
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

EŞİT ELEKTRİK ÜRETİM GÜCÜNE SAHİP PV – PV/T GÜNEŞ PANELLERİNİN PERFORMANSININ SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

İlker İLASLANER

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞUBAT 2026

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmasında 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.

İlker İLASLANER

02/02/2026

EŞİT ELEKTRİK ÜRETİM GÜCÜNE SAHİP PV – PV/T GÜNEŞ PANELLERİNİN PERFORMANSININ SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

İlker İLASLANER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2026

ÖZET

Bu tez çalışması Türkiye'de elektrik üretimi için birincil kaynak tipi olarak kullanılan yerli ve yenilenebilir fotovoltaik (PV) panellerde verim artışını en yüksek seviyede sağlayabilmek için yapılmıştır. Türkiye'de 2010 yılından önce sahadaki hiçbir uygulamada güneş enerjisinden elektrik üretimi yapılmazken günümüzde ise üretim artışı hız kesemeden devam etmektedir, ayrıca birincil elektrik üretim kaynak tipine ilişkin verimlilik hususu giderek önemini artırmaktadır. 2024 yılı sonu itibari ile güneş enerjisine dayalı kurulu güç miktarı 20,23 GW'ı yakalayıp toplam kurulu güç içerisindeki payı %17,40 seviyesine ulaşmıştır. Isı aktarımının da verimlilik açısından önem arz etmesinden kaynaklı olarak güneş paneline uygulanabilir düzeyde soğutucu yapının tasarımı yapılarak tüm deneylerde panel yüzeyine temaslı halde kullanımı sağlanmıştır. Eşit güçteki iki PV panelden birine tasarlanan soğutucu düzenek uygulanarak diğeri ile birlikte aynı ortamda çalıştırılması neticesinde veriler toplanmış olup elde edilen veriler çerçevesinde analizler sonucu verimlilik hesapları yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda birinci faz deney çalışmasında soğutucu akışkanın su olduğu sistemde elektriksel verimin PV panelde %6,49 olduğu fotovoltaik termal (PV/T) panelde ise %8,28 olduğu ayrıca termal verimin de %36,48 olduğu tespiti yapılmıştır. İkinci faz deney çalışması ise kütlece %0,50 oranında mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$) ve saf su ile elde edilen karışım olan soğutucu nanoakışkan ile yapılmıştır. Nanoakışkan ile elektriksel verimin PV panelde %7,39 olduğu, PV/T panelde ise %11,50 olduğu bununla birlikte termal verimin de %70,43 olduğu tespiti yapılmıştır. Tasarımı gerçekleştirilmiş olan soğutucu akışkan dolaşımının sağlandığı bakır boru düzeneğinde akışkan debisinin artışı verimlilik değerleri üzerinde yükseliş yönünde olumlu etki oluşturduğu tespiti yapılmıştır. Belirlenen bu verimlilik artışının karbon emisyon değerleri açısından emisyonu azaltıcı yönünde olumlu bir katkı sağlayabileceği tespitinde bulunulmuştur.

Bilim Kodu	:	92802
Anahtar Kelimeler	:	Pv, pv/t, güneş enerjisi, nanoakışkan, güneş panellerinin performansının sayısal ve deneysel incelenmesi
Sayfa Adedi	:	99
Danışman	:	Prof. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF PV - PV/T SOLAR PANELS WITH EQUAL ELECTRICITY GENERATION POWER

(Ph. D. Thesis)

İlker İLASLANER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2026

ABSTRACT

This thesis study was conducted in order to provide the highest level of efficiency increase in domestic and renewable photovoltaic (PV) panels used as the primary source type for electricity production in Turkey. While there was no electricity generation from solar energy in any application in the field in Turkey before 2010, today the production increase continues without slowing down, and the efficiency issue regarding the primary electricity generation resource type is gradually increasing its importance. As of the end of 2024, the amount of installed capacity based on solar energy reached 20.23 GW and its share in the total installed capacity reached 17.40%. Due to the importance of heat transfer in terms of efficiency, the design of the cooling structure applicable to the solar panel was made and its use was ensured in contact with the panel surface in all experiments. As a result of applying the designed cooling device to one of the two PV panels with equal power and operating in the same environment with the other, data were collected and efficiency calculations were made by performing analyzes within the framework of the obtained data. As a result of the analyzes, in the first phase test study, it was determined that the electrical efficiency was 6.49% in the PV panel and 8.28% in the photovoltaic thermal (PV/T) panel in the system where the refrigerant was water, and the thermal efficiency was 36.48%. The second stage of the experimental study was carried out with nanofluids, which are mixtures obtained by combining 0.50% with mass of manganese iron oxide ($MnFe_2O_4$) and distilled water. It was determined that the electrical efficiency with nanofluid was 7.39% in the PV panel and 11.50% in the PV/T panel, while the thermal efficiency was 70.43%. It has been determined that the increase in the fluid flow rate in the copper pipe assembly where the designed refrigerant circulation is provided has a positive effect on the efficiency values. It has been determined that this identified efficiency increase can make a positive contribution to reducing emissions in terms of carbon emission values.

Science Code	:	92802
Key Words	:	Pv, pv/t, solar energy, nanofluid, numerical and experimental investigation of performance of solar panels
Page Number	:	99
Supervisor	:	Prof. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübesi ile tüm desteklerini esirgemeden yardımcı olup anlayış gösteren danışman hocam Prof. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ'ye teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Deneysel faaliyetlerimde ve diğer tüm teknik konularda desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. Ata HANLAR'a tüm destekleri için teşekkür ederim.

Hayata atılmam için katkılarını esirgemeyen, akademik çalışmalara yönelmemi sağlayan ve her türlü imkânı sunmaktan çekinmeyen kıymetli babam Kemal İLASLANER ve annem Zümrüt İLASLANER'e teşekkürü borç bilirim. Çalışmalarımda kendine de vakit ayırmayı ihmal etmediğim, kalemlerini bana kullandıran değerli oğlum İlter İLASLANER'e de teşekkür ederim.

Hazırlamış olduğum bu doktora tezi için tasarlanan deney setinin kurulumuna gerekli olan malzemeler Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeler Birimi FDK-2023-8360 kodlu doktora BAP projesi desteğiyle sağlanmıştır. Tasarlanan deney setinin kurulumu ve deneylerin yapılışı, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü Atölye ve Laboratuvar imkânları ile de desteklenmiş olup teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 5

3. GÜNEŞ ENERJİSİ VE SİSTEMLERİ 11

3.1. Güneş Enerjisi Isıl Uygulamaları ve Çeşitleri 11

3.1.1. Düşük sıcaklık uygulamaları 11

3.1.2. Orta sıcaklık uygulamaları 12

3.1.3. Yüksek sıcaklık uygulamaları 12

3.2. Güneş Enerjisi Elektrik Uygulamaları ve Çeşitleri 13

3.2.1. Fotovoltaik (PV) güneş panelleri 16

3.2.2. Fotovoltaik termal (PV/T) güneş panelleri 19

3.3. Türkiye Elektrik Kurulu Gücünde Fotovoltaik Kaynak Değişimi 22

4. NANOAKIŞKANLAR 25

4.1. Nanoakışkan Çeşitleri 25

4.2. Deneylerde Kullanılan Nanoparçacığın Özellikleri 26

4.3. Nanoakışkan Hazırlama Yöntemleri 28

Sayfa

5. TEORİK ANALİZ 33
5.1. Belirsizlik Analizi 33
6. MATERYAL VE METOD 35
6.1. Sayısal Analiz 35
6.1.1. CFD analizi 35
6.2. Deney Setinde Kullanılan Malzemelerin Teknik Özellikleri 40
6.3. Deneyi Seti Hazırlama Aşamaları 50
6.3.1. Nanoakışkanın hazırlanışı 50
6.3.2. Isı değiştirici elemanların tasarımı ve fotovoltaik (PV) panele montajı 51
6.4. Deneyin Yapılışı 57
7. BULGULAR VE TARTIŞMA 63
7.1. CFD Analiz Sonuçları 63
7.2. Deneysel Analiz Sonuçları 67
8. SONUÇ VE ÖNERİLER 89
8.1. Sonuçlar 89
8.2. Öneriler 92
KAYNAKLAR 93
ÖZGEÇMİŞ 99

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Kurulu gücün birincil kaynak tipine göre gelişimi 23

Çizelge 3.2. Elektrik üretiminin birincil kaynak tipine göre gelişimi 24

Çizelge 4.1. Nanoakışkanların listesi 25

Çizelge 5.1. Ölçüm cihazlarının tipleri, ölçüm aralıkları, hassasiyetleri ve belirsizlikleri.. 34

Çizelge 6.1. Termokupl ve klemens özellikleri 41

Çizelge 6.2. Kağıtsız kayıt cihazı özellikleri..... 42

Çizelge 6.3. PV panel teknik özellikleri..... 43

Çizelge 6.4. Jel akü teknik özellikleri 44

Çizelge 6.5. İnventer teknik özellikleri 45

Çizelge 6.6. Nanoparçacık teknik özellikleri 45

Çizelge 6.7. Triton X-100 teknik özellikleri 46

Çizelge 6.8. Isıtmalı manyetik karıştırıcı teknik özellikleri 47

Çizelge 6.9. Termal anemometre teknik özellikleri 47

Çizelge 6.10. Solarmetre teknik özellikleri..... 48

Çizelge 6.11. Pompa teknik özellikleri 49

Çizelge 6.12. Termal kamera teknik özellikleri 49

Çizelge 6.13. İlk faz deney çalışmasında kullanılan soğutucu akışkan ve debileri..... 57

Çizelge 6.14. İlk faz deney çalışmasında veri kayıt cihazına ait girişler 60

Çizelge 6.15. İkinci faz deney çalışmasında kullanılan soğutucu akışkan ve debileri.. 60

Çizelge 6.16. İkinci faz deney çalışmasında veri kayıt cihazına ait girişler..... 61

Çizelge 7.1. Tüm deneylere ait soğutucu akışkan ve debileri..... 67

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.1. PV/T'de sayısal olarak elde edilen ortalama çıkış suyu sıcaklığı..... 67

Şekil 7.2. Su ile yapılan deneylerde rüzgar hızı ve radyasyon 68

Şekil 7.3. Su deneylerinde hava sıcaklık değişimi..... 69

Şekil 7.4. Su deneylerinde PV ve PV/T sağ üst panel sıcaklık değişimleri..... 70

Şekil 7.5. Su deneylerinde PV ve PV/T panel arasındaki sıcaklık farkı..... 71

Şekil 7.6. Soğutma sıvısı çıkış ve giriş sıcaklık farkı 72

Şekil 7.7. Su deneyinde PV panel çıkış gücü..... 73

Şekil 7.8. Su deneyinde PV/T panel çıkış gücü 74

Şekil 7.9. Nanoakışkan ile yapılan deneylerde rüzgar hızı ve radyasyon..... 75

Şekil 7.10. Nanoakışkan deneylerinde hava sıcaklık değişimi 76

Şekil 7.11. Nanoakışkan deneylerinde PV ve PV/T sağ üst panel sıcaklık değişimleri . 77

Şekil 7.12. Nanoakışkan deneylerinde PV ve PV/T panel arasındaki sıcaklık farkı 77

Şekil 7.13. Soğutma sıvısı çıkış ve giriş sıcaklık farkı 78

Şekil 7.14. Panellere ait giriş akımları 79

Şekil 7.15. Nanoakışkan deneyinde PV/T panel çıkış gücü 80

Şekil 7.16. PV sistemde elektriksel verim 81

Şekil 7.17. PV sistemde ortalama elektriksel verim 82

Şekil 7.18. PV/T su ile yapılan deneyde elektriksel verim 82

Şekil 7.19. PV/T su ile yapılan deneyde ortalama elektriksel verim 83

Şekil 7.20. PV/T nanoakışkan ile yapılan deneyde elektriksel verim..... 84

Şekil 7.21. PV/T nanoakışkan ile yapılan deneyde ortalama elektriksel verim..... 84

Şekil 7.22. PV/T su ile yapılan deneyde termal verim 85

Şekil 7.23. PV/T su ile yapılan deneyde ortalama termal verim 86

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.24. PV/T nanoakışkan ile yapılan deneyde termal verim 86

Şekil 7.25. PV/T nanoakışkan ile yapılan deneyde ortalama termal verim 87

Şekil 8.1. PV/T çıkış gücünün su ve nanoakışkan deneylerindeki değişimi 91

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. Düşük sıcaklık uygulamaları 11

Resim 3.2. Orta sıcaklık uygulamaları 12

Resim 3.3. Yüksek sıcaklık uygulamaları 13

Resim 3.4. Silikon güneş hücre eşdeğer devresi 14

Resim 3.5. Silikon güneş hücre katmanları 15

Resim 3.6. Güneş panellerinin katmanları 15

Resim 3.7. Saydam güneş paneli 16

Resim 3.8. İnce film güneş paneli 17

Resim 3.9. Esnek güneş paneli 18

Resim 3.10. Polikristal güneş paneli 19

Resim 3.11. Fotovoltaik termal (PV/T) güneş paneli 20

Resim 3.12. Hava soğutmalı fotovoltaik termal (PV/T) güneş paneli 20

Resim 3.13. Sıvı soğutmalı fotovoltaik termal (PV/T) güneş paneli 21

Resim 3.14. Faz değişim malzemeli fotovoltaik termal (PV/T) güneş paneli 21

Resim 3.15. Isı borulu fotovoltaik termal (PV/T) güneş paneli 22

Resim 4.1. Manyetik spinel ferritin birim hücre yapısı 27

Resim 4.2. Mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$) 28

Resim 4.3. Tek adımlı nanoakışkan hazırlama yöntemi 29

Resim 4.4. İki adımlı nanoakışkan hazırlama yöntemi 30

Resim 4.5. TEM cihazının çalışması 31

Resim 4.6. SEM cihazının çalışması 31

Resim 6.1. Tasarlanan PV/T'nin yapısı ve sınır koşulları 36

Resim 6.2. Soğutma borularının büyütülmüş resimleri 37

Resim **Sayfa**

Resim 6.3. Elips şeklinde bakır borularla donatılmış PV/T'nin ağ görüntüsü 38

Resim 6.4. PV/T'de soğutucu akışkan çıkış sıcaklığı 38

Resim 6.5. Termokupl bağlantı klemensi..... 40

Resim 6.6. Klemens bağlantı şekli 41

Resim 6.7. Kağıtsız kayıt cihazı 42

Resim 6.8. Fotovoltaik (PV) paneller..... 43

Resim 6.9. Jel akü..... 44

Resim 6.10. Akıllı inverter..... 44

Resim 6.11. Nanoparçacık mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$)..... 45

Resim 6.12. Triton X-100 yüzey aktifleştirici 46

Resim 6.13. Isıtmalı, manyetik ve mekanik karıştırıcı..... 46

Resim 6.14. Termal anemometre..... 47

Resim 6.15. Solarmetre cihazı 48

Resim 6.16. Pompa ve bağlantısı..... 48

Resim 6.17. Termal kamera 49

Resim 6.18. Manyetik, mekanik karıştırıcı ve ısıtıcı..... 51

Resim 6.19. Fotovoltaik panel hücrelerinin yerleşimi ve miktarı 52

Resim 6.20. Bakır boru şekil değişikliği öncesi ve sonrası..... 53

Resim 6.21. Üst üçlü giriş ve çıkış bakır boru bağlantısı..... 54

Resim 6.22. Orta dörtlü giriş ve çıkış bakır boru bağlantısı 55

Resim 6.23. Alt üçlü giriş ve çıkış bakır boru bağlantısı 56

Resim 6.24. Fotovoltaik termal (PV/T) panele termokupl yerleşimi 58

Resim 6.25. Fotovoltaik (PV) panele termokupl yerleşimi..... 59

Resim 7.1. Modifiyeli borular ve manifold ile PV/T yüzeyinin sıcaklık dağılımı 64

Resim **Sayfa**

Resim 7.2. PV/T'nin su alanındaki sıcaklık dağılımı..... 65

Resim 7.3. PV/T'nin ısı değiştirici içindeki düzlem üzerindeki hız dağılımı..... 66

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
A	Alan, (m^2)
c_p	Sabit basınçta özgül ısı, (kJ/kg°C)
h	Kaynama ısı transfer katsayısı, (W/m^2°C)
hz	Hertz
M	Mesh (Ağ)
$\dot{m}$	Kütlesel debi, (kg/s)
m^2	Metrekare
Nu	Nusselt sayısı
P	Basınç, (MPa)
R	Sonuç
Ra	Rayleigh sayısı
T	Sıcaklık, (°C)
V	Gerilim
W	Belirsizlik
ν	Kinematik viskozite, (mm^2/s)
ρ	Yoğunluk, (g/cm^3)
μ	Dinamik viskozite, (mPa.s)

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
CFD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme ve Denetleme Kurumu
ETKB	Enerji ve tabii kaynaklar bakanlığı
EVA	Ethylene vinly acetate
ETFE	Ethylene tetrafluoroethylene
FDM	Faz değişim malzemeli
$MnFe_2O_4$	Mangan demir oksit

Kısaltmalar	Açıklamalar
PV	Fotovoltaik
PV/T	Fotovoltaik termal
SEM	Elektron tarama mikroskobu
TEM	Elektron iletim mikroskobu

1. GİRİŞ

Güneş enerjisi, güneş çekirdeğinde gerçekleşen füzyonun sonucu olarak hidrojen gazının helyuma dönüşmesi ile açığa çıkan ışıma enerjisidir. Güneşten yaklaşık olarak metrekareye $3{,}9x10^{26}$ W/m^2 güç yayılmaktadır, bu tükenmeyen emisyon azaltıcı etkiye sahip çevre dostu enerji kaynağının belirli bir miktarı dünyaya ulaşabilmektedir. Atmosfer dışına metrekareye ortalama 1370 W/m^2 güç ulaşabilmekteyken bu değer yeryüzüne ulaştığında mevsim ve çevre koşullarına bağlı olarak 1100 W/m^2 olabilmektedir. Yeryüzüne ulaşan bu yenilenebilir güç sahada teknik olarak güneş enerjisi ısıl uygulamaları ve elektrik uygulamaları olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ülkeler fosil yakıtlı kaynak türlerinin enerjiye dönüştürülmesinde çevreye birçok zararın olması ve emisyon değerleri yüksekliğinin olumsuz çevre koşullarını meydana getirmesi sebebiyle yenilebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından fotovoltaik (PV) uygulamaların Türkiye elektrik kurulu gücü içerisindeki payı giderek artmakta olup her geçen gün de enerjideki ihtiyacın artışıyla karşılaşılmaktadır. Türkiye'de güneşlenme süresinin uzun olması ve elektrik enerjisi tüketim maliyetlerindeki hızlı artışlar PV uygulamalarının sadece saha uygulaması yapılmakla kalmayıp çatı tipi uygulamalara da başlanılmıştır ayrıca bu konuyla ilgili Enerji Piyasası Düzenleme ve Denetleme Kurumu (EPDK) tarafından hem mevzuat hem de teknik alt yapı düzenlemesi sağlanmıştır.

Türkiye'de toplam elektrik kurulu gücü 2024 yılı sonu 116 265 MW olup, güneş santrali kurulu gücü 2024 yılı sonu itibari ile 20 232,1 MW ve kurulu güç içerisindeki payı %17,4 sevilerindedir [1]. Türkiye, jeopolitik açıdan yenilenebilir enerji potansiyeli yüksek bir ülke olmakla birlikte cari açığının büyük bir kısmının enerji ithalatından kaynaklanıyor olması dikkat çekmektedir. Bu noktada özellikle yenilenebilir enerji kaynakları kullanımına uygun olan ülkemizde elektrik tüketimine ilişkin alternatif üretim kaynağı kullanımı konusunda çalışmalar yapılması ve ithal ikamenin azaltılması yönünde adımlar atılması önemli olduğu kadar elektrik üretiminin verimli olması da önem arz etmektedir [2].

Bu çalışmada, yeşil mutabakat kapsamındaki öncelikli araştırma, geliştirme, yenilik

konularından “Temiz, Erişilebilir ve Güvenli Enerji Arzı” başlığına yönelik olarak, yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi hatta mevcut enerji sistemleri ile bütünleşmelerinin sağlanması bununla birlikte verimliliğin yükseltilmesi nihai sonuç olarak amaçlanmıştır [3]. Yapılan bu çalışma içeriğindeki deneysel çalışmaların tamamında verimliliğin ön planda tutulması amaç edinilmiştir bu yolda ilerleyerek hibrit model PV uygulamaya ihtiyaç olduğu ortaya konmuştur [4]. Özellikle de enerji açığının çok olduğu ada halindeki ülkelerde enerji verimliliği en önemli tasarruf aracı olarak karşımıza çıkmaktadır [5].

Çalışma kapsamında; günümüzde kullanılan ticari güneş pilleri % 45’den daha düşük bir verimle güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilmekte ve dönüşüm verimi, sıcaklık artışı ile ters orantılı olarak azalmaktadır [6]. Hızla nüfus ve sanayileşme artışıyla enerji ihtiyaçları da artmaktadır. Dünyada kısıtlı olan yakıtların tükenmesi oldukça hızlı bir şekilde devam etmektedir. Enerji kaynaklarının sürdürülebilir biçimde yönetilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarına başvurulmalıdır [7]. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi geleceğe umut verici bir kaynak olarak görülmektedir [8]. Hibrit fotovoltaik termal (PV/T) solar sistemleri son yıllarda elektrik ve termal enerji elde edilmek için dünya çapında yaygınlaşmaya başlamıştır [9]. Piyasada bulunan güneş panelleri düşük verimle çalışırken sıcaklık artıkça güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürme verimi de düşmektedir [10]. Güneş panellerinde, elektrik enerjisi verimi arttırmanın yanı sıra termal enerji de elde edilmek için hibrit PV/T solar sistemi geliştirilmiştir [11-13].

Bu çalışmada PV, hibrit solar sistem olan PV/T mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$)/saf su kullanılarak güneş panellerinde elektrik ve termal enerji verimlerinin artırılması araştırılmıştır. Ayrıca, eşit elektrik üretim gücüne sahip PV ve PV/T güneş panellerinin performansları deneysel olarak karşılaştırılıp sayısal olarak da detaylı şekilde değerlendirilmiştir. PV panellerin elektrik üretimi esnasında ısı enerjisi meydana gelmekte ve ortam şartları gereği ısıya maruz kalmasıyla birlikte bu ısı enerjisinin transfer edilememesi PV panellerde verim kaybına neden olmaktadır. Panel gücü aynı olan aynı karakteristikteki termal ısı aktarımı özelliğine sahip olan PV/T ve olmayan PV uygulamaları arasındaki verimlilik farkı en üst seviyede gözlemlenerek çalışma kapsamında PV/T olan panel performansının üst seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir.

PV/T uygulamasında nanoakışkan olarak mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$)/saf su karışımı

sayesinde ısı transferini en üst seviyede sağlanması ile elde edilen sonuçlar termokupllar ve veri kayıt cihazı cihazıyla toplanıp veriler değerlendirilmiştir.

PV sistemlerde performansı artırmak için termal olarak ısı transferi nanoakışkan olan mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$)/saf su kullanımı yolu ile üst seviyelere taşınmak istenilmiştir. Dolayısı ile de deneysel olarak gerçekleştirip çıkan sonuçları sayısal olarak analiz ederek karşılaştırma imkânı sağlanmıştır.

Ayrıca çalışma kapsamında gerçekleştirilmiş olan deneysel uygulamalar eşit güce sahip paneller arasındaki performans farkını da açık bir şekilde ortaya koymuş olup PV/T uygulaması ile ısı transferi nanoakışkan yoluyla sağlanmıştır. PV/T panelin verimi, termal soğumanın sağlanamadığı eşit güçlü diğer PV'ye göre daha verimli olduğu deneysel uygulamalarda ortaya konulmuş olup sayısal olarak da detaylı analiz edilmiştir.

Deneylerin tamamı, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümü bünyesinde bulunan laboratuvarda gerçekleştirilmiştir. Deneyler ve öncesi sıra ile ilk olarak literatür taraması, deneysel malzeme temini, temin edilen malzemelerin kabulü, deney setinin kurulumu, deneylerin gerçekleştirilmesi, verilerin toplanmasının sağlanması, toplanan verilerin derlenerek analiz edilmesi ve nihayetinde tüm çalışmaya ilişkin detaylı raporlamanın hazırlanması tamamlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Enerji politikaları oluşturulurken enerjinin sağlanacağı kaynaklar ve bu kaynaklara erişim yolu, yöntemi, sürekliliği, üretim ve dönüşüm yöntemleri, son kullanıcıya kesintisiz teslimatı bununla birlikte tüketimde verimlilik kriterleri gibi birçok unsur dikkate alınması önem arz etmektedir. Bu kriterler doğrultusunda belirlenen enerji politikalarının ekonomik, siyasi, hukuki ve sosyal yönleri ile çevre ve güvenlik boyutları ön planda olmaktadır. Diğer dünya ülkeleri gibi Türkiye'nin de temel politikası, enerjinin zamanında, yeterli, güvenilir, rekabet edilebilir fiyatlardan, çevresel etkileri de göz önünde tutularak sağlanmaktadır. Bu bağlamda enerji politikasının oluşturulmasında aşağıdaki hususların göz önünde bulundurulmaktadır;

- Enerji arz güvenliğinin ve güvenilirliğinin sağlanması,
- Stratejik petrol ve doğal gaz depolama kapasitesinin artırılması,
- Kaynak çeşitlendirmesi,
- Yerli ve yenilenebilir kaynakların kullanımı ve geliştirilmesine öncelik verilmesi,
- Farklı teknolojilerin kullanımı, geliştirilmesi ve yerli üretimin artırılması,
- Yatırım ihtiyacının büyüklüğü ve çevresel etkiler dikkate alınarak enerjinin üretiminden tüketimine kadar tüm safhalarında verimliliğin artırılması,
- Yakıt esnekliğinin artırılması (üretimde alternatif enerji kaynağı kullanımına imkân sağlanması),
- Ülkemizin jeo-stratejik konumundan yararlanarak enerji koridoru olma potansiyelinden en iyi şekilde yararlanılması ile Orta Doğu ve Hazar petrol ve doğal gazının dünya piyasalarına ulaştırılması sürecine her aşamada katılım sağlanması (rezervden pay, nakil, rafinaj, pazarlama, sıvılaştırılmış doğal gaz),
- Enerji sektörünün, işleyen bir piyasa olarak şeffaflığı ve rekabeti esas alacak şekilde yapılandırılması,
- Bölgesel işbirliği projelerine katılım ve entegrasyonun sağlanması,
- Her aşamada çevresel etkilerin göz önünde bulundurulması.

