



**FOTOVOLTAİK/TERMAL (PV-T) GÜNEŞ KOLEKTÖRDE
ELEKTRİKSEL VE TERMAL VERİMİN DENEYSEL ANALİZİ**

Bedirhan Çağrı GÖKSEL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Bedirhan Çağrı GÖKSEL

22/10/2021

FOTOVOLTAİK/TERMAL (PV-T) GÜNEŞ KOLEKTÖRDE ELEKTRİKSEL VE TERMAL VERİMİN DENEYSSEL ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Bedirhan Çağrı GÖKSEL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2021

ÖZET

PV (fotovoltaik) panellerin hücre yüzeylerinde güneş ışınlamalarının tutulması sonucu hücrelerin ısınmasıyla sistemin elektrik enerjisi üretimindeki verimliliğin düşüşü gözlemlenmektedir. Bu temel sorunun çözüme kavuşturulması, PV panellerdeki oluşan verimlilik düşüşünü engelleyebilir. Bu çalışmada PV panelde oluşan fazla ısının soğutucu serpantin ile PV panel arka yüzeyinden ısının çekilmesi yöntemiyle verimlilik artışı elde edilmeye çalışılmıştır. Aynı özellikteki iki fotovoltaik panelin karşılaştırılmasıyla, aynı ortam ve aynı çevre şartları altında deneysel incelemesi yapılmıştır. Soğutucu akışkan olarak su kullanılmıştır. Soğutma işleminin yapıldığı modül için, soğutucu akışkan, sisteme debimetre ile 15 dakikada bir hız ayarı yapılarak verilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, soğutma işlemi yapılmayan PV panel genel verimi maksimum %16,12 olarak gerçekleşmiştir. Soğutma işleminin yapıldığı PV/T modülün toplam verimi (elektrik + termal verim) maksimum %69,38 olarak gerçekleşmiştir. Soğutulan PV panelin elektrik verimi ise maksimum %17,57 olarak gerçekleşmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, bu tip bir PV/T modül ile konutlar, oteller ve yurtlar için hem elektrik enerjisi hem de termal enerji ihtiyacını bütünlük bir yapı halinde sağlayabilir.

Bilim Kodu : 92802
Anahtar Kelimeler : PV, PV/T, Güneş Enerjisi, Deneysel
Sayfa Adedi : 53
Danışman : Doç. Dr. Halil İbrahim VARIYENLİ

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF ELECTRICAL AND THERMAL EFFICIENCY IN
PHOTOVOLTAIC/THERMAL (PV-T) SOLAR COLLECTOR

(M. Sc. Thesis)

Bedirhan Çağrı GÖKSEL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2021

ABSTRACT

In this study, it has been tried to increase efficiency by removing the excess heat generated in the PV panel from the cooling coil and the back surface of the PV panel. By comparing two photovoltaic panels with the same characteristics, an experimental investigation was carried out under the same environment and environmental conditions. Water was used as the refrigerant. For the module where the cooling process is carried out, the refrigerant was supplied to the system by adjusting the speed with a flow meter every 15 minutes. According to the results of the study, the overall efficiency of the PV panel without cooling was realized as maximum 16,12%. The total efficiency (electrical + thermal efficiency) of the PV/T module, in which the cooling process is performed, was realized as a maximum of 69,38%. The electrical efficiency of the cooled PV panel was maximum 17,56%. According to the results of the study, this type of PV/T module can provide both electrical and thermal energy needs for residences, hotels and dormitories as an integrated structure.

Science Code : 92802

Key Words : PV, PV/T, Solar Energy, Experimental

Page Number : 53

Supervisor : Assoc. Prof. Halil İbrahim VARİYENLİ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince ve tez çalışmam esnasında gerek teorik gerekse pratik bilgi ve tecrübeleri ile benden yardımlarını esirgemeyen, deney seti tasarımının her noktasında alın teri bulunan danışmanım Saygı Değer Doç. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ hocama sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Tez çalışmamız için temel materyalimiz olan fotovoltaiik panelleri bizlere hibe eden ELİN ENERJİ A.Ş'ye eğitim ve öğretim destekleri için çok teşekkür ediyorum. Yüksek lisans eğitimim boyunca maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen, her zaman yanımda olan ve beni destekleyen canım aileme, başta dedem ve anneanneme sonsuz şükranlarımı iletiyorum. Beni, hayallerimi ve fikirlerimi destekleyen, bu yolda ufuk çizgimi sevgisiyle genişleten, karamsarlığa düştüğümde beni tekrar ayağa kaldıran canım sevgilime sonsuz sevgimi ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
3. FOTOVOLTAİK/ TERMAL (PV/T) SİSTEMLER.....	11
3.1. PV/T Sistemlerin Sınıflandırılması	13
3.1.1. Düz levha PV/T sistemler	14
3.1.2. Yoğunlaştırıcı tip PV/T sistemler	20
4. MATERYAL VE YÖNTEM	25
4.1. Deney Seti Ana Parçaları, Özellikleri ve Montaj	25
4.1.1. PV panel	27
4.1.2. Gelişmiş tarayıcı cihaz (Termokupl Data Logger).....	27
4.1.3. Soğutucu serpantin	28
4.1.4 Direnç	30
4.2. Modül 1 Deney Tesisatının Tasarımı	31
4.2.1. Modül 1 PV panel ve serpantin 3D tasarımının oluşturulması	31
4.3. Deney Çalışması ve Deney Verileri	32
4.4. Matematiksel Modelleme	38

Sayfa

4.4.1. Modül 1'e ait termal hesaplamalar.....	38
4.4.2. Elektriksel, termal ve toplam güçlerin ve verimin incelenmesi.....	39
4.5. Deney Verileri ile Örnek Çalışma.....	41
4.5.1. Karbon ayak izi hesaplaması.....	43
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	45
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ.....	53

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Farklı sıvı tipli PV/T sistemlerinin karşılaştırılması.....	17
Çizelge 3.2. Farklı düz levha PV/T sistemlerin karşılaştırılması.....	20
Çizelge 4.1. Deney setine ait parça ve özellikleri.....	25



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Düz Tip PV/T Kolektör Sınıflandırması.....	4
Şekil 2.2. Saygin ve arkadaşları tarafından incelenen deney düzeneği.	5
Şekil 2.3. Dubey ve Tiwari tarafından incelenen deney düzeneği.....	7
Şekil 2.4. Othman ve arkadaşları tarafından incelenen PV/T kolektörün şeması.....	7
Şekil 2.5. Wu ve arkadaşları tarafından incelenen IB-PV/T sistemin şeması.	8
Şekil 2.6. Huo ve arkadaşları tarafından incelenen PV/T kolektörün şematik.	9
Şekil 3.1. PV/T çalışma konsepti.....	11
Şekil 3.2. PV/T sistemlerin temel mantık şeması	13
Şekil 3.3. PV/T sistemler sınıflandırılması	13
Şekil 3.4. Sulu tip PV/T tasarımı	15
Şekil 3.5. Sulu ve havalı tip (hibrit) PV/T şeması	15
Şekil 3.6. Havalı tip PV/T kolektör şeması.....	18
Şekil 3.7. Yoğunlaştırıcı tip PV/T.....	21
Şekil 3.8. Yoğunlaştırılmış tip PV/T paket model	23
Şekil 4.1. Deney seti şeması ön yüz görünümü	26
Şekil 4.2. Deney seti şeması arka yüz görünümü	26
Şekil 4.3. Deney çalışmasında kullanılan PV panel	27
Şekil 4.4. Deneysel çalışma sırasında verilerin alınması için kullanılan data logger	28
Şekil 4.5. Soğutucu serpantin bakır boruları tasarımı.....	28
Şekil 4.6. Direnç devre tasarımı.....	31
Şekil 4.7. PV Panel ve soğutucu serpantin teknik çizim.....	32
Şekil 4.8. PV panel ve serpantin birleştirilmiş hali /Ön ve arka yüzey 2D görüntüsü	32

Şekil	Sayfa
Şekil 4.9. 3 günlük yüzey sıcaklığı karşılaştırma grafiği.....	33
Şekil 4.10. 3 günlük şebeke suyu giriş-çıkış sıcaklık grafiği.....	34
Şekil 4.11. 3 günlük ortalama radyasyon ve çevre sıcaklığı grafiği	35
Şekil 4.12. 9 Temmuz 2021 gerilim ve akım grafiği	35
Şekil 4.13. 10 Temmuz 2021 gerilim ve akım grafiği	36
Şekil 4.14. 11 Temmuz 2021 gerilim ve akım grafiği	37
Şekil 4.15. Modül 1 ısı kayıp şeması	38
Şekil 4.16. 9 Temmuz 2021 verimlilik grafiği.....	40
Şekil 4.17. 10 Temmuz 2021 verimlilik grafiği.....	40
Şekil 4.18. 11 Temmuz 2021 verimlilik grafiği.....	41

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Kim ve arkadaşları tarafından incelenen deney düzeneği.	5
Resim 4.1. Soğutucu serpantin borularının kaynak ile bağlantı süreci.....	29
Resim 4.2. Soğutucu serpantin sızdırmazlık test süreci.....	29
Resim 4.3. Soğutucu serpantin ve PV panel montaj süreci	30
Resim 4.4. Deney seti ön yüz görünümü	33



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

m²	Metre Kare
db	Desibel
mm	Milimetre
kg	Kilogram
L	Litre
Dk	Dakika
A	Amper
V	Voltaj
W	Watt
Wp	Watt peak
kW	Kilovat
Ω	Ohm

Kısaltmalar

Açıklamalar

BİPV/T	Bina Entegre Fotovoltaik/Termal
CO₂	Karbon Dioksit
CPC	Bileşik parabolik toplayıcı
EVA	Etilen-Vinil Asetot
IB-PV/T	Isı Borulu Fotovoltaik/Termal
IPCC	Internation Panel on Climate Change (Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli)
PV	Fotovoltaik
PV/T	Fotovoltaik/Termal

1. GİRİŞ

Dünya nüfusundaki artış ve sanayileşmenin bir sonucu olarak dünyanın enerji talebi hızla artmaktadır. Günümüzde fosil kaynaklı yakıtlar, enerji talebini karşılamak için büyük miktarda yakılıyor ve ekosisteme ciddi şekilde zarar veren kirletici gaz emisyonuna neden oluyor [1]. Küresel ısınma, insan ve diğer türlerin hayatta kalmasını tehdit eden ciddi bir sorundur. Enerji krizi birçok ülkede ekonomik büyümenin önüne bir engeldir. Bu sorunları çözenin en etkili yollarından birisi fosil yakıt yerine daha fazla yenilenebilir enerji kullanmaktır [2]. Mevcut enerji yapısında değişikliklere acil ihtiyaç vardır. Çevre dostu enerji kaynaklarını keşfetmek gelecek yıllarımız için çok önemlidir [3].

Yenilenebilir enerji kaynakları çevre dostu oldukları için hayati öneme sahiptirler. Bu kaynaklara; hidroelektrik enerji, jeotermal enerji, rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi ve biyoenerji gibi kaynaklar örnek verilebilir [4]. Güneş enerjisinin uygulanması ve geliştirilmesi en umut verici seçimdir ve nedenleri şu şekilde sıralanabilir [4];

- Güneş enerjisi en zengin yenilenebilir enerji kaynağıdır, yaklaşık $1,8 \times 10^{14}$ kW dünya tarafından ısı ve ışık gibi şekillerde masrafsız olarak emilir. Bol ve tükenmezdir.
- Güneş enerjisinin kullanımı çevreye daha az zarar verir, ucuz ve çevre dostudur.
- Kırsal kesimlerde, endüstriyel işletmeler ve evlerin güneş enerjisi sistemlerini kullanması kolay ve ekonomik olduğu için uygun ve etkilidir.

Güneş enerjisi, termal güneş kolektörleri aracılığıyla termal enerji üretmek ve fotovoltaik kolektörler (PV) aracılığıyla elektrik enerjisi üretmek için uygulanabilir. Şu anda bunları iki ayrı güneş kolektörüne yerleştirmek yaygın bir uygulamadır, yani biri güneş termal kolektörleri için ve diğeri fotovoltaik modüller için [4]. Bununla birlikte, hem termal hem de elektrik enerjisi talebini karşılamak için gereken toplam alan çok büyüktür. Bu nedenle güneş enerjisini hem elektrik hem de ısıtma uygulamaları için aynı anda kullanmak iyi bir fikirdir. Güneş termal kolektörleri ve fotovoltaik kolektörler bir araya getirildiğinde, kombine güneş kolektörleri için toplam enerji kullanım verimliliği artırılır [5].

Fotovoltaik Termal (PV/T) sistemleri, güneş radyasyonunu termal ve elektrik enerjisine dönüştürür. Bu sistemler, elektromanyetik radyasyonu (fotonları) elektriğe dönüştüren bir fotovoltaik hücre ile kalan enerjiyi yakalayan ve PV modülünden atık ısıyı ortadan kaldıran bir güneş termal toplayıcıyı birleştirir. Fotovoltaik hücreler, artan direnç nedeniyle sıcaklıktaki artışla verimlilikte bir düşüş yaşarlar. PV/T sistemler ısıyı PV hücrelerinden uzaklaştıracak ve böylece hücreleri soğutacak ve direnci düşürerek verimliliklerini artıracak şekilde tasarlanabilir. Sonuç, daha yüksek verimlilik ve daha uzun ömürlü soğuk çalışan bir PV panel ve konut, ticari veya endüstriyel uygulamalar için kullanılabilecek sıcak akışkan üretimidir. Monokristalin (c-Si) ve polikristalin (pc-Si) silikon güneş pilleri için verimlilik, sıcaklıktaki her derece artış için yaklaşık %0.45 oranında azalır. Amorf-silikon (a-Si) hücreler için, modül tasarımına bağlı olarak sıcaklıkta yaklaşık %0.25'lik bir artışla, etki daha azdır. Bu istenmeyen etki, sıvı sirkülasyonu ile uygun bir ısı ekstraksiyonu ile kısmen önlenabilir [6].

Güneş enerjisine dayalı sistemlerin endüstriyel olarak birçok örneği bulunmaktadır. Fakat elektriksel-termal hibrit sistemlerinin kullanımı ve üretimi sınırlı olduğu görülmektedir. PV/T modüllerin kullanılması, standart PV panellerin yerine elektriksel verim ve toplam verim (elektrik + termal verim) açısından daha avantajlıdır.

Bu çalışmadaki temel amaç olarak, PV modülün elektriksel verimliliğinin incelenmesiyle ve PV/T modülünün hem elektriksel hem de termal verimliliğinin değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

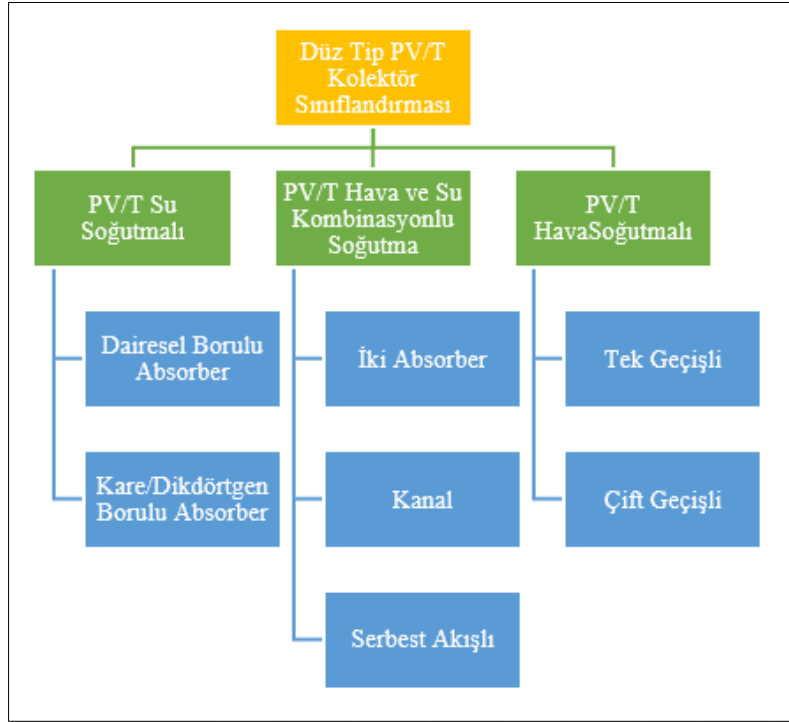
2. LİTERATÜR TARAMASI

Güneş pilleri yüzeyine gelen güneş ışınımının çoğunu verimli enerjiye dönüştüremez ve hücrelerdeki sıcaklık artarak elektriksel verimde düşüş gözlemlenir. Bu nedenle, PV hücre sıcaklığı doğal yolla ya da zorlanmış soğutucu akışkan aracılığıyla soğutma işlemi yapılarak düşürülebilir.

Fotovoltaik panellerin termal sistemlerle birlikte kullanılarak, hibrit bir sistem oluşturulması, verim artırılmasına yönelik bir çözüm olmaktadır. Ayrıca iyi bilinmektedir ki hibrit bir sistem kullanılması, harici elektrik enerjisi kaynağı kullanılması ihtiyacını azaltmaktadır.

Yapılan literatür taraması sonucu birçok çalışma, gaz ve sıvı akışkan kullanılarak sistemde oluşan fazla ısının çekilmesi amacıyla yapılmıştır. Literatürdeki deneysel çalışmalar incelendiğinde, soğutucu akışkan olarak su kullanılan birçok çalışma diğer çalışmalara göre daha fazla verim elde etmektedir. Hava soğutmalı PV-T panellerin uygulanması daha kolaydır, onlar sıvı soğutma devresine ihtiyaç duymazlar. Hava uygun fiyatlıdır, temizdir ve hemen hemen Dünya'daki bütün uygulamalar için kullanılabilir. Ancak verimlilik noktasında sulu tip soğutma sistemlerine göre daha verimsizdirler. Deneysel çalışmamızda sulu soğutma yapılmasının temel sebebi daha fazla verim elde edilebilmesindendir.

