23. Fayaz, H., Rahim, N.A., Hasanuzzaman, M., Nasrin, R. and Rivai, A., “Numerical and experimental investigation of the effect of operating conditions on performance of PVT and PVT-PCM”, **Renewable Energy**, 143: 827-841 (2019).
24. Al-Waeli, A.H.A., Chaichan, M.T., Sopian, K., Kazem, H.A., Mahood, H.B. and Khadom, A.A., “Modeling and experimental validation of a PVT system using nanofluid coolant and nano-PCM”, **Solar Energy**, 177: 178-191 (2019).
25. Tiwari, S., Agrawal, S. and Tiwari, G.N., “PVT air collector integrated greenhouse dryers”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 90: 142-159 (2018).
26. Guarracino, I., Freeman, J., Ramos, A., Kalogirou, S.A., Ekins-Daukes, N.J. and Markides, C.N., “Systematic testing of hybrid PV-thermal (PVT) solar

- collectors in steady-state and dynamic outdoor conditions”, *Applied Energy*, 240: 1014-1030 (2019).
27. Zhou, C., Liang, R., Zhang, J. and Riaz, A., “Experimental study on the cogeneration performance of roll-bond PVT heat pump system with single stage compression during summer”, *Applied Thermal Engineering*, 149: 249-261 (2019).
 28. Aste, N., Pero, C.D. and Leonforte, F., “Water PVT collectors performance comparison”, *Energy Procedia*, 105: 961-966 (2017).
 29. Pang, W., Cui, Y., Zhang, Q., Yu, H., Zhang, X., Zhang, Y. and Yan, H., “Comparative investigation of performances for HIT-PV and PVT systems”, *Solar Energy*, 179: 37- 47 (2019).
 30. Al-Waeli, A.H.A., Kazem, H.A., Chaichan, M.T. and Sopian, K., “Experimental investigation of using nano-PCM/nanofluid on a photovoltaic thermal system (PVT): Technical and economic study”, *Thermal Science and Engineering Progress*, 11: 213-230 (2019).
 31. Singh, H.P., Jain, A., Singh, A. and Arora, S., “Influence of absorber plate shape factor and mass flow rate on the performance of the PVT system”, *Applied Thermal Engineering*, 156: 692-701 (2019).
 32. Tamar, V., Norton, B. and Tiwari, G.N., “A novel approach towards investigating the performance of different PVT configurations integrated on test cells: An experimental study”, *Renewable Energy*, 137: 93-108 (2019).
 33. Herrando, M., Ramos, A., Zabalza, I. and Markides, C.N., “A comprehensive assessment of alternative absorber-exchanger designs for hybrid PVT-water collectors”, *Applied Energy*, 235: 1583-1602 (2019).
 34. Kazemian, A., Hosseinzadeh, M., Sardarabadi, M. and Passandideh-Fard, M., “Effect of glass cover and working fluid on the performance of photovoltaic thermal (PVT) system: An experimental study”, *Solar Energy*, 173: 1002-1010 (2018).
 35. Tiwari, G.N., Meraj, M. and Khan, M.E., “Exergy analysis of N-photovoltaic thermal compound parabolic concentrator (N-PVT-CPC) collector for constant collection temperature for vapor absorption refrigeration (VAR) system”, *Solar Energy*, 173: 1032-1042 (2018).
 36. Nasrin, R., Rahim, N.A., Fayaz, H. and Hasanuzzaman, M., “Water/MWCNT nanofluid based cooling system of PVT: Experimental and numerical research”, *Renewable Energy*, 121: 286-300 (2018).
 37. Gupta, V.S., Singh, D.B., Mishra, R.K., Sharma, S.K. and Tiwari, G.N., “Development of characteristic equations for PVT-CPC active solar distillation system”, *Desalination*, 445: 266-279 (2018).