İnaç (2020) tarafından yapılan çalışmada; tekli, kojenerasyon, trijenerasyon ve çoklu üretim sistemlerinin enerji ve ekserji analizlerini detaylı bir şekilde incelenmiş olup sonucunda tekli ve çoklu üretim sistemlerinin enerji verimlerini sırasıyla %16,4 ve %78 iken ekserji

verimlerini %26,2 ve %36,6 olarak belirlemiştir.
Tasci (2021) tarafından yapılan çalışmada, enerjinin arz güvenliğinin sağlanması, politikalarının da bu temeller üzerine kurulması zorunluluğu, birincil enerji yoğunluğu konularını incelemiştir. Nihayetinde ise enerji politikalarının şekillenmesinde küresel ısınma ve iklim değişikliği kadar arz talep dengesinin önemli olduğu, bununla birlikte arz güvenliği ile birlikte piyasa fiyatlarının düzenlenmesi için de yenilenebilir kaynakların önemli olduğu tespitleri" yapılmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kurulu gücü ve üretimi yıldan yıla artarken, 2023 yılından sonra devreye girmesi planlanan 4800 MW'lık baz yük santral özelliği taşıyan Akkuyu Nükleer Santralin termik nitelikli kapasitesinin bulunması elektrik iletim ve dağıtım sistem ataletine etkisi de dikkat çekmektedir. Her bir nükleer santral ünitesi için ünite bazında değişen oranlarda alım garantisi verilmektedir. Ayrıca yerli linyit kömür ve ithal kömür kullanan santrallere verilen teşvik ve destek mekanizmaları sayesinde bu santrallerin kurulu güçleri artmaya devam etmektedir. Yerli linyit kömürünün yüksek karbon emisyonunun yanında düşük ısıl değerli yakıt olması büyük bir problemdir. Bu santrallerin ömürlerinin oldukça uzun olması nedeniyle kömürlü termik santrallerin hatta bazı doğalgaz kombine santrallerin nükleer alım sonrası garantiler nedeniyle atıl kalacağı da görülmektedir. Atıl yatırımın yanı sıra alım garantilerinin de elektrik piyasasındaki fiyatlarda düşüşü baskılayacağı açık olarak ortaya konabilmektedir. Taşkıran (2021) çalışmasında elektrik talep tahminleri, üretimde kullanılan yakıtların planlaması, elektrik santral yatırım kararları ve talebi karşılayabilme konularını incelemiştir. Sonucunda ise 2001 sonrası dönemde elektriğin serbest rekabet yoluyla ucuz ve kaliteli temin edilmesi gerekçesiyle başlayan süreçte özelleştirmenin yanı sıra teşvikler nedeniyle özel sektörün payının giderek arttığı düşünüldüğü, yatırımların nihai tüketicinin lehine olmadığı, artan elektrik üretimi ve kaynak çeşitlendirmesinin nihai tüketici için bir refah etkisi sağlamadığı sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde birincil enerji kaynağı olan PV'nin elektrik piyasasına ve emisyona olumlu katkılar sağlayacağı tespitlerinde bulunarak verimlilik ile birlikte sürdürülebilirliğin de elde edileceği tespitleri yapılmıştır.

Elektrik enerjisinde verimlilik ve sürdürülebilirlik bağlamında geleceğin enerji sistemlerinin baş aktörü konumunda olabilecek birincil üretim kaynağı olan PV ön plana çıkmaktadır. PV sistemler güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilen bir sistem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sistemlerde panellerin ısınmasından kaynaklı verim kayıpları yapılan saha

uygulamalarında gözlenmiştir. Fidan (2021) yaptığı çalışmalarda PV panellerde verimlilik incelemesinde bulunmuş olup hibrit uygulama olan PV/T ile hem elektriksel verim artışının sağlanıp hem de ısıl verimlilikte iyileşme olduğu sonucuna varmıştır. Bu sebepledir ki PV/T panellerin verimli oluşu gerekçesi sahada kullanım sebebi haline gelmektedir.

Fotovoltaik hücrelerin veya modüllerin verimlilikleri kontrollü koşullar altında ölçülür hatta şartların ışınım için 100W/m^2 olup hücre sıcaklığının ise 25 ^oC olduğu kabul edilir. Bu çalışma sıcaklığı gerçek uygulamalarda çok daha yüksek olmasından kaynaklı olarak elektriksel güç ve verim kayıplarına neden olmaktadır. Tonui ve Tripanagnosstopoulos'ın (2021) yapmış olduğu çalışmada fotovoltaik modüllerin veriminin artırılması incelenmiştir. Modülde üretilen ısının aktarımının modülün altında ve/veya üzerinde ısı geri kazanım sıvısı (su, yağ, glikol, hava, vb.) geçirerek elde edilebildiği hatta termal ve elektrik enerjisinin aynı anda üretildiği bu entegre yaklaşım PV/T kollektörlerin temelini teşkil ettiği sonucuna varmıştır [18].

2014 Ekim ayında Avrupa Konseyinin, Avrupa Birliği'nin öngördüğü yenilenebilir enerjinin temini ve enerji verimliliğinin en az %27 düzeyinde tutulması hedefi ve ayrıca 2030 yılı sonuna kadar sera gazı emisyonunun asgari %40 azaltılması hedefi çerçevesinde 2030 İklim ve Enerji Politikaları Çerçevesi'ni hazırlamış olması, Paris İklim Konferansı ile uyumlu olması nedeniyle anlaşmanın gücünü artıracak bir zemin oluşturulmuştur. Avrupa Komisyonunun, Avrupa Birliği'nin seragazı emisyonlarının %45'ini oluşturan Emisyon Ticareti Sistemi'ni yenileme çalışmaları ve Çaba Paylaşım Kararı çerçevesinde arazilerin kullanımına ve ormancılık faaliyetlerine başlamış olması, bu yöndeki uygulama sürecinin bir parçası olarak görülmektedir. Tüm bu olumlu gelişmelere rağmen yenilenebilir enerjiye geçişin, 2015 Paris Anlaşması'ndaki hedefleri yakalamaya yetecek hızda ilerlemediği görülmektedir. Zira, elektrik de enerji konusu temel bileşen kavramlardan biridir. Enerji piyasası temel olarak 3 büyük kısımdan oluşmaktadır. Bunları elektrik, ulaşım, ısıtma/soğutma olarak gruplayabiliriz. Elektrik enerjisi sektöründe yenilenebilir enerji alanında olumlu ve hızlı gelişmeler PV sistemlerde yoğun olarak görülürken, ulaştırma ve ısıtma/soğutma sektöründe elektrik enerjisine göre gelişmeler oldukça yavaş ilerlemektedir. Bu da enerji sektörünün genelinde hedeflere ulaşmada sapmalara neden olmaktadır.

Güneş enerjisi, temiz, güvenli ve güvenilebilir enerji üretmek için en büyük potansiyele sahip kaynaktır. Öyle ki, dünya kıtaları üzerine düşen güneş enerjisi, yıllık olarak tüm

dünyada kullanılan elektriğin 200 katı güce eşittir. Güneş enerjinin en önemli kolaylığı güneş gören her yerde kullanılabilme özelliğine sahip olmasıdır [19]. Ayrıca Aydoğdu (2021) çalışmasında verimlilik ile ilgili farklılıklar coğrafi konuma ve hava kalitesine göre değişse de dünya üzerinde herhangi bir yerde düşük kurulum maliyeti ile enerji temin edebilmenin mümkün olma durumunu incelemiştir. Nihayetinde ise güneş enerjisinde hem avantaj hem de dezavantaj olarak sayılabilecek hususun ar-ge çalışmaları (bakım, onarım ve işletme faaliyetleri) neticesinde teknolojinin ve verimliliğin geliştirilememesi bu nedenle yatırımı yapılan tesisin kısa süre sonra verimlilik ve maliyet etkinliği itibariyle geri kalma riskinin oluşabileceği tespitlerinde bulunmuştur. Bazilian, Leenders ve Van Der Ree (2021) çalışmalarında PV verimliliğini incelemiş olup PV/T sisteminin yararları ile birlikte verimliliğe de katkıları olacağı sonuçlarına varmıştır.

PV/T'de saha uygulamalarında başarı ölçütleri kapsamında;

- Hem PV hem de termal kolektör sistemler güneş spektrumunun farklı bir bölümünü kullanır. Termal kolektör kızılötesi dalgalar kullanırken, güneş hücreleri görünür ışık dalgaları kullanır. İki sistemin PV/T olarak birlikte kullanılması, tüm güneş spektrumunun daha etkin kullanılmasına neden olacaktır. [20].
- An ve Liu (2021) çalışmalarında sistemin en önemli temel bileşenin maliyet ve verimlilik olduğunu incelemiş, PV ve PV/T sistem arasındaki tercihlerde hibrit model olan PV/T düzeyinde uygulamaların avantajları olduğu tespitini yapmıştır. Seifried ve Witzel (2021) çalışmalarında yenilenebilir enerjide kaynak tipine göre PV sistemlerinin şebeke uygulama modellerini incelemiş olup PV/T sistemlerin kentsel yaşam alanlarında kolaylıkla uygulanabildiği ve maliyetlerinde düşük seviyeler olduğu, verimin de yüksek tutulduğu tespitlerinde bulunmuşlardır. Hatta yeni teknolojik uygulamalar ile PV/T uygulamalarının hidrojen teknolojisi ile entegre edilebileceği tespitlerini de yapmıştır. Tripanagnostopoulos ve Tselepis (2021) çalışmalarında rüzgar enerjisi ile PV aynı anda elektrik üretimi yapan hibrit santral modellerinde verimliliği incelemiştir. İlave olarak su ve hava ile soğutma sağlanan PV/T sistemlerin maliyetler üzerinde 6 yıl kadar sürede %50 oranda katkı sağladığı tespitinde bulunmuşlardır [21-23].
- PV/T kurulumu için gereken toplam alan, her bir sistem için (termal soğutma ve fotovoltaik olarak) ayrı ayrı olduğundan daha az yer kaplanma durumu korunacaktır [24].
- PV/T sisteminin yaz aylarında yalıtımının bulunması, yüzey gölgelenmesinin azalması ve termal yükün azaltılması sonucu üst düzey ısı aktarımı sayesinde verimlilik anlamında avantajlara sahiptir [25].

- Mojumder, Uddin, Alam ve Enam'ın (2021) çalışmalarında PV ve PV/T verimlilikleri bununla birlikte termal ısı aktarım yöntemleri incelenmiş olup (metal hava kanallı ayrıca su kanallı olan model) hibritleştirilmiş PV/T modelin verimliliğe katkılarının olduğu su ile yapılan soğutmada %28 seviyelerde olduğu tespitleri yapmıştır.
- PV/T sistemlerinin önemi ise; daha sonra diğer kritik uygulamalarda kullanılabilecek bazı termal kayıpların iyileştirilmesi ile üretilen elektriğin kabul edilebilir bir düzeye çıkarılması sağlanarak emisyona olumlu anlamda katkı sunarak ön planda olacaktır [26].
- Chow (2022) çalışmasında sistemin genel performansını değerlendirmiştir. Sonuçta ise PV/T verimliliği PV sistemlerde kullanılan kolektör modeline bağlı olarak akış şekline göre değişiklik gösterebileceği tespitlerinde bulunmuştur.
- Zhang, Zhao, Smith, Xu ve Yu (2022) çalışmalarında PV ve PV/T sistemlerinin teknik, ekonomik ve çevresel etkileri incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda ise dünyada PV kurulu gücün 2030 yılında %5, 2050 yılında ise %11 seviyelerinin yakalanacağı bu durumunda 100 Gt karbon emisyonu azaltımı olacağı ve emisyonun PV/T uygulamaları ile daha da fazla seviyelerde azaltım sağlanabileceği tespitleri yapılmıştır.
- Charalambous, Maidment, Kalogirou ve Yiakoumetti (2023) çalışmalarında PV/T sistemlerinde elektrik ve ısıl performans konularını inceleyerek kolektörden akan akışkanın akış hızı ile birlikte ısıl geçirgenliğinin önemi hatta temas edilen yüzeyin geniş tutulmasının verimlilik için olan önemi tespit edilmiştir;

Bu çalışma kapsamında, eşit güçteki PV ve PV/T panel performansları karşılaştırılırken verimlilik düzeyinde de neler sağlanabileceği gözlemlenmiş olacaktır. Bununla birlikte yerli ve yenilenebilir kaynaklarda performansın üst seviyede tutulması beklenmekte olup tasarımı yapılan ısı değiştiricinin de yüksek seviyede ısı aktarımı sağlayarak önemli bir bileşen olarak literatüre büyük katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

3. GÜNEŞ ENERJİSİ VE SİSTEMLERİ

Güneş enerjisi saha uygulamaları malzeme, yöntem ve teknolojik düzeyleri dikkate alındığında birçok çeşidi bulunmasına rağmen ısıl uygulamalar ve elektrik uygulamaları (güneş pilleri) olarak iki ana başlıkta incelenmektedir.

3.1. Güneş Enerjisi Isıl Uygulamaları ve Çeşitleri

Bu sistemlerde her zaman ilk amaç güneş enerjisinden ısı elde etmektir, elde edilen ısı doğrudan kullanılabilirken elektrik üretiminde de kullanılabilmektedir. Isıl uygulamalar sıcaklık değerlerine göre düşük sıcaklık uygulamaları, orta sıcaklık uygulamaları ve yüksek sıcaklık uygulamaları olmak üzere üç ana başlıkta incelenebilmektedir.

3.1.1. Düşük sıcaklık uygulamaları

Düşük sıcaklık uygulamaları (20-100°C); düzlemsel vakum güneş kolektörleri (bina, sera, yüzme havuzu ısıtması, sıcak su elde edilmesi), güneş havuz bacaları, tarım ürünleri kurutmasının yapılması, deniz suyundan tatlı su elde edilmesi, güneş ocakları ve fırın kullanımı gibi çalışmalar güneş enerjisinden düşük sıcaklık elde edilme faaliyetleridir. Düzlemsel güneş kolektörleri en sık kullanılan uygulamalar olup saydam örtü (düz cam veya vakum tüplü) ile sistem çıkış su sıcaklığı 100°C'ye kadar artmaktadır. Düzlemsel güneş kolektörleri doğal dolaşımla ya da dolaşım pompalı olarak sahada karşımıza çıkmaktadır. Resim 3.1'de sırası ile düzlemsel vakum güneş kolektörü, güneş havuz bacası ve güneş ocağı görülmektedir.



Resim 3.1. Düşük sıcaklık uygulamaları a) Düzlemsel vakum güneş kolektörü, b) Güneş havuz bacası ve c) Güneş ocağı [29]

3.1.2. Orta sıcaklık uygulamaları

Orta sıcaklık uygulamaları (100-300°C); Resim 3.2'de görüldüğü gibi sırası ile büyük ısıtma ve soğutma sistemlerini, endüstriyel çalışmalar için buhar üretimini son olarak da elektrik üretimini kapsamaktadır. Özellikle endüstriyel uygulamalarda proses (işlemsel) ısıtma ve viskozite kontrolü gerektiren petrokimya alanlarında mutlak surette üretilen buhar bulunur. Üretilen bu buhar eğer basınç değerlerinde ciddi kayıplar yaşanmaz ise verimliliğin yüksek tutulması amacı ile elektrik üretimi de yaptırılarak enerjinin şebekeden çekilme maliyetlerinin yüksek oluşunu kendi bünyesinde elektrik üretimi vasıtası ile karşılayıp otoprodüktör nitelikli tesis vasfı taşıyabilmektedir.



Resim 3.2. Orta sıcaklık uygulamaları a) Büyük ısıtma ve soğutma sistemi, b) Endüstriyel buhar üretimi ve c) Elektrik üretimi [29]

3.1.3. Yüksek sıcaklık uygulamaları

Yüksek sıcaklık uygulama (>300°C); sistemleri de endüstriyel faaliyetler için buhar üretimi, büyük ısıtma hatta soğutma sistemleri ve özellikle elektrik enerjisi üretimi amacı ile parabolik çanak alıcılı elektrik üretimi (10 MW ve üstü elektrik santralleri için) işlemini gerçekleştirme gayesi ile kullanılmaktadır.

Yoğunlaştırıcılı ısıl düzenekler olarak da bilinen bu sistemlerin kullanımı Resim 3.3'te de görüldüğü üzere elektrik üretim teknolojisi amacı ile; parabolik oluklu kolektörler, parabolik çanak sistemleri ve merkezi alıcılı olarak üç farklı yöntemle sağlanmaktadır.



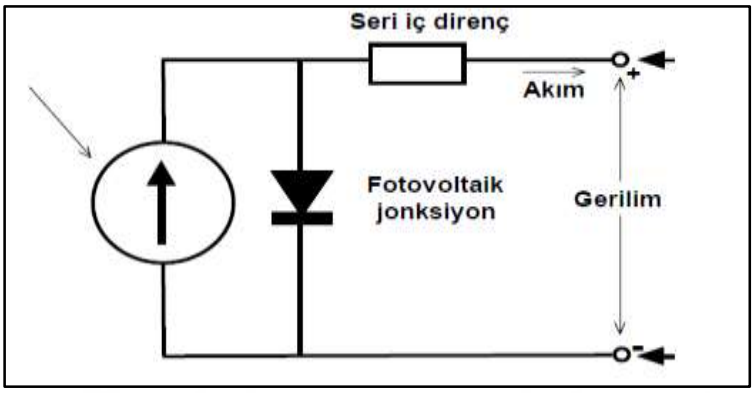
Resim 3.3. Yüksek sıcaklık uygulamaları a) Parabolik oluk, b) Parabolik çanak ve c) Merkezi alıcılı [29]

3.2. Güneş Enerjisi Elektrik Uygulamaları ve Çeşitleri

Güneş panelleri esasında yarı iletkendeki kullanılan fotoelektrik etkinin sonucu olarak güneşten alınan enerjinin elektrik akımına dönüştürülmesi ve bu enerjiyi depolayarak bünyesinde tutabilen bir elektronik devreden oluşturmaktadır. Fotovoltaik paneller en az gölge ve en fazla güneş ışınımı koşulu sağlanması ile uygun açı ile yönlendirilmiş şekilde, panel gücüne de bağlı mümkün olan en fazla elektrik üretimini sağlamaktadır. Saha uygulamalarında en fazla radyasyon etkinin de sağlanması amacı ile montajlama durumunda panellerin yönü güneye bakacak şekilde yatayla zeminle uygun açıda sabitlenir.

Güneş panelleri, yapısı ince kumlardan oluşturulmuş olan silikon katman yapılara dayanmaktadır. Silikon malzeme ise 1 eV ile 1.8 eV enerji sağlama aralığına sahip olan ve evrende bol miktarda bulunan elementlerdendir. Bunun yanında kristal silisyumun enerji sağlama boşluk düzeyi 1.12 eV seviyelerinde iken amorf silisyum olan malzemeninki 1.75 eV, kadmium tellür (CdTe) 1.45 eV, bakır indium diselenyum ($CuInSe_2$) 1.05 eV seviyelerindedir. Kumun işlemlerden geçirilmesi ile silisyum adı verilen element üretilerek, yüksek bir ısı sayesinde silikon elde edilir ve güneş paneli hücrelerinin hammaddesini teşkil eder. Güneşin yeryüzüne ulaşan kırmızı ışığında enerjisi 1.7 eV mavisinin ise 2.7 eV seviyelerinde olması sebebiyle silikonun yüksek ısı ile eritilerek şekillendirilip işlenmesi ile hücreler soğutulduktan sonra güneş paneli yapımında kullanılması amacıyla parlatma ve taşlama işlemleri yapılır nihayetinde elektrik üretebilir hale getirilir. Silikon temelli bu enerji hücreleri 150 ile 300 mikron kalınlığında oldukça kırılgan ve ince şekle sahip yapıdadır. Silikon hücreye ait eşdeğer devre Resim 3.4'te olduğu gibi üretilen akımla birlikte oluşan kayıplar seri dirençle gösterilmektedir, seri direncin değeri hücrenin verimini etkileyen bir kayıp elemanıdır. Güneş hücresi yarı iletken malzeme olduğu için diyotla sembolize edilir, güneş panelinin elektrik üretimi bir akım kaynağı (güneş ışığı etkisinin artışı ile akım artar) niteliği taşıması sembolünü şekildeki gibi ifade etmeye sebeptir. PV panellerden en yüksek

verimi elde etmek için uygun sıcaklıklarda en ideal seviyedeki akım ve gerilim düzeyine uygun açılarda ışınım düzeyi tercih edilmelidir.



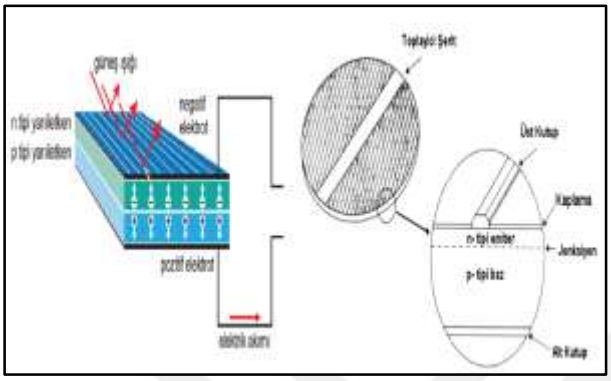
Resim 3.4. Silikon güneş hücre eşdeğer devresi [30]

Yüksek ısı vasıtası ile elde edilen silikon bloklar dilimlenerek dizgi (yonga şekil) olarak adlandırılan ince diskler şekline getirilir. Bu dizgiler (yonga şekiller) güneş paneli yapımında kullanılabilmesi için hata oluşturmayacak biçimde kesim işlemleri yapılması zorunludur, üzerinde yansıtıcısı olmadan ve enerjiyi içerisinde depolamasına yardımcı olabilen bir kaplama da ilave edilerek, sonrasında metal iletkenler de ilave edilerek oluşturulan PV panelin içyapısı Resim 3.5'teki gösterimdeki gibidir [30]. Bu sayede bir matris elde edilmiş olur ki matrislerde, depolanan güneş enerjisi elektrik enerjisine dönüşmüş olur. Elde edilen hücresel yapılar birbirine lehim irtibatı ile bağlanır, üretim unsurunu teşkil eden tüm katmanlar bir araya getirilip güneş panelini oluşturulmuş olur. Güneş panelleri yapısı Resim 3.6'daki gibi dıştan içe katmanları sırası ile alüminyum çerçeve, temperli cam, eva film, solar hücre, eva film, sırt folyosu ve bağlantı kutusundan meydana gelmektedir [31].

Alüminyum çerçeve: Saha uygulamalarında montaj yapılması için güneş panelini fiziksel faktörlerden muhafaza etmektedir bununla birlikte piyasada kullanılan boyut standartlarına uygunluğu ve bağlantı elemanları çeşitliliği sayesinde kolaylıklar sağlamaktadır.

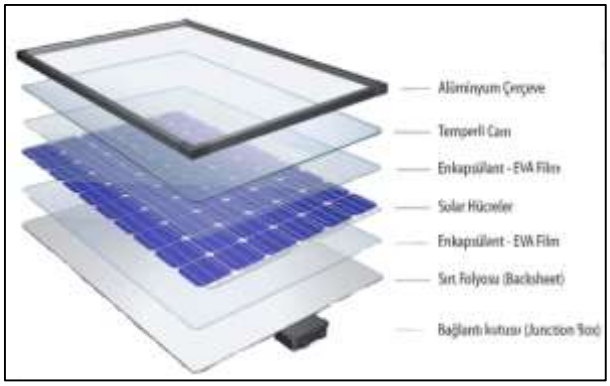
Temperli cam: PV güneş panelini toz, rüzgâr, taş gibi sert cisimlerin çarpmalarından muhafaza ederek her türlü darbelere karşı mukavemet oluşturmaktadır. Yüzeyi güneş ışıklarının büyük bir kısmını emmek için temperli güneş camlardan imal edilmelerine rağmen güneş ışığı kısmen atmosfere yansımaktadır. EVA (Ethylene Vinly Acetate) film: Temperli cam, hücre ve sırt folyosu (backsheet) arasını doldurarak parçaları birbirine

yapıştırma özelliğini taşıyan özel nitelikli katmandır. Sırt Folyosu (Backsheet): Panelin arka kısmının yalıtımı için üretilirler ve işletme şartlarına uygun sıcaklıklarda çalışması amacı ile tasarlanır. Bağlantı Kutusu (Junction Box): IP64 seviyelerinde su geçirmez niteliklidir panel kablo bağlantılarını, bypass (köprü) diyotunu içermektedir.



Resim 3.5. Silikon güneş hücre katmanları [31]

Köprü diyotu, panele ait hücre dizinlerinin birinde gölgeleme ve arızalı durumlar oluştuğunda panelin diğer kısımlarının elektrik üretim işlemine devam etmesini sağlayan işlevi bulunmaktadır.



Resim 3.6. Güneş panellerinin katmanları [32]

Güneş panel tipleri; esasında üretim aşamasında kullanılan malzeme ve üretim prensiplerine göre çeşitlilik gösterir. Panele ilişkin olarak saha kurulumunun yapılmak istendiği bölgenin güneşlenme süresi ve coğrafik durumların da göz önünde bulundurulması yanında kullanılmak istenen panelin verimliliği de önem arz etmektedir. Pratikte üretilen modeller arasında; katmanları sırası ile alüminyum çerçeve, temperli cam, eva film, solar hücre, eva

film, sırt folyosu ve bağlantı kutusundan oluşan PV model bir de bağlantı kutusundan önce sırt folyosu ile temaslı ve irtibatlı olan ısı değiştirici içeren panel olarak PV/T bulunmaktadır.

3.2.1. Fotovoltaik (PV) güneş panelleri

Saha uygulamalarında kullanın güneş panelleri; saydam, ince film, esnek, polikristal, monokristal güneş panelleridir.