Günümüzde, konuya ilişkin birçok araştırma, deneysel ve nümerik çalışma yapılmıştır ve hala yapılmaktadır. İbrahim ve arkadaşları, araştırmalarında PV/T sistemlerin bir sınıflandırmasına yer vermişlerdir. Düz Tip PV/T kolektörlerin sınıflandırmasını aşağıdaki şekilde yapmışlardır [7].



Şekil 2.1. Düz Tip PV/T Kolektör Sınıflandırması [7].

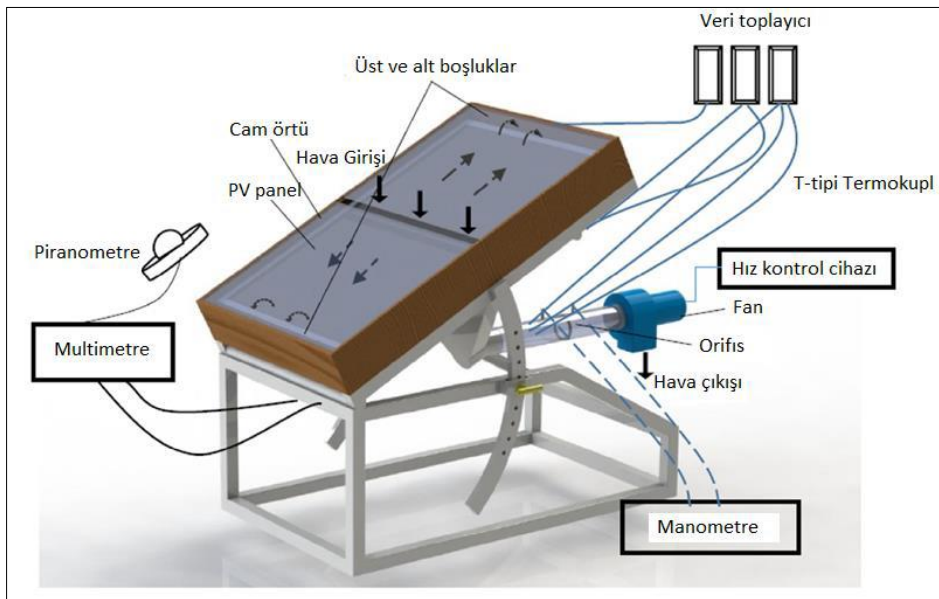
Serhaddi F. ve arkadaşlarının [8] yaptıkları çalışmada, bir PV/T air (hava akışkanlı) kolektöre ait, elektriksel ve termal parametrelerin, ekserji bileşenlerinin ve ekserji veriminin hesaplanması ayrıntılı bir şekilde enerji ve ekserji analizi olarak yapılmıştır. Çalışmada, PV/T kolektörün ısı ve elektriksel parametrelerini hesaplamak için, bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. PV/T kolektörün belirli iklimsel, işletme ve tasarım parametreleri için elektriksel verimi, ısı verimi, toplam verimi ve ekserji verimi sırası ile 10,01%- 17,18%-45%, 10,75% olarak bulunmuştur [8].

Kim ve arkadaşları [9] Şekil 2.2’de görülen, PV paneli monokristal malzemeden olan PV/T kolektörün deneye dayalı incelemesini gerçekleştirmişlerdir. PV/T kolektörde ısı enerji üretmek için kullanılan akışkan havadır. Yapılan analizler sonucunda PV/T kolektörün ısı veriminin %22 ve elektriksel veriminin ise %15 olduğu tespit edilmiştir [9].



Resim 2.1. Kim ve arkadaşları tarafından incelenen deney düzeneği [9].

Saygin ve arkadaşları [10], yapmış oldukları çalışmalarında içerisinden akışkan olarak hava geçirilen ve değiştirilmiş olan PV/T kolektörü deneysel olarak incelemişlerdir. Kolektörün orta noktasında bulunan bir boşluktan alınan çevre hava PV panelin üst ve alt kısmından geçirilip, PV paneldeki ısıl enerji alındıktan sonra bir kanal vasıtası ile dışarı atılmaktadır. Yapılan analizler sonucunda akışkanın kütle debisinin $0,037 \text{ kg/s}$ ve PV panel ile koruyucu cam tabaka arasındaki mesafenin 3 cm olduğu durumda, %48 civarında olan en yüksek ısı verim elde edilmiştir [10].



Şekil 2.2. Saygin ve arkadaşları tarafından incelenen deney düzeneği [10].

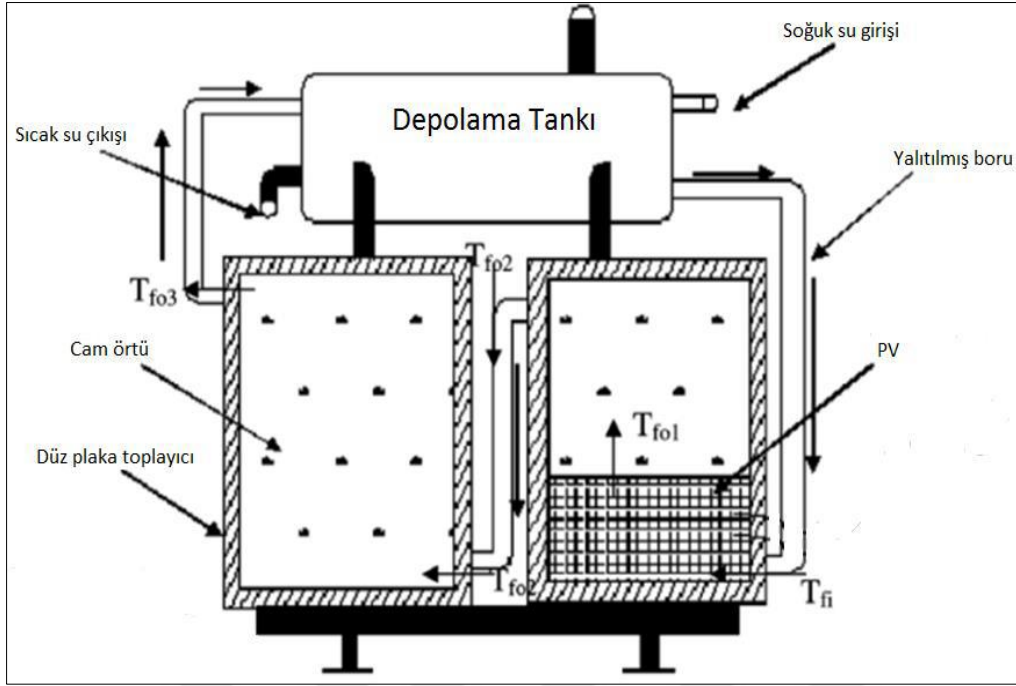
Ahn ve arkadaşlarının [11], PV/T performansını incelemek için yaptıkları deneysel bir çalışmada, sistemden çıkan akışkan (hava), dış hava girişindeki taze havanın ön ısıtılması için ısı geri kazanım bölümüne monte edilmiştir. Çalışma sonucu termal verim %23, elektriksel verim %15 ölçümlenmişti [11].

Kabul ve Duran [12] yaptıkları çalışmada PV hücrelerinin sıcaklığının artmasıyla düşen verimi, sistemi su yardımıyla soğutarak verimi artırmayı, bunun içinde PV panelin arka (sırt) yüzeyine yerleştirilen soğutucu borular içerisinden geçirilen akışkanla (su) panelin soğutulması amaçlanmıştır. Panel yüzeyinden çekilen ısı ile sıcaklığı artan su, bir haznesi içerisinde dolaştırılarak ısınıp depodaki akışkana aktarmaktadır. Bu sayede hücrelerin soğumasıyla hem PV sistemin toplam verimi (elektrik + termal) artırılmış hem de sıcak su ihtiyacı karşılanacaktır. Deney sonuçları, soğutulan ve soğutulmayan paneller kıyaslandığında; elektrik üretiminde yaklaşık % 35 güç artışı ve % 7 bir verim artışı elde etmişlerdir [12].

Alzaabi ve arkadaşları [13] tarafından panel verimliliğini arttırmak amacıyla yapılan çalışmada suyla soğutulan bir tasarım gerçekleştirmişlerdir. Tasarım sonucu elektriksel verim %15'ten %20 seviyelerine getirilmiştir. Termal verim ise %60 ile %70 arasında elde edilmiştir [13].

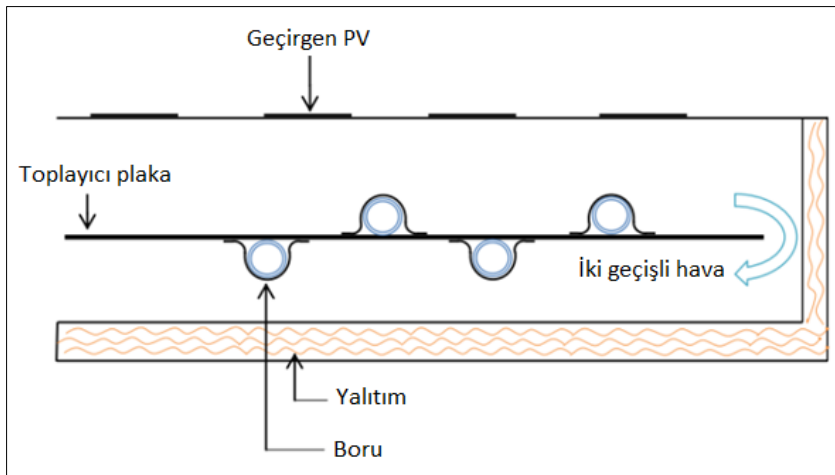
Mojumder ve arkadaşlarının [14] çalışmasında, PV panele monte edilmiş 4 farklı yapıya sahip metalik katmanın bir PV/T sisteminin verimliliği için etkisi araştırılmıştır. Sistem verimi en düşük olan 'yassı metalik katman', en yüksek verim ise 'ileri ve geriye dönük testere dişli katmanlardan' elde edilmiştir. Termal verim %30 elektriksel verim %9,25 olarak sonuca varılmıştır [14].

Dubey ve Tiwari [15], içerisinden akışkan olarak su geçirilen PV/T kolektörü deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Yapılan analizlerde yutucu yüzeyin %30,56'sının, %50'sinin ve tamamının PV panel ile kaplandığı durum teorik olarak incelenmiştir.



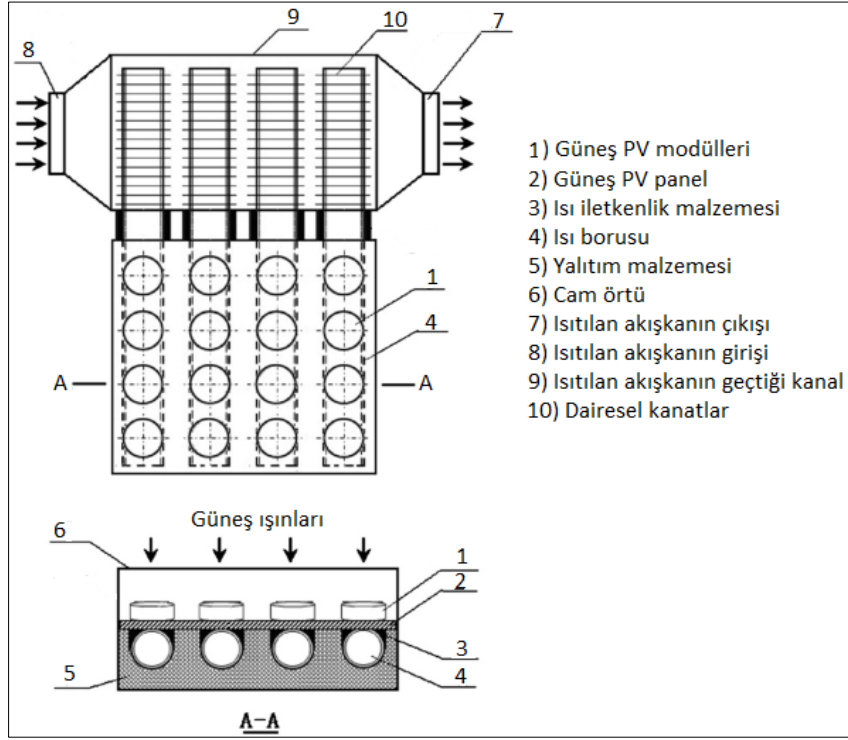
Şekil 2.3. Dubey ve Tiwari tarafından incelenen deney düzeneği [15].

Othman ve arkadaşları [16], içerisinde hem hava hem de su geçirilerek ısı enerjisi elde edilen PV/T kolektörü deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel olarak incelenen PV/T kolektörün şematik resmi Şekil 2,4'te görülmektedir. PV/T kolektöre ait deneyler laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş, güneş ışığının elde edilmesinde ise güneş simülatörü kullanılmıştır. Yapılan çalışma ve analizler sonucunda en yüksek ısı verim ve elektriksel verimin sırasıyla %76 ve %17 olduğu görülmüştür [16].



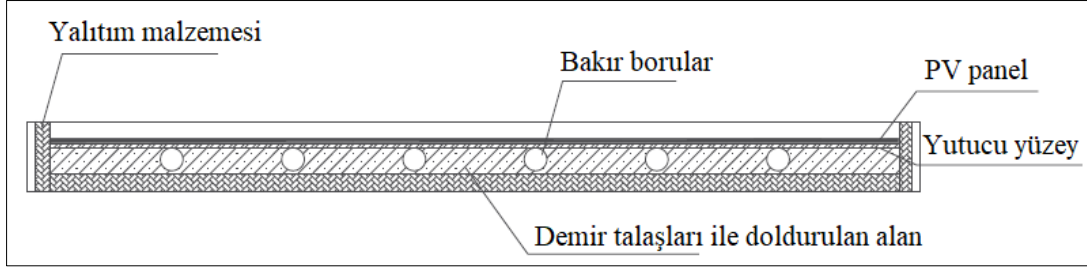
Şekil 2.4. Othman ve arkadaşları tarafından incelenen PV/T kolektörün şeması [16].

Wu ve arkadaşları [17] yaptıkları çalışmada Şekil 2,8’de görülen IB-PV/T (ısı borulu-fotovoltaik / termal) sistemi teorik olarak incelemiştir. Yapılan teorik çalışmanın doğruluğu literatürde yapılmış deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslanarak belirlenmiştir. Yapılan teorik incelemeler sonucunda IB-PV/T sistemin ısı veriminin %63,65, elektriksel veriminin %8,45 ve ekserji veriminin %10,26 olduğu belirlenmiştir [17].



Şekil 2.5. Wu ve arkadaşları tarafından incelenen IB-PV/T sistemin şeması [17].

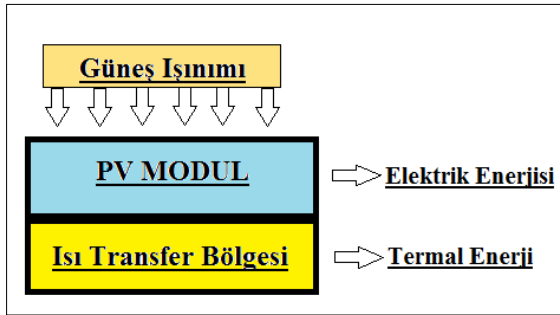
Huo ve arkadaşları [18] yaptıkları bu çalışmada içerisinde akışkan olarak su geçirilen, yutucu yüzeye yapıştırılmış borulara sahip klasik PV/T kolektörlerden farklı olarak, Şekil 2,6’da görüldüğü üzere yutucu yüzeyin arka kısmına yapışık halde olan boruların arası demir talaşı ile dolu olan yeni bir PV/T kolektör tasarlamışlardır. Tasarlanan bu yeni kolektörün deneysel analizleri laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Güneş simülatörü kullanılarak elde edilen güneş ışınlamı değeri 400 W/m² ila 800 W/m² arasında değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda demir talaşı ile doldurulmuş olan PV/T kolektörün kullanılması ile elektriksel verim değeri %19,8’e kadar arttırılabilmektedir. Demir talaşı doldurulmamış olan klasik PV/T kolektöre nazaran bu yeni tip PV/T kolektörün kullanılması ile kolektörün elektriksel veriminde %25,3’e, ısı veriminde %10,7’ye ve toplam veriminde ise % 12,7’ye varan artış sağlanmıştır [18].



Şekil 2.6. Huo ve arkadaşları tarafından incelenen PV/T kolektörün şematik [18].

3. FOTOVOLTAİK/ TERMAL (PV/T) SİSTEMLER

Bir fotovoltaik/termal (PV/T) sistemi, fotovoltaik ve güneş termal bileşenlerinin bir entegrasyonudur. Kombine bir sistemden elektrik ve ısı üretilir [19]. PV tabakası ile kaplanmış bir soğurucuya sahip geleneksel termal toplayıcılardan oluşur [20]. PV modüllerinde elektrik üretilir ve eşzamanlı olarak emilen termal enerji çalışma akışkanları tarafından taşınır. Sonuç olarak, PV verimliliği artar.



Şekil 3.1. PV/T çalışma konsepti

PV/T kolektörlerin avantajları şu şekilde sıralanabilir [21];

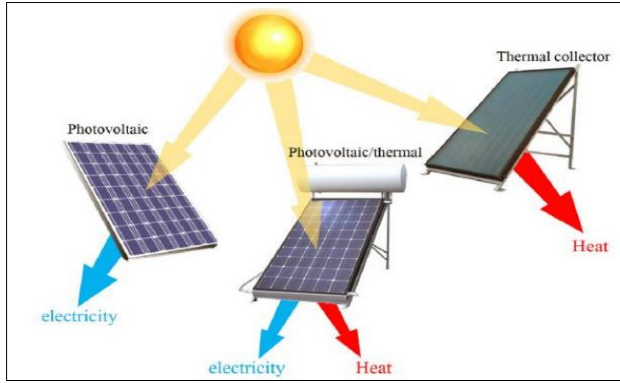
- 1) PV/T kolektörlerinin alan kullanımı, geleneksel PV sistemleri ve termal kolektörlerle karşılaştırıldığında daha yüksektir. PV/T toplayıcılarla kaplı bir alan, genellikle geleneksel PV sistemleri veya geleneksel termal toplayıcılarla kaplı bir alandan ayrı olarak daha fazla elektrik ve ısı sağlayabilir. Çatı alanı sınırlı olduğunda, özellikle faydalıdır ve gelecekte giderek daha kullanışlı hale gelecektir.
- 2) Ayrı fotovoltaik ve termal sistemlerle karşılaştırıldığında, PV/T kolektörleri çatılarda mimari bütünlüğü koruyabilir.
- 3) İki ayrı sistem yerine tek bir sistemin kurulması ihtiyacı için kurulum maliyetini düşürebilir.
- 4) PV/T kolektörlerin toplam enerji verimliliği, geleneksel PV sistemlerinden ve geleneksel kolektörlerden daha yüksektir.