38. Yandri, E., “The effect of Joule heating to thermal performance of hybrid PVT collector during electricity generation”, ***Renewable Energy***, 111: 344-352 (2017).
39. Fayaz, H., Nasrin, R., Rahim, N.A. and Hasanuzzaman, M., “Energy and exergy analysis of the PVT system: Effect of nanofluid flow rate”, ***Solar Energy***, 169: 217-230 (2018).
40. Fayaz, H., Rahim, N.A., Hasanuzzaman, M., Rivai, A. and Nasrin, R., “Numerical and outdoor real time experimental investigation of performance of PCM based PVT system”, ***Solar Energy***, 179: 135-150 (2019).
41. Nazri, N.S., Fudholi, A., Mustafa, W., Yen, C.H., Mohammed, M., Ruslan, M.H. and Sopian, K., “Exergy and improvement potential of hybrid photovoltaic thermal/thermoelectric (PVT/TE) air collector”, ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 111: 132-144 (2019).
42. Boutina, L., Khelifa, A., Touafek, K., Lebbi, M. and Baissi, M.T., “Improvement of PVT air-cooling by the integration of a chimney tower (CT/PVT)”, ***Applied Thermal Engineering***, 129: 1181-1188 (2018).
43. Sahota, L. and Tiwari, G.N., “Review on series connected photovoltaic thermal (PVT) systems: Analytical and experimental studies”, ***Solar Energy***, 150: 96-127 (2017).
44. Nasrin, R., Rahim, N.A., Fayaz, H. and Hasanuzzaman, M., “Water/MWCNT nanofluid based cooling system of PVT: Experimental and numerical research”, ***Renewable Energy***, 121: 286-300 (2018).
45. Dimri, N., Tiwari, A. and Tiwari, G.N., “Comparative study of photovoltaic thermal (PVT) integrated thermoelectric cooler (TEC) fluid collectors”, ***Renewable Energy***, 134: 343-356 (2019).
46. Özakin, A.N. and Kaya, F., “Effect on the exergy of the PVT system of fins added to an air-cooled channel: A study on temperature and air velocity with ANSYS Fluent”, 184: 561-569 (2019).
47. Nazri, N.S., Fudholi, A., Bakhtyar, B., Yen, C.H., Ibrahim, A., Ruslan, M.H., Mat, S. and Sopian, K., “Energy economic analysis of photovoltaic-thermal-thermoelectric (PVT-TE) air collectors”, ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, 92: 187-197 (2018).
48. Tiwari, G.N., Meraj, M., Khan, M.E., Mishra, R.K. and Garg, V., “Improved Hottel-Whillier-Bliss equation for N-photovoltaic thermal-compound parabolic concentrator (N-PVT-CPC) collector”, ***Solar Energy***, 166: 203-212 (2018).
49. Fudholi, A., Zohri, M., Rukman, N.S.B., Nazri, N.S., Mustapha, M., Yen, C.H., Mohammed, M. and Sopian, K., “Exergy and sustainability index of

- photovoltaic thermal (PVT) air collector: A theoretical and experimental study”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 100: 44-51 (2019).
50. Zuhur, S., Ceylan, İ. and Ergün, A., “Energy, exergy and environmental impact analysis of concentrated PV/cooling system in Turkey”, *Solar Energy*, 180: 567-574 (2019).
 51. Ağbulut, Ü., Gürel, A.E., Ergün, A. and Ceylan, İ., “Performance assesment of a V-Trough photovoltaic system and prediction of power output with different machine learning algorithms”, *Journal of Cleaner Production*, (2020).
 52. Kaya, M., Gürel, A.E., Ağbulut, Ü., Ceylan, İ., Çelik, S., Ergün, A. and Acar, B., “Performance analysis of using CuO-Methanol nanofluid in a hybrid system with concentrated air collector and vacuum tube heat pipe”, *Energy Conversion and Management*, 199: (2019).
 53. Gürel, A.E., Ağbulut, Ü., Ergün, A. and Ceylan, İ., “Environmental and economic assessment of a low energy consumption household refrigerator”, *Engineering Science and Technology*, 23: 365-372 (2020).
 54. Ceylan, İ., Gürel, A.E., Demircan, H. and Aksu, B., “Cooling of a photovoltaic module with temperature controlled solar collector”, *Energy and Buildings*, 72: 96-101 (2014).
 55. Ceylan, İ., Gürel, A.E., Ergün, A. and Tabak, A., “Performance analysis of a concentrated photovoltaic and thermal system”, *Solar Energy*, 129: 217-223 (2016).
 56. Ağbulut, Ü., Ceylan, İ., Gürel, A.E. and Ergün, A., “The history of greenhouse gas emissions and relation with the nuclear energy policy for Turkey”, *International Journal of Ambient Energy*, (2019).
 57. Choi, H., Kim, Y., Son, C., Yoon, J. and Choi, K., “Experimental study on the performance of heat pump water heating system coupled with air type PV/T collector”, *Applied Thermal Engineering*, 178: (2020).
 58. Shao, N., Ma, L. and Zhang, J., “Experimental investigation on the performance of direct-expansion roof-PV/T heat pump system”, *Energy*, 195: (2020).
 59. Koşan, M., Demirtaş, M., Aktaş, M. and Dişli, E., “Performance analyses of sustainable PV/T assisted heat pump drying system”, *Solar Energy*, 199: 657-672 (2020).
 60. Yu, Q., Hu, M., Li, J., Wang, Y. and Pei, G., “Development of a 2D temperature-irradiance coupling model for performance characterizations of the flat-plate photovoltaic/thermal (PV/T) collector, *Renewable Energy*, 153: 404-419 (2020).