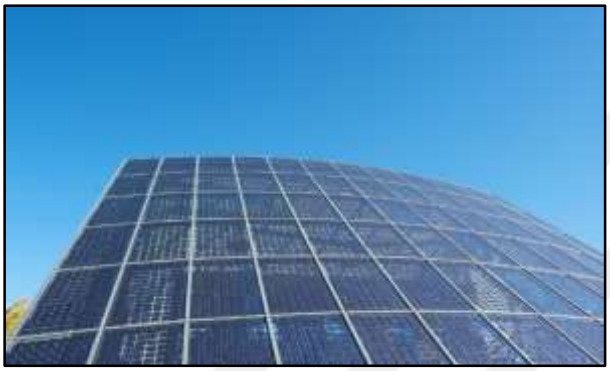
Saydam güneş paneli, teknolojik ilerlemenin son geldiği noktada saydam ve yarı saydam üretimlerinin gerçekleştirilmiştir. Şuana kadar yaygın bir kullanım ve uygulama alanları olmamasına rağmen saydam güneş panelleri ilerleyen zamanlar için önemli bir elektrik üretim kaynağı unsuru niteliğindedir. Özellikle de Resim 3.7'de olduğu gibi yeni mimari unsurların kapı ve pencerelerine projelendirilerek kayda değer miktarda elektrik ihtiyacı karşılar hale gelebilecektir [32]. Saydam güneş panelleri güneş ışının %60'ına kadarını soğurmakta olduğu açık şekilde bilinmektedir. İmalat teknolojisini yaygın olarak çok ince yarı iletken unsurları bir cam plaka üzerine yerleştirip yapıştırarak gerçekleştirilmektedir [33]. En büyük dezavantajı ise saydam güneş panellerinin inorganik güneş panellerinden daha çabuk bozulmakta olsa da düşük ışınımda ve gölgelemelerin yüksek olduğu mimari uygulamalarda az etkilenerek avantajlı durumdadır. Saydam güneş paneli teknolojisi ortalama %10 aralığında verimlilik sağlamaktadır [34].



Resim 3.7. Saydam güneş paneli [33]

İnce film, üretim teknolojisinde kullanılan malzemelere bağlı olarak farklı türde film panel çeşitleri bulunmaktadır. Bunlar; amorf silisyum, kadmiyum tellür, bakır indiyum galyum selenür, organik fotovoltaiklerdir. Hafif ve oldukça esnek yapılarından kaynaklı olarak

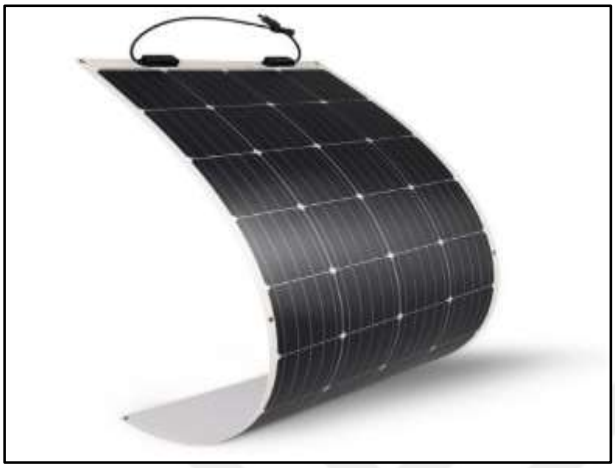
mimari şekillere uyumlu şekillerde uygulanabilmeleri rahatlık sağlamaktadır. Polikristal ve monokristal panellere göre oldukça fazla mekan kaplayan ince film paneller verimlilik anlamında oldukça düşük durumdadır [35]. Mimari projelerde ve diğer saha uygulamalarında Resim 3.8'deki gibi gölge durumlarından hatta yüksek ısı değişimlerinden az etkilenmektedir. İnce film güneş panellerinin verimlilikleri ortalama %7 seviyelerinde olduğu için piyasada diğer panel çeşitlerine göre oldukça az tercih edilirler. Silikon güneş panellerine göre daha kısa ömürlü oluşları ve kadmiyum gibi toksik malzemelerin kullanılması gerekçesi ile dezavantajlar bulundurmaktadır [36].



Resim 3.8. İnce film güneş paneli [35]

Esnek güneş paneli, imalat esnasında çoğu panel silisyum ve ana madde olarak da silikon malzemeler kullanılarak yapılmaktadır. Saha uygulamalarında en fazla tercih edilen güneş hücre modelleri polikristal ve monokristal teknolojilerdir. Her iki hücre modelinde de silikon blok dizilim (yonga şekilde) kesilerek yapılır ve kesim sonrası ortaya çıkan hücreler lehim vasıtası ile birbirlerine bağlanır. Normal şartlarda panellerde kesilen blok dizgi (yonga şekil) kalın ve esneme özelliği olmayan biçimdedir. Fakat blok dizgi (yonga şekil) oldukça ince bir kesimle fotovoltaik özellikler korunarak kesilirse esneklik özelliği oluşmuş olacaktır [37]. Sonuç olarak 30 derecelik bükülme seviyelerinin yakalandığı esneklik düzeyine ulaşılan esnek güneş paneli elde edilmiş olacaktır. Katlanarak (rulo haline getirip), esnetilebilme özelliği Resim 3.9'daki gibi korucuyu bir cam tabakaya sahip olmayıp bunun yerine ETFE (Ethylene tetrafluoroethylene) olarak da bilinen bir polimer malzemeden oluşmasından kaynaklı taşıma kolaylığına sahip olması hatta kara/deniz taşıma araçlarında kullanılabilir olması en büyük avantajları arasında yer almaktadır. İnce silikon dizgi nedeni ile yıllara sair proje uygulamalarında daha az dayanıklılık göstermesi (esnetilerek kullanımı irtibat bağlantılarının kopması ve hücre çatlaması sonucu olarak) buna bağlı olarak da daha

kısa süreli garanti sürelerinin olması dezavantajlı durumlar ihtiva etmektedir. Esnek güneş panellerinin verimlilikleri ortalama %8 seviyelerinde olduğu ve garanti sürelerinin oldukça kısa olduğu (5 yıl) için piyasada diğer panel çeşitlerine göre az tercih edilmektedir [38].



Resim 3.9. Esnek güneş paneli [37]

Polikristal güneş paneli, polikristal silikon fotovoltaik güneş hücrelerinin üretiminde kayda değer oranda öncü gelen malzemelerin başında bulunmaktadır. Polikristal silikon (veya çok kristalli Silisyum, multi-Si, yarı kristal Silisyum, Poli-Si ve polysilikon) küçük kristaller olarak da bilinen, kristalitten oluşan bir çeşit silikon malzemedir. Resim 3.10'daki gibi panel imalatı sonrası mavi renkte görünüme sahiptir, monokristal panellere göre daha basit bir üretim sürecine sahip olup ortalama olarak %10 düzeylerinde verimlilik sunmaktadır ve diğerlerine göre daha uygun fiyatlıdırlar [39]. Monokristal güneş panelleri ile ısı değişiminden etkilenme anlamında kıyaslandıklarına daha az etkilendikleri ortaya konabilmektedir, bununla birlikte imalatları sırasında daha az silikon ortaya çıkmakta olduğu dikkat çeken avantajları arasında bulunmaktadır.

Yapılan saha uygulamalarında polikristal güneş panelleri monokristal güneş panellerine göre daha fazla alan kaplamaktadır. Bunun temel sebeplerinin başında ise güneş panel verimliliğidir, kullanılan malzemenin saflığı ile doğru orantılıdır ve silikon saflığını arttırmak için yapılan işlemlerde birlikte eritilmiş birçok silikon parçasından faydalanılmıştır ve maliyeti de ciddi anlamda artırmak. Dolayısı ile polikristal güneş panelleri ile monokristal güneş panelleri arasındaki temel fark burada ortaya çıkar [40].



Resim 3.10. Polikristal güneş paneli [39]

Monokristal güneş paneli, hücresi tek bir kristalden oluşması ve yüksek kalitede saf silikon madde kullanıldığı için hatta elektrik akışını oluşturan elektronların hareket etmek için daha fazla alanı olması gerekçesi ile monokristal paneller diğerlerine göre daha verimli olup ortalama olarak %11 verimlilik oranına sahiptir. İmalatları esnasında saf silikon özelliğe sahip yongalardan kesilerek işlem yapıldığı için koyu siyah renge sahiptir. Saf silikon malzeme kullanımından dolayı ekonomik ömürleri diğer tüm PV panellere göre uzun olmaktadır, bu sebepten projelerde sıklıkla tercih sebebidir [41]. Özellikle saha uygulamalarında gölgelenmelerden çok etkilenmemesi verimliliğini artırmaktadır, bu yüzden Avrupa ülkelerinin düşük güneşlenme yaşanan bölgelerinde en çok tercih edilen panel çeşidi olma sebebidir [42].

Bu yüzden deneysel çalışmalarımızın tamamında (Gazi Üniversitesi BAP kapsamında FDK-2023-8360) en düşük güneşlenmede ve gölgelenmelerden çok etkilenmeden, aynı güç için daha az alan kaplamak istenmesi ve ekonomik ömrünün de uzun olmasını da dikkate alarak deney çalışmalarımızın tamamında yüksek verime sahip olduğu gerekçesi ile monokristal fotovoltaik panel kullanılmıştır.

3.2.2. Fotovoltaik termal (PV/T) güneş panelleri

PV/T güneş paneli sistemleri içerik olarak PV olanlar ile elektrik üretim ünitesi olarak aynı olup ısı üretilen kısmın soğutulması için ilave ve farklılık arz etmektedir. Güneş paneli sistemlerinin tamamında elektrikle birlikte ısı üretimi mutlak surette kaçınılmazdır. Bu sebeptendir ki ısı üretimi olan kısımlarda ısı aktarımını soğutma amaçlı sağlayarak verimliliği artırmayı hedeflediğimiz panellerimiz hibrit bir model niteliği de taşıyan PV/T

panel tasarımının yollarını açmıştır. Resim 3.11'de olduğu gibi PV güneş panellerinde oluşan ısının uygun şartlarda transferi sağlandığında elektriksel veriminde artış sağlarken termal verimlilikte üst noktalara taşınmış olacaktır [43].

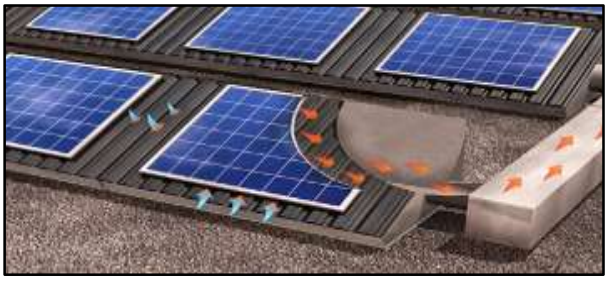


Resim 3.11. Fotovoltaik termal (PV/T) güneş paneli [43]

Piyasa uygulamalarında ilk olarak hava soğutmalı sistem fotovoltaik termal, ikincisi sıvı soğutmalı fotovoltaik termal, üçüncüsü de faz değişimi yapılan malzemeli sistem fotovoltaik termal ve ısı borusu sistemli olmak üzere dört farklı uygulama modeli bulunmaktadır.

Hava soğutmalı PV/T sistemler, Resim 3.12'de görüldüğü üzere hava akış hızının da etkisi ile hücre sıcaklıklarının düşürülmesi sonucu verimliliğin artırılmasının sağlandığı düzeneklerdir. Isı aktarımının doğal hava ile sağlanması, kurulumunun oldukça basit oluşu, düşük işletme maliyetinin de bulunması ve bununla birlikte bina uygulamalarında rahatlık yaygın kullanımına sebep olmaktadır.

Bu uygulamalarda temel esas havanın temas yüzeyinin artırılarak ki bu çoğunlukla emici yüzey artışı ile mümkün olup nihayetinde elektriksel ve ısıl verim artışı sağlanmış olur.



Resim 3.12. Hava soğutmalı fotovoltaik termal (PV/T) güneş paneli [44]

Havalı tip olan modellerde basit tasarımı ve düşük maliyetleri avantajları ile ön plandayken düşük ısıl performans ve daha az ısıtılmış hava uygulamaları olması dezavantajları arasındadır bu yüzden de alan ısıtmalarında hatta tarımsal etkinliklerde kullanılmaktadır [44]. Sistemde dolaşan havanın hızı ve bununla birlikte hava kanalı tasarım şekli panel verimi üzerinde oldukça büyük etlileri vardır [45].

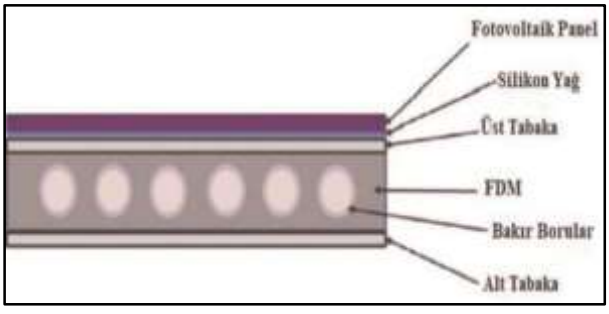
Sıvı soğutmalı PV/T sistemler, Resim 3.13'teki gibi olup; havalı tiplere göre ısı aktarımının daha üst seviyelerde olduğu uygulamalardır.



Resim 3.13. Sıvı soğutmalı fotovoltaik termal (PV/T) güneş paneli [45]

Kullanılan sıvının cinsine bağlı olarak ısı aktarımı farklılık göstermektedir. Suyun nispeten daha hızlı ulaşılır olması tercih sebebi olmakla birlikte bu verimlilik artırma yönteminde nanoakışkanların kullanımı ile de daha yüksek seviyeler elde edilmektedir.

Faz değişimi yapılan malzemeli (FDM) PV/T sistemler, Resim 3.14'teki gibi olup PV paneli soğutmak amacı ile uygun görülen faz değiştiren malzeme yüksek miktarda füzyon ısısına, ısıl iletkenliğe ve kimyasal kararlığa sahip olmalıdır.



Resim 3.14. Faz değişim malzemeli (FDM) PV/T güneş paneli [46]

Sistemin çalışmasında faz değiştiren malzemeye ısı verildiğinde ardından malzeme erime noktasına eriştiğinde belirli düzeyde ısıya maruz kalır böylelikle katı fazdan sıvı faza geçiş sağlanmış olur. Böylece sıvı faz değiştiren malzeme depolanan enerjiyi bırakmış olur esas fazına dönüş sağlanarak işleyiş tamamlanır [46].

Isı borulu PV/T sistemler, Resim 3.15'teki gösterimde olduğu gibi sıra ile izolasyon malzemesi üzerine alüminyum plakalar döşenir, üzerine siyah ısı emici yüzeyler dizilir onun da üstünde fotovoltaik hücreler bulunur.



Resim 3.15. Isı borulu fotovoltaik termal (PV/T) güneş paneli [47]

Tüm bu düzenek ısı boruları ile de irtibatlandırılarak ısı değiştirici düzeneğe bağlantısı yapılarak verimlilik sağlama maksatı ile soğutma sağlanmış olur [47]. Isı borusu, bulunmuş olduğu uygulamalarda sıcaklıkta düşüş sağlayıp ısı taşınım seviyesinin de yüksek olmasına katkıda bulunur. Çalışmalarda kullanılacak soğutucu akışkan sahanın mevsimsel şartlarına uygun olacak şekilde donma etkisi de göz önünde bulundurularak seçilmelidir [48].

3.3. Türkiye Elektrik Kurulu Gücünde Fotovoltaik Kaynak Değişimi

Fosil bileşenli yakıtların giderek artan bir şekilde tükenme tehdidinin varlığı, yenilenebilir ve giderek üretim maliyetleri düşen kaynak fotovoltaikten elektrik üretimi Türkiye'de karbon emisyon azaltılmalarının da hedef olduğu son yıllarda kaynak kurulu gücü de bununla birlikte üretimin de artarak ilerlemektedir [49].

Türkiye'de elektrik üretim kaynakları arasında fotovoltaik; 2010 yılında toplam kurulu güç 49 524,05 MW olup hiç yokken 2020 yılında toplam kurulu güç 95 890,57 MW iken 6

667,40 MW ile %6,95'lik paya sahip olduğu yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir. Ayrıca 2024 yıl sonu toplam kurulu güç 116 265,1 MW olup bunun 20 232,1 MW gücü PV kaynak tipine ait olup toplam kurulu gücün %17,4'lük kısmını oluşturmaktadır.

Çizelge 3.1. Kurulu gücün birincil kaynak tipine göre gelişimi

Kaynak Tipi	2010 (MW)	%	2020 (MW)	%
Kömür	11 978,20	24,19	19 801,15	20,65
Sıvı Yakıtlar	1 772,66	3,58	372,26	0,39
Doğal Gaz	18 420,39	37,19	26 117,46	27,24
Yenilenebilir+Atık+Atık Isı	107,20	0,22	1 502,80	1,57
Hidrolik	15 831,20	31,97	30 983,90	32,31
Jeotermal	94,20	0,19	1 613,20	1,68
Rüzgar	1 320,20	2,67	8 832,40	9,21
Güneş	-	-	6 667,40	6,95
Toplam	49 524,05	100	95 890,57	100

Elektrik üretiminde birincil kaynak tipine göre Türkiye'de güneşlenme süresi ve radyasyon etkinin yüksekliğine de bağlı olarak kurulu güçte bir artış sağlanırken elektrik üretiminde de azımsanmayacak bir artışı öngörmemek mümkün olamayacaktır.

Yapılan çalışmalar da gösteriyor ki birincil elektrik üretim kaynakları içerisinde fotovoltaikten 2010 yılında toplam elektrik üretim 211 207,73 GWh olup hiç yokken 2020 yılında toplam elektrik üretim 306 703,09 GWh olup 10 950,18 GWh üretim ile %3,57'lik payının olduğu çalışmalarda tespit edilmiştir.

2024 yıl sonunda ise 354 570,21 GWh'lik Türkiye toplam elektrik üretiminin %8,67'lik kısmı olan 30 746,01 GWh'lik kısmı PV kaynak vasıtası ile karşılanmaktadır [50].

Çizelge 3.2. Elektrik üretiminin birincil kaynak tipine göre gelişimi

Kaynak tipi	2010 (MW)	%	2020 (MW)	%
Kömür	55 046,36	26,06	105 812,00	34,5
Sıvı yakıtlar	2 180,02	1,03	322,66	0,11
Doğal gaz	98 143,72	46,47	70 931,33	23,13
Yenilenebilir+atık+atık ısı	457,51	0,22	5 736,63	1,87
Hidrolik	51 795,48	24,52	78 094,37	25,46
Jeotermal	668,21	0,32	10 027,70	3,27
Rüzgar	2 916,42	1,38	24 828,22	8,1
Güneş			10 950,18	3,57
Toplam	211 207,73	100	306 703,09	100

4. NANOAKIŞKANLAR

Nanoakışkanlar, birim metrenin milyarda biri kadar ölçek olan nano boyutta karbon, metal, metal oksit, nitrit gibi patiküllerin su, mineral yağ, etilen vb. baz sıvıları ile birlikte süspansiyon elde edilmesiyle oluşan ısı transferi akışkanıdır. Nano boyutta kendine ait termal, kimyasal, manyetik özellikleri dolayısı ile ileri teknoloji ve bilimsel ilerleme düşünülen her dalda çoklukla tercih edilmektedir. Başlıca avantaj niteliğinde özellikleri de sırası ile yüksek iletkenli ve ısı transferi yapması, aşınma ve korozyondan etkilenme durumunun olmamasıdır. Ayrıca nano düzeyde parçacıklardan oluşması çökelme durumunu zayıflatır ve kararlılığını korur, nano düzeyde oluşan hareketlilik akışkandaki ısı aktarımının artmasına sebebiyet vermesi, hacmine oranla daha geniş yüzeysel alana sahip olması hazırlanan süspansiyonların kararlılığını artırmaktadır. Dolayısı ile ısıl iletkenliği her daim yüksek tuttuğu için verimli çalışmalar ortaya koymada yardımcı olurlar [51].

4.1. Nanoakışkan Çeşitleri

Nanoakışkanlar parçacık şekillerine bağlı olarak bölümlendirilebilirler. Farklı sıvı ve parçacık uygulamaları ile birbirinden faklı süspansiyonlar elde ederek çeşitli nanoakışkanlar oluşturulabilir [52].

Çizelge 4.1. Nanoakışkanların listesi

Parçacık Türü	Örnek
Tek tip metalik:	Cu, Fe, Ni, Ag, vb.
Metal oksitler:	CuO, Al_2O_3, TiO_2, vb.
Alaşım metal:	Ag-Cu, Ag-Al, Al-Cu, Fe-Ni, vb.
Karbon tabanlı:	CNT, elmas, fulleren, garfit, grafen, vb.
Seramik veya metal karbürler:	SiC, Al_2O_3, CeO_2, CuO, Fe_2O_3, MgO, ZnO
Metal nitrürler:	SiN, TiN, AID, vb.
Çok metalli oksitler:	$NiFe_2O_4$, $ZnFe_2O_4$, $MnFe_2O_4$, vb.

4.2. Deneylerde Kullanılan Nanoparçacığın Özellikleri

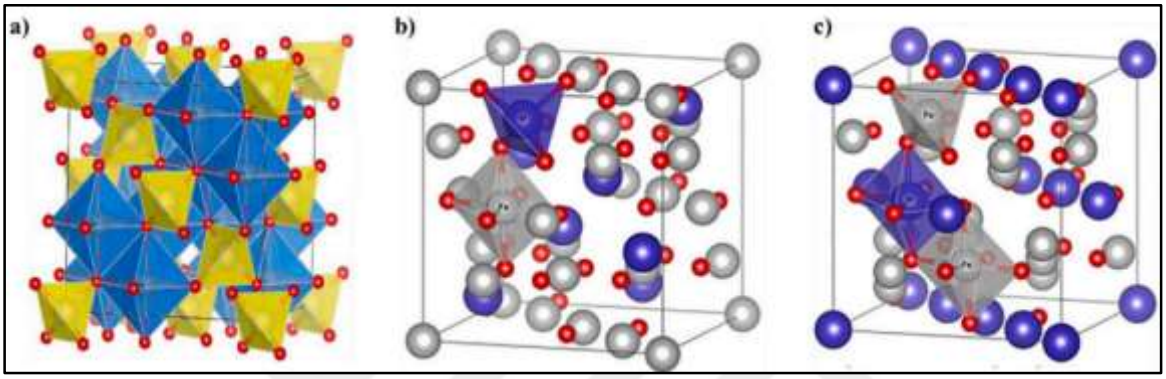
Bilimsel araştırma proje kapsamından metal oksit nanoparçacıklar arasından mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$) nanoparçacık tozu saflığı %98,95 boyutu 55 nm tercih edilerek deneylerde kullanılmıştır. Ayrıca mineral oksitler içerisinde jakopsit, manyetik özellikler bakımından da ferromanyetik niteliktedir. Ferromanyetik oksitin manyetik döngüleri temsili Resim 4.1'deki gibi olup manyetik düzenleme şekilleri polikristal yapı nihayetinde karşımıza çıkmaktadır. Özellikle biyomedikal uygulamalarda MR (manyetik rezonans görüntüleme), manyetik malzeme olaraksa da manyetik kayıt uygulamalarında ön planda olur, pil malzemesi elektrot malzemesi yada lityum iyon pil hazırlanmasında kullanımları ön plandadır, katalizör olarak ise de kimyasal işlemlere katalizörlük yapmada ve katalizör taşıyıcı olarak ön plana çıkmaktadır. Yüksek manyetizma en büyük özelliği olup bu sebeple ısıl iletkenliği oldukça da yüksek özelliklidir, dolayısı ile nanoparçacık olarak tercih edilmesine katkı sağlamıştır. Isı taşınım ile aktarılan ısı seviyesi yüksek manyetizma özelliğinden iletkenliğinin yüksek oluşudur ki verimliliği artırma düzeyinde bir araç olma ayrıcalığı proje kapsamında sunulmaktadır [53].

Elektriksel iletkenliği ve manyetikleşme özelliği yüksek olan akışkanların debi ve akış hızları manyetik alanın etkisiyle artmakta, elektriksel iletkenliği ve manyetikleşme özelliği düşük olan akışkanların ise debi ve akış hızları manyetik alanın etkisiyle azalmaktadır. Bu çalışmada, ısı taşınımıyla transfer edilen ısı miktarı, akışkanın akış hızı ile doğru orantılıdır [54].

Manganez ferrit ($MnFe_2O_4$) en ilgi çekici yumuşak ferritlerinden biri olması sebebi ile son 50 yıldır çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmıştır ve güçlü manyetik geçirgenliğe ve düşük kayıplara sahiptir. Kullanıldığı alanlar manyetik rezonans görüntüleme, ilaç aktarımı, elektronik aletler ve çeşitli haberleşme bölümleri bunlar arasındadır. Diğer spinel ferritlerle karşılaştırıldığında, manganez ferrit düşük bir dirence sahiptir [55].

Diğer manyetik malzemeler, elektromanyetik dalga emici malzemeler, katalizörler, nanokompozitler ve tıbbi faaliyet alanlarında geniş uygulamalara sahiptir [56]. Nano çinko gibi ferrit tozu iyi bir manyetizmaya, yüksek spesifik yüzey alanına, güçlü emme kabiliyetine ve iyi kimyasal stabiliteye sahipliği bulunmaktadır [57].

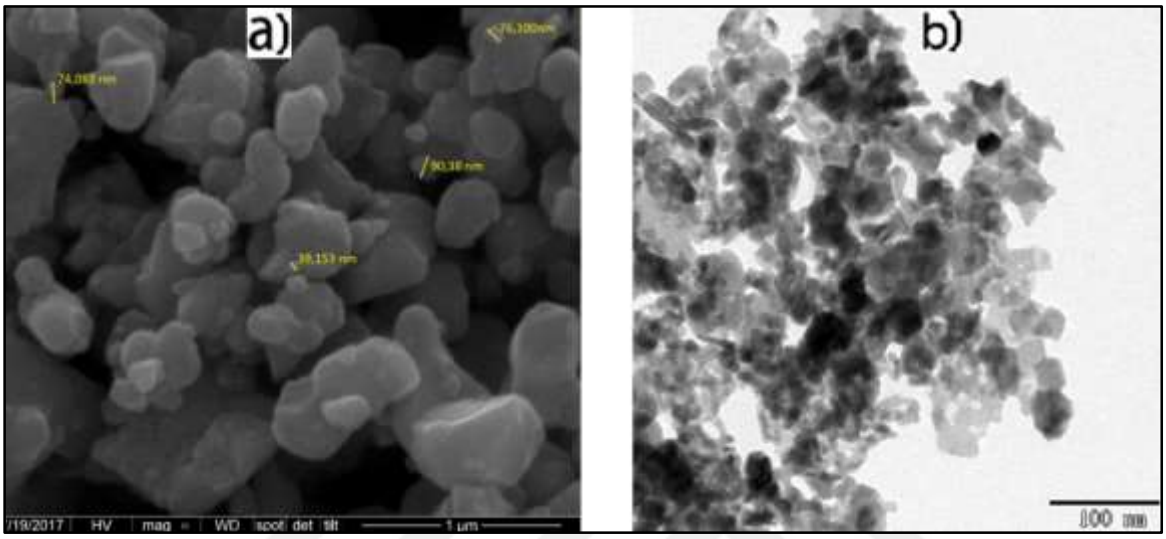
Spinel ferrit malzemeler, genel kimyasal formülü AB_2O_4 olan spinel yapılarına sahip metal oksitlerdir; burada A ve B, sırasıyla tetrahedral (A yeri) ve oktahedral (B yeri) konumlarında bulunan çeşitli metal katyonlarını temsil eder. Spinel ferritlerin, mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$)'in manyetizmadan kaynaklı ve elektronik özelliklerini doğru manyetik sıralama elde etmek hatta detaylı incelemek için yoğunluk fonksiyonel hesaplamaları kullanılmaktadır [58].