PV/T teknolojisi gelişimi, son yıllarda çok ilerleme kaydetmiştir, ancak olgun bir PV/T pazarı henüz kurulamamıştır.

Güneş enerjisi, binaların sıcaklık kontrolü, endüstriler için ısı üretimi, gıda soğutma, suyun ısıtılması, sulama sistemleri, enerji üretimi ve diğer çeşitli işlemler için uygulanabilirler. PV/T sistemleri, yararlı enerji girdisi sağlayabilir ve diğer türdeki enerji kaynaklarının tüketimini azaltabilir.

Güneş teknolojisi geliştirmenin ilk aşamasında, yüksek güneş radyasyonuna sahip alanlar veya şebeke elektriğine sınırlı erişime sahip alanlar, güneş PV teknolojisinin uygulanması için uygun yerler olarak kabul edildi. Ancak güneş hücrelerinin verimliliği sıcaklığa bağlıdır [19]. Yeryüzüne ulaşan güneş radyasyonları 0,25 μm ile 2,5 μm dalga boyu aralığındadır. Güneş pili malzemelerinin birçoğu, karasal güneş spektrumunun sınırlı bölümüne yanıt verir. Sadece güneş pili malzemesinin tepki aralığına karşılık gelen radyasyonlar, güneş pili tarafından elektrik enerjisi üretmek için dönüştürülebilir. Kullanılmayan radyasyonlar ise enerjilerini güneş hücresinde ısı olarak dağılacaktır [22]. Sıcaklık arttığında, sıcaklığın hareket kabiliyeti, difüzyon uzunluğu ve azınlık yük taşıyıcılarının ömrü ve doyma akımı üzerindeki etkisine bağlı olarak elektriksel dönüşüm verimliliği genellikle düşer [19].

PV/T kavramı 1970'lerin ortalarında belgelenmiştir. Son yıllarda literatürde bu sistemlerle ilgili bazı teorik ve deneysel çalışmalar yayınlanmıştır [23]. Vorobiev ve arkadaşları tarafından tasarlanan bir hibrit PV/T güneş sistemi, bir radyasyon yoğunlaştırıcı, bir PV hücresi ve bir termoelektrik jeneratörden oluşuyordu ve hesaplamalarına göre, hibrit sistemin genel verimliliği yaklaşık %30'a ulaşabilirdi [24]. Zhu ve arkadaşları ayrıca, optimize edilmiş termal yönetimli bir PV/T hibrit güç üretim sistemi önerdi ve bu sistemin verimliliği yaklaşık %23 olarak değerlendirildi [25]. Sonuçlar hibrit PV/T sisteminin pratik ve verimli olduğunu gösterdi. Bununla birlikte, ısı olarak emilen veya yansıyan çok miktarda gelen enerji vardır, bu da fotovoltaiik hücrelerin çalışma sıcaklığında artışa ve elektrik verimliliğinde düşüşe neden olur.

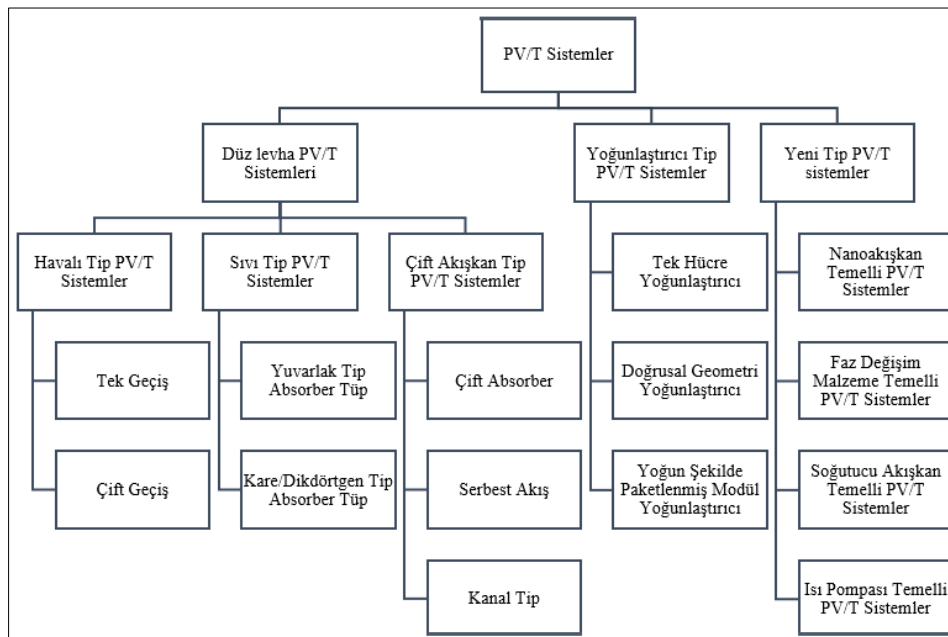


Şekil 3.2. PV/T sistemlerin temel mantık şeması

PV performansını iyileştirmek için birçok hibrit fotovoltaik-termal (PV/T) toplayıcı tasarımı önerilmiştir. Termal emici ve PV modülü arasında iyi bir termal temas ile daha iyi elektrik verimliliği ve termal verimlilik elde edilebilir [2].

3.1. PV/T Sistemlerin Sınıflandırılması

PV/T sistemleri, genel olarak ısı çekme düzenlemesi, çalışma ortamı ve son uygulamalar temelinde sınıflandırılır. Ayrıca PV/T sistemleri, radyasyonların konsantrasyon ve konsantrasyon dışı düzenlemelerine göre de sınıflandırılabilir. PV/T sistemlerin geniş bir sınıflandırması Şekil 3.3.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. PV/T sistemler sınıflandırılması

3.1.1. Düz levha PV/T sistemler

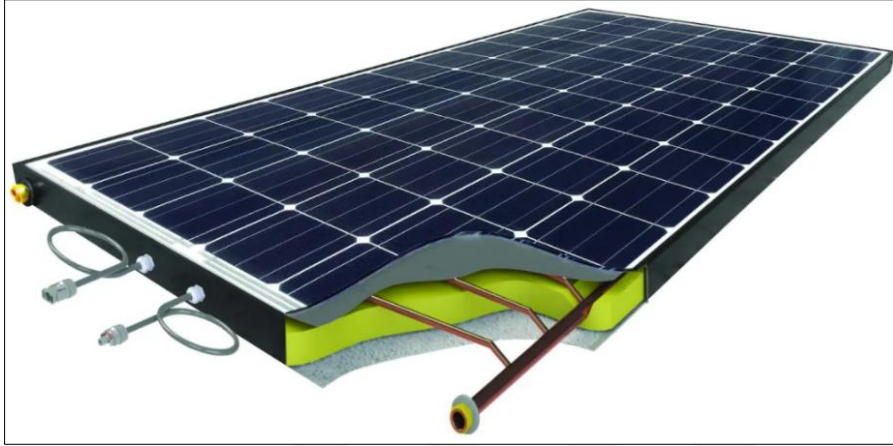
Konsantre olmayan PV/T sistemlerin, en basit ana sınıflarından birisidir. Bu sistemlerde herhangi bir konsantre düzenlemesi olmayan doğal radyasyonlar kullanılır. Fotovoltaik modülden ısı ekstraksiyonu için kullanılan ortama bağlı olarak, bu sistemler su tipi ve havalı tip olarak sınıflandırılır [26].

Düz levha PV/T sistemler, orta sıcaklıklarda enerji iletimi gerektiren cihazlar için uygulanırlar. Güneş enerjisini, güneşi takip etmeden ışınlı veya dağınık güneş radyasyonu ile kullanırlar. Güneş enerjili su ısıtma, bina ısıtmasında, iklimlendirmede ve endüstriyel proses ısısında yaygın olarak kullanılırlar ve yapıları basittir ve az bakım gerektirirler. PV/T toplayıcı, cam kapaklardan (sırlı veya sırsız), güneş pillerinden, soğurucu kolektörlerden ve sızdırmaz malzemelerden oluşur. Absorbe edilen enerjiyi bir sıvıya aktarma araçlarına sahiptirler ve solar absorbe edicinin yüzeyinde güneş radyasyonuna saydam zarflar kullanılır. Bu önlem, konveksiyonu ve atmosfer radyasyon kaybını azaltabilir. Hava tipi bir güneş kolektörü temelde sıvı tipiyle aynıdır ve tek farkı, sıvı tüplerinin kanallara dönüştürülmesidir. Genel olarak benimsenen PV/T çalışma sıvısı sudur, ancak hava uygulamalarına ve hibrit hava ve su sistemine odaklanan çok sayıda çalışma da vardır. Çalışma sıvısı olarak havanın kullanımı genel olarak bina entegrasyonunda yaygındır. Çalışma sıvısının türüne göre, düz plaka PV/T toplayıcı, çift akışkan (su-hava) PV/T kolektörü, sulu tip PV/T kolektörü ve havalı tip PV/T kolektörü gibi farklı sıvı kombinasyonlarına sahip birkaç türe ayrılabilir [27]. Bir PV/T sistemindeki emici kolektörler hayati öneme sahiptirler. PV hücresinin veya modülünün sıcaklığını düşürebilir, sıcak çalış sıvısı tarafından salınan ısıyı toplayabilir ve PV modülünün verimliliğini artırabilir[7]. Düz levhalı güneş kolektörleri ve güneş pilleri geniş çapta araştırılmış ve çeşitli uygulamalarda ticari başarı elde etmişler [28], [29].

Sulu tip PV/T sistemler

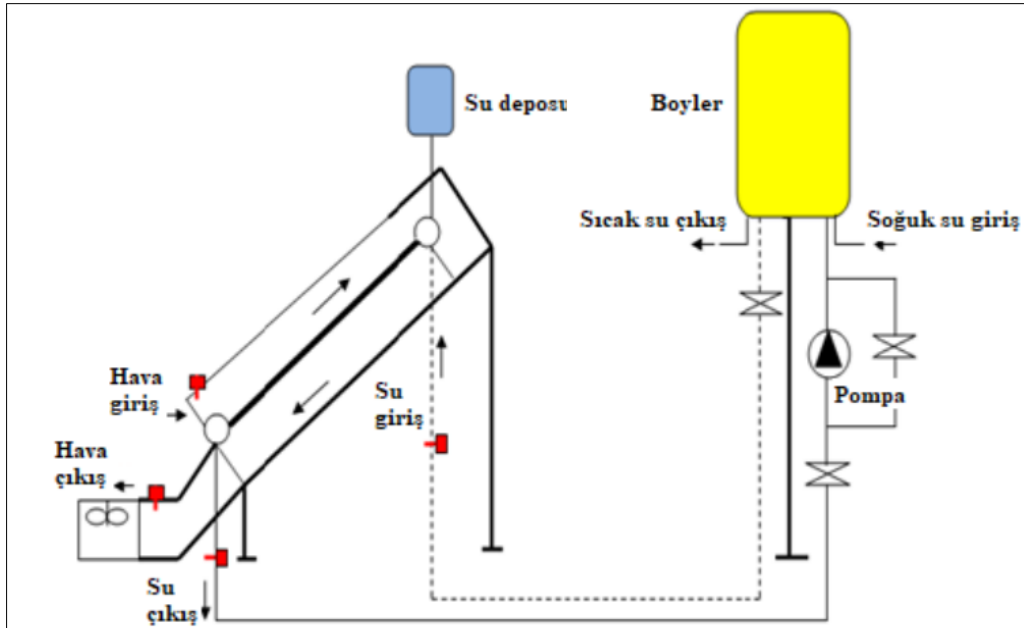
Son yıllarda PV/T sistemleri ısı transfer akışkanı olarak sıvıyı havadan daha çok tercih etmektedir. Havalı PV/T sistemlerinin bakım maliyeti daha ucuzdur, ancak çalışma sıvısı olarak suyu kullanan PV/T sistemleri daha kararlı termal performansa sahiptirler [30]. Sıvı tip PV/T sistemi, suyun havanınkinden daha yüksek ısı kapasitesinin bir sonucu olarak

popülerdir ve bu da daha yüksek bir genel verimlilik sağlar [31]. Bu tür PV/T sistemlerde su, PV modülünden ısının çekilmesi için bir ortam olarak kullanılır. Bu kombinasyon aynı anda elektrik ve sıcak su sağlar. Mevcut literatür çoğunlukla su tipi PV/T sistemlerinin teorik ve deneysel performans analizlerini içerir. PV/T sisteminden gelen sıcak su, çoğu durumda evsel ihtiyaçlarda kullanılır.



Şekil 3.4. Sulu tip PV/T tasarımı

Sıvı tip PV/T toplayıcılar dört tipte sınıflandırılabilir; Levha ve tüp PV/T kolektör, kanallı tip PV/T kolektör, serbest akışlı PV/T kolektör ve çift akışkanlı PV/T kolektör[3].



Şekil 3.5. Sulu ve havalı tip (hibrit) PV/T şeması

Levha ve tüp PV/T kolektör

Normal bir PV panelini alıp onu bir termal toplayıcıya entegre etmek, bir PV/T toplayıcı yapmanın en kolay yoludur. Daha fazla üst koruyucu kapak kullanmak, bu tür kolektörlerin ısı yalıtımını iyileştirebilir, ancak kolektörün elektrik verimi azalır, çünkü her bir koruyucu ek yansımalarla sebep olacaktır.

Bu PV/T tipi, konutlarda sıcak su talebini karşılamak için etkili bir seçenektir. Performans olarak bir kanallı tip PV/T kolektöründen biraz daha kötü olsa da, termal verimlilik açısından uygun bir seçimdir. Ayrıca, levha ve tüp PV/T kolektörlerin avantajı, üretimi basit ve düşük maliyetli bir konfigürasyondur, çünkü bunlar bir PV paneli ve termal kolektör birlikte kurulduktan hemen sonra, herhangi bir büyük değişiklik yapılmadan kullanıma sokulabilir[4].

Kanallı tip PV/T kolektör

Kanallar, bu tür PV/T kolektörlerde PV panel üstüne kurulur. PV paneli, kanaldaki sıvıdan farklı bir absorpsiyon spektrumuna sahipse daha fazla radyasyon alabilir. Bu tasarımda, akışkan ortamı, PV panellerin absorpsiyon spektrumunun bir kısmıyla örtüşen suyu kullanır ve elektrik performansında %4'lük bir azalmaya neden olur. Bununla birlikte, kanal çok geniş olacak şekilde tasarlanırsa, kaplı plaka çok büyük olabilir ve su basıncına dayanabilmesi için kalın cam kullanılması gerekebilir [32]. Bu problemi çözmek için PV panelin altından su akışı sağlayan birçok çeşit kanal tasarımı sunulmuştur.

Serbest akışlı PV/T kolektör

Serbest akışlı panelde, emiciden akan akış ortamı sınırlandırmamıştır. Kanallı PV/T kolektör ile karşılaştırıldığında, tasarım bir cam tabakayı kaldırır, bunun sonucunda yansıma ve malzeme maliyetleri azalır, cam kapağa verilen hasar gibi mekanik sorunlar çözülmüş olur. Ancak buharlaşmanın neden olduğu ısı kaybı artabilir. Bir kanallı PV/T kolektörü için, PV panelinde akan sıvı genellikle sudur, ancak buharlaşma basıncı yeterince düşük değildir,

yüksek sıcaklıkta serbest akışlı PV/T kolektörü, akışkan ortamında suyun buharlaşması nedeniyle bazı problemlerle karşılaşabilir [4].

Çift akışkanlı PV/T kolektör

Bu tür bir tasarımda, birincil emici olarak şeffaf bir PV laminat kullanılır ve ikincil emici olarak koyu renkli bir metal plaka yerleştirilir. Her panelin üstünde bir su kanalı vardır. Su üst kanaldan akar ve alt kanaldan geri gelir. Bu tasarımın ısı verimi yüksektir ancak iki emicili PV/T kolektöründeki ağır cam kapak, kanallı PV/T kolektörünkünden daha belirgindir [4].

Sıvı tip PV/T sistemlerin karşılaştırılması

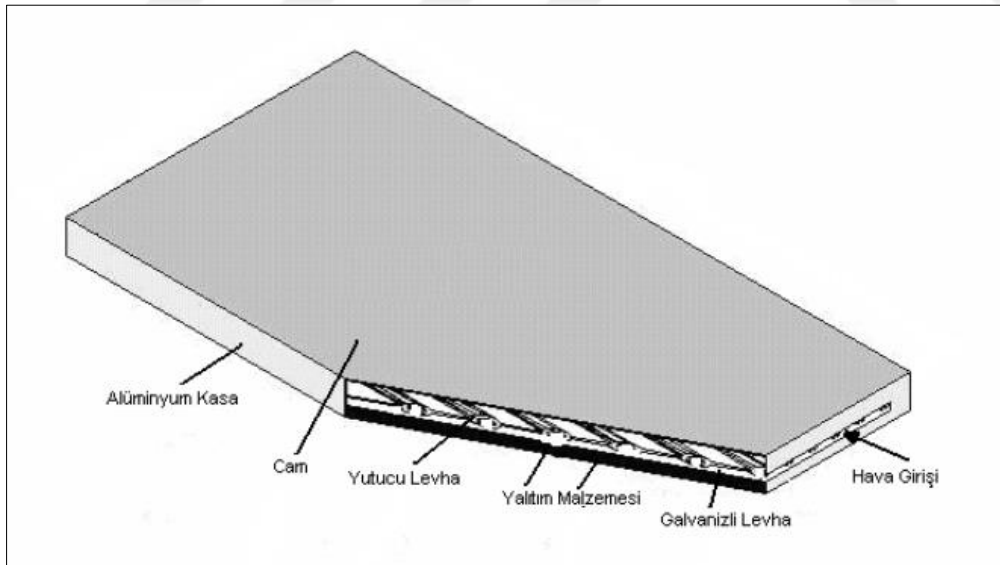
Çizelge 1’de sıvı tipi PV/T sistemlerinin türleri karşılaştırılmıştır ve bunların avantajları, dezavantajları ve performanslarını optimize etmek için çeşitli önlemler sunulmuştur. PV/T sistemlerinin performansının, kütle akış hızı, hücre yoğunluğu ve kolektör uzunluğu vb. gibi parametrelerin artmasıyla iyileştirilebileceği gözlemlenmiştir. İki emicili PV/T kolektör, hem termal hem de elektriksel verimlilikte daha iyi performans göstermektedir [1].