61. Li, Z., Ji, J., Yuan, W., Song, Z., Ren, X., Uddin, M.M., Luo, K. and Zhao, X., "Experimental and numerical investigations on the performance of a G-PV/T system comparing with A-PV/T system", *Energy*, 194: (2020).
62. Wang, D., Qi, T., Liu, Y., Wang, Y., Fan, J., Wang, Y. and Du, H., "A method for evaluating both shading and power generation effects of rooftop solar PV panels for different climate zones of China", *Solar Energy*, 205: 432-445 (2020).
63. Yu, B., Zhang, D., Liu, J. and Niu, X., "A novel solar PV/T driven air purification system based on heterogeneous photocatalytic reaction principles: A short review and preliminary investigation", *Energy Conversion and Management*, 210: (2020).
64. Song, Z., Ji, J., Cai, J., Li, Z. and Yu, B., "The performance comparison of the direct-expansion solar assisted heat pumps with three different PV evaporators", *Energy Conversion and Management*, 213: (2020).
65. Toledo, C., Vicente, R.L., Abad J. and Urbina, A., "Thermal performance of PV modules as building elements: Analysis under real operating conditions of different technologies", *Energy & Buildings*, 223: (2020).
66. Terashima, K., Sato, H. and Ikaga, T., "Development of an environmentally friendly PV/T solar panel", *Solar Energy*, 199: 510-520 (2020).
67. Abdelrazik, A.S., Al-Sulaiman, F.A. and Saidur, R., "Numerical investigation of the effects of the nano-enhanced phase change materials on the thermal and electrical performance of hybrid PV/thermal systems", *Energy Conversion and Management*, 205: (2020).
68. Shao, N., Ma, L. and Zhang, J., "Experimental study on electrical and thermal performance and heat transfer characteristic of PV/T roof in summer", 162: (2019).
69. Wang, G., Yao, Y., Wang, B. and Hu, P., "Design and thermodynamic analysis of an innovative hybrid solar PV-CT system with multi-segment PV panels", 37: (2020).
70. Yao, J., Xu, H., Dai, Y. and Huang, M., "Performance analysis of solar assisted heat pump coupled with build-in PCM heat storage based on PV/T panel", *Solar Energy*, 197: 279-291 (2020).
71. Ceylan, İ., Yılmaz, S., İnanç, Ö., Ergün, A., Gürel, A. E., Acar, B. and Aksu, A. İ., "Determination of the heat transfer coefficient of PV panels", *Energy*, 175: 978-985 (2019).
72. Kılıç, M. ve Yiğit, A., "Isı Transferi 3. bas.", *Alfa Aktüel*, Bursa, (2008).

73. Çengel, Y.A. ve Cimbala, J.M., “Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları 3. bas.”, **Palme**, Ankara, (2015).



ÖZGEÇMİŞ

Özgür İNANÇ 1989 yılında Elazığ'da doğdu. İlkokulu Bursa Cavit Çağlar İlköğretim Okulu'nda, ortaokulu Bursa Özel Emine Örnek İlköğretim Okulu'nda, liseyi Bursa Şükrü Şankaya Anadolu Lisesi'nde okudu. 2007 yılında Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2011 yılında aynı üniversitenin aynı bölümünde yüksek lisansına başladı ve 2012 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2013 yılı Eylül ayından beri Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Üniversite Mah. Ali İrfan Büyükbaş Cad.,
Çebioğlu Gold Residence C-123/Merkez/KARABÜK

Tel : (538) 488 7634

E-posta : ozgurinanc@karabuk.edu.tr