Resim 4.1. Manyetik spinel ferritin birim hücre yapısı a) Oktahedral alanlar (mavi), tetrahedral alanlar (sarı) ve oksijen atomları (kırmızı), b) Normal spinel ferrit ve c) Ters spinel ferrit [55]

Aynı çalışma kapsamında mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$)'ün tamamen düzenli durumda ve düşük taşıyıcı yoğunluklu bir yarı metal olduğu da tespiti sağlanmıştır. Sahip olduğu özelliği gereği önemli malzemelerden biri olan çinko demir oksit ($MnFe_2O_4$) yüksek manyetik geçirgenlik, yüksek reaksiyon sıcaklığı, yüksek elektriksel direnç, düşük güç kaybı gibi ayırt edici özellikleri değişik birçok endüstriyel uygulamada çok tercih edilmiştir. Üstün özellikleri nedeniyle manyetik spinel malzeme, transformatör çekirdekleri, yüksek hızlı dijital kayıt sistemleri için okuma yazma kafa aparatları, radyo frekans devreleri ve elektromanyetik dalgalar için emiciler gibi farklı teknik uygulama alanlarında tercih edilmiştir. $CoMgFe_2O_4$, $CoZnFe_2O_4$ ve $MgZnFe_2O_4$ gibi karma spinel ferritler, yüksek elektriksel direnç, kimyasal kararlılık ve yüksek reaksiyon sıcaklığı gibi üstün özellikleri nedeniyle incelenmesi gereken diğer manyetik ferritlerdir. Ayrıca temel sıvının ısıl iletkenliği nanoparçacık eklenerek hazırlanmış olan nanoakışkanın ısıl iletkenliğinden çok daha düşüktür. Bunun en önemli nedeni nanoparçacıkların sıvı içerisinde çarpışma etkisinden kaynaklanmaktadır. Parçacık boyutu azaldıkça çarpışma miktarı da artış gösterecektir [59].

Mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$)'in güçlü manyetik geçirgenliğe sahip ve düşük kayıpları olan yumuşak ferrite özelliği taşımaktadır. Diğer ferrit malzemelere göre düşük dirence sahip olup termodinamik olarak ısıl iletkenliğinin yüksek oluşu önem arz etmektedir. Resim 4.2'de nanoparçacığa ilişkin sırası ile SEM ve TEM görüntülerini de detaylı görebiliriz [60].



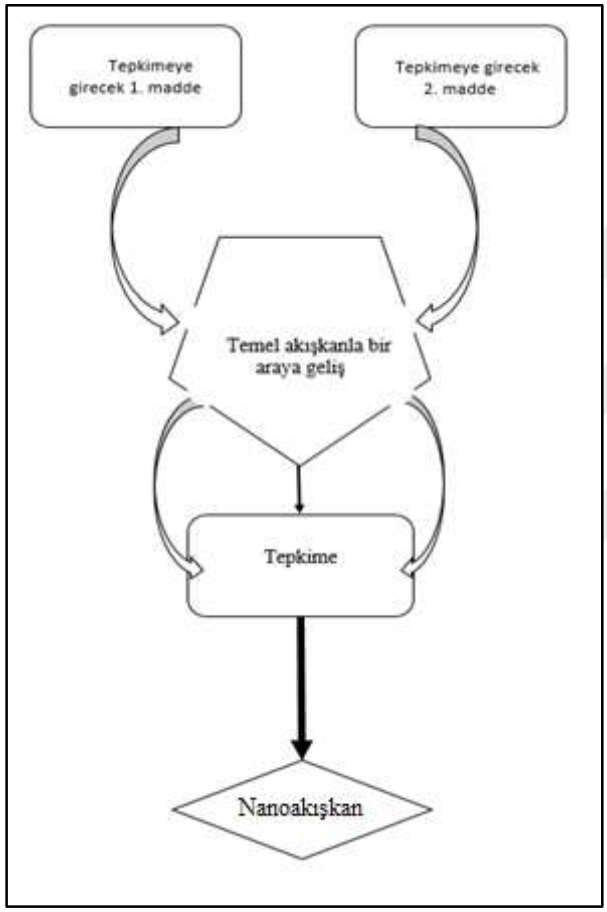
Resim 4.2. Mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$) a) SEM görüntüsü, b) TEM görüntüsü

Ayrıca mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$) biyomedikal teşhis ve tedavi uygulamalarında çokça tercih edilmiştir. Yüksek yüzey alanı, hacim oranına, yüzey şekli yoğunluğu sebebi ile ferrit nanoparçacık üretimi olarak son zamanlarda daha fazla ilgi görmüştür. Resim 4.2'de nanoparçacığa ilişkin sırası ile SEM ve TEM görüntüleri de detaylı şekilde gözlemlenmiştir [61].

4.3. Nanoakışkan Hazırlama Yöntemleri

Bu çalışma kapsamında kullanılan nanoakışkanın ısı aktarımını en üst seviyede sağlayabilme durumunu gözlemlenmiştir. Isı aktarımı bu yüzden de nanoparçacığın boyutlarına, cinsine, miktarına, homojen dağılımı ve süspansiyon hazırlamada kullanılan yüzey aktifleştirme işlemine göre değişiklik göstermektedir [62]. Hazırlanacak olan nanoakışkan iki farklı yöntemle elde edilir ve bunlardan ilki nanoparçacıkların aynı anda üretim ve dağıtım yapıldığı tek adımlı yöntem diğeri ise boyut düşürme ile yapılan iki adımlı yöntemdir.

Tek adımlı yöntem; Resim 4.3'te olduğu gibi kuru toz şeklinde olan nanoparçacıkların temel akışkanla ile bir araya getirilmesi sureti ile sağlanan birleşimdir. Yöntemin içeriğinde fiziksel ve kimyasal tepkimeler ön planda olup ilave olarak vakumlu buharlaştırma uygulamaları ile nanoakışkan elde edilir. Bu uygulamada nanoparçacıkların çökelmesini en asgari düzeye indirmek ve kararlılığını artırarak homojenize karışım için depolama, dağıtma işlemleri uygulanır.

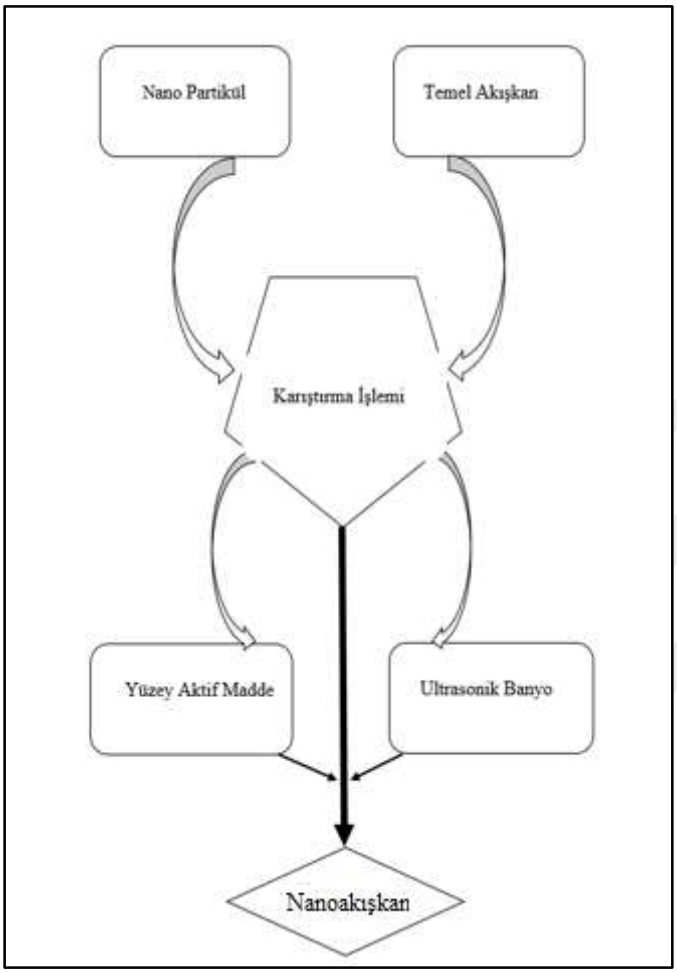


Resim 4.3. Tek adımlı nanoakışkan hazırlama yöntemi

Bu yöntemin en büyük avantajı nanoakışkandaki parçacıkların topaklanmasının oldukça az oluşudur. Ürün çoğunlukla oksitlenmesi ve ısı iletim katsayısı yüksek metal gruptaki nanoparçacıklara uygulanan yöntemdir.

İki adımlı yöntem; Resim 4.4'te olduğu gibi kuru toz şeklinde olan nanoparçacığa öğütme yöntemi ile sentezleme yapılır. Kuru toz şeklindeki parçacıklar temel akışkanla birlikte

homejen dağılım sağlar ve kararlılıklarını üst seviyeye taşımak için de yüzey aktif maddesi de ilave edilir.

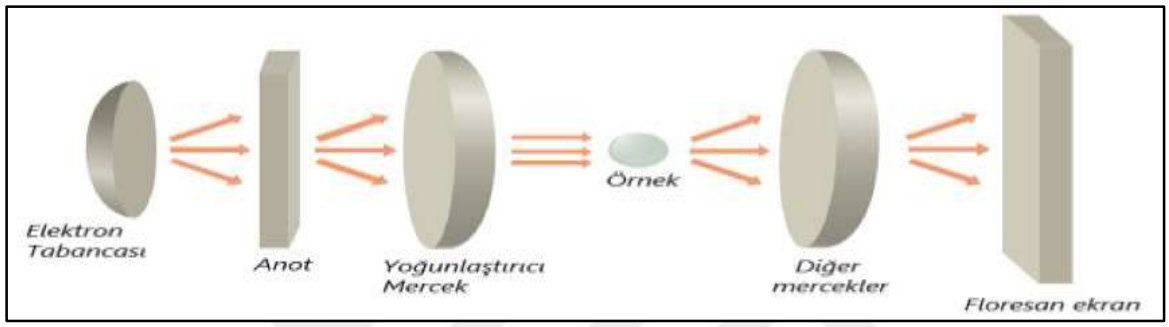


Resim 4.4. İki adımlı nanoakışkan hazırlama yöntemi

Nanoakışkanın kararlılığı önem arz etmekte olup topaklanma vb. ısı transferini düşürücü etkiler sisteme ait akışkanın sistemi tıkama yönünde de göstermesine sebep olur. Parçacıkları etkileyen diğer unsur ise elektriksel çift katman itme kuvvet etkisi ve bu itme kuvveti ile birbirinden ayrılırlar. Nanoakışkandaki kararlılık için elektriksel çift katmanlı itme kuvveti her zaman çekme kuvvetinden büyük olmalıdır.

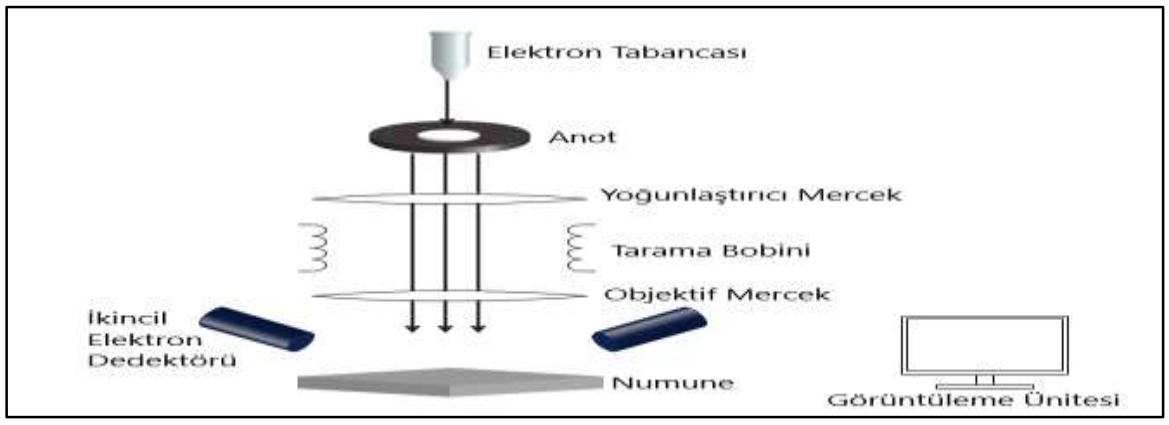
Nanoakışkanların kararlılığını; pH değer kontrolü, ultrasonik karıştırma ya da yüzey aktifleştirici madde eklemesi yaparak sağlanır. Nanoakışkan kararlığını ise; elektron mikroskopi, dinamik ışık saçılımı, spektral emicilik, sedimantasyon veya santrifüj ya da zeta potansiyel analizi yöntemlerinden biri ile değerlendirme imkanı bulunmaktadır.

Elektron mikroskopi yönteminde; TEM (transmision elektron mikroskobu) ya da SEM (taramalı elektron) kullanılarak parçacıkların konsantrasyonları, tutulumları ve elektriksel itme kuvvetleri izlenerek kararlılıklar tespit edilir. TEM'ler genellikle moleküler ve hücresel yapıları detaylı şekilde incelemek için geniş elektron demetleri kullanılır. Resim 4.5'te olduğu gibi numunelerden elektronların geçebileceği düzeyde yani 150 nm'den ince olması önemlidir ve geçiş sağlayan elektronlar dedektörler tarafından algılanır ve iki ve üç boyutlu görüntüler elde edilir.



Resim 4.5. TEM cihazının çalışması [63]

SEM'ler elektron tabancası yüksek çözünürlüklü bir görüntü elde etmek için Resim 4.6'da olduğu gibi numune üzerine yüksek enerjili elektron akışı yapar. Elektromanyetik mercekler elektron ışınının odaklanmasına yardımcı olur, bu odaklanma ile manyetik akış numuneye ulaştığında, yüzeyi dikdörtgen şekilde tarar böylelikle sadece üç boyutlu detaylı görüntü elde edilmiş olur. SEM'ler genellikle 30 kV'a kadar TEM'ler 60 ila 300 kV arasında ivmelenme voltajları kullanılarak yapılabilir.



Resim 4.6. SEM cihazının çalışması [63]

TEM görüntü büyütmeleri SEM'lerin kapasitesinden daha yüksektir. TEM örneklerini 50 milyon kattan fazla büyütebilirken SEM örnekleri ise 2 milyon kata kadar büyütebilirler. Ayrıca SEM görüntülerinin alan derinliği TEM'lerinkinden önemli ölçüde daha büyüktür. Numuneler SEM'lerde elektron kolonunun altına konumlandırılır, çünkü elektron dedektörleri saçılmış ve ikincil saçılmış elektronları toplama işlemi yapmaktadır. TEM mikroskoplarında ise numuneyi kolonun ortasına konumlandırmalıdır ki iletilen elektronlar numuneden ve altındaki lensinden geçebilsin. SEM'de yüksek toplama açıları kullanılırken TEM'de kullanılmazken numune hazırlama işlemleri SEM'de daha kolay gerçekleşmektedir [63].

Dinamik ışık saçılımı yönteminde sıvı içerisinde homojen olarak karışmış partçacıklar aydınlatıcı lazere maruz kalırlar ve böylece ışık dalgalanmaları ile hız tespiti yapılıp bu veriyle parçacık boyutu ve dağılımı ortaya konur [64].

Spektral emicilik yönteminde nanoakışkanın emicilik aralığı 190-1 100 nm olduğunda kararlılık analizinde kullanılır ve koyu renkli akışkanlarda kullanılması ışığı emdiği için uygulanabilirliği zordur.

Sedimantasyon veya santrifüj yönteminde kararlılık çökelmenin miktarı ile ölçülendirilmektedir. Kullanıma hazır nanoakışkandan numune alınarak çökelmesi ölçülür bu da parçacık boyutu ve dağılımı sabit kalıncaya kadar beklenir çökelme de yoksa kararlıdır denir. Diğer yöntemlere göre uygulaması oldukça kolaydır.

Zeta potansiyel analizi yönteminde parçacıklar arasındaki itme kuvvetinin elektrisel olarak ölçeklendirilmesidir. Parçacıklar yüzeylerindeki potansiyele göre yüksek potansiyel taşıyan yüklü parçacıklar elektriksel olarak kararlı yapıdadır denir eğer düşükse de kararsızdır denir. Zeta potansiyeli 40-60 mV arasında en ideal kararlılığa sahiptir [65].

5. TEORİK ANALİZ

Teorik analiz bölümünde sisteme ilişkin analizleri yaparken ve modeli oluştururken kullanılan denklemlere yer verilmiştir.

5.1. Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmanın tamamında kullanılan soğutucu akışkanlara ait debileri birbirini takip eden her gün için değişkenlik göstermeden sabit tutulmuştur. Her bir deney çalışma fazında soğutucu akışkanın sıcaklığı termokupl ile ölçülüp veri kayıt cihazında bilgileri muhafaza edilmiştir.

Yapılan çalışmaların tamamında parametrelerdeki sapmalar deneysel sonuçları etkilemiştir [66]. Sıcaklık ölçümlerinde termal iletkenlikteki belirsizlik ifadesi;

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial X_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial X_2} w_2\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial R}{\partial X_n} w_n\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.1)$$

Sıcaklık ölçümlerinin belirsizliği termokupl ölçüm cihazından kaynaklanan belirsizliği 0,5; cihazın bağlantı noktasından kaynaklanan belirsizliği 0,25; cihazın sıcaklığı okuması sırasında oluşan belirsizliği 0,5 alındığında hesaplanan belirsizlik ifadesi;

$$W_T = [(0{,}5)^2 + (0{,}25)^2 + (0{,}5)^2]^{\frac{1}{2}} = \pm 0{,}75℃$$

Akış hızlarını detaylı gözlemleme ve ölçmeme için debimetre cihazları kullanılmış olup debimetreden kaynaklı hatalar ölçü ve okuma dolayı oluşacak hataları kapsar. Belirsizlikler sırasıyla her ikisi içinde 0,01'dir. Buna bağlı olarak debimetrenin belirsizliği için gerekli hesaplamalar yapılırsa;

$$W_m = [(0{,}01)^2 + (0{,}01)^2]^{\frac{1}{2}} = \pm 0{,}0141\ g/s$$

Işınımı ölçme amacı ile kullanılan solarimetreden kaynaklı belirsizlik hesaplarında solarimetre cihazın belirsizliği 0,05; solarimetrede ışınım verisi okunması belirsizliği 1 olarak alınır.

$$W_{ph} = [(0{,}05)^2 + (1)^2]^{\frac{1}{2}} = \pm 1{,}001\ W/m^2$$

Belirsizlik analizleri ile ölçüm cihazlarının belirsizlikleri sırası ile hesaplanmış olup hesaplanan belirsizliklerinin kabul edilir aralıklara sahip olduğu belirtilebilmektedir.

Ölçüm cihazlarına ait teknik özellikler ve cihazların toplam belirsizlikleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Ölçüm cihazlarının tipleri, ölçüm aralıkları, hassasiyetleri ve belirsizlikleri

Cihazlar	Cihaz Tipi	Ölçüm Aralığı	Hassasiyetleri	Toplam Belirsizlik
Debimetre	Şamandıralı	0-10 g/s	± 0,01 g/s	± 0,0141 g/s
Solarimetre	Kimo SL100	1- 1500 W/m^2	± 0,05 W/m^2	± 1,001 W/m^2
Termokupl	Veri kayıt cihazı Elimko Epr-110, K Tipi	-100 - 1000 ºC	± 0,5 ºC	± 0,75 ºC

6. MATERYAL VE METOD

Tasarlanan deney setinin kurulumu için gerekli olan malzemeler proje desteğiyle sağlandıktan sonra PV/T yapımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan deney setinin kurulumu ve deneyler Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü Atölye ve Laboratuvarının olduğu sahada yapılmıştır. Deneyler iki fazdan oluşmaktadır; ilki su ile dört faklı gün ve debide (6 l/dk, 5 l/dk, 4 l/dk, 3 l/dk), ikinci fazı ise nanoakışkan ($MnFe_2O_4$/Su) ile dört faklı gün ve debide (6 l/dk, 5 l/dk, 4 l/dk, 3 l/dk) gerçekleştirilmiştir. Tüm sonuçlar ise kâğıtsız veri kayıt cihazında toplanmıştır.

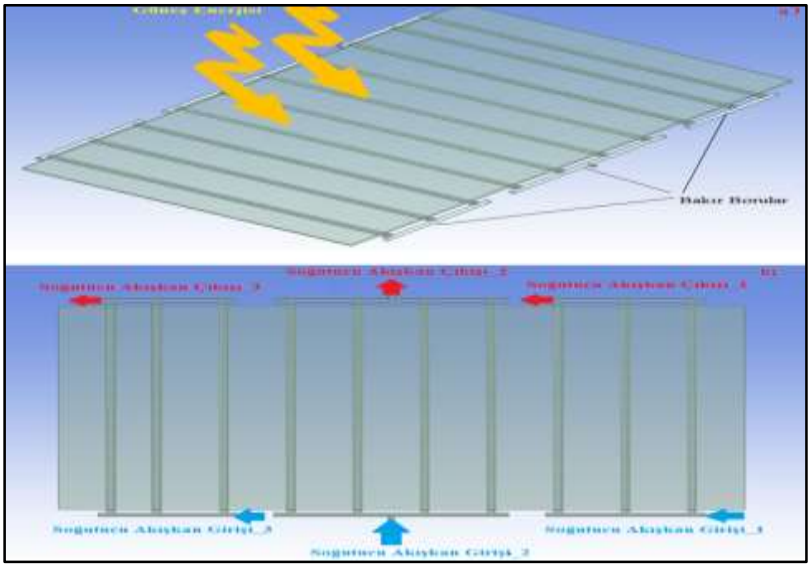
6.1. Sayısal Analiz

Sayısal analiz çalışmalarında Ansys Fluent programı kullanılmıştır. Analizler tanımlanmış problemlerin çözümünde (sayısal analiz ve deneysel olarak) kullanılan yöntemleri ifade etmektedir. Deneysel analizler doğru sonuçları elde etme açısından güvenilir neticeleri vermiş olsa da sürecinin uzun olması, deneyler esnasında tahmin edilemeyen problemlerin oluşumuna engel değildir. Bu sebepledir ki sayısal analizlerimiz de gerçekleştirilerek modeller aracılığı ile deneysel yapılan çalışmaların sayısal olarak doğrulamalarının elde edilmesi sağlanmıştır. Sayısal analizlerde hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) kullanılmıştır. CFD içeriği; geometri oluşturma, ağ yapısı oluşturma (yapının hesaplama yapılabilir küçük hücrelere bölünmesi esasını taşıması), fiziksel modelleme (akışının, ısı aktarımının) seçimi ve nihai olarak çözümünden oluşmaktadır.

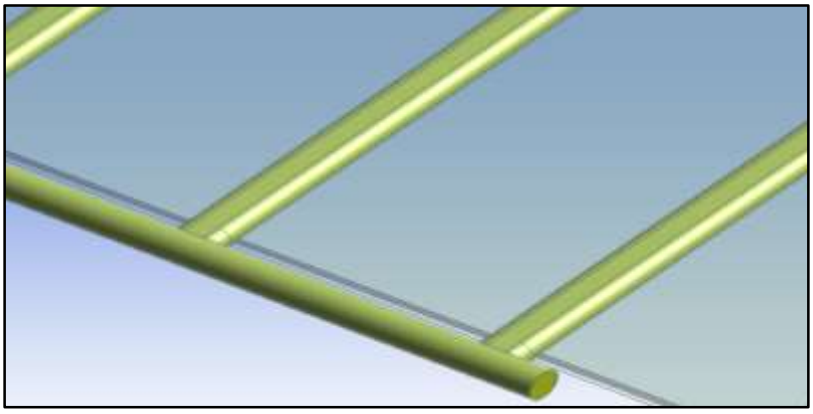
6.1.1. CFD analizi

Bir enerji dönüşüm sistemi oluşturmadan önce CFD analiz dahilinde sayısal simülasyon yöntemleri kullanılarak ısı transferi ve akışkan akış özellikleri detaylı bir şekilde incelenebilir. Akışlar, sıcaklık ve hız gibi akışkan özelliklerini deney yolu ile belirlemek genellikle zor olsa da sayısal analiz bu süreci basitleştirir. Mevcut çalışmada su soğutmalı sistemin (PV/T) genel termal özelliklerini incelemek için Ansys Fluent programı kullanılmıştır. Resim 6.1'de, geliştirilen PV/T'nin genel yapısını ve tasarlanan soğutma sisteminin düzenini göstermektedir. Buna ek olarak Resim 6.2'de soğutma borularının ve su bölümünün büyütülmüş bir gösterimini temsil etmektedir. Güvenilir sayısal sonuçlar elde

etmek için bakır boru bileşeninin CFD analizine dâhil edildiği unutulmamalıdır. PV modül tabanı ile soğutma boruları arasındaki temas yüzeyini iyileştirmek için borular eliptik olarak tasarlanmıştır. Variyenli, Yousefi, Tuncer, Sözen, Göksel ve Khanlari (2025) tarafından yürütülen bir çalışmada PV/T'de eliptik olarak tasarlanmış bakır borular kullanılmış olup nihayetinde eliptik olarak şekillendirilmiş bakır soğutma borularının başarılı bir şekilde kullanıldığını göstermiştir. Ancak daha önceki çalışmalarda PV/T'yi soğutmak için uzunlamasına borular kullanılmıştır. Bu çalışmada ise önceki çalışmalardan farklı olarak PV panelini soğutmak için enine tasarlanmış eliptik borular kullanılmıştır. Ek olarak Resim 6.1'de görüldüğü gibi daha iyi soğutma performansı elde etmek için manifold kısmı üç parçaya bölünmüştür. Bu değişiklik PV paneli üzerinde homojen bir akışkan akışı ve daha verimli soğutma sağlamak için yapılmıştır. Başka bir ifade ile elips şeklinde boruların ve bölünmüş manifoldların kullanılmasının temel amaçları; bakır boruları ve PV paneli arasındaki temas yüzeyini artırmak, homojen bir akış sağlamak ve soğutma kapasitesini yükseltmektir. Bu çalışmada aynı özelliklere sahip iki monokristal fotovoltaik panel ile deneysel değerlendirmeler yapılmıştır. Kullanılan fotovoltaik modülde güneş hücreleri cam, eva, arka levha malzemeleri ve alüminyum çerçeveden oluşan fonksiyonel katmanlar arasına yerleştirilmiştir. Fotovoltaik modüllerde güneş hücreleri arasında boşlukların bulunması bilinen bir gerçektir. PV/T sisteminin CFD analizi Ansys Fluent içinde atanan ilgili malzeme özellikleri ile birlikte tüm PV panel katmanlarını içermektedir. Karmaşıklığa neden olmaması için sayısal analizlerde güneş pilleri arasındaki boşluklar dikkate alınmamıştır.