Çizelge 3.1. Farklı sıvı tipli PV/T sistemlerinin karşılaştırılması [1].

<u>Sıvı Tip PV/T Sistemleri</u>	<u>Avantajları</u>	<u>Dezavantajları</u>	<u>Performans Optimizasyonu</u>
Levha ve tüp PV/T kolektör	Gelişmiş ve olgun teknoloji	Düşük elektrik verimi	Uygun sayıda üst kapak
Kanallı Tip PV/T Kolektör	Daha yüksek termal verimlilik	- Ağır ama kırılabilir yapı - Çalışma sıvısı için sınırlı seçenek	Şeffaf PV panel kullanımı ve şeffaf malzemelerin maliyetinin düşürülmesi
Serbest Akışlı PV/T Kolektör	Düşük yansımalar ve malzeme maliyetleri	- Yüksek sıcaklıkta kararsızlık - Buharlaşma nedeniyle büyük ısı kaybı	Uygun çalışma sıvısı kullanılması
Çift Akışkanlı PV/T Kolektör	- Daha iyi mekanik yapı - Daha yüksek termal verimlilik	Ağır ama kırılabilir yapı	Birincil ve ikincil kanallar arasında şeffaf yalıtım katmanının kullanılması

Havalı tip PV/T sistemler

Bu tür PV/T sistemlerinde hava, PV modüllerinden ısının çekilmesi için bir ortam olarak kullanılır. Üst korucuyu kapak, PV hücreleri içeren bir cam sandviçten yapılmıştır. Ve PV hücreleri, sırlı yüzeyin üzerine veya bir ızgaraya yerleştirilmiştir. Izgara üzerine yerleştirmenin avantajı, bitişik sütunlar ve sıralar arasındaki aralıkların, güneş ışınımının geriye doğru soğurucu plakaya doğrudan kazanımını güçlendirmesidir[33]. PV/T kolektörün çeşitli konfigürasyonları, bu sistemin elektrik ve termal enerji çıkışını dengelemek için hücre alanı yoğunluğunu değiştirerek yapılır. Sandviç ve soğurucu plaka arasındaki hava akışı, kaldırma kuvvetinin etkisi ile doğal bir yolla veya bir fan tarafından üretilen zorlanmış akış yoluyla sağlanabilir. Hava akışı, panel tarafından emilen ısıyı ortadan kaldırır ve aynı anda PV hücrelerini soğutur, böylece elektriksel dönüşüm verimliliğini artırır. Çalışmalar genellikle, camlı [34], [35], camsız PV/T kolektörleri [36], farklı hava kanal düzenlemeleri [35], doğal akışlı [37], zorlanmış hava akışlı [38], hava kanallarında eklerin kullanımı [38], hava kanallarının farklı derinlikler de düzenlenmesi ve hava kütle akış hızının optimizasyonunu içermektedir [39].



Şekil 3.6. Havalı tip PV/T kolektör şeması

Havalı tip PV/T sistemlerden çıkarılan ısının son kullanımı çoğunlukla alan ısıtma uygulamasıdır[40]. Havalı tip PV/T sistemleri, alan ısıtma uygulamaları için binaya entegre edilir ve bu sisteme Bina entegre PV/T (BIPV/T) denir. BIPV/T sistemleri, tavana veya duvara monte edilebilir [41].

Yaygın bir düz levha PV/T sisteminin termal modellenmesi

Sistemler genellikle bir cam kapak, bir PV panel, bir soğurucu, borular ve bir yalıtım katmanından oluşur. Genel olarak, PV hücresi, koruyucu bir cam kapak ile bindirmeli alüminyum alaşımdan yapılmış bir arka plan arasında kapsüllenir. Yapıştırıcı olarak etilen-vinil asetat (EVA) kopolimeri kullanılır [42]. Çalışma sıvısı, sıcak su uygulamaları için PV panelinin ısısını taşımak için borulardan akar. Farklı ısı transfer boru konfigürasyonları [43], farklı türde kaplama malzemeleri ve farklı türde çalışma akışkanları gibi farklı tasarımlara sahip çeşitli PV/T sistemleri vardır [44].

Bir PV/T sistemi içindeki pratik enerji aktarımı süreçleri çok karmaşıktır. Hesaplamaları basitleştirmek ve yaklaşık simülasyon modelleri geliştirmek için varsayımlar yapılmalıdır. Genellikle, PV/T bileşenlerinin, ortam sıcaklığı ve güneş radyasyonu yoğunluğu değiştiğinde hemen yarı kararlı duruma ulaştığı varsayılır. Isı transferi tek boyutlu ve yarı kararlı durum olarak kabul edilir. PV/T bileşenlerinin (çalışma sıvısı hariç) ısı kapasiteleri ihmal edilebilir ve tüm bileşenlerin ısıl iletkenliği sabit kabul edilir. Bu varsayımlardan sonra, sistemin her parçası için enerji dengesi denklemleri oluşturulabilir. Belirli bir PV/T sistemi için, çalışma sıcaklığı radyasyon yoğunluğu, ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı, bileşen malzemesi ve çalışma akışkanının giriş sıcaklığından etkilenir. Sonuç olarak, performans parametreleri için matematiksel ifadeler bileşen enerji dengesi denklemlerinden türetilmişse, bir sistemin ısı ve elektriksel performansları değerlendirilebilir [1].

Çizelge 3.2. Farklı düz levha PV/T sistemlerin karşılaştırılması [1].

Düz Levha PV/T Tipleri	Çalışma Sıvısı	Avantajları	Dezavantajları	Uygulamaları
Havali Tip PV/T	Hava	- Basit tasarım - Düşük bakım maliyeti	- Düşük termal performans - Daha az ısıtılmış hava uygulaması	- Alan ısıtma - Tarımsal uygulamalar
Sıvılı Tip PV/T	- Su - Faz değişim malzemeleri - Nanoakışkanlar	- Yüksek ısı taşıma kapasitesi - Havali tip PV/T sistemine göre daha yüksek termal ve elektriksel verim - PV sisteminin termal yönetimi için verimli bir şekilde kullanılır. - Mükemmel performans - Uygun sıcaklık iletkenliği	- Karmaşık tasarım - Yüksek maliyet - PV/T sistemi ile entegre - Sınırlı uygulama	- Alan ısıtma - Sıcak su ihtiyacı - Su filtreleme sistemleri - Deniz suyu filtreleme - Binalarla entegre sistem - PV panel sıcaklık kontrolü
Çift Akışkan Tip PV/T	Hava ve Su	- Yüksek elektriksel ve termal verim - Sıcak su ve sıcak hava aynı anda sağlanır - PV panellerin çok iyi soğutulması	- Karmaşık tasarım - Yüksek maliyet - Sınırlı uygulama	- Alan ısıtma - Sıcak su ihtiyacı

3.1.2. Yoğunlaştırıcı tip PV/T sistemler

PV/T sistemlerinin geliştirilmesi için sermaye maliyetlerini düşürmek hayati önem taşımaktadır[5]. PV panelin üzerindeki radyasyon akısı olayı aynı tepe gücü sağlamak için arttırılırsa, maliyet azalacaktır. Sonuç olarak, PV alanında belirgin bir azalma sağlanacaktır. Bu durumda, yoğunlaştırma sistemi kavramı sunulmuştur çünkü bu sistemler aracılığıyla radyasyon akısında bir artış elde edilebilir [27].

Adından da anlaşılacağı gibi, bu tür bir PV/T sisteminde, güneş radyasyonlarını PV/T sistemi üzerinde yoğunlaştırmak için güneş yoğunlaştırıcıları kullanılır. Pek çok araştırmacı,

farklı güneş enerjisi yoğunlaştırıcıları ve farklı güneş malzemeleri kullanarak yoğunlaştırıcı PV/T sistemleri geliştirmiştir [26]. Geçmişte, düzlem yansıtıcı aynalar [45], [46], Fresnel lensler [47], parabolik oluklar [48], bileşik parabolik toplayıcılar(CPC) [49], paraboloidal çanak kullanımları bildirilmiştir [50]. Bunlara ek olarak yoğunlaştırıcı PV/T sistemlerinde gerçekten yüksek çalışma sıcaklıklarına uygun güneş pili kullanılmaktadır [26].



Şekil 3.7. Yoğunlaştırıcı tip PV/T

Yoğunlaştırıcı PV/T kolektörleri, reflektörlerden gelen ışığın odaklandığı PV kolektörlerden oluşur. Bu reflektörler arasında fresnel, parabolik ve çanak türleri bulunmaktadır. Radyasyon kaynağı ile enerji soğurucu yüzey arasına alanı küçültmek ve enerji dağıtım sıcaklığını artırmak için optik bir cihaz yerleştirilebilir. Düz levha PV/T yerine yoğunlaştırıcı tipi PV/T uygulaması, güneş pilleri tarafından elde edilen radyasyon yoğunluğunu artırabilir [1]. Son yıllarda, yoğunlaştırılmış güneş radyasyonu altındaki PV hücrelerinin çalışması, reflektörler ve lensler gibi optik cihazlar güneş pillerine göre daha ucuz olduğu için geniş çapta araştırılmaktadır. Ancak, PV hücrelerinin maliyetinin düşürülmesi nedeniyle, bu ifade zaman zaman değişebilir [2].

Hücre, gelen güneş radyasyonunun yalnızca küçük bir bölümünü elektrik enerjisine dönüştürür. Emilen enerjinin çoğu bu işlem sırasında ısıya dönüştürülür. Yoğunlaştırıcı PV/T sistemlerindeki radyasyon akısındaki artış aynı zamanda sistemin sıcaklığının ve akışkan sıcaklığının artmasına neden olur, bu da ısı çevreye zamanında yayılmadığı sürece yüksek ve tehlikeli bir bağlantı sıcaklığına yol açabilir. Bununla birlikte, PV hücrelerinin

Çalışma sıcaklığı arttığında, açık devre voltajı azalır ve mono ve polikristalin PV hücreleri için doldurma faktörü ve gıkışı da azalır. Sonuç olarak, dönüşüm verimliliği azalır ve PV hücre malzemesi zarar görebilir[2].

Yoğunlaştırıcı PV/T sistemlerde, fotovoltaiik hücrelerin soğutulması hayati önem taşımaktadır. PV hücreleri, aşırı sıcaklığın bir sonucu olarak geri döndürülmez şekilde hasar görebilir. Soğutma sistemleri için tasarımı konuları arasında düşük ve tek tip hücre sıcaklıkları, sistem güvenilirliği, yeterli kapasite ve minimum güç tüketimi yer alır [51].

Doğrusal (Lineer) geometri

Güneş ışığını bir hücre dizisine odaklamak için genellikle parabolik oluklar veya doğrusal Fresnel lensler kullanılır. Hücreler ısının yayılması için daha az alana sahiptirler. Ancak, hücrelerin her iki tarafı ve arkası ısı dağıtımı için kullanılır [52].

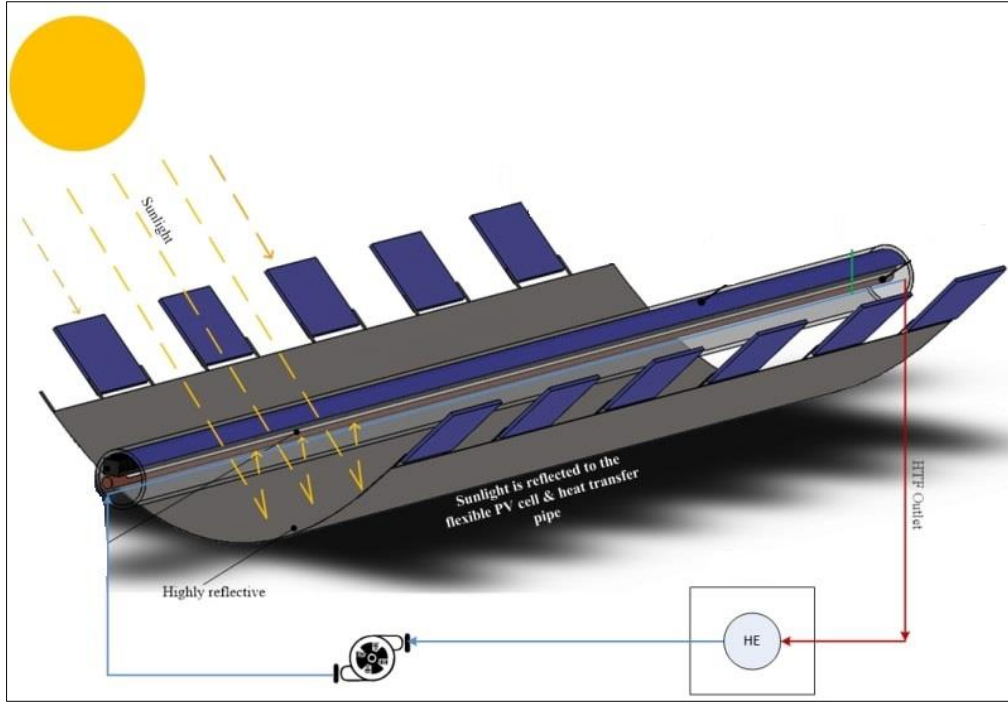
Dairesel Fresnel ve astar Fresnel lensi karşılaştırıldığında, astar Fresnel daha çok tercih edilmiştir. Çünkü yalnızca bir eksen izlemeye ihtiyaç duyar ve PV/T sistemine ile kolayca entegre edilebilir. Ayrıca, mercekler aracılığıyla, gelen radyasyon doğrudan ve dağınık güneş radyasyonuna ayrılabilir. Böylece sistem, bir binada elektrik enerjisi, termal enerji ve aydınlatmanın birleşik ihtiyaçlarını karşılamak için uygulanabilir [6].

Doğrusal Fresnel lenslerden sonra, doğrusal Fresnel reflektörler, orta büyüklükteki konsantre PV/T sistemlerinde en yaygın kullanılan mekanizmadır. Doğrusal Fresnel reflektörlerin ideal bir performans için daha modüler ve kompakt bir tasarımı sağladığına inanılmaktadır. Binalara kolayca entegre edilebilir [52].

Yoğunlaştırılmış paket model

Alıcılar tipik olarak bir çanak veya heliostat alanı gibi büyük nokta odaklama sistemlerinde çok sayıda yoğun şekilde paketlenmiş hücrelerden oluşur ve aydınlatma homojenliğinin artması nedeniyle, genel olarak odak düzleminde uzağa yerleştirilir. İkincil yoğunlaştırıcı, akı homojenliğini geliştirebilir. Bununla birlikte, daha önce tartışılan iki konfigürasyonla

(tek hücre, doğrusal geometri) karşılaştırıldığında, bu tür modüller, kenar hücreleri olmadan daha büyük bir soğutma sorununa sahiptir ve her hücre, ısı dağıtımı için sadece arka tarafını kullanır. Sonuç olarak, tüm ısı yükü modülün modül yüzeyine normal bir yönde dağıtılmalıdır ve pasif soğutma, tipik konsantrasyon seviyelerinde böyle bir konfigürasyonda uygulanamaz [52].