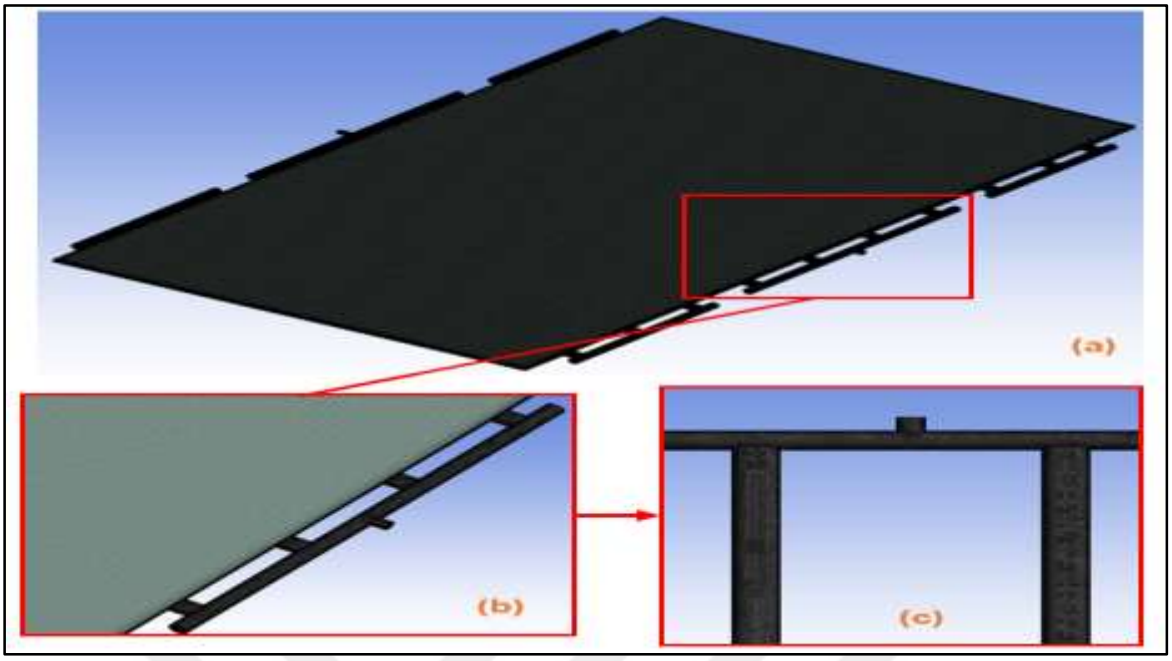
Resim 6.1. Tasarlanan PV/T'nin yapısı ve sınır koşulları a) PV/T'nin genel görünümü, b) Tasarlanan soğutma sisteminin düzeni



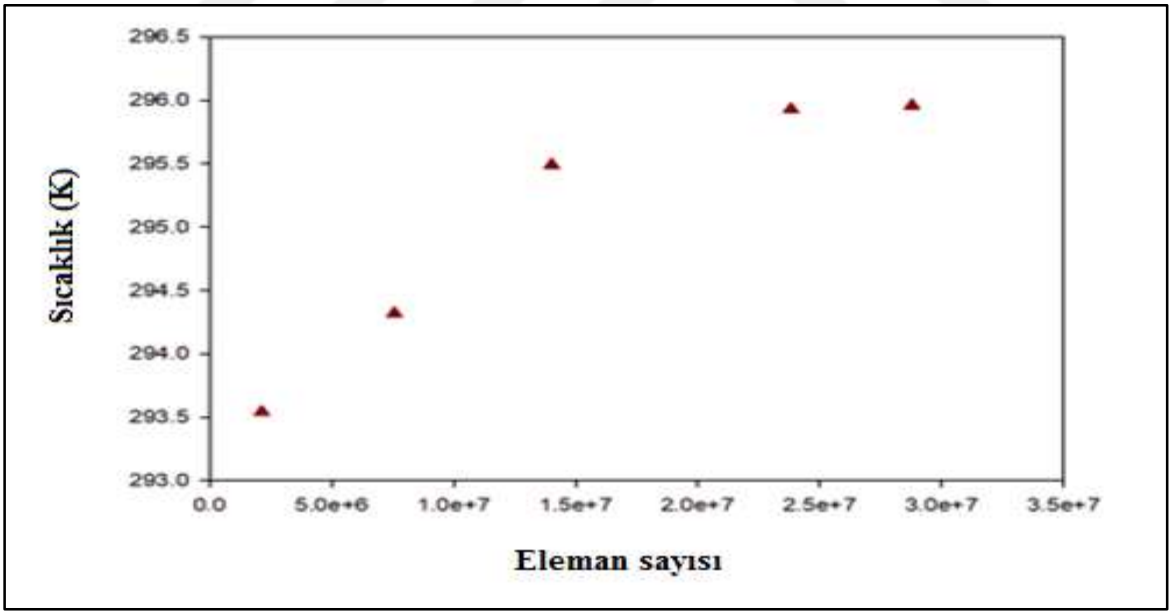
Resim 6.2. Soğutma borularının büyütülmüş resimleri

Sayısal analizlerin bir sonraki adımı olarak tasarlanan PV/T için ağ yapısı Ansys ağ modülü içerisinde gerçekleştirilmiştir. Ağ oluşturma topolojik hücreleri oluşturduğu için CFD analizi önemli işlemdir. Resim 6.3'te elips şeklindeki bakır borularla donatılmış PV/T'nin genel ağ görünümünü, PV ile bakır boruların büyütülmüş görünümünü, elips şeklinde bakır boruların ve manifold kısmının büyütülmüş ağ yapısını göstermektedir.

Resim 6.3'te gösterildiği gibi PV modülünün arka tarafında dolaşımdaki suya ısı aktarımından sorumlu borular için daha ince ağ elemanları kullanılmıştır. CFD analizi için en uygun ağ tasarımını belirlemek amacıyla tasarlanan PV/T üzerinde ağ çalışması yapılmıştır. Resim 6.4'te kullanılan ağ elemanı sayısına göre PV/T'deki çıkış suyu sıcaklığının değişimini göstermektedir. Bakır borularda ve yakın bölgelerde ince ağ elemanlarının kullanılması, Resim 6.4'teki gibi ağ elemanlarının sayısını önemli ölçüde artırmıştır. Sayısal analizde tasarlanmış borulara sahip PV/T'de 28 790 670 elemanlı bir ağ kullanılarak modellenmiştir. Oluşturulan ağ kalitesinin değerlendirilmesi, sayısal analiz sonuçlarının doğruluğunu doğrudan etkilediği için PV/T'de yapılan analizlerde önem arz etmektedir. Oluşturulan ağ yapısı için önemli kalite kriterleri arasında çarpıklık birincil parametre olarak kabul edilir. PV/T ağ yapısı için en fazla çarpıklık 0,86 iken ortalama çarpıklık 0,23 olarak tespit edilmiştir. Tespit edilmiş olan çarpıklık değerleri PV/T ağ yapısının yüksek kalitesini açıkça göstermektedir.



Resim 6.3. Elips şeklinde bakır borularla donatılmış PV/T'nin ağ görüntüsü a) Genel görünümü, b) PV ve bakır boru görünüm ve c) Elips bakır boru ve manifold büyütülmüş ağ yapısı



Resim 6.4. PV/T'de soğutucu akışkan çıkış sıcaklığı

Bu sayısal araştırmanın temel amacı, tasarlanan PV/T'nin termohidrolik davranışını analiz etmektir. Bu amaç ile CFD analizinde kararlı hal çözüm yöntemi uygulanmıştır. Sayısal analizin ilk adımında benzer sistemleri inceleyen Variyenli ve diğerleri (2025) çalışmasında belirlemiş olduğu sınır değerler bu çalışmada da esas alınmıştır. Sonraki adımda test

sonuçlarına dayanarak üç temel korunum denkleminin (kütle, enerji ve momentum) türetilmesini sağlamak için sayısal analizlerde sınır koşulları belirlenmiştir. Ayrıca türbülanslı akış rejimini dikkate alan üç boyutlu bir model kullanılarak problem karakterize edilmiştir. CFD analiz adımında akışkan akışına ilişkin belirli varsayımlarda süreklilik, momentum ve enerji denge denklemleri dikkate alınmıştır. Ek olarak sıvının sıkıştırılamaz olduğu, sıvının fiziksel özelliklerinin sabit kaldığı ve yer çekim etkisinin ihmal edildiği kabulleri de yapılmıştır.

Yapılan analizler aşağıdaki üç koruma denklemine odaklanmaktadır [68-69].

$$\nabla.(\rho.\vec{v}) = 0 \tag{6.1}$$

Momentum dengesi denklemi ise:

$$\nabla.(\rho.\vec{v}.\vec{v}) = -\nabla p + \nabla.\left(\mu\left[(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^{T}) - \frac{2}{3}\nabla.\vec{v}I\right]\right) \tag{6.2}$$

Ayrıca enerjinin korunumu şu şekilde ifade edilebilir:

$$\nabla.\left(\vec{V}(\rho E + p)\right) = \nabla.k_{eff}\nabla T - h\vec{J} + \left(\mu\left[(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^{T}) - \frac{2}{3}\nabla.\vec{v}I\right].\vec{v}\right) \tag{6.3}$$

Başlangıç analizlerinde türbülanslı akış rejimi varsayıldığından simülasyonların türbülanslı akış davranışını dikkate alması gerekmektedir. Bu nedenle önceki araştırmalara göre çeşitli PV/T sistemlerin simülasyonlarında en sık kullanılan k ve ε türbülans modeli CFD analizi için kullanılmıştır [70]. Model, türbülanslı kinetik enerjiye ve dağılım oranına karşılık gelen iki taşıma denklemi ve $k-\varepsilon$ kullanarak türbülansı hesaba katar. Buna göre sayısal simülasyonlarda $k-\varepsilon$ RNG türbülans modeli kullanılmıştır. Modelin davranışı aşağıdaki denklemlerle modellenmiştir [71]. Bunlardan ilki:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_k \mu_{eff}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \tag{6.4}$$

diğeri de aşağıdaki gibi.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff}\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right) + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \tag{6.5}$$

burada kaynak terimler S_k ve S_ε ile gösterilmektedir. Sıkıştırılabilir türbülanstaki toplam dağılıma dalgalanan genleşmenin katsayısı Y_M ile gösterilmektedir. Ek olarak model $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ ve $C_{3\varepsilon}$ sabitlerini içermektedir. Ansys fluent'teki yüzeyden yüzeye radyasyon modeli PV/T'ye gelen güneş radyasyonunu hesaba katmak için kullanılmıştır. PV/T'nin açısal konumuna göre güneş yön vektörü tanımlanmıştır. PV/T sisteminde gelen güneş radyasyonunun bir kısmı PV panelinin cam kapağı tarafından emilir. Yüzey sıcaklıklarını belirlemek ve incelenen alanın radyasyon alanın radyasyon analizini gerçekleştirmek için [72]:

$$\dot{Q}_\iota = A_i \sum_{j=1}^{N} F_{i\to j}(J_i - J_j) \tag{6.6}$$

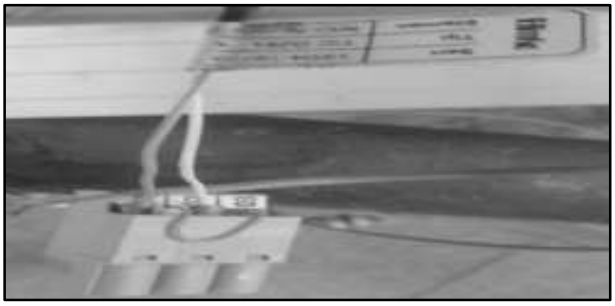
ilave olarak:

$$\sigma T_i^4 = J_i + \frac{1-\epsilon_i}{\epsilon_i} \sum_{j=1}^{N} F_{i\to j}(J_i - J_j) \tag{6.7}$$

Görüş faktörü $F_{i\to j}$, i yüzeyinden çıkan, j yüzeyine gelen güneş radyasyonun oranını ölçer. Radyasyon yoğunluğu J birim zaman ve alan başına bir yüzeyden çıkan toplam radyasyon enerjisi miktarını ölçer. Ayrıca N analiz edilen hacim içindeki toplam yüzey sayısını gösterir.

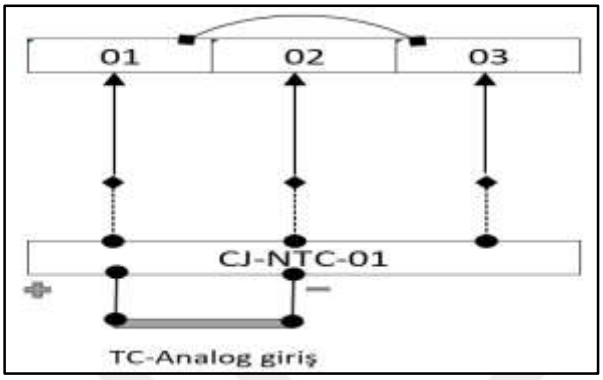
6.2. Deney Setinde Kullanılan Malzemelerin Teknik Özellikleri

Termokupl, bağlantı klemensi olarak kâğıtsız kayıt cihazı kanal girişlerine uygun montajlı kullanılması gerekli olup Resim 6.5'te gösterildiği birinci ve üçüncü çıkışları paralel bağlanarak on iki adet olacak şekilde kullanılmıştır.



Resim 6.5. Termokupl bağlantı klemensi

E-CJ-NTC-01 tip klemensleri Resim 6.6'da görülen 01 ile 03 paralel bağlantısı yapılarak ilgili kanala irtibatlandırılarak kullanılmıştır. Tüm sıcaklık bilgisi alınan termokupl giriş bağlantıları aynı düzende yapılmıştır.

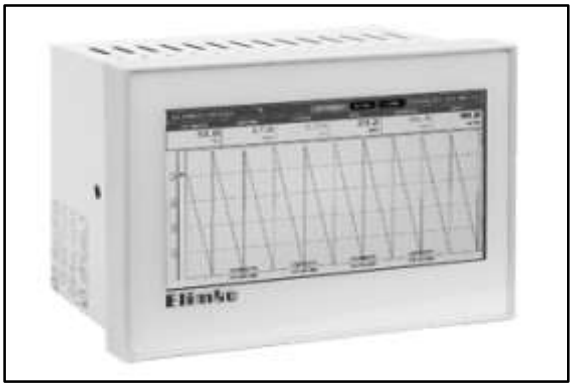


Resim 6.6. Klemens bağlantı şekli

Çizelge 6.1. Termokupl ve klemens teknik özellikleri

Termokupl ve klemens	
Tip:	E-CJ-NTC-01
Eleman sayısı:	1
Koruyucu kılıf malzeme cinsi:	1.4301 (304) paslanmaz
Koruyucu kılıf dış çapı:	6 mm
Dalma boyu:	5 cm
Rezistans termometre tel sayısı:	3 telli
Kablo boyu:	3 m
Kablo cinsi:	silikon
Rekor:	G1/2

Kâğıtsız kayıt cihazı, Resim 6.7'de görülen veri kayıt cihazı bilgisayara veri taşınabilir ve bilgisayar üzerinden izlenebilir nitelikte olup bununla birlikte programıyla birlikte çalışmalarda bir adet kullanılmıştır.

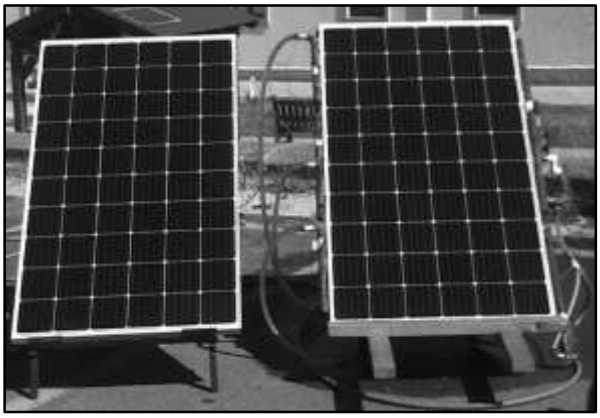


Resim 6.7. Kâğıtsız kayıt cihazı

Çizelge 6.2. Kâğıtsız kayıt cihazı özellikleri

Kâğıtsız kayıt cihazı	
Tip:	E-PR-110-2-2-2-2-0-0
Giriş:	4 adet slot, her bir slot 6 adet analog girişli
Besleme:	85-265 VAC/85-375 VDC
Doğruluk sınıfı:	0.5
Ebatları:	144-144 mm
Hafıza:	En az 8 Gb Micro SD
Veri taşıma:	PC'ye ve PC üzerinden izlenebilir
Program:	PC programı yanında
Ekran:	5.7" touch panel ekranlı
Port:	En az 1 adet USB port bağlantılı
Besleme:	6 adet 24V DC transmitter besleme
Modbus:	Giriş-çıkış özelliği
Ethernet:	Giriş-çıkış özelliği
Koruma:	IP 65 koruma sınıfında
Fonksiyon:	Matematiksel fonksiyon ve totalizer özellikli
Kanal:	En az 12 adet sanal kanala sahip
Kayıt:	Batch kayıt aralığı 0-10 sn…0-10 gün

Fotovoltaik, mono kristal 375 W gücünde Resim 6.8'de gösterildiği şekli ile iki adet panelden biri termal etkiyi gözlemlemek amacıyla soğutma amaçlı bakır borularla uyumlandırılarak PV/T yapıya dönüştürülmüştür.



Resim 6.8. Fotovoltaik (PV) paneller

Çizelge 6.3. PV panel teknik özellikleri

PV paneli	
Tip:	Mono kristal
Gücü:	375 W gücünde
Maks gerilim:	1000V/1500V DC
Güç toleransı:	0-5 W
Modül verimi:	En az %20
Çalışma sıcaklık aralığı:	-40 ^{o}C – 80 ^{o}C
Hücre nominal çalışma sıcaklığı:	En az 45 ^{o}C
DC fotovoltaik sigorta ve buşonları:	1000V-15A
Bağlantı:	Konektör ile
Kablo:	Bağlantı kabloları yanında

Jel akü, sülfürik asidin isli silikonla karıştırılması sonucu elde edilen jeli barındıran akülerdir, deney çalışmalarında her iki deney setinde de birer tane aynı güçte kullanılmıştır. Jel akü Resim 6.9'da görüldüğü gibi elektrotlarının sıvı yerine jel halde bulunduğu kuru tip akülerdir.



Resim 6.9. Jel akü

Çizelge 6.4. Jel akü teknik özellikleri

Jel akü	
Gerilim:	12 V
Kapasite:	Nominal kapasitesi 60 Ah

Akıllı inverter, aşırı yük ve kısa devre koruma niteliklerini de barındıran Resim 6.10'daki akıllı inverterden iki adet kullanılmıştır.

Çalışma anında güneş, pil ve şebeke ya da şebeke, güneş ve pil (UPS modunda) çalışma kabiliyetlerinin tamamı kullanım olarak gözlemlenmiştir.



Resim 6.10. Akıllı inverter

Çizelge 6.5. İnverter teknik özellikleri

İnverter	
Giriş değerleri:	230 VAC, 50 Hz/60 Hz frekans
Çıkış değerleri:	230 VAC ± 5%, % 90 verim, 10-20 ms.
Batarya voltaj:	Aralığı 12-48 VDC
Veri bağlantı:	USB/RS232 bağlantısı
Çalışma sıcaklığı:	-10-50 ^{o}C, veri depolama 15-60 ^{o}C
Bağlantı kabloları:	İçerisinde

Nanoparçacık mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$), ısı aktarım düzeyini üst seviyelerde tutmak amacı ile kullanılan nanoparçacık çeşidi olup Resim 6.11'deki şekli ile 100 gr miktarlı malzemedir.



Resim 6.11. Nanoparçacık mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$)

Çizelge 6.6. Nanoparçacık teknik özellikleri

Nanoparçacık ($MnFe_2O_4$)	
Adı:	Mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$)
Saflık:	% 98,95
Boyut:	55 nm
Miktar:	100 gr

Triton X-100, nanoakışkan hazırlanırken yüzey aktifleştirici olarak kullanım amacı ile Resim 6.12'deki ($C_{14}H_{22}O(C_2H_4O)_n$) formüllü ürün kullanılmıştır.

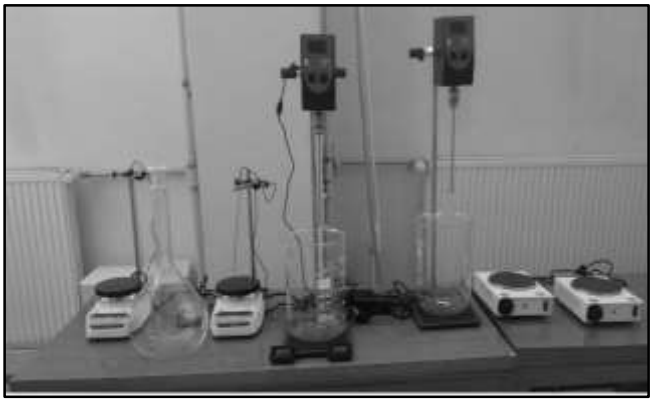


Resim 6.12. Triton X-100 yüzey aktifleştirici

Çizelge 6.7. Triton X-100 teknik özellikleri

Yüzey aktifleştirici	
Adı:	Triton X-100
Erime noktası:	6 ^{o}C
Kaynama noktası:	270 ^{o}C
Molar kütle:	647 gr

Isıtmalı manyetik ve mekanik karıştırıcı; nanoakışkan hazırlamak amacı ile saf su ve nanoparçacık kullanılarak Resim 6.13'de görülen şekli ile istenildiğinde deneyin ilerleyiş durumuna bağlı olarak hem manyetik hem de elle kontrollü karıştırma imkanları sunan cihazlardan faydalanılmıştır.



Resim 6.13. Isıtmalı manyetik ve mekanik karıştırıcı

Çizelge 6.8. Isıtmalı manyetik karıştırıcı teknik özellikleri

Isıtmalı manyetik karıştırıcı	
Giriş değerleri:	230 VAC, 50 Hz/60 Hz frekans
Güç değerleri:	600/300 (W)
Ultrasonik frekans:	28 kHz
Karıştırma hızı:	200-2200 rpm
Karıştırma kapasitesi:	10 litre
Sıcaklık ayarı:	5-320 ^{o}C

Termal anemometre, deneysel çalışmaların tamamında hem hava sıcaklık bilgisinin veri kayıt cihazındakileriyle doğrulaması için hem de panel yüzeylerinin maruz kaldığı rüzgârın hızını tespit etmek için Resim 6.14'daki anemometreden faydalanılmıştır.



Resim 6.14. Termal anemometre

Çizelge 6.9. Termal anemometre teknik özellikleri

Termal anemometre	
Hava sıcaklığı ölçüm aralığı:	0-60 ^{o}C
Güç kaynağı değeri:	9 V
Hava hızı ölçüm aralığı:	0-45 m/s kHz
Kablo uzunluğu:	Spiral uzayabilen 2 m
Pil ömrü:	50 saat
Hava hızı çözünürlüğü:	0,01 birim

Solarmetre cihazı, Resim 6.15'de gösterilen cihaz tüm deney aşamalarında radyasyon etkiyi ölçme amacı ile kullanılmıştır.



Resim 6.15. Solarmetre cihazı

Çizelge 6.10. Solarmetre teknik özellikleri

Solarmetre	
Güneş ışığı ölçüm aralığı:	0-1999 W/m^2
Güç kaynağı değeri:	4,5 V
Tepki süresi:	0,25 saniye
Kablo uzunluğu:	Spiral uzayabilen 2 m
Pil ömrü:	50 saat
Hava hızı çözünürlüğü:	0,1 birim

Pompa, PV/T soğutma düzeneğinde soğutucu akışkanın tasarlanan sistemde dolaşımını sağlamak için Resim 6.16'daki bağlantı hali ile bir adet kullanılmıştır.



Resim 6.16. Pompa ve bağlantısı

Çizelge 6.11. Pompa teknik özellikleri

Pompa	
Pompa motor gücü:	0,37 kW
Güç kaynağı değeri:	220 V
Maksimum basınç:	10 bar
Koruma tipi:	IP 44
Giriş ve çıkış:	25 mm
Emiş derinliği:	8 m

Termal kamera, deney çalışmalarında güneş panelinin yüzey sıcaklık değişimlerini gözlemlemek için Resim 6.17'deki cihaz kullanılmıştır.