Şekil 3.8. Yoğunlaştırılmış tip PV/T paket model



4. MATERYAL VE YÖNTEM

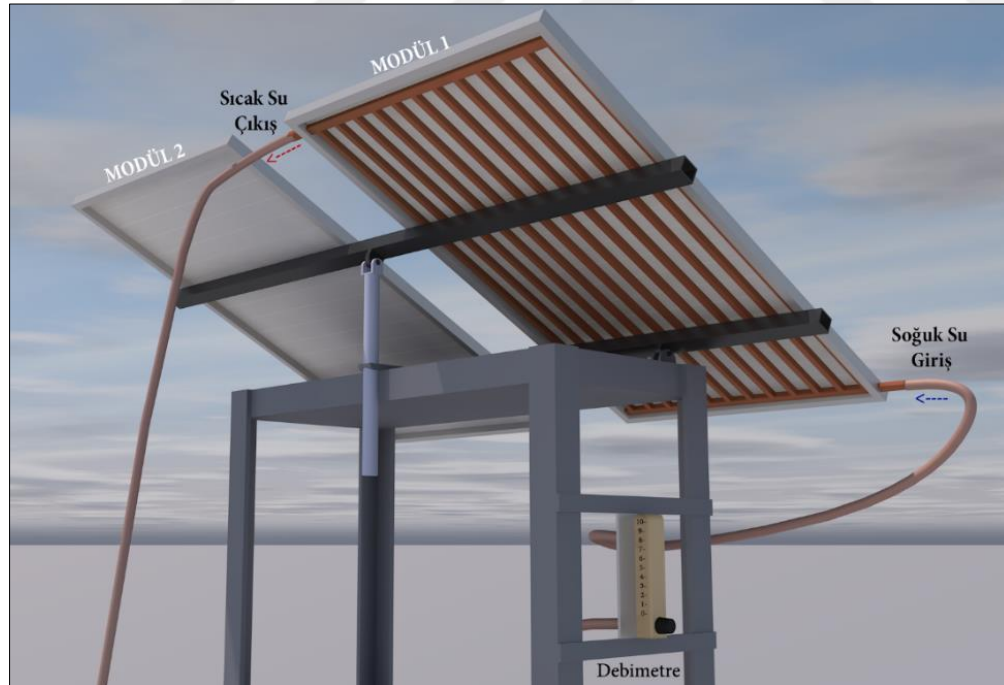
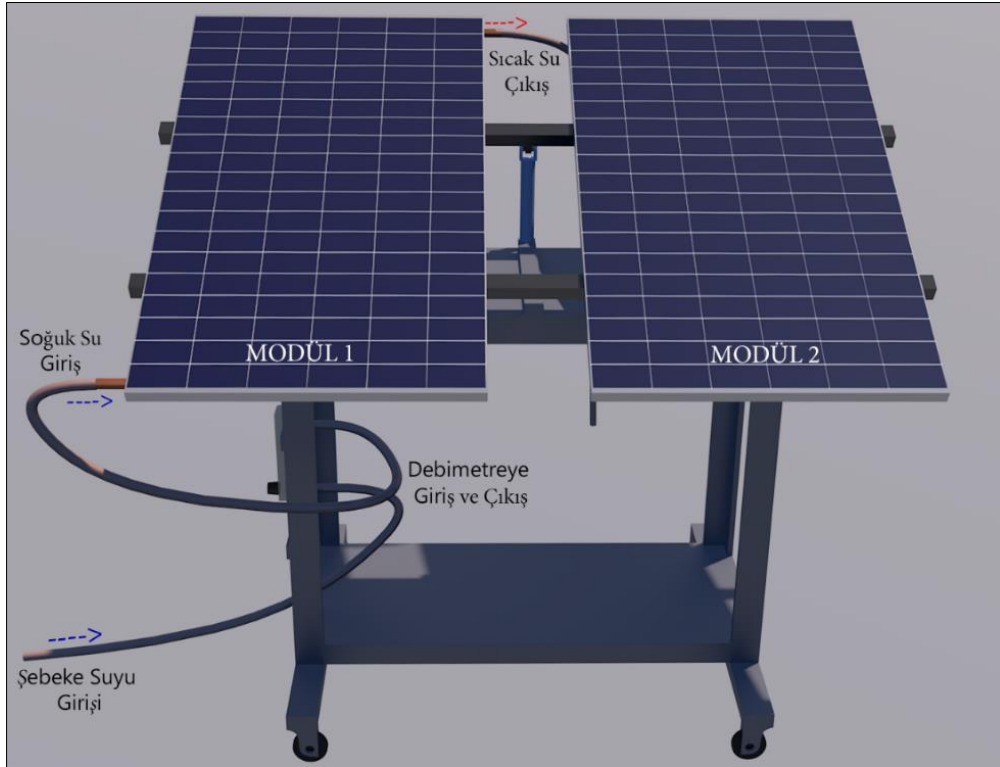
4.1. Deney Seti Ana Parçaları, Özellikleri ve Montaj

Deney setine ait malzemelerin adları, ait oldukları modül ve parça özellikleri liste halinde verilmiştir. Fotovoltaik panel her iki modülde de varken, soğutucu su serpantini yalnız Modül 1’de bulunmaktadır. Deney setinde kullanılmış olan fotovoltaik paneller aynı ebatlara ve aynı özelliklere sahiptir. Fotovoltaik güneş panelleri aynı platform üzerine monte edilmiştir.

Çizelge 4.1. Deney setine ait parça ve özellikleri.

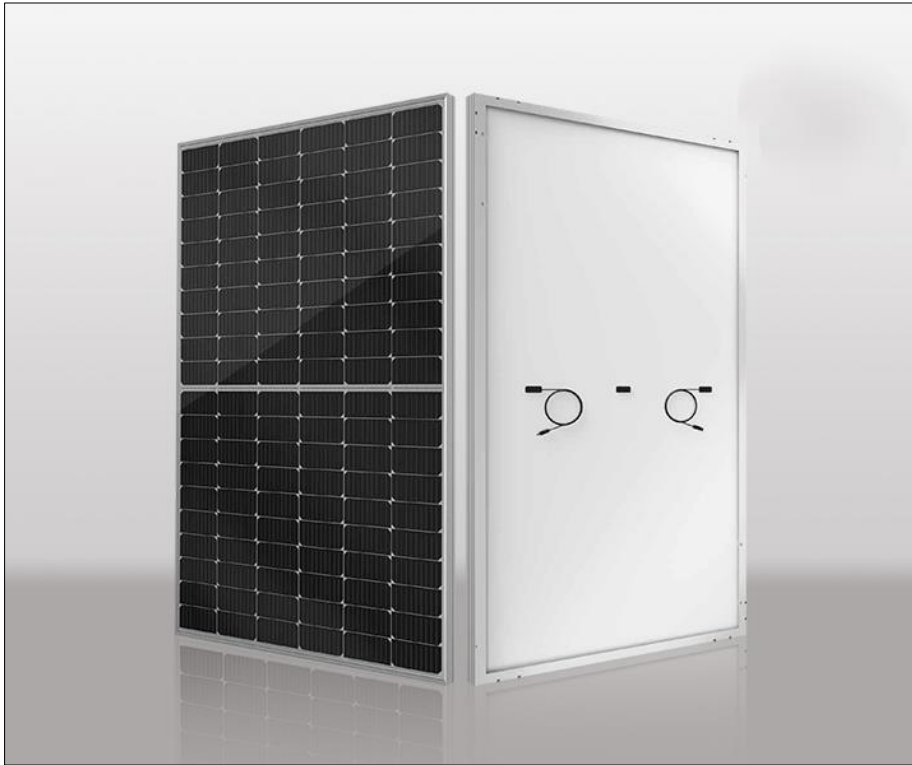
Adı	Ait Olduğu Modül	Özellikleri
PV Panel	Modül 1 ve Modül 2	ELNSM60M-HC-HV-370 Wp Voc: 41.6 V Isc: 11.34 A Vmp: 34.6 V Imp: 10.70 A
Gelişmiş Tarayıcı Cihazı	Modül 1 ve Modül 2	ELİMKO 680 Ölçüm Elemanı: Termokupl
Su Serpantini	Modül 1	Bakır:(λ :394 W/mK) Boru Çapı: 24 mm / 32 mm
Solarimetre	Modül 1 ve Modül 2	CEM DT-1307 Ölçüm Aralığı:2000W /635 BTU’e kadar
Debi Ölçer	Modül 1	Debi Aralığı: 0-10 L/dk
Yük	Modül 1 ve Modül 2	4 Ω Direnç

Deney setine ait parça ve özellikleri tabloda yer almaktadır. Deney setinin şeması ise Çizelge 4.1 de gösterilmiştir. Modül 1 ve Modül 2 aynı marka ve aynı güçte olan iki fotovoltaik panel ile tasarlanmıştır. Modül 1’de fotovoltaik panel arkasına yerleştirilmiş bir serpantin boru dizisi bulunmaktadır. Serpantin oluşturulmadan önce panel sırtına tam temas etmesi için bakır borular belirli oranda ezilerek temas yüzeyi arttırılmıştır. Modül 2’de ise her hangi bir ek parça bulunmamaktadır. Her iki modülünde aynı açıda olabilmesi için paneller aynı iki profil boru üzerine yerleştirilmiştir. Modül 1’de bulunan serpantin girişi şebeke suyu ile beslenmiştir ve serpantin çıkışı ise dış ortama serbest olarak bırakılmıştır. Serpantine giriş yapan suyun kontrolü için ise debimetre kullanılmıştır.



4.1.1. PV panel

Modül 1 ve Modül 2'ye ait fotovoltaik paneller, her ikisi de aynı özelliktedir. Monokristal 370 Wp güce sahip olan bu panellerin ön yüzeylerinde her hangi bir değişiklik yapılmamıştır. Modül 1 ve Modül 2 arasındaki verimlilik kıyaslaması yapabilmek için aynı şartlarda kurulum yapılmıştır.



Şekil 4.3. Deney çalışmasında kullanılan PV panel

4.1.2. Gelişmiş tarayıcı cihaz (Termokupl Data Logger)

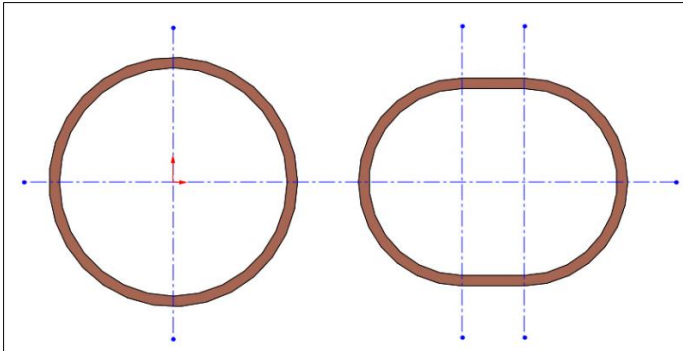
Deney esnasında her iki güneş panelinin aynı üç noktasından sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümlere ek olarak çevre ve şebeke suyu girişi ile sıcak su çıkış sıcaklıkları ölçülmüştür. Fotovoltaik paneller üst, orta ve alt nokta olmak üzere üç noktadan K tipi termokupl yardımı ile sıcaklığı ölçülmüştür.



Şekil 4.4. Deneysel çalışma sırasında verilerin alınması için kullanılan data logger

4.1.3. Soğutucu serpantin

Fotovoltaik hücrelerde emilen ısınn çekilmesi için oluşturulan su serpantini, 24mm dış çapa sahip 12 adet bakır iletim borusu, 32 mm dış çapa sahip 2 adet toplama kolektörüne sahiptir. Toplama borusu olan 32 mm dış çapa sahip iki bakır boru iletim boruları ile birleştirilmeden önce belirli oranda ezilerek silindirik yapıdan elips bir hale dönüştürülmüştür. Bu uygulamanın yapılmasının temel amacı panel ve ısı transfer maddesi olan akışkan ile arasındaki ısı transfer yüzeyini arttırmaktır.



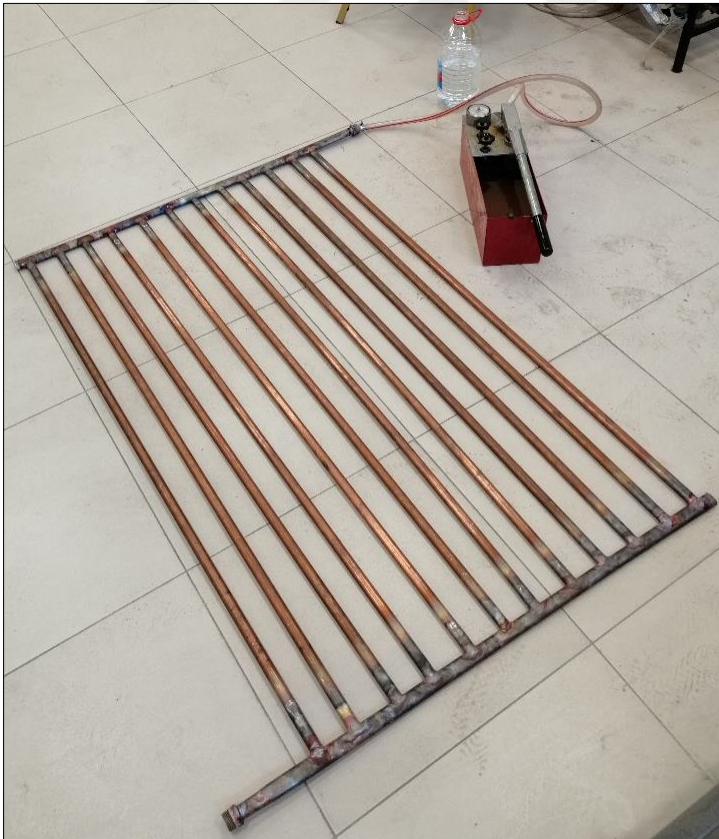
Şekil 4.5. Soğutucu serpantin bakır boruları tasarımı

Boru ezme uygulaması diğer 12 bakır boruya da uygulanmıştır. Her iki toplama borusu ezilme uygulamasından sonra 12 eşit mesafede delikler açılarak iletim borularının konumları ayarlanmıştır.



Resim 4.1. Soğutucu serpantin borularının kaynak ile bağlantı süreci

Bakır borular sert lehimleme yöntemi ile birleştirilmiş olup daha sonra sızdırma testi yapılarak sızdırmazlığı sağlanmıştır.



Resim 4.2. Soğutucu serpantin sızdırmazlık test süreci

Serpantin, kontrolleri tamamladıktan sonra Modül 1'in arkasına yerleştirilmiştir. Yerleştirme sırasında panel çerçevesi alt ve üst noktalardan kesilerek serpantin panel arka yüzeyine serpantin borularının yüzeylerinin panel yüzüne temas edecek şekilde monte edilmiştir.

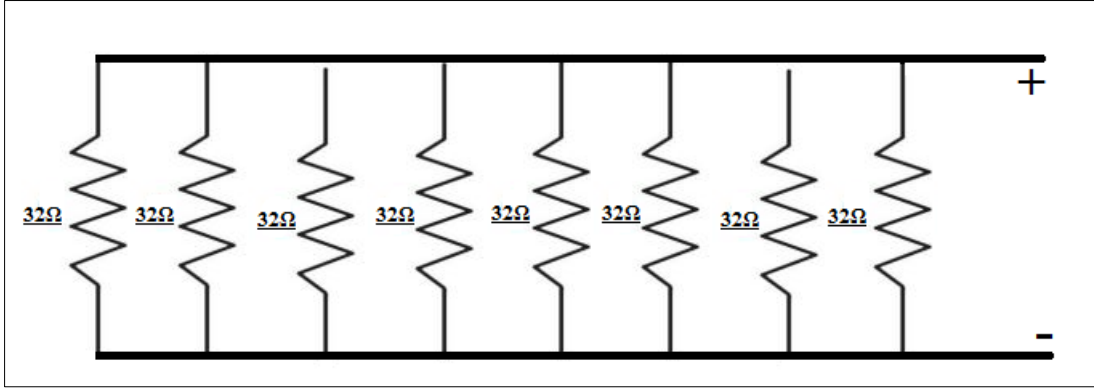


Resim 4.3. Soğutucu serpantin ve PV panel montaj süreci

4.1.4 Direnç

Fotovoltaik panellerden aktarılan elektrik enerjisinin gerilim ve akım ölçümü için elektrik devre tasarımında bir yük veya dirence ihtiyaç vardır. Sisteme eklenen 4Ω 'luk direnç ile güneş panellerinin yükte çalışması ile gerilim ve akım değişikliği ölçülebilir.

Direnç devresi oluşturulurken 32Ω 'luk sekiz adet rezistans paralel bağlanarak 4Ω 'luk bir direnç devresi elde edilmiştir. Ölçümler sırasında gerilim ölçümü için voltmetre devreye paralel olarak, ampermetre ise seri olarak bağlanır.



Şekil 4.6. Direnç devre tasarımı

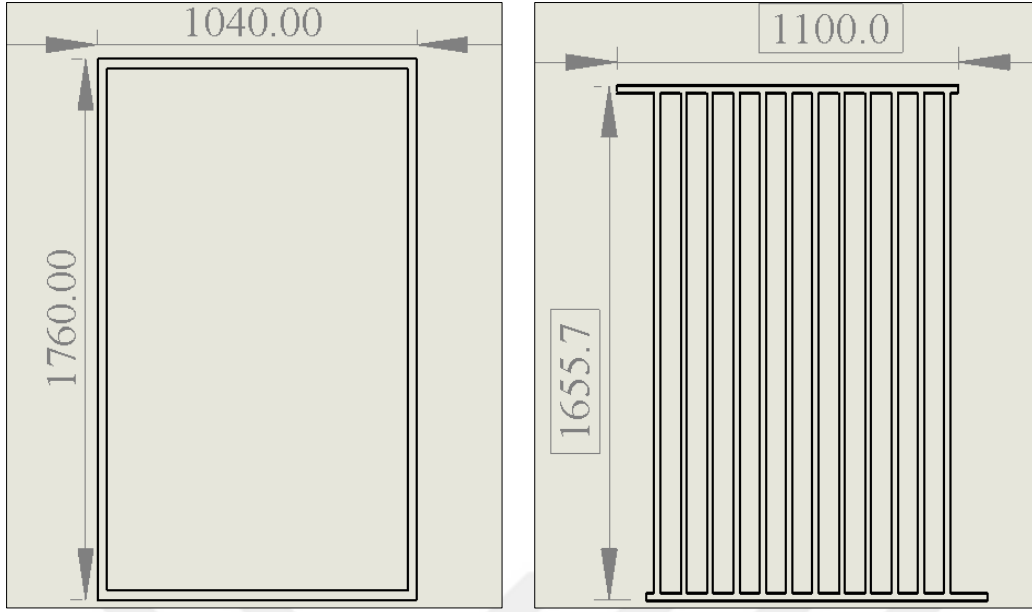
Akım ve gerilim değerlerinin ölçülebilmesi için voltmetre devreye paralel bağlanırken, akımı ölçmek için ise ampermetre devreye seri olarak bağlanır.