Resim 6.17. Termal kamera

Çizelge 6.12. Termal kamera teknik özellikleri

Termal kamera	
Dedektör:	Soğutmasız mikrobolometre
Dedektör çözünürlüğü:	1024-768
Minimum odak:	0,15 m
Frekans:	30 Hz
Ölçüm sıcaklık aralığı:	-40-650 ^{o}C
Görüş alanı:	28^{o}-21^{o}

6.3. Deney Seti Hazırlama Aşamaları

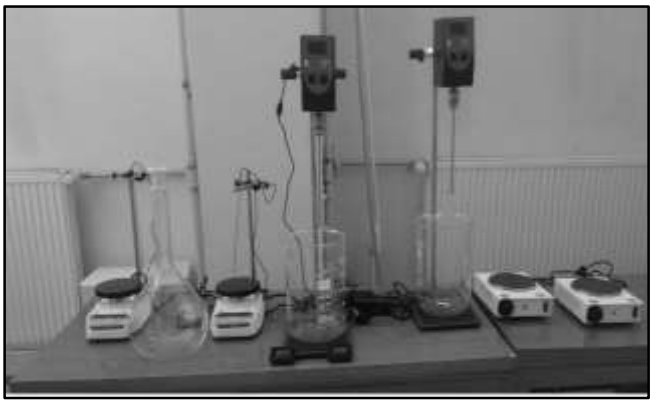
Projede fotovoltaik panelde ısınan ve ekonomik ömrü ciddi anlamda kısalan yonga yüzeylerinin soğumasını termodinamik anlamda sağlayarak panele ilişkin verimliliği yüksek oranda sağlamak amaç edinilmiştir. Monokristal panel kullanılarak gölgelenmeden ve ısıdan çok etkilenmeden deneysel çalışmalar farklı soğutucu ve akışkan debilerinde yapılmıştır. Bu deneysel çalışma içeriğinde termal anlamda soğutma ön planda olmayan fotovoltaik panel ile eşit güçte termal nitelikli soğutulan fotovoltaik panel yüzey sıcaklıklarının değişimi çok açık bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Bunun için öncelikle PV panelin ısı değiştirici düzeneği hazırlanarak ardından montajı yapılıp kurulum aşamasına geçilerek deneyler yapılmaya başlanılmıştır. Deneysel çalışmaların su ve nanoakışkan ile iki farklı fazda yapılması amacı ile PV/T için sırası ile yukarıdan aşağı doğru 3'lü, 4'lü ve 3'lü gruplar halinde 3 giriş tek çıkışta toplanacak şekilde bakır borularla ile tasarlanmış soğutucunun bağlantıları yapılmıştır.

6.3.1. Nanoakışkanın hazırlanışı

Metal oksit parçacık içeren mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$, saflık %98.95) nanoparçacık tozları ve ana akışkan (saf su) unsurun homojen biçimde karışımının sağlanması amacı ile manyetik karıştırıcı ve çözelti ısıtıcısı kullanılmış olup olası aksiliklere karşılık mekanik karıştırıcı ile çözelti ısıtıcı da kullanılmıştır. Nanoparçacık olarak mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$) kullanılarak saf su ile nanoakışkan hazırlıkları yapılmıştır. Bu hazırlıklar kapsamında nanoparçacıkların ilave edildiği 5'er litre kapasiteli her birinden ikişer tane beher kaplar ile birlikte ısıtmalı manyetik karıştırıcı ve mekanik ısıtıcı ile birlikte mekanik karıştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$) nanoparçacıklar arasında çok metalli oksitler grubunda bulunmaktadır. Kuru toz şeklindeki parçacıklar temel akışkanla birlikte homejen dağılımının sağlanması ve kararlılıklarını üst seviyeye ulaştırmak maksadı ile yüzey aktifleştirici madde de ilave edilmiştir. Hazırlanan çözeltide oluşması mümkün çökelmelerin önüne geçebilmek için temel akışkanın %0,2'si kadar yüzey aktifleştirici ($C_{14}H_{22}O(C_2H_4O)_n$ formülüne sahip) Triton X-100 kullanılmıştır. Yüzey aktif ediciliği özelliği ile parçacık temas açılarını azaltan Triton X-100 kullanımı sayesinde nanoparçacığı dış yüze temasları artırılıp ıslanma üst seviyeye taşınmış olup yüzey gerilmelerinde de azalma elde edilmiştir.

Hazırlanan hibrit nitelikteki nanoakışkan çözeltinin kararlılık durumunu bozmamış olmasına ve çökelme etkisi oluşturmamış olmasına dikkat edilmiştir. Nanoakışkan hazırlanırken kütlece % 0,5 oranında mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$) kullanılarak hazırlıklar yapılmıştır. Tüm deney çalışmalarında her biri 5'er litre olacak şekilde 2 farklı kapta nanoakışkan 45℃ sıcaklıkta yarım saat ısıtılarak ve 2200 rpm devirde karıştırılmış olup 10 litre soğutucu akışkan hazırlığı bu şekilde tamamlanmıştır. Hazırlanmış olan bu nanoakışkanın pompa vasıtasıyla tasarımı ve montajı yapılan soğutma sistemi içerisinde dolaşımı belirlenen debilerde sağlanmıştır.

Deneysel çalışmanın nanoakışkan hazırlığı aşamasında manyetik karıştırıcı ile yapılan hazırlıkta sıvı içerisine bırakılan mıknatıs bünyesinde tutulumlar hazırlık işlemlerinin ilk 10 dakikasında dikkat çekmiş olup sonuç olarak nanoparçacıkların manyetik alandan etkilendiği gözlemlenmiştir. Bu oluşması ön görülmez durum mekanik ısıtıcı ve karıştırıcı kullanımı ile aşılmış olup Resim 6.18'deki deney düzeneği kullanılarak 45℃ sıcaklıkta yarım saat ısıtılarak ve aynı sürede 2200 rpm devirde karıştırılarak hazırlanmıştır. Bu yüzden nanoakışkan hazırlık çalışmasında tüm hazırlıklar mekanik düzeneğe uygun şekilde yapılmıştır. PV panelden en verimli şekilde yararlanmak için ısı aktarımı bakır borular vasıtası ile sağlanmıştır. Soğutucu düzenekte mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$) ve saf su ile yapılan karışım farklı debilerde kullanarak deneylerde ısı aktarımının etkisi üzerinde durulmuştur.

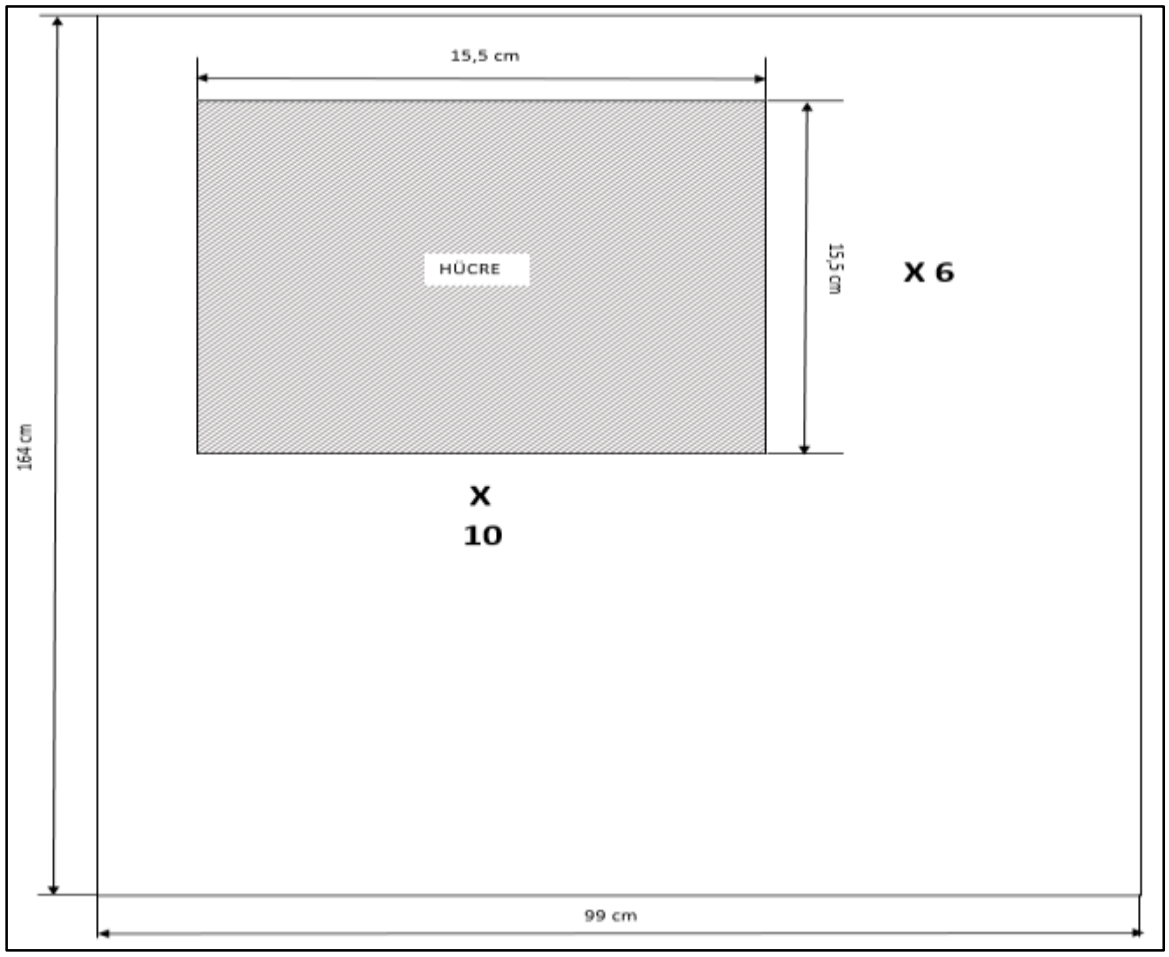


Resim 6.18. Manyetik, mekanik karıştırıcı ve ısıtıcı cihaz

6.3.2. Isı değiştirici elemanların tasarımı ve fotovoltaik (PV) panele montajı

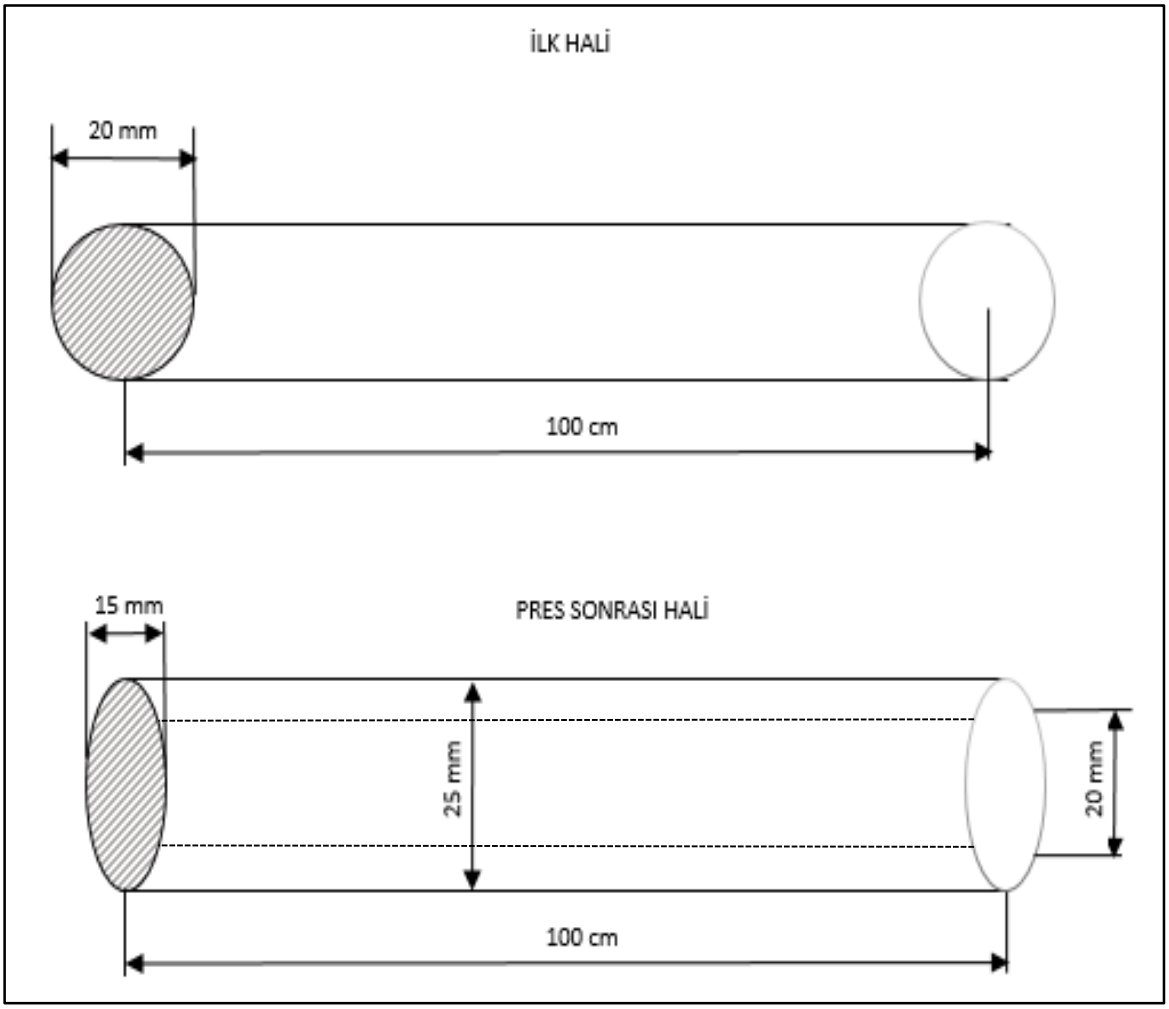
Bakır borular 164 x 99 cm ölçülerindeki monokristal fotovoltaik panelin arka kısmına, dış

çerçevelerine uygun biçimde eşit ölçülerde yerleştirilip bakır boru setleri ile 3'lü, 4'lü, 3'lü grup oluşturacak biçimde montajı yapılmıştır. Fotovoltaik panelin yüzeyinde 15,5 x 15,5 cm ölçülerinde yatayda altı, düşeyde ise on adet hücre bulunmakta olup Resim 6.19'daki gibi yerleşime sahiptir.



Resim 6.19. Fotovoltaik panele hücrelerin yerleşimi ve miktarı

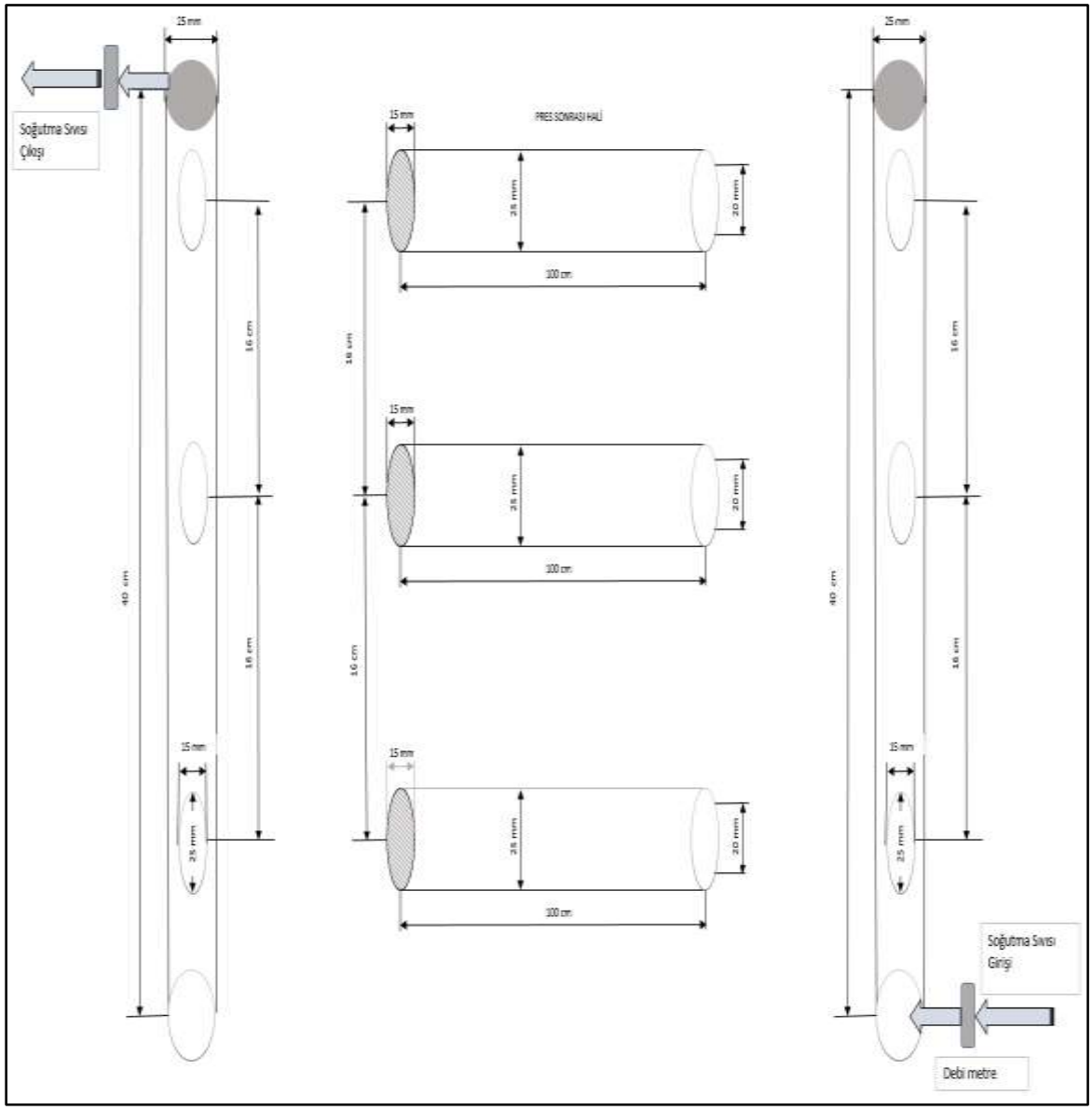
100 x 2 cm ölçülerinde Resim 6.20'de olduğu gibi bakır borular kullanılarak panel eninde tüm yüzeye temas edecek şekilde press makinesi ile gerekli baskı uygulanarak 1,5 x 2,5 x 100 cm ölçülü hale getirilmiştir. Bu hali ile içerisinden sıvı geçebilecek boyutta sıralanırlar ve 3'lü, 4'lü, 3'lü irtibatlandırılacak şekilde kollektör bağlantılarını oluşturacak biçimde sırası ile hem giriş hem de çıkış için tüm bakır borular soğuk kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. 2,5 x 40 cm üst üçlü giriş ve çıkış bakır boru kollektör bağlantısı Resim 6.21'deki gibidir. 2,5 x 56 cm orta dörtlü giriş ve çıkış bakır boru bağlantısı Resim 6.22'deki gibidir. 2,5 x40 cm alt üçlü giriş ve çıkış bakır boru bağlantısı ise Resim 6.23'deki gibi tasarlanmıştır.



Resim 6.20. Bakır boru şekil değişikliği öncesi ve sonrası

Fotovoltaik panelin arka kısmına yerleştirilen 164 x 99 cm ölçülerindeki bakır borular aralarında yukarıdan aşağı doğru her biri arasında 16 cm (alttaki üçlü grupta panel boyunca ikinci üçlü grubu oluşturmak için en sonuncu ile 11cm aralık) olacak şekilde 10 adet sıra ile yerleştirilmiştir.

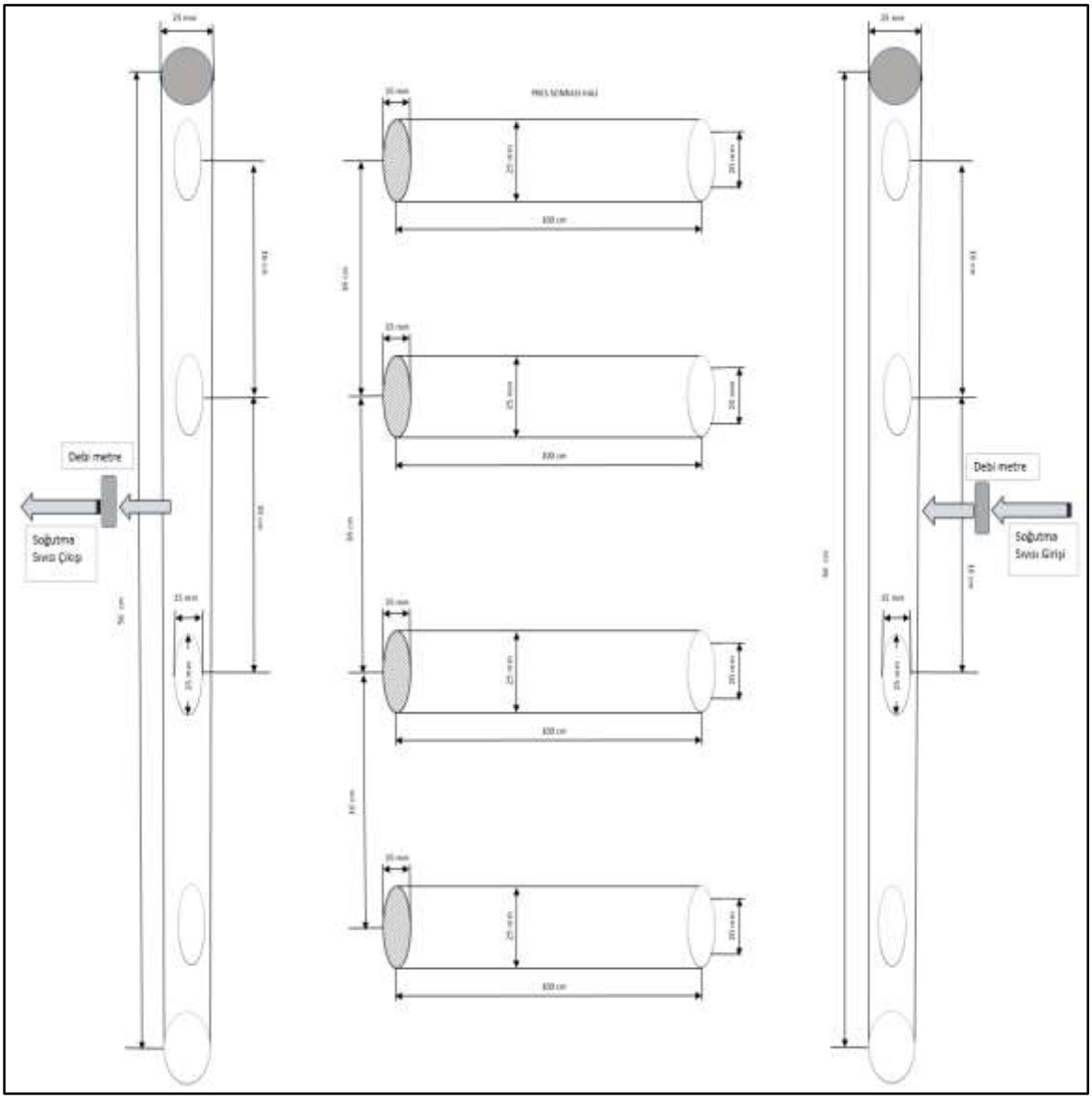
Üst üçlü grup için yatayda üçlü olarak dizilen ısı değiştirici bakır boruların her iki ucundan irtibatlanması 40 x 2,5 cm ölçülerindeki bakır boruların yukarıdan aşağıya her biri arası 16 cm mesafe olacak şekilde bağlantı uçları açılarak kaynak yöntemi ile birleşimi sağlanmıştır. Üst üçlü grup için kesinlikle hiçbir sızmanın da olmayacağı sistem testi yapılarak doğrulanmıştır.



Resim 6.21. Üst üçlü giriş ve çıkış bakır boru bağlantısı

Üst üçlü grup düzeneği panel enince getirilmiş olan soğutucu akışkanın geçirileceği bakır boruların sağ alt bağlantı ucundan debimetre ile girişin yapılabileceği, sol üstten ise soğutucu akışkanın çıkışının sağlanabileceği biçimde fotovoltaik panelin arkasına yerleşimi çerçeveye oturacak ölçütlerde tasarlanmıştır.

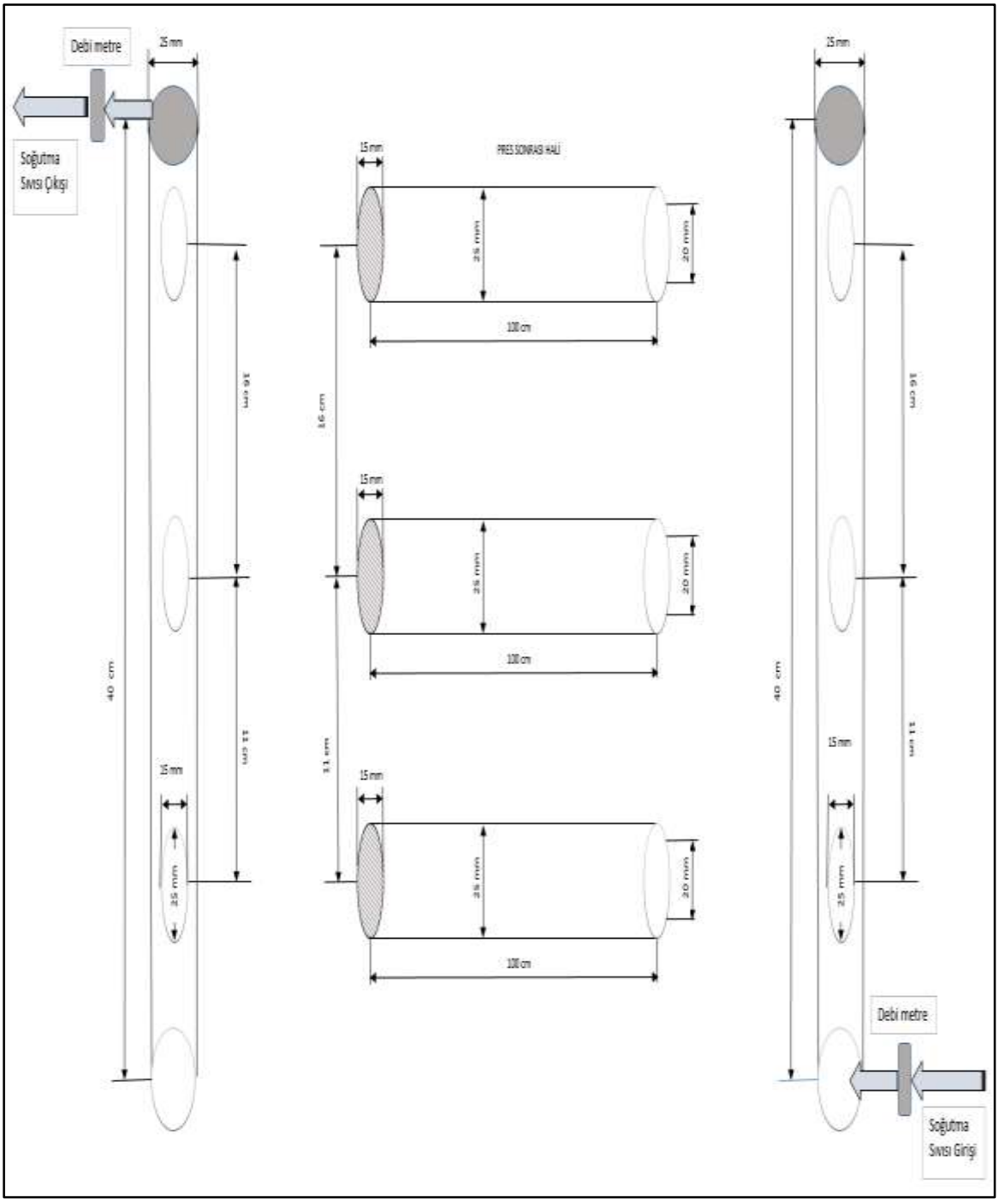
Orta dörtlü grup için yatayda dörtlü olarak dizilen ısı değiştirici bakır boruların her iki ucundan irtibatlanması 56 x 2,5 cm ölçülerindeki bakır boruların yukarıdan aşağıya her biri arası ve üst üçlü grubun son dizgisi ile 16 cm mesafe olacak şekilde bağlantı uçları açılarak kaynak yöntemi ile birleşimi sağlanmıştır.



Resim 6.22. Orta dörtlü giriş ve çıkış bakır boru bağlantısı

Orta dörtlü grup düzeneği panel enince getirilmiş olan soğutucu akışkanın geçirileceği bakır boruların orta bağlantı ucundan debimetre ile girişin yapılabileceği, sol ortadan ise soğutucu akışkanın çıkışının sağlanabileceği biçimde fotovoltaik panelin arkasına yerleşimi çerçeveye oturacak ölçütlerde tasarlanmıştır.

Alt üçlü grup için yatayda üçlü olarak dizilen ısı değiştirici bakır boruların her iki ucundan irtibatlanması 40 x 2,5 cm ölçülerindeki bakır boruların yukarıdan aşağıya sıralanması ile sağlanmıştır. Bu durumda her biri arası 16 cm (en alttaki üçlü grupta son dizgi ile bir üst mesafesi 11 cm) olacak şekilde bağlantı uçları açılarak soğuk kaynak yöntemi ile birleşimi sağlanmıştır.



Resim 6.23. Alt üçlü giriş ve çıkış bakır boru bağlantısı

Alt üçlü grup düzeneği içinse panel enince getirilmiş olan soğutucu akışkanın geçirileceği bakır boruların sağ alt bağlantı ucundan debimetre ile girişin yapılabileceği, sol üstten ise soğutucu akışkanın çıkışının sağlanabileceği biçimde fotovoltaik panelin arkasına yerleşimi çerçeveye oturacak ölçütlerde tasarlanmıştır.

6.4. Deneyin Yapılışı

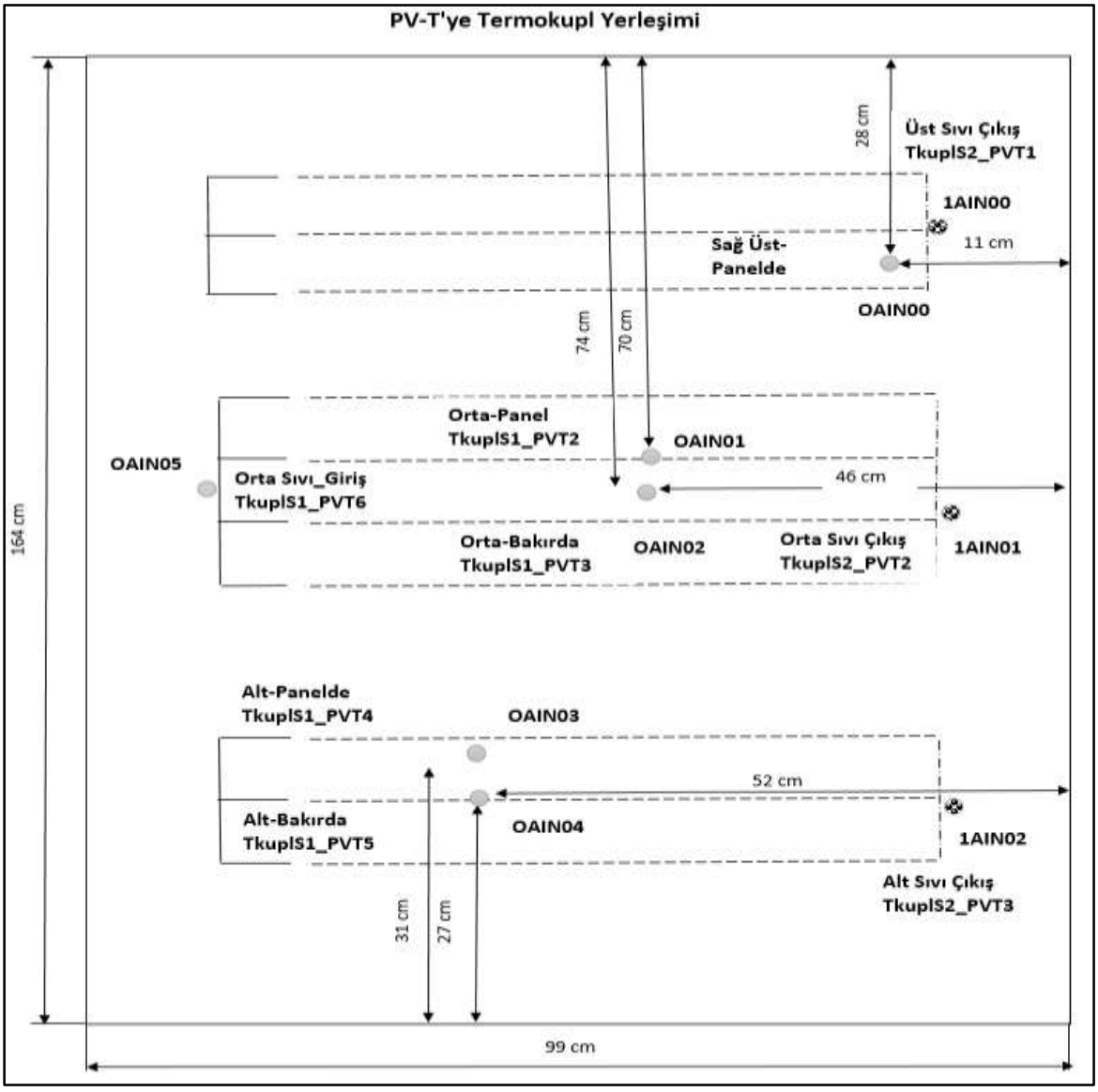
Deney çalışmalarında kullanılan birinci set; PV panelin, invertörün, veri kayıt cihazı, akünün ve bilgisayar bağlantıları yapılarak oluşturulmuş güneşten elektrik üreten düzenektir. İkinci deney seti ise birinci deney setinin yanında aynı özelliklere sahip eşit güç kapasiteli ve teçhizatlı olarak donatılmış olan PV panelin arkasında soğutucu akışkanın geçişinin sağlandığı düzenekle donatılmıştır. Soğutucu düzenek montajı panel ölçülerine de uygun olarak sağlanmış halde olan PV/T ile yan yana her iki panel de güneye bakacak şekilde 40° açı ile 39.940873, 32.819318 koordinatlarında kampüs yerleşkesinde konumlandırılmıştır. Deney setleri iki fazdan oluşacak şekilde iki farklı soğutucu akışkan kullanarak her bir faz çalışmasında da farklı akışkan debileri ile çalışmalar yapılmıştır. İlk fazı suyla, ikinci fazı ise mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$) ve saf su ile olacak şekilde PV ve PV/T paneller ile yapılmıştır.

İlk faz deney (soğutucu akışkan olarak su kullanılarak yapılan) çalışmasında bu fazın tüm denemelerinde PV/T panelde soğutucu akışkan olarak su kullanılmıştır. Kullanılan soğutucu ana akışkanın (su) akış hızı debimetre vasıtası ile ayarlanmaktadır. Ayrıca debimetreler tasarlanmış olan soğutucu eliptik düzenekli bakır borulara girişi bağlantı elemanları vasıtasıyla irtibatlandırılarak kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar 4 (dört) gün saat 10:00 ile 16:00 arası ve 4 (dört) farklı debide Çizelge 6.13'te ifade edildiği sıra ile belirtilen soğutucu akışkan ile gerçekleştirilmiş.

Çizelge 6.13. İlk faz deney çalışmasında kullanılan soğutucu akışkan ve debileri

Soğutucu Akışkan	Debi (l/dk)
Su	6
Su	5
Su	4
Su	3

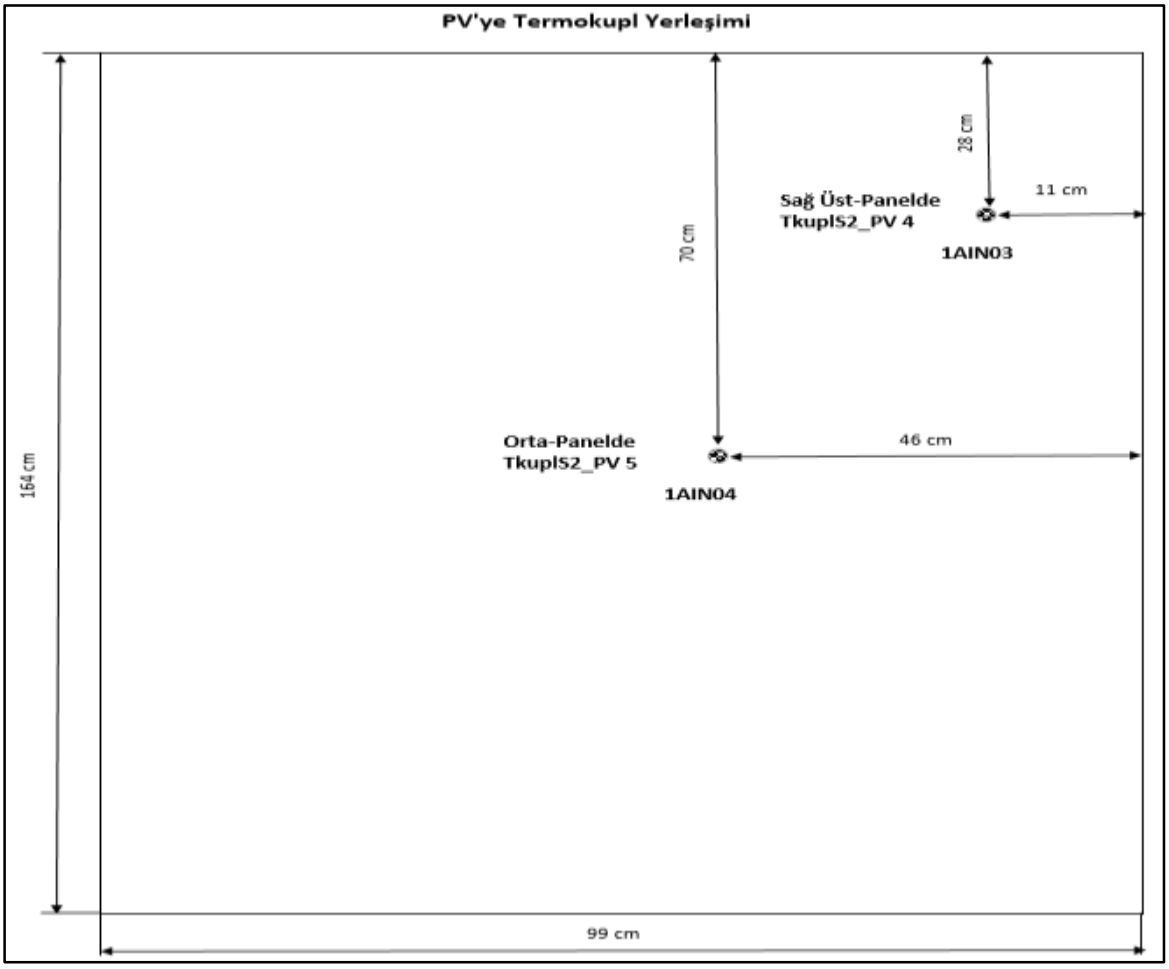
Deneysel çalışmanın ilk fazında veri kayıt cihazımızda soğutucu akışkan, hava, PV ve bununla birlikte PV/T panellerden alınan sıcaklık bilgilerini Çizelge 6.14'te belirtilen kayıt sırası ve kod isimlerle derlenmiştir. PV/T panelden sıcaklık bilgisi Resim 6.24'teki şekilde termokupl uçlar yerleştirilerek veriler toplanmıştır.



Resim 6.24. Fotovoltaik termal (PV/T) panele termokupl yerleşimi

Bu veriler; PV/T panel gövdesine temaslı üç adet, soğutucu akışkanın temaslı olduğu bakır boruların dış gövdesinde iki adet, soğutucu akışkanın girişinde bir adet kullanılarak S1 olarak isimlendirilen veri bandında toplamıştır.

S2 veri bandında ise sırası ile soğutucu akışkanın çıkışında üç adet, PV panel gövdesinde iki adet ve hava sıcaklığını ölçmek için ise bir adet olmak üzere toplam on iki adet K tipi termokupl ile veri kayıt cihazında toplanmaktadır. PV panel gövdesinde termokupl yerleşimi Resim 6.25'deki gibi yapılmıştır.



Resim 6.25. Fotovoltaik (PV) panele termokupl yerleşimi

Veri kayıt cihazında iki kanalın tamamı Çizelge 6.2'deki sırada ifade edildiği gibi iki giriş (S1, S2), 12 kanal (0AIN00 ile 1AIN05 arasında) isim ve etiketleri ile kullanılmıştır. Veri kayıt cihazında PV/T panelden gelen; S1 girişine ait 0AIN00 kanalında sağ üst köşesindeki, 0AIN01 panel ortasındaki, 0AIN02 orta panel hizasında orta bakır borudaki, 0AIN03 alt paneldeki, 0AIN04 alt panel hizasında bulunan bakır borudaki, 0AIN05 sisteme giren soğutucu akışkandaki sıcaklık bilgilenin almaktadır. Bununla birlikte S2 girişine ait 1AIN00 kanalında üst akışkan çıkışındaki, 1AIN01 panel orta akışkan çıkışındaki, 1AIN02 panel alt akışkan çıkışındaki, 1AIN03 sağ üst PV paneldeki, 1AIN04 orta PV paneldeki, 0AIN05 havadaki sıcaklık bilgilenin almaktadır.

Veri kayıt cihazı verilere uzaktan erişim imkânını da sunmuştur, tüm çıkışlara ilişkin veriler bağlantı klemenslerinin teknik özellikler dosyasında izah edilen şekilde olduğu gibi ölçme ucu bağlantısına bağlanmıştır.

Çizelge 6.14. İlk faz deney çalışmasında veri kayıt cihazına ait girişler

S1	
Kanallar	Etiket
0AIN00	PVT1
	Sagust
	Panel
0AIN01	PVT2
	Orta
	Panel
0AIN02	PVT3
	Orta
	Bakır
0AIN03	PVT4
	Alt
	Panel
0AIN04	PVT5
	Alt
	Bakır
0AIN05	PVT6
	Giriş
	Orta Sıvı

S2	
Kanallar	Etiket
1AIN00	PVT1
	Çıkış
	Üst Sıvı
1AIN01	PVT2
	Çıkış
	Orta Sıvı
1AIN02	PVT3
	Çıkış
	Alt sıvı
1AIN03	PV4
	Sağ üst
	Panel
1AIN04	PV5
	Orta
	Panel
1AIN05	PVT6
	Hava
	Sıcaklık

İkinci faz deney çalışması, soğutucu akışkan olarak mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$) ve saf su (kütlece %0,5) ile hazırlanan karışım kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu fazın tüm denemelerinde PV/T panelde soğutucu akışkan olarak mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$) ve saf su ile hazırlanan nanoakışkan kullanılmıştır. Kullanılan soğutucu akışkanın akış hızı debimetre vasıtası ile ayarlanmıştır. Birinci fazda kullanılan PV/T deney setinin aynısı kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar dört gün saat 10:00 ile 16:00 arası ve farklı debilerde Çizelge 6.15'te ifade edildiği sıra ile gerçekleştirilmiş.

Çizelge 6.15. İkinci faz deney çalışmasında kullanılan soğutucu akışkan ve debileri

Soğutucu Akışkan	Debi (l/dk)
$MnFe_2O_4$/Su	6
$MnFe_2O_4$/Su	5
$MnFe_2O_4$/Su	4
$MnFe_2O_4$/Su	3

Deneysel çalışmanın ikinci fazında veri kayıt cihazında soğutucu akışkan, hava, PV ve bununla birlikte PV/T panellerden sıcaklık bilgilerini Çizelge 6.16'da belirtilen sıralama ile derlenmiştir. Bu veriler; PV/T panel gövdesine temaslı üç adet, soğutucu akışkanın temaslı olduğu bakır boruların dış gövdesinde iki adet, soğutucu akışkanın girişinde bir adet kullanılarak S1 olarak isimlendirilen veri bandında toplamıştır.

S2 veri bandında ise sırası ile soğutucu akışkanın çıkışında üç adet, PV panel gövdesinde iki adet ve hava sıcaklığını ölçmek için ise bir adet olmak üzere toplam on iki adet K tipi termokupl ile veri kayıt cihazında toplanmıştır.

Veri kayıt cihazında toplanmış verilerin tamamı deneyin ilk fazında olduğu gibi termokupl yerleşimleri Resim 6.20 ve Resim 6.21'de olduğu gibidir. Veri kayıt cihazında iki kanal ve on iki veri girişinin tamamı da kullanılmıştır.

Çizelge 6.16. İkinci faz deney çalışmasında veri kayıt cihazına ait girişler

S1	
Kanallar	Etiket
0AIN00	PVT1
	Sagust
	Panel
0AIN01	PVT2
	Orta
	Panel
0AIN02	PVT3
	Orta
	Bakır
0AIN03	PVT4
	Alt
	Panel
0AIN04	PVT5
	Alt
	Bakır
0AIN05	PVT6
	Giriş
	Orta Sıvı

S2	
Kanallar	Etiket
1AIN00	PVT1
	Çıkış
	Üst Sıvı
1AIN01	PVT2
	Çıkış
	Orta Sıvı
1AIN02	PVT3
	Çıkış
	Alt sıvı
1AIN03	PV4
	Sağ üst
	Panel
1AIN04	PV5
	Orta
	Panel
1AIN05	PVT6
	Hava
	Sıcaklık

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

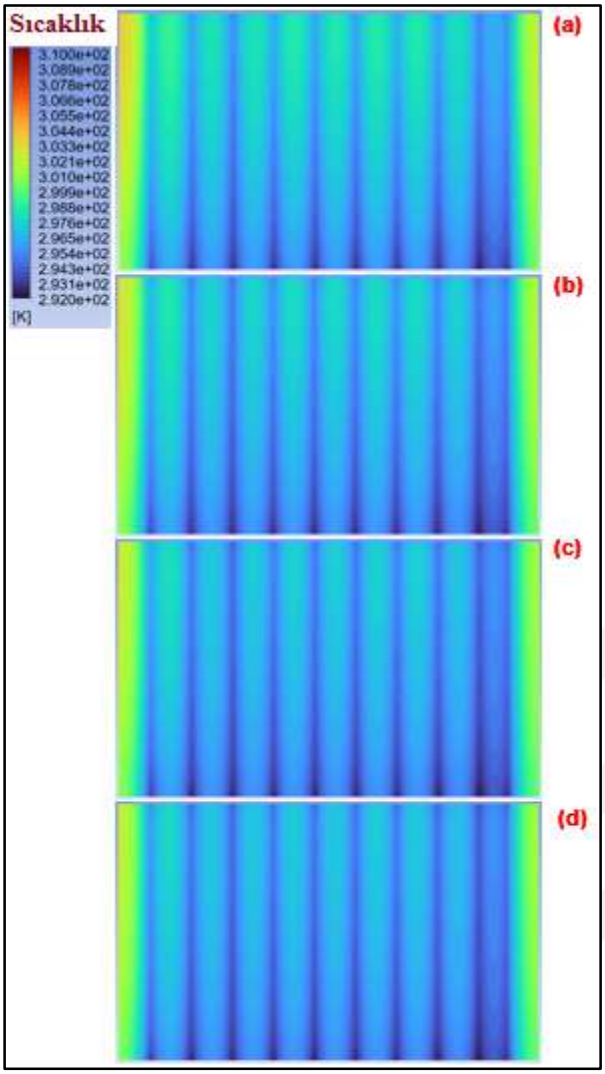
Deneyler, iki fazdan oluşup uygun hava koşullarında güneşlenme olanağının en iyi şartlarda olduğu zamanda kurulu vaziyette deney setleri ile başlanabilir hale getirilmiştir. İlk faz su ile yapılıp akabinde ikinci faz nanoakışkanın hazırlanması sonrası deney çalışmalarına geçilip verilerin elde edilmesi amaçlanmıştır. İlerleyen zamanda her faz deney için veri kayıt cihazı ile verileri toplama aşaması sonrası verileri derleme aşamasına geçilmiştir. Toplanan veriler vasıtası ile analizler yapılmıştır ve tüm çalışmalar rapora dönüştürülüp çıktılar üretilmiştir.

7.1. CFD Analiz Sonuçları

Bu bölümde sayısal olarak üretilen sonuçlar sunulmakta ve tartışılmaktadır. Sayısal simülasyonlar öncelikle PV/T sisteminin genel performansını değerlendirmek ve termal tepkisini görselleştirmek için gerçekleştirilmiştir. Resim 7.1'de, farklı akış hızları için modifiye edilmiş borular ve manifold ile PV/T'deki PV panel üzerindeki sıcaklık değişimini göstermektedir.

Mevcut çalışmada, önceki çalışmalardan farklı olarak, PV paneli soğutmak için enine modifiye edilmiş borular kullanılmıştır. Ayrıca, daha iyi soğutma performansı elde etmek için manifold kısmı üç parçaya bölünmüştür. Resim 7.1, bu modifikasyonların su soğutma sisteminin soğutma performansı üzerindeki olumlu etkisini açıkça göstermektedir.

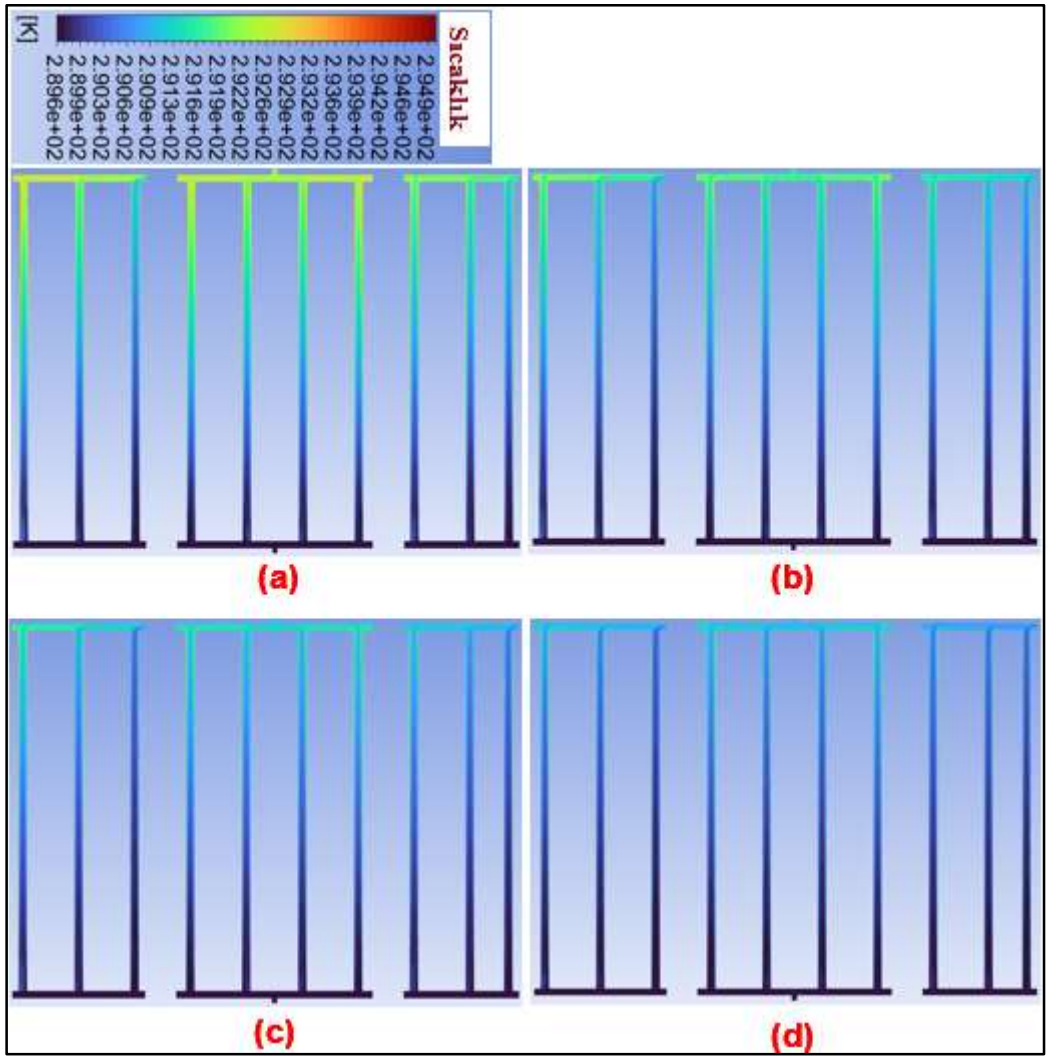
Yatay olarak monte edilmiş soğutma borularının kullanılması, Resim 7.1'de görüldüğü gibi PV yüzeyinin soğutulmasında önemli bir etkiye sahip olmuştur. Literatürdeki uygulamalardan farklı olarak soğutucu bakır borular enlemesine ve eliptik şekil verilerek manifoldlara bağlanmıştır nihayetinde temas yüzey alanları artırılmıştır. Manifold olarak da tek değil üçlü olarak tasarlanmıştır. Manifold sayısının tek olmamasının, enlemesine soğutucu yerleştirilmesinin ve temas yüzeyinin eliptik yapıyla artırılmasının ısı aktarımındaki etkisi Resim 7.1'de detaylı bir şekilde görülmektedir.