4.2. Modül 1 Deney Tesisatının Tasarımı

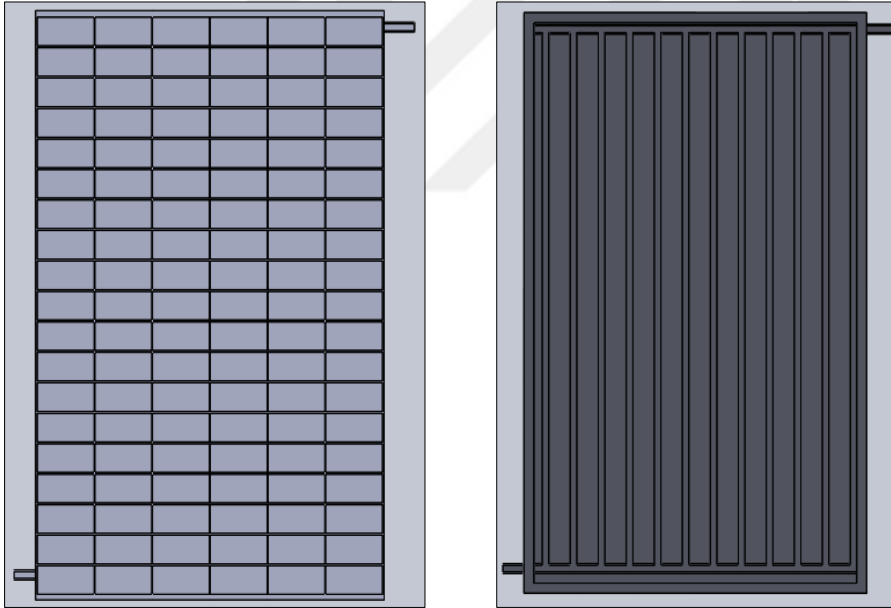
Modül 1'in PV panelinin gerçek ebatlarıyla (1040mm x 1760mm) çizilmiş olup daha sonra soğutucu serpantininin gerçek ebatlarıyla (1100mm x 1655.7mm) çizilerek bilgisayar ortamında birleştirilerek incelenmiştir.

4.2.1. Modül 1 PV panel ve serpantin 3D tasarımının oluşturulması

3D tasarım programı olan Solidworks ile PV panel ve soğutucu serpantin tasarımını gerçekleştirilmiş ve montaj işlemleri yapılmıştır.



Şekil 4.7. PV Panel ve soğutucu serpantin teknik çizim



Şekil 4.8. PV panel ve serpantin birleştirilmiş hali /Ön ve arka yüzey 2D görüntüsü

4.3. Deney Çalışması ve Deney Verileri

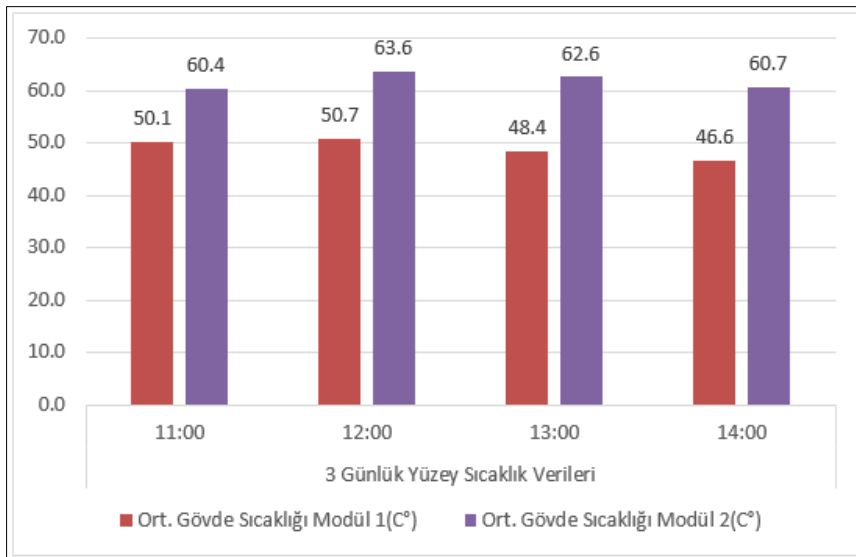
Deneyler Gazi Üniversitesi Merkez Kampüs içerisinde yer alan Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümü bahçesinde gerçekleştirilmiştir. 9 Temmuz 2021 tarihinde saat 11.00'da ilk deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir.

Şebeke suyu ile beslenen serpantin için akışkan debi ayarı yapılarak her 15 dakika bir şekilde veriler kayıt altına alınmıştır. 4 farklı debi ayarı ile her saat başında debi ayarlaması tekrar başlangıç noktasına ayarlanarak panellerin günlük 4 saatlik zaman dilimi içerisinde her bir saat için performansları incelenmiştir.



Resim 4.4. Deney seti ön yüz görünümü

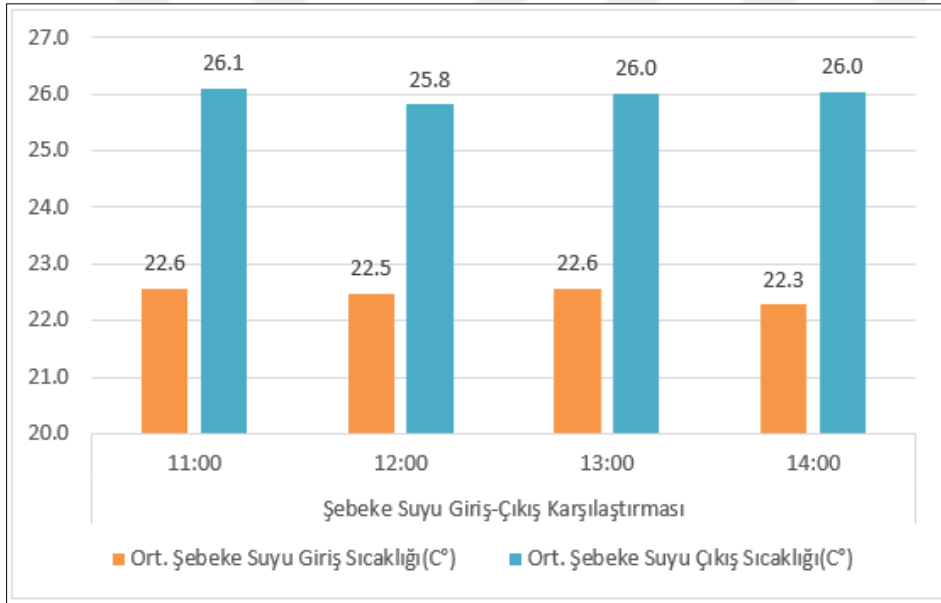
9 Temmuz 2021 saat 11.00'da başlayan deneysel çalışma, 5L/dk'lık debi ayarı ile başlayarak, her 15 dakikalık periyodlarla, sırası ile 4L/dk-3L/dk-2L/dk debi ayarı ile test edilmiştir. Aynı testler 10 ve 11 Temmuz 2021 tarihlerinde de yapılmıştır.



Şekil 4.9. 3 günlük yüzey sıcaklığı karşılaştırma grafiği

Grafikte verilen değerler deneysel çalışma sırasında elde edilen verilerin ortalama değerleridir. Soğutmanın yapıldığı Modül 1’den elde edilen ortalama gövde sıcaklığı verileri ile soğutmanın yapılmadığı Modül 2’nin ortalama gövde sıcaklığı verileri kıyaslandığında, soğutmanın yapılmaması sebebiyle Modül 2 gövde sıcaklığı daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

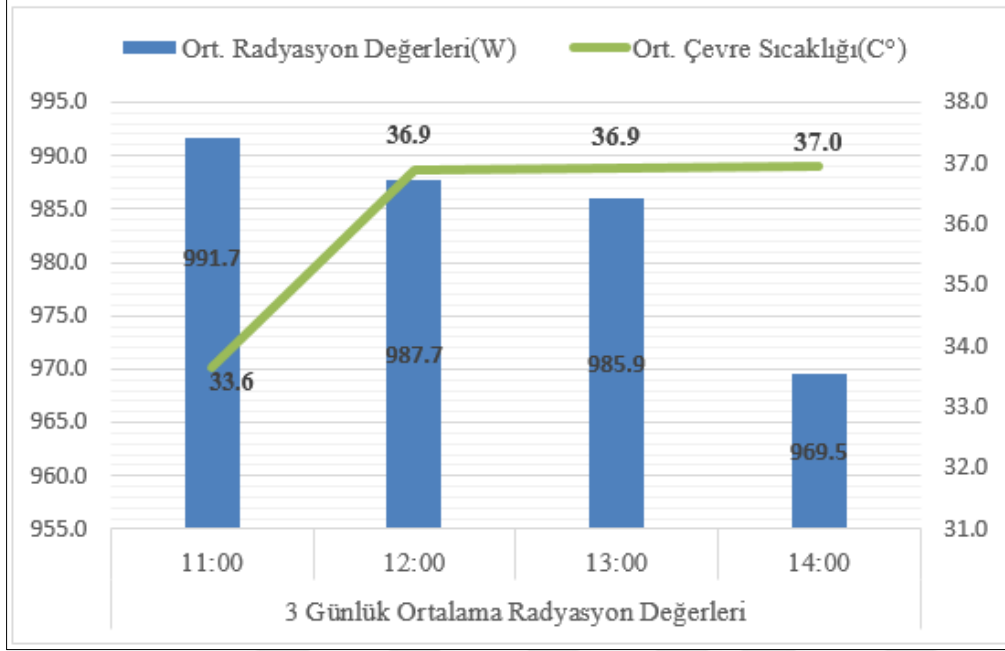
Deneysel çalışma sırasında, her iki panel içinde termokupl yardımıyla üç noktadan sıcaklık ölçümü yapılmıştır. PV panellerin arka kısmına üst, orta ve alt kısım olacak şekilde üç termokupl konumlandırılmıştır. Bu ölçümler sayesinde panelde gerçekleşen sıcaklık artışının hangi konumda ne kadar olduğu incelenmiştir.



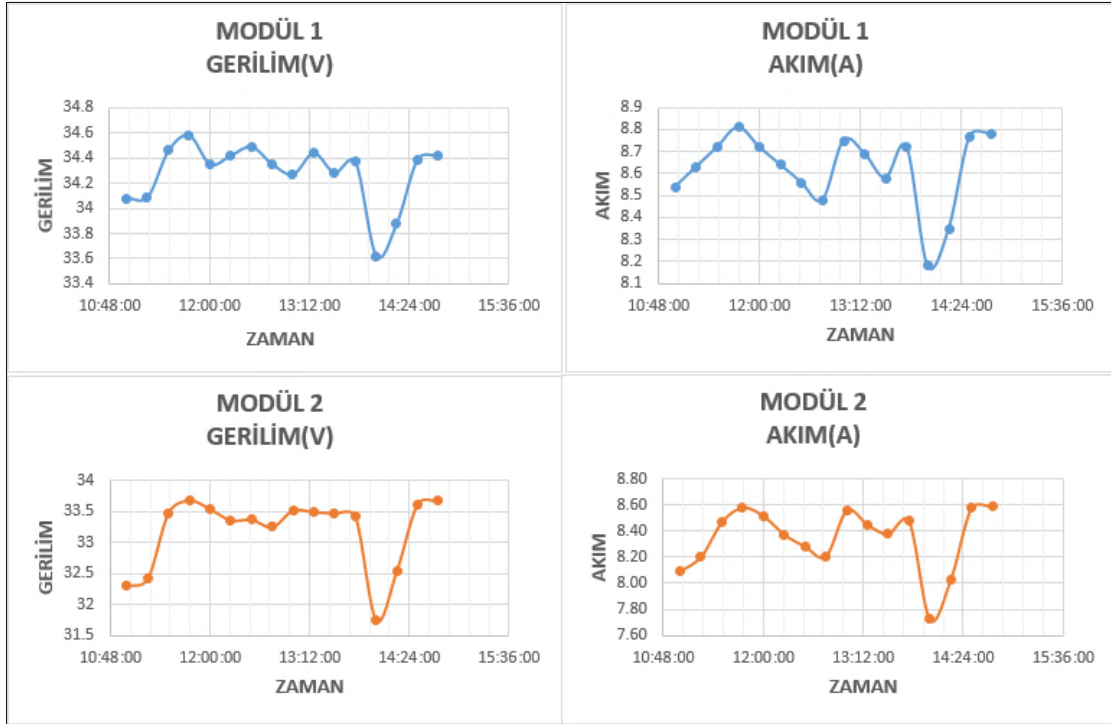
Şekil 4.10. 3 günlük şebeke suyu giriş-çıkış sıcaklık grafiği

Grafiklerden de anlaşılacağı gibi Modül 1 ve Modül 2 arasındaki sıcaklık farkı açık bir şekilde görülmektedir. Deneysel çalışma sırasında Modül 1 için gözlemlenen en yüksek sıcaklık 11 Temmuz 2021 tarihinde saat 11.45 zaman diliminde panelin alt kısmında 58,4 C° olarak ölçülmüştür. Modül 2 için ise 11 Temmuz 2021 tarihinde saat 13.00 zaman diliminde panelin alt kısmında 72,5 C° olarak ölçülmüştür. Modül 1 için gözlemlenen en düşük sıcaklık 11 Temmuz 2021 tarihinde saat 14.15 zaman diliminde panelin orta kısmında 38,2 C° olarak ölçülmüştür. Modül 2 için ise 10 Temmuz 2021 tarihinde saat 13.30 zaman diliminde panelin üst kısmında 48,2 C° olarak ölçülmüştür.

Modüllerden alınan verilerin kıyaslanabilmesi için oluşturulan grafikler incelendiğinde, her iki panelin gerilim ve akım grafiklerinin paralel olarak hareket ettiği görülmüştür.

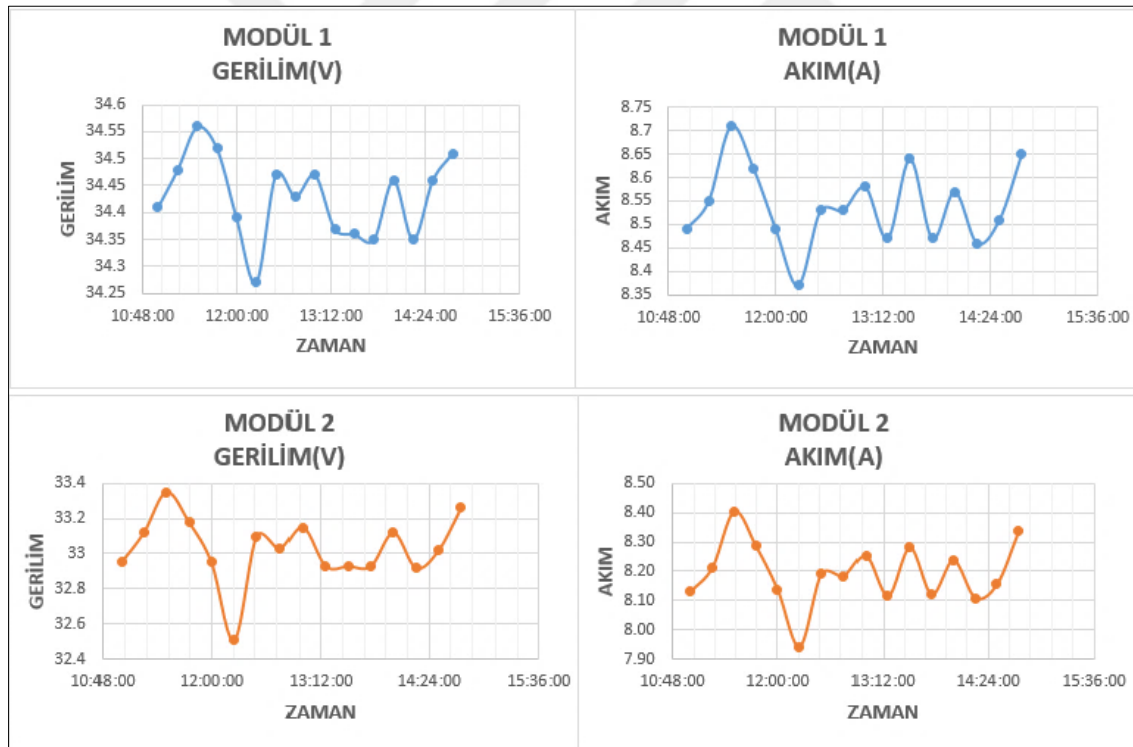


Şekil 4.11. 3 günlük ortalama radyasyon ve çevre sıcaklığı grafiği



Şekil 4.12. 9 Temmuz 2021 gerilim ve akım grafiği

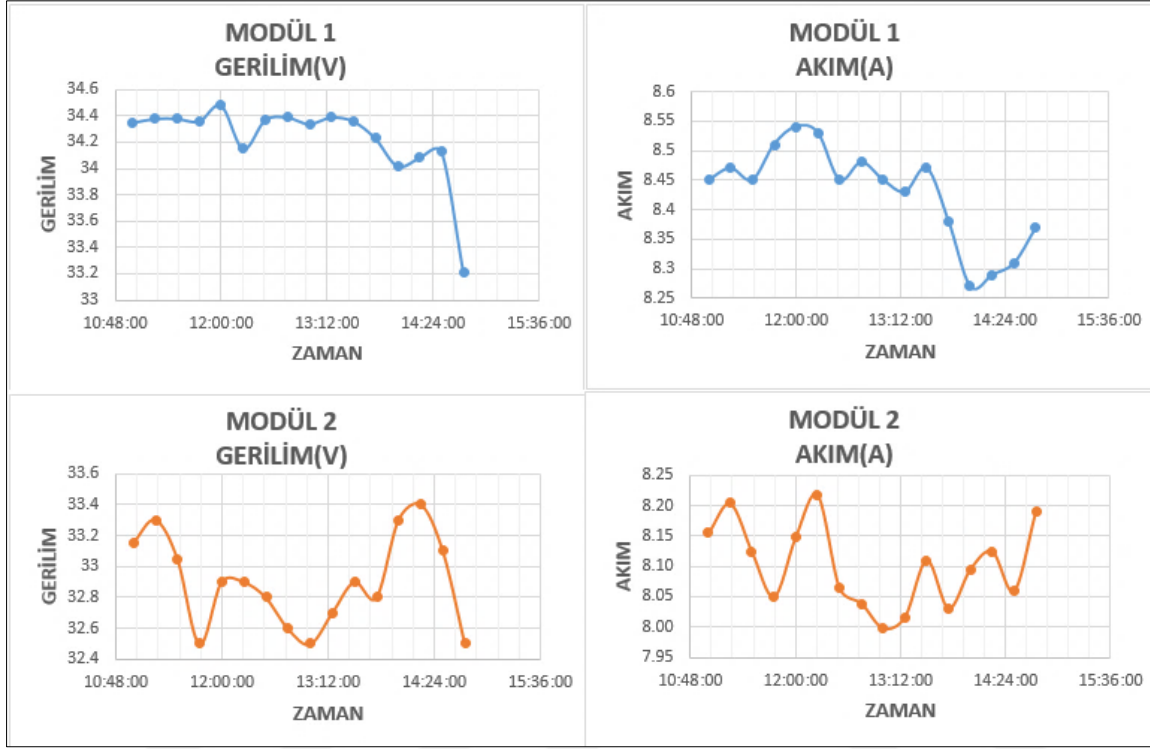
Deneyin birinci günü, aynı özelliklerde iki fotovoltaik panelin, gerilim ve akım değerleri eş zamanlı olarak ölçülmüştür. Elde edilen verilerin grafik üzerinde incelenmesi sonucu Modül 1’den ölçülen gerilim ve akım değerleri ile Modül 2’den ölçülen gerilim ve akım değerleri paralel bir şekilde akış sürdürmüştür. Anlık radyasyon değişimi, çevre sıcaklığı değişimi, bulutlanma ve rüzgârın etkisinin her iki panel üzerinde etkilerinin aynı olduğu gözlemlenmiştir. Soğutulan Modül 1 tasarımının soğutulmayan Modül 2’ye göre verimli olduğu gözlemlenmiştir. Modül 1’den ölçülen gerilim ve akım değerleri Modül 2’ye kıyasla daha yüksek çıkmıştır. 9 Temmuz tarihinde Modül 1’den elde edilen maksimum gerilim değeri ve akım değeri sırasıyla, 34,58 V ve 8,81 A ile saat 11.45 zaman diliminde ölçülmüştür. Modül 2’den elde edilen maksimum gerilim değeri saat 11.45 zaman dilinde olup 33.58 V ölçülmüşken akım değeri ise saat 14.45 zaman diliminde 8.59 A olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.13. 10 Temmuz 2021 gerilim ve akım grafiği

Deneyin ikinci günü yani 10 Temmuz 2021 tarihinde elde edilen veriler incelendiğinde ise panellerin yine paralel bir şekilde elektrik enerjisi ürettiği gözlemlenmiştir. İkinci gün verileri detaylı incelendiğinde ise Modül 1’den ölçülen maksimum gerilim değeri ve akım değeri sırasıyla, 34,56 V ve 8,71 A olarak saat 11.30 zaman diliminde ölçülmüştür. Modül

2'den ölçülen maksimum gerilim değeri ve akım değeri ise sırasıyla, 33,35 V ve 8.41 A olarak saat 11.30 zaman diliminde ölçülmüştür.



Şekil 4.14. 11 Temmuz 2021 gerilim ve akım grafiği

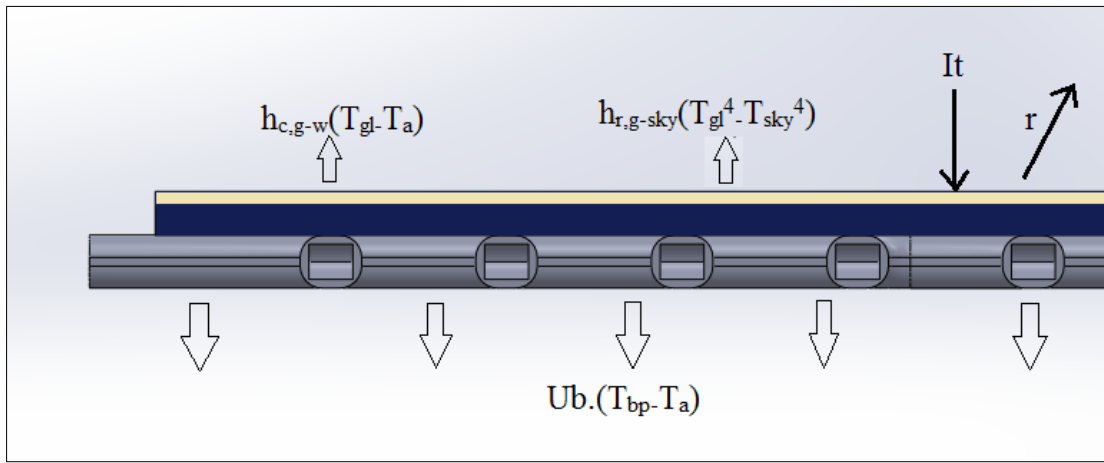
Deneyin üçüncü ve son günü olan 11 Temmuz 2021 tarihinde alınan verilerin grafik üzerinde incelenmesi sonucu önceki günlerde olduğu gibi yine paralellik görülmektedir. Ancak Modül 1'deki veri akışı daha az iniş ve çıkışlara sahip iken Modül 2'de iniş ve çıkışlar daha keskin olarak gözlemlenmektedir. Bu durumun sebebi ölçümler sırasında rüzgârın şiddetinin ve yönünün çok sık değişmesi olarak tespit edilmiştir. Tablodan da görüleceği üzere 11 Temmuz 2021 tarihinde Modül 1'den ölçülen maksimum gerilim ve akım değerleri sırasıyla, 34,48 V ve 8,54 A ile saat 12.00 zaman diliminde ölçülmüştür. Modül 2'den ölçülen maksimum gerilim ve akım değeri ise sırasıyla, 33,3 V ve 8.20 A olarak saat 11.15 zaman diliminde ölçülmüştür.

4.4. Matematiksel Modelleme

Bu bölümde, Modül 1 ve Modül 2'nin elektriksel, termal ve toplam verimleri teorik olarak incelenmiştir.

4.4.1. Modül 1'e ait termal hesaplamalar

Modül-1 ısı kayıp ve kazançları, Şekil 4.15'da şema olarak gösterilmiştir [53].



Şekil 4.15. Modül 1 ısı kayıp şeması

Burada cam yüzeyden çevreye radyasyonla ısı kaybı Denklem 1'de verilmiştir [53].

$$h_{r,sky} (T_{gl}^4 - T_{sky}^4) \quad (1)$$

Cam yüzeyden çevre havasına konveksiyon ile ısı kaybı Denklem 2'de verilmiştir[53].

$$h_{c,g-w} (T_{gl} - T_a) \quad (2)$$

Modülün gövdesinden çevre havasına ısı kaybı ise Denklem 3'de verilmiştir [53] .

$$U_b(T_{bp} - T_a) \quad (3)$$

$$h_{r,sky} = \frac{\sigma}{\left(\left(\frac{1}{\epsilon_2} \right) + \left(\frac{1}{\epsilon_{sky}} \right) - 1 \right)} \quad (4)$$

$$h_{c,g-w} = h_w = 5,7 + 3,8 V_{wind} \text{ (Mc Adams formülasyonuna göre)} \quad (5)$$

$$\epsilon_2 = 0.85$$

$$\epsilon_{sky} = 0,741 + 0,0062 T_{bp} \quad (6)$$

T_{bp} =Çiğ noktası sıcaklığı

$$T_{sky} = 0,0552T_a^{1.5} \quad (7)$$

Modül ön yüzeyinden ısı kaybı:

$$h_{r,gl-sky}(T_{gl}^4 - T_{sky}^4) + h_{c,gl-w}(T_{gl} - T_a) \quad (8)$$

Modülün arka yüzeyinden olan ısı kaybı [63]:

$$U_b(T_{bp} - T_a) \quad (9)$$

Toplam ısı kaybı= Modül ön yüz ısı kaybı + Modül arka yüzey ısı kaybı

Toplam Isı kazancı:

$$Q = m * cp * (T_o - T_i) \quad (10)$$

4.4.2. Elektriksel, termal ve toplam güçlerin ve verimin incelenmesi

$$\text{Elektriksel güç: } I_{sc}V_{ov} \quad (11)$$

$$\text{Modül 1 Termal Güç: } P_{th-m1} = \dot{m}_{water}Cp_{(water)}(T_o - T_i) \quad (12)$$

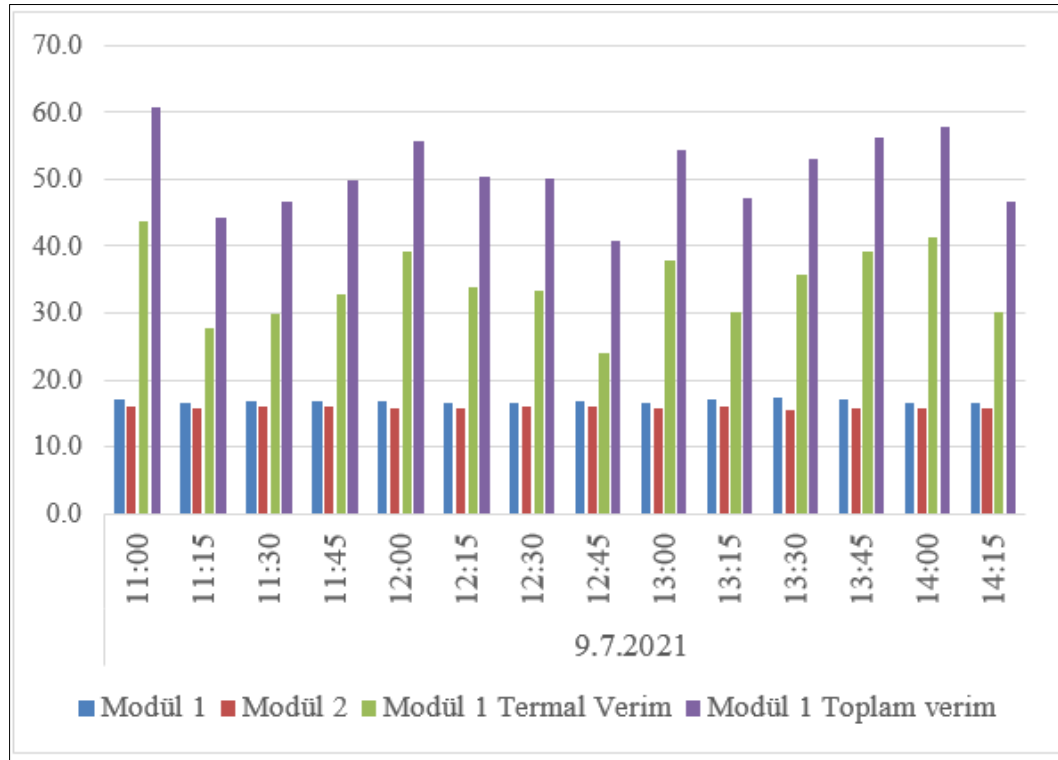
$$\text{Modül 1 Toplam Güç: } P_{tot-m1} = (I_{sc}V_{ov}) + (\dot{m}_{water}Cp_{(water)}(T_o - T_i)) \quad (13)$$

$$\text{Toplam Işınım: } I_{total} = I_t.A \quad (14)$$

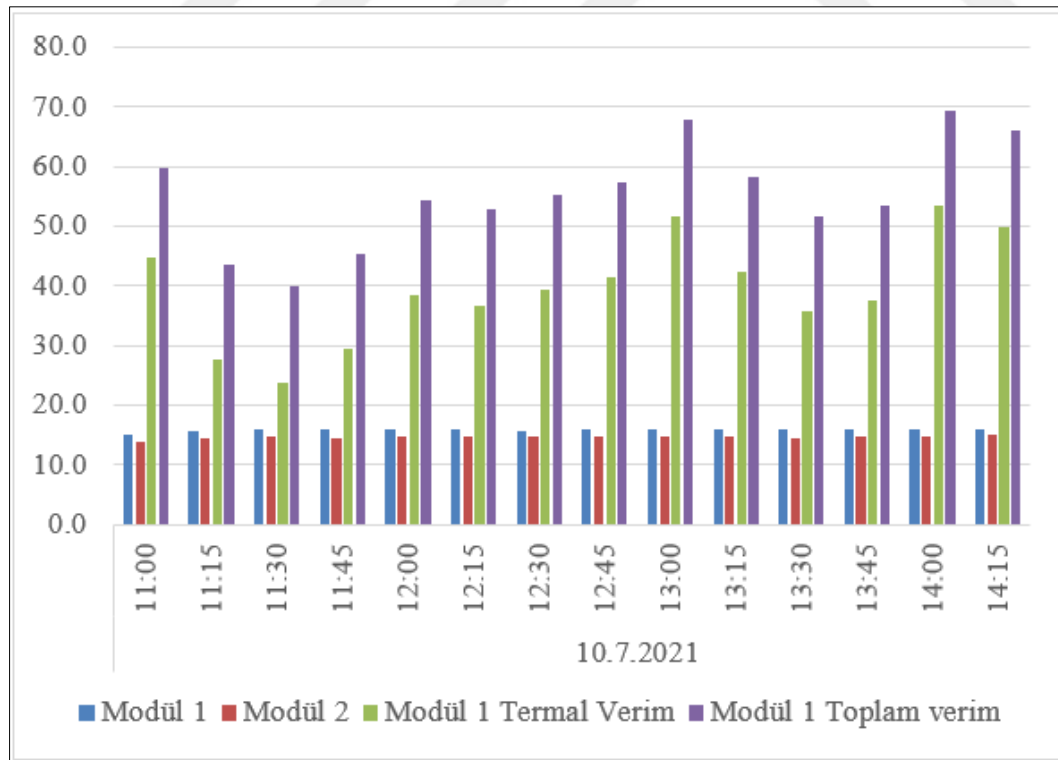
$$\text{Elektriksel Verim : } \mu_e = \frac{I_{sc} \times V_{oc}}{I_t \times A} \quad (15)$$

$$\text{Modül 1 Termal Verim : } \mu_{th-m1} = \frac{\dot{m}(water) \times Cp(water) \times (T_o - T_i)}{I_t \times A} \quad (16)$$

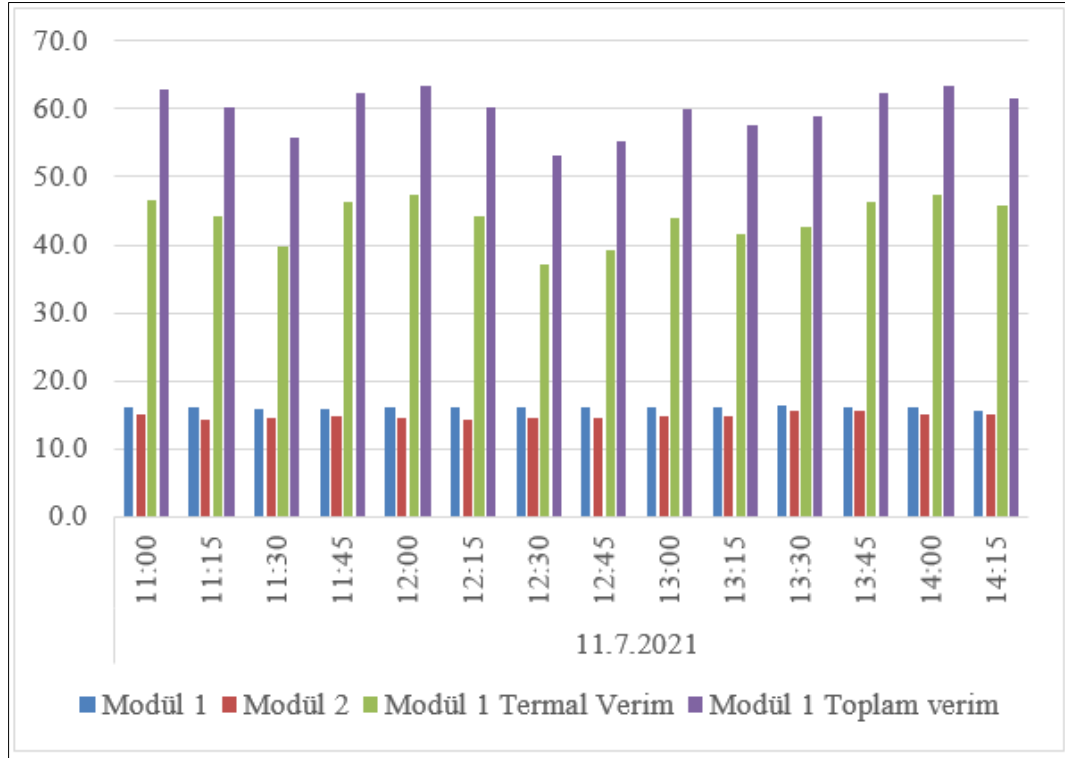
$$\text{Modül 1 Toplam Verim : } \mu_{tot-m1} = \frac{\dot{m}(water) \times Cp(water) \times (T_o - T_i) + (I \times V)}{I_t \times A} \quad (17)$$



Şekil 4.16. 9 Temmuz 2021 verimlilik grafiği



Şekil 4.17. 10 Temmuz 2021 verimlilik grafiği



Şekil 4.18. 11 Temmuz 2021 verimlilik grafiği

4.5. Deney Verileri ile Örnek Çalışma

Ankara ilimizde 4 kişilik bir ailenin tüm enerji ihtiyaçlarını karşılamak için çatı tipi PV sistemi ve hibrit PV/T güneş kolektör sistemi kullanımı arasında kıyaslama yapılmıştır.

Aile, çatı tipi PV sistemi kullanımı durumunda, kullanım sıcak suyunu elektrikli ısıtıcı tarafından karşılayacaktır. Hibrit PV/T güneş kolektörü kullanımında ise elektrikli ısıtıcı devre dışı bırakılacaktır.

Hesaplamalarda kullanılan değerler deneysel çalışma verilerimizden elde edilmiştir. PV modül genel verim kaybı %14 olarak gerçekleşirken, deneysel çalışmamız verilerine bağlı olarak PV/T modül verim kaybı ise %12,7 olarak gerçekleşmektedir.

Kıyaslama yapılırken 3 farklı sorunun cevabı aranmıştır;

- 1) Aile tüm ihtiyaçlarını şehir şebeke bağlantısı ile karşılarsa,
- 2) Aile tüm ihtiyaçlarını PV modül ile karşılarsa,

3) Aile tüm ihtiyaçlarını Hibrit PV/T modül ile karşılar,sa,

4 kişilik bir ailenin günlük temel elektrik ihtiyaç değeri 10,09 kWh olarak hesaplanmıştır. Ailenin günlük kullanım sıcak su ihtiyacı ise toplam 200 litre olarak belirlenmiştir. Elektrikli su ısıtıcısının su sıcaklığını 40°C'ye kadar ısıtılması için günlük 4,2 kWh enerji ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

1) Aile ihtiyacını şehir şebekesi ile karşılanırsa;

- Aylık 302,91 kWh toplam enerji tüketimi olacaktır. 1 kWh ücreti 0,79 TL olarak hesap edilirse aylık 239,3 TL elektrik faturası ödemesi yapılacaktır. Elektrikli su ısıtıcısının günlük enerji tüketimi 4,2 kWh olacaktır.

2) Aile bu ihtiyacını şebekeye bağlı çatı tipi fotovoltaik sistem ile karşılar,sa;

- 28 adet 370 Watt Monokristal PV modül kullanarak, 6 saatlik ortalama güneşlenme süresi ile günlük 62,16 kWh enerji üretimi gerçekleşir ancak sistemde oluşacak kayıplardan (%14) dolayı ortalama 53,45 kWh enerji üretimi gerçekleştirecektir.
- Günlük enerji ihtiyacı günlük üretilen toplam enerjiden çıkarıldığında aile fazladan üretilen 43,3 kWh'lik toplam enerjiyi elektrik firmasına 1 kWh başına 0,32 TL ile satışını gerçekleştirecektir. Bu durumda aile aylık 239,3 TL'lik elektrik ihtiyacını PV modülden sağlayacak ve ek olarak ürettiği fazla enerji sebebi ile aylık 415,68 TL ek gelir elde edecektir.
- 28 adet PV modül kurulum ücreti 72 000 TL civarında ve sistem ömrünün 25 yıl olduğu düşünülürse sistem yatırımının amorti süresi ise 9,2 yıl olacaktır.

3) Aile tüm ihtiyaçlarını Hibrit PV/T modül ile karşılar,sa;

- Aile PV/T sistem kullanacağı için elektrikli ısıtıcı yükü ortadan kalkacaktır. Bu durumda ailenin günlük toplam enerji ihtiyacı 5,8 kWh olarak gerçekleşecektir.
- Ailenin günlük enerji tüketim değeri düştüğü için modül sayısında da düşüş olacaktır.16 adet PV/T modülü tercih edilmiştir.
- Bu durumda aylık 176,91 kWh toplam enerji tüketimi olacaktır. 1 kWh ücreti 0,79 TL olarak hesap edilirse aylık 139,76 TL elektrik faturası ödemesi yapılacaktır.
- PV/T modül, ailenin günlük ihtiyacını sağladıktan sonra fazla üretilen enerji şebekeye gönderilecektir. Bu durumda günlük enerji ihtiyacı günlük üretilen toplam

enerjiden çıkarıldığında aile fazladan üretilen 30,9 kWh'lik toplam enerjiyi elektrik firmasına, 1 kWh başına 0,32 TL ile satışını gerçekleştirecektir. Böylece aile aylık 296,5 TL ek gelir elde edecektir.

- 16 adet PV/T modül tasarımı maliyeti 45 000 TL olarak hesaplanmıştır. Sistem ömrünün 30 yıl olduğu düşünülürse sistem yatırımının amorti süresi ise 8,6 yıl olacaktır.

4.5.1. Karbon ayak izi hesaplaması

Elektrik enerjisinden kaynaklı karbondioksit emisyonun hesaplanmasında IPCC karbondioksit emisyonu faktörü olan 0,584 ton / mWh [55] değeri kullanılır.

Elektrik tüketiminden kaynaklı CO₂ Emisyon Miktarı:

- Yıllık Elektrik Tüketimi (mWh) x Emisyon Faktörü (ton/mWh)

Bu durumda 4 kişilik ailemiz için;

- 1. durum için yıllık 3635 kWh elektrik kullanacaktır. Toplam 1,564 ton CO₂ emisyonu gerçekleşecektir.
- 2. durum için yıllık 2871 kWh elektrik kullanacaktır. Toplam 1,236 ton CO₂ emisyonu gerçekleşecektir.
- 3. durum için yıllık 2122 kWh elektrik kullanacaktır. Toplam 0,91 ton CO₂ emisyonu gerçekleşecektir.

Aile PV sistem kullanımı ile karbondioksit emisyonunda %20,9'luk bir düşüş gerçekleştirirken, PV/T güneş kolektörü kullanımıyla karbondioksit emisyonunda %41,82 düşüş gerçekleştirecektir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Modül 1 ve Modül 2 karşılaştırıldığında, elektrik verimi bakımından Modül 1'in daha verimli çalıştığı gözlemlenmektedir. PV/T sistemi olarak tasarlanan Modül 1, elektriksel verime ek olarak panel yüzeyinden çekilen ısı ile sisteme termal enerji de sağladığı için sistem verimi Modül 2'ye göre çok daha fazla çıkmaktadır.

Çalışma sonuçlarına göre, soğutma işlemi yapılmayan PV panel (Modül 2) genel verimi maksimum 16,13 % olarak gerçekleşmiştir. Soğutma işleminin yapıldığı PV/T sistemi (Modül 1) toplam verimi (elektrik + termal verim) maksimum 69,38% olarak gerçekleşmiştir. Soğutulan PV panelin elektrik verimi ise maksimum 17,57% olarak gerçekleşmiştir.

Güneş enerjisine dayalı sistemlerin endüstriyel olarak birçok örneği bulunmaktadır. Fakat elektriksel-termal (PV/T) hibrit sistemlerinin kullanımı ve üretimi sınırlı olduğu görülmektedir. PV/T modüllerin kullanılması, standart PV panellerin yerine elektriksel verim ve toplam verim (elektrik + termal verim) açısından daha avantajlıdır. PV/T sistemlerin alan kullanımı, geleneksel PV sistemleri ve termal kolektörlerle karşılaştırıldığında daha düşüktür. PV/T toplayıcılarla kaplı bir alan, genellikle geleneksel PV sistemleri veya geleneksel termal toplayıcılarla kaplı bir alandan ayrı olarak daha fazla elektrik ve ısı sağlayabilir. Çatı alanı sınırlı olduğunda, özellikle faydalıdır ve ayrı fotovoltaiik ve termal sistemlerle karşılaştırıldığında, PV/T kolektörleri çatılarda mimari bütünlüğü koruyabilir.

PV performansını iyileştirmek için birçok hibrit fotovoltaiik-termal (PV/T) toplayıcı tasarımı önerilmiştir. Yapılan diğer çalışmalar incelendiğinde, termal emici ve PV modülü arasında iyi bir termal temas ile daha iyi elektrik verimliliği ve termal verimlilik elde edilebileceği gözlemlenmiştir.

Yaptığımız deneysel çalışma sonucunda, elde edilen verilerin ışığında, soğutucu serpantin tasarımı, soğutucu akışkanın sisteme giriş hızı ve çevre hava şartları gibi faktörler verimliliği etkileyen başlıca etkenlerdendir. Soğutucu serpantin, akışkanın düzenli ve eşit olarak akışını

sağlamalıdır. Soğutucu akışkanın boru içindeki akışının düzenli ve eşit bir şekilde olmasını sağlayacak tasarımlar tercih edilmelidir.



KAYNAKLAR

1. Jia, Y., Alva, G. and Fang, G. (2019). Development and applications of photovoltaic-thermal systems: A review. *Renewable Sustain Energy Review*, 102, 249–265.
2. Segal, A., Epstein, M. and Yogev, A. (2014). Hybrid concentrated photovoltaic and thermal power conversion at different spectral bands. *Solar Energy*, 76(5), 591–601.
3. Zondag, H., Vries, D., Helden, W. J., Zolingen, R. J. and Steenhoven, A. (2003). The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy*, 74(3), 253–269.
4. Buonomano, A., Calise, F., Dentice d'Accadia, M. and Vanoli, L. (2013). A novel solar trigeneration system based on concentrating photovoltaic/thermal collectors. Part 1: Design and simulation model. *Energy*, 61(1), 59–71.
5. Erdil, E., Ilkan, M. and Egelioglu, F. (2008). An experimental study on energy generation with a photovoltaic (PV)-solar thermal hybrid system. *Energy*, 33(8), 1241–1245.
6. Ju, X. (2017). A review of concentrated photovoltaic-thermal (CPVT) hybrid solar systems with waste heat recovery (WHR). *Science Bulletin*, 62(20), 1388–1426.
7. Ibrahim, A., Othman, M., Ruslan, M., Mat, S. and Sopian, K. (2011). Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors. *Renewable Sustain Energy Review*, 15(1), 352–365.
8. Sobhnamayan, F., Sarhaddi, F., Alavi, M., Farahat, S., and Yazdanpanahi, J. (2014). Optimization of a solar photovoltaic thermal (PV/T) water collector based on exergy concept. *Renewable Energy*, 68, 356–365.
9. Kim, S. and Kim, J. (2019). Experimental study on the thermal and electrical characteristics of an air-based photovoltaic thermal collector. *Energies*, 12(14), 2-14.
10. Saygin, H., Nowzari, R., Mirzaei, N. and Aldabbagh, L. B. (2017). Performance evaluation of a modified PV/T solar collector: A case study in design and analysis of experiment. *Solar Energy*, 141, 210–221.
11. Ahn, J. and Kim, J. (2015). A study on experimental performance of air-type PV/T collector with HRV. *Energy Procedia*, 78, 3007–3012.
12. Kabul, A. ve Duran F. (2014). Isparta İlinde Fotovoltaik/Termal (Pv/T Hibrit Sistemin Performans Analizi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Uluslararası Teknoloji Bilim Dergisi*, 6(1), 31–43.

13. Al-Waeli, A., Sopian, K., Kazem, H. and Chaichan, M. (2020). Evaluation of the electrical performance of a photovoltaic thermal system using nano-enhanced paraffin and nanofluids. *Case Study Thermal Engineering*, 21(6), 1-8.
14. Mojumder, J., Chong, W., Ong, H., Leong, K. and Abdullah-Al-Mamoon. (2016). An experimental investigation on performance analysis of air type photovoltaic thermal collector system integrated with cooling fins design. *Energy Building*, 130, 272–285.
15. Dubey, S., Sarvaiya, J. and Seshadri, B. (2013). Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world - A review. *Energy Procedia*, 33(11), 311–321.
16. Othman, M., Ibrahim, A., Jin, G., Ruslan, M. and Sopian, K. (2013). Photovoltaic-thermal (PV/T) technology - The future energy technology. *Renewable Energy*, 49, 171–174.
17. Wu, S., Zhang, Q., Xiao, L. and Guo, F. (2011). A heat pipe photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid system and its performance evaluation. *Energy Building*, 43(12), 3558–3567.
18. Huo, Y., Lv, J., Li, X., Fang, L., Ma, X. and Shi, Q. (2019). Experimental study on the tube plate PV/T system with iron filings filled. *Solar Energy*, 185(6), 189–198.
19. Chow, T. (2010). A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Application Energy*, 87(2), 365–379.
20. Calise, F., Dentice d'Accadia, M., Palombo, A. and Vanoli, L. (2013). Dynamic simulation of a novel high-temperature solar trigeneration system based on concentrating photovoltaic/thermal collectors. *Energy*, 61, 72–86.
21. Bergene, T. and Løvvik, O. M. (1995). Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells. *Solar Energy*, 55(6), 453–462.
22. Singh, D. B. and Tiwari, G. N. (2017). Performance analysis of basin type solar stills integrated with N identical photovoltaic thermal (PVT) compound parabolic concentrator (CPC) collectors: A comparative study. *Solar Energy*, 142, 144–158.
23. Joshi, S. S., Dhoble, A. S., Sathe, T. and Mangrulkar, C. (2018). Performance Analysis of Photovoltaic Thermal System Using Silicone Oil Spectrum Filter. *Application Solar Energy*, 54(1), 4–9.
24. Vorobiev, Y., González-Hernández, J., Vorobiev, P. and Bulat, L. (2006). Thermal-photovoltaic solar hybrid system for efficient solar energy conversion. *Solar Energy*, 80(2), 170–176.

25. Zhu, W., Deng, Y., Wang, Y., Shen, S. and Gulfam, R. (2016). High-performance photovoltaic-thermoelectric hybrid power generation system with optimized thermal management. *Energy*, 100, 91–101.
26. Joshi, S. and Dhoble, S. (2017). Photovoltaic -Thermal systems (PVT): Technology review and future trends. *Renewable Sustainable Energy Review*, 92(7), 848–882.
27. Daghighi, R., Ruslan, M. H. and Sopian, K. (2011). Advances in liquid based photovoltaic/thermal (PV/T) collectors. *Renewable Sustainable Energy Review*, 15(8), 4156–4170.
28. Zondag, H. A. (2008). Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. *Renewable Sustainable Energy Review*, 12(4), 891–959.
29. Ooshaksaraei, P., Sopian, K., Zaidi, S. H. and Zulkifli, R. (2017). Performance of four air-based photovoltaic thermal collectors configurations with bifacial solar cell. *Renewable Energy*, 102, 279–293.
30. Kroiß, A., Pröbst, A., Hamberger, S., Spinnler, M., Tripanagnostopoulos Y. and Sattelmayer S. (2014). Development of a seawater-proof hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector. *Energy Procedia*, 52, 93–103.
31. Herrando, M., Markides, C. N. and Hellgardt, K. (2014). A UK-based assessment of hybrid PV and solar-thermal systems for domestic heating and power: System performance. *Application Energy*, 122, 288–309.
32. Bakker, M., Zondag, H. A., Elswijk, M. J., Strootman, J. and Jong, M. J. (2005). Performance and costs of a roof-sized PV/thermal array combined with a ground coupled heat pump. *Solar Energy*, 78(2), 331–339.
33. Su, D., Jia, Y., Lin, Y. and Fang, G. (2017). Maximizing the energy output of a photovoltaic–thermal solar collector incorporating phase change materials. *Energy Building*, 153, 382–391.
34. Slimani, M. E. A., Amirat, M., Kurucz, I., Bahria, S., Hamidat, A. and Chaouch, W. A. (2017). A detailed thermal-electrical model of three photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid air collectors and photovoltaic (PV) module: Comparative study under Algiers climatic conditions. *Energy Conversion Management*, 133, 458–476.
35. Farshchimonfared, M., Bilbao, J. I. and Sproul, A. B. (2015). Channel depth, air mass flow rate and air distribution duct diameter optimization of photovoltaic thermal (PV/T) air collectors linked to residential buildings. *Renewable Energy*, 76, 27–35.
36. Shahsavari, A. and Ameri, M. (2010). Experimental investigation and modeling of a direct-coupled PV/T air collector. *Solar Energy*, 84(11), 1938–1958.

37. Mojiri, A., Taylor, R., Thomsen, E. and Rosengarten, G. (2013). Spectral beam splitting for efficient conversion of solar energy - A review. *Renewable Sustainable Energy Review*, 28, 654–663.
38. Farshchimonfared, M., Bilbao, J. I. and Sproul, A. B. (2016). Full optimisation and sensitivity analysis of a photovoltaic–thermal (PV/T) air system linked to a typical residential building. *Solar Energy*, 136, 15–22.
39. Singh, S., Agarwal, S., Tiwari, G. N. and Chauhan, D. (2015). Application of genetic algorithm with multi-objective function to improve the efficiency of glazed photovoltaic thermal system for New Delhi (India) climatic condition. *Solar Energy*, 117, 153–166.
40. Agrawal, S. and Tiwari, G. N. (2015). Performance analysis in terms of carbon credit earned on annualized uniform cost of glazed hybrid photovoltaic thermal air collector. *Solar Energy*, 115(2015), 329–340.
41. Agrawal, B. and Tiwari, G. N. (2010). Optimizing the energy and exergy of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems under cold climatic conditions. *Application Energy*, 87(2), 417–426.
42. Shan, F., Tang, F., Cao, L., and Fang G. (2014). Comparative simulation analyses on dynamic performances of photovoltaic-thermal solar collectors with different configurations. *Energy Conversation Management*, 87, 778–786.
43. Charalambous, P. G., Maidment, G. G., Kalogirou, S. A. and Yiakoumetti, K. (2007). Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review. *Application Thermal Engineer*, 27(2-3), 275–286.
44. Liu, L., Jia, Y., Lin, Y., Alva, G. and Fang, G. (2017). Numerical study of a novel miniature compound parabolic concentrating photovoltaic/thermal collector with microencapsulated phase change slurry. *Energy Conversation Management*, 153(1), 106–114.
45. Mohsenzadeh, M. and Hosseini, R. (2015). A photovoltaic/thermal system with a combination of a booster diffuse reflector and vacuum tube for generation of electricity and hot water production. *Renewable Energy*, 78, 245–252.
46. Calnan, S. (2014). Applications of oxide coatings in photovoltaic devices. *Coatings*, 4(1), 162–202.
47. Rosell, J. I., Vallverdú, X., Lechón, M. A. and Ibáñez, M. (2005). Design and simulation of a low concentrating photovoltaic/thermal system. *Energy Conversation Management*, 46(18-19), 3034–3046.

48. Coventry, J. S. (2005). Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector. *Solar Energy*, 78(2), 211–222.
49. Bernardo, L. R., Perers, B., Håkansson, H. and Karlsson, B. (2011). Performance evaluation of low concentrating photovoltaic/thermal systems: A case study from Sweden. *Solar Energy*, 85(7), 1499–1510.
50. Helmers, H. and Kramer, K. (2013). Multi-linear performance model for hybrid (C)PVT solar collectors. *Solar Energy*, 92, 313–322.
51. Royne, A., Dey, C. J. and Mills, D. R. (2005). Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: A critical review. *Solar Energy Material Solar Cells*, 86(4), 451–483.
52. Chemisana, D. and Rosell, J. I. (2011). Design and optical performance of a nonimaging Fresnel transmissive concentrator for building integration applications. *Energy Conversion Management*, 52(10), 3241–3248.
53. Soto, W., Klein, S. A, and. Beckman, W. A. (2006). Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. *Solar Energy*, 80(1), 78–88.





GAZİ GELECEKTİR..