Resim 7.1. Modifiyeli borular ve manifold ile PV/T yüzeyinin sıcaklık dağılımı a) 3 l/dk, b) 4 l/dk, c) 5 l/dk ve d) 6 l/dk

Başka bir deyişle, yatay olarak monte edilmiş borular kullanılarak su akış yolunun kısaltılması, PV paneli üzerindeki soğutma etkisini iyileştirmiştir. Elips şeklinde bakır boruların kullanılması, temas yüzeyini artırmış ve sonuç olarak PV paneli üzerindeki soğutma etkisini iyileştirmiştir. Yukarıda belirtildiği gibi, manifoldun bölünmesi, soğutma sisteminde homojen bir su akışı sağlamada ve daha homojen soğutulmuş bir PV yüzeyi elde etmede de olumlu etkilere sahiptir. Ayrıca, Resim 7.1'de su akış hızının PV panel üzerindeki soğutma etkisine tesiri açıkça görülebilir. Resim 7.2, soğutma suyu akış hızının etkisini karşılaştırmak amacıyla, dört farklı su akış hızında PV/T'nin su bölgesindeki sıcaklık değişimini bir düzlem üzerinde göstermektedir. PV panelleri soğutmak için kullanılan geleneksel tip ısı değiştiricilerinde, genellikle suyu soğutma borularına dağıtmak için bir dağıtım manifoldu kullanılır. Ancak, mevcut modifiye edilmiş ısı değiştiricide, homojen akış

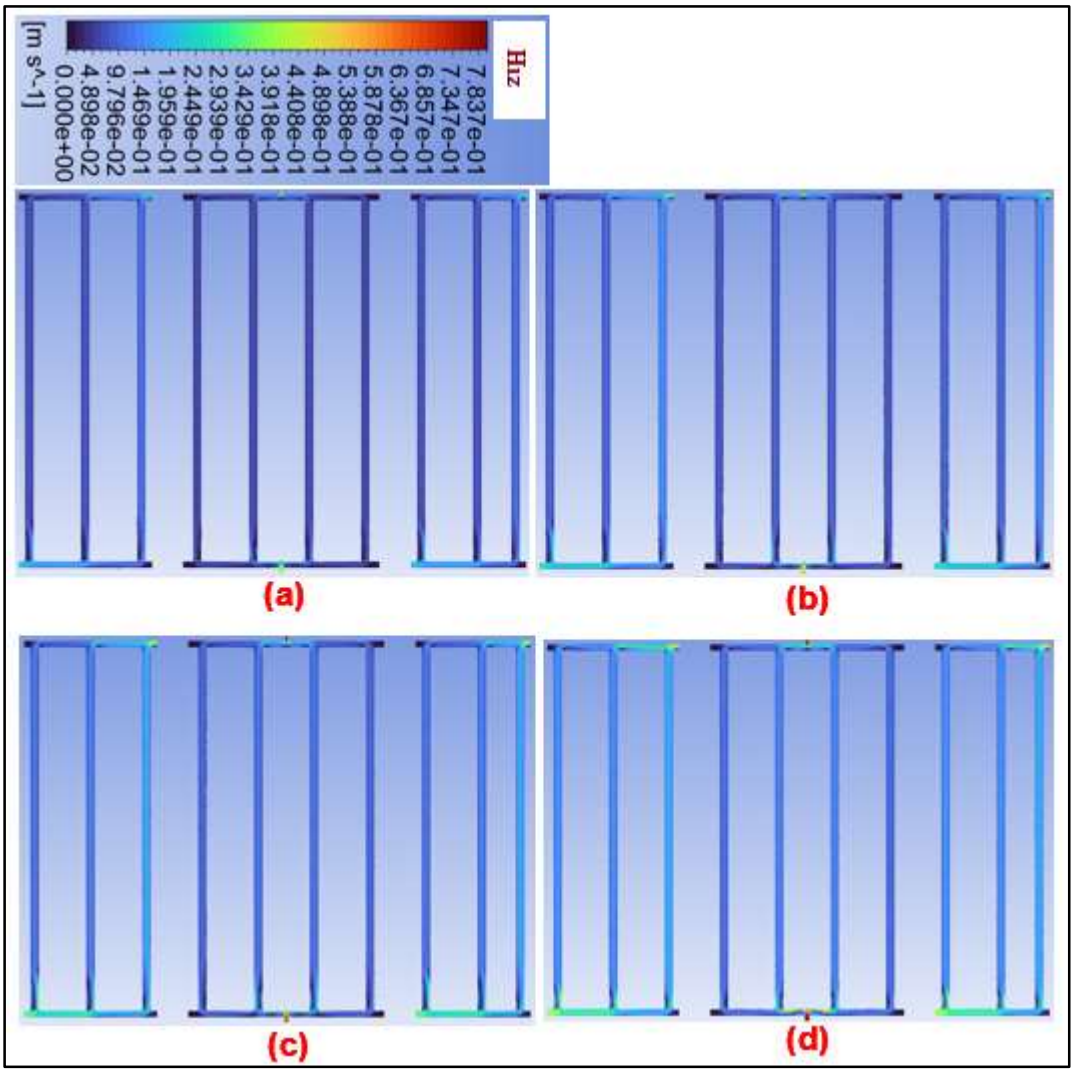
elde etmek ve soğutma etkisini artırmak için dağıtım manifoldu kısmı üç parçaya bölünmüştür. Resim 7.2'de PV panelden suya nasıl enerji aktarıldığını göstermektedir. Resim 7.2, soğutma ısı değiştiricinin dağıtım manifoldu kısmının bölünmesinin sistemde homojen bir soğutma elde edilmesine yol açtığını açıkça göstermektedir. Resim 7.2'de görüldüğü gibi, soğutma suyu üç dağıtım manifolduna girer ve PV panelinin sıcaklığını düşürmek için 10 adet modifiye edilmiş bakır boruya gönderilir.



Resim 7.2. PV/T'nin su alanındaki sıcaklık dağılımı a) 3 l/dk, b) 4 l/dk, c) 5 l/dk, d) 6 l/dk

Daha sonra, akan su, ısı değiştiricinin üç üst toplama manifoldu bölümü tarafından toplanır ve sistemden dışarı atılır. Resim 7.3, dört farklı su akış hızında PV/T'nin ısı değiştirici kısmının içindeki bir düzlem üzerindeki su alanı için hız dağılımını göstermektedir. Bu şekil, PV/T'nin ısı değiştirici kısmının içindeki su akış modelini göstermektedir. Bu şekil, sistem içindeki su akış hızının etkisini göstermektedir. Ayrıca, Resim 7.3, sistemin manifold kısmı

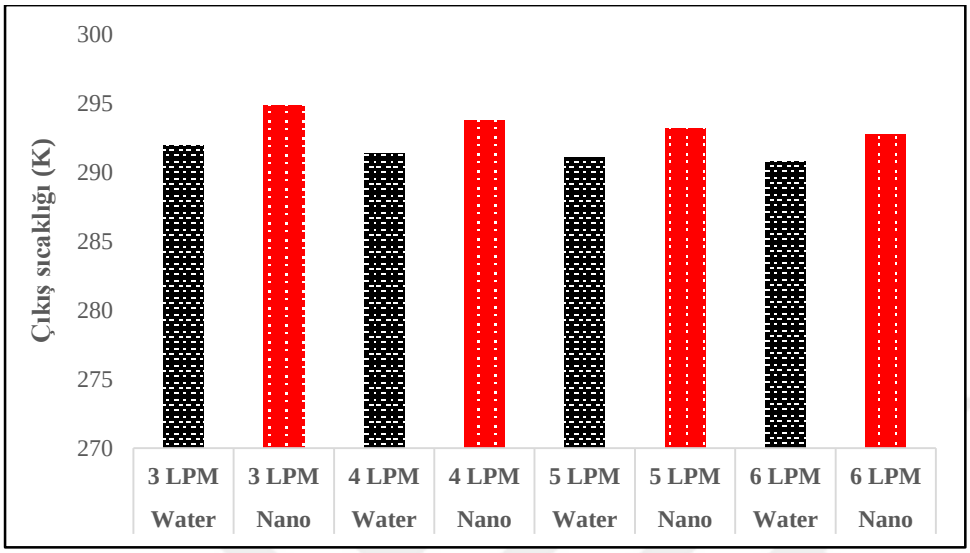
için yeni bir tasarım kullanılarak elde edilen, sistemin soğutma ısı değiştirici içindeki homojen su dağılımını göstermektedir.



Resim 7.3. PV/T'nin ısı değiştirici içindeki düzlem üzerindeki hız dağılımı a) 3 l/dk, b) 4 l/dk, c) 5 l/dk ve d) 6 l/dk

Şekil 7.1, PV/T'de sayısal olarak elde edilen ortalama çıkış suyu sıcaklığını göstermektedir. Çalışma akışkanı olarak nanoakışkan kullanılması, soğutma suyunun çıkış sıcaklığında iyileşmeye yol açmıştır. nanoakışkan kullanımı, çıkış suyu sıcaklığını önemli ölçüde artırmış, bu da PV/T'de daha iyi soğutma anlamına gelmektedir. Nanoparçacıkların eklenmesi, suyun termal özelliklerini artırarak daha fazla termal enerji elde edilmesine ve sonuç olarak PV panelinin daha iyi soğutulmasına neden olmuştur.

Çalışma akışkanının akış hızının ısı değiştirici kısmındaki çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisi Şekil 7.1'de görülmektedir.



Şekil 7.1. PV/T'de sayısal olarak elde edilen ortalama çıkış suyu sıcaklığı

7.2. Deneysel Analiz Sonuçları

Yapılan bu deneysel çalışma, kampüs yerleşkesinde deney setleri 39.940873, 32.819318 koordinatlarına yerleştirilerek yatay zemine 40º açı eğimle Çizelge 7.1'de listelenen sırada her biri farklı olacak şekilde birbirini takip eden günlerde ve farklı soğutucu akışkan (su ve nanoakışkan "$MnFe_2O_4$ – saf su karışımı") debilerinde yapılmıştır.

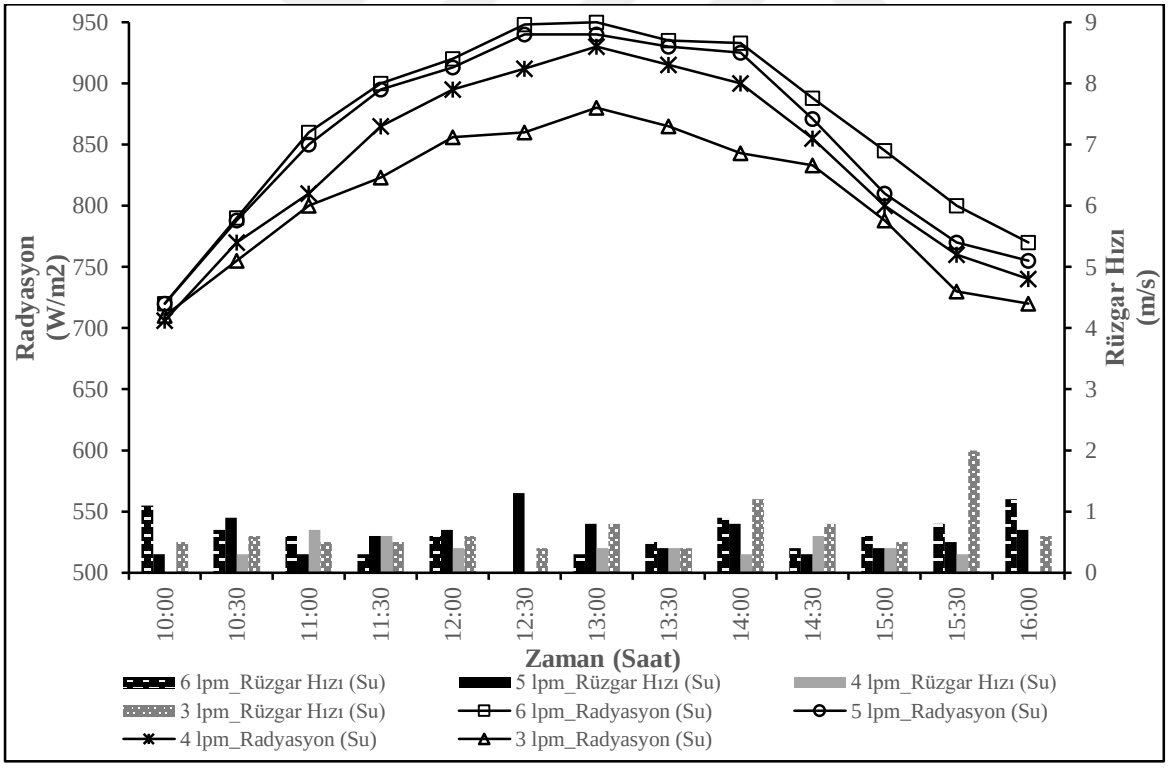
Çizelge 7.1. Tüm deneylere ait soğutucu akışkan ve debileri

1. Faz Deneyler		2. Faz Deneyler	
Soğutucu Akışkan	Debi (l/dk)	Soğutucu Akışkan	Debi (l/dk)
Su	6	$MnFe_2O_4$	6
Su	5	$MnFe_2O_4$	5
Su	4	$MnFe_2O_4$	4
Su	3	$MnFe_2O_4$	3

Öncelikle deneysel çalışmalar ilk olarak birinci faz olarak su ile dört farklı akışkan debisinde yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında tasarlanmış olan soğutucu bakır borulu düzenek panel

yüzeyine teması da sağlanacak şekilde yerleştirmiş olup ilk çalışma 6 l/dk akışkan debisinde sonrakiler ise farklı günde sırası ile 5 l/dk, 4 l/dk ve 3 l/dk debilerinde yapılmıştır.

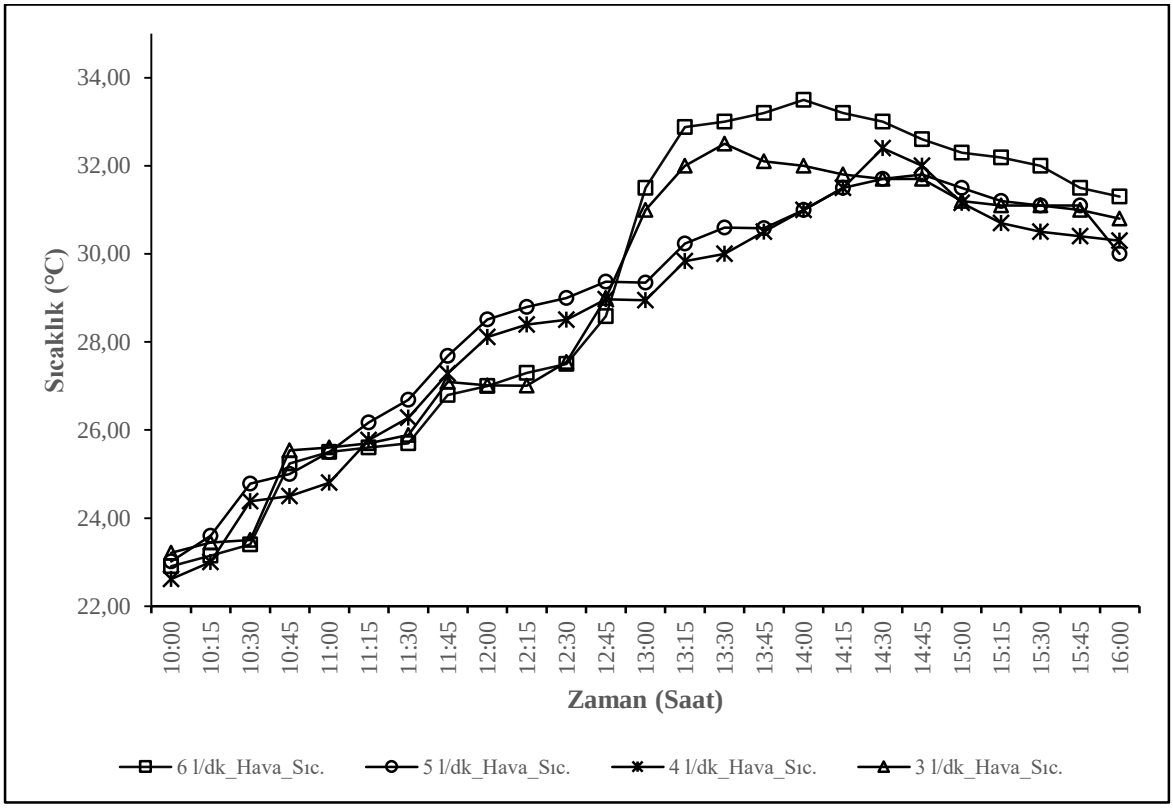
Su ile ilk faz olarak yapılan deney için ilk gün 6 l/dk debideki soğutucu akışkan kullanıldığı gün radyasyon etkisi en fazla 13:00'te 950 W/m^2 olarak ölçülmüş olup aynı saatte rüzgâr hızı da 0,3 m/s olarak ölçülmüştür. Aynı deney setinde sıra ile devam eden gün 5 l/dk debi ile soğutucu akışkan kullanımının yapıldığı deneyde radyasyon etkisi en fazla 13:00'te 940 W/m^2 olarak ölçülmüş olup aynı saatte rüzgâr hızı da 0,8 m/s ölçülmüştür. 4 l/dk debi ile soğutucu akışkan kullanımının yapıldığı günde radyasyon etkisi en fazla 13:00'da 930 W/m^2 olarak ölçülmüş olup aynı saatte rüzgâr hızı da 0,4 m/s ölçülmüştür. 3 l/dk debi ile soğutucu akışkan kullanımının yapıldığı günde radyasyon etkisi en fazla 13:00'te 880 W/m^2 olarak ölçülmüş olup aynı saatte rüzgâr hızı da 0,8 m/s olarak ölçülmüştür. Gerçekleştirilmiş olan deney çalışmasına ilişkin radyasyon ve rüzgâr hızı Şekil 7.2'deki gibidir.



Şekil 7.2. Su ile yapılan deneylerde rüzgâr hızı ve radyasyon

Su ile yapılan deneylerde günlük olarak sıcaklık değişimleri de Şekil 7.3'te ifade edildiği biçimde değişiklik göstermiştir. Birinci faz deneyin ilk günü (6 l/dk deneyinde) hava sıcaklığı en fazla 14:00'te 33,5°C, devam eden gün (5 l/dk deneyinde) hava sıcaklığı en fazla

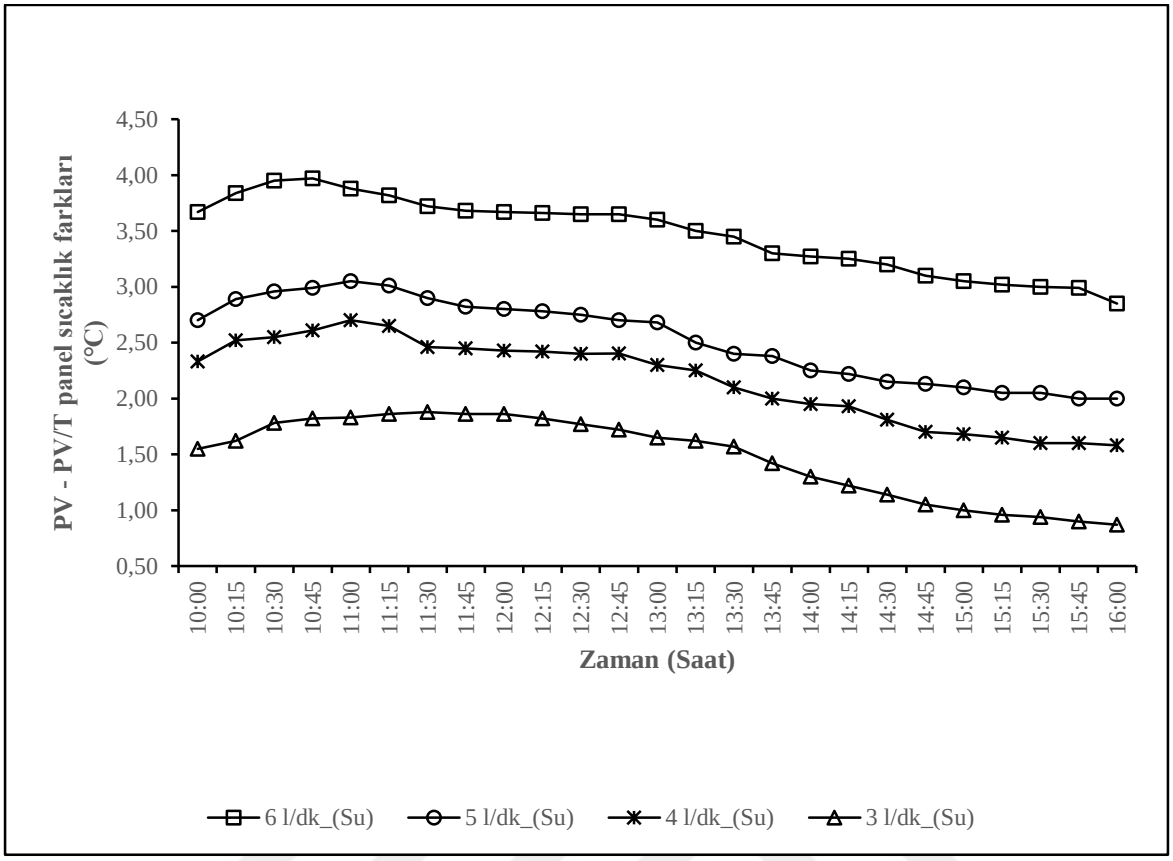
14:45'te 31,8℃ tespit edilmiştir. Bir sonraki gün (4 l/dk deneyinde) hava sıcaklığı en fazla 14:30'da 32,4℃, son gün (3 l/dk deneyinde) hava sıcaklığı en fazla 13:30'da 32,5℃ olarak tespit edilmiştir.



Şekil 7.3. Su deneylerinde hava sıcaklık değişimi

Soğutucu akışkan olarak su kullanılan deneylerde PV ve PV/T deney setlerinin her ikisinde de sağ üstte konumlandırılmış haldeki termokupllardan (PV4 - PV/T1_Sağ_Üst Panel) alınan bilgiler neticesinde Şekil 7.4'teki gibi değerler elde edilmiştir. 6 l/dk debi ile yapılan deneyde paneller arasındaki yüzey sıcaklık farkı gün ortası 12:00'de 3,67℃ olarak ölçülmüştür.

Devamında takip eden günde ise aynı saat için 5 l/dk debi ile sıcaklık farkı 2,80℃ olduğu tespit edilmiştir. 4 l/dk debi ile sıcaklık ise aynı saat için 2,43℃, son gün 3 l/dk debi ile sıcaklık aynı saatte 1,86℃ olarak tespit edilmiştir.

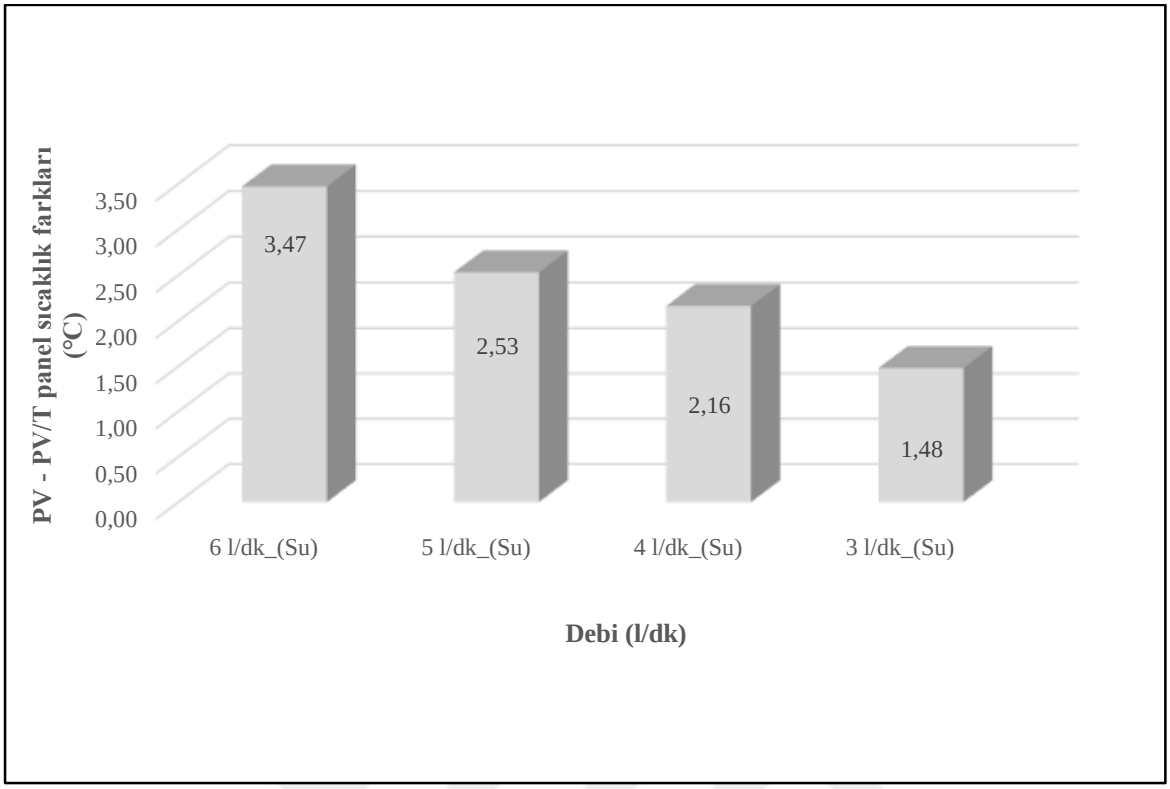


Şekil 7.4. Su deneylerinde PV ve PV/T sağ üst panel sıcaklık değişimleri

Ayrıca deney süresince her gün yapılan ölçümler neticesinde her iki panele ilişkin sağ üst yüzeye ait sıcaklık farkları ortalaması ise Şekil 7.5'te ifade edildiği gibidir.

Birinci fazın ilk günü 6 l/dk debideki yapılan soğutmada sıcaklık farkı ortalaması 3,47℃ ve 5 l/dk debideki yapılan deneyde soğutmada sıcaklık farkı ortalaması 2,53℃ ölçülmüştür. Sonraki gün 4 l/dk debideki yapılan soğutmada sıcaklık farkı ortalaması 2,16℃ ve son gün 3 l/dk debideki yapılan soğutmada sıcaklık farkı ortalaması 1,48℃ olarak ölçülmüştür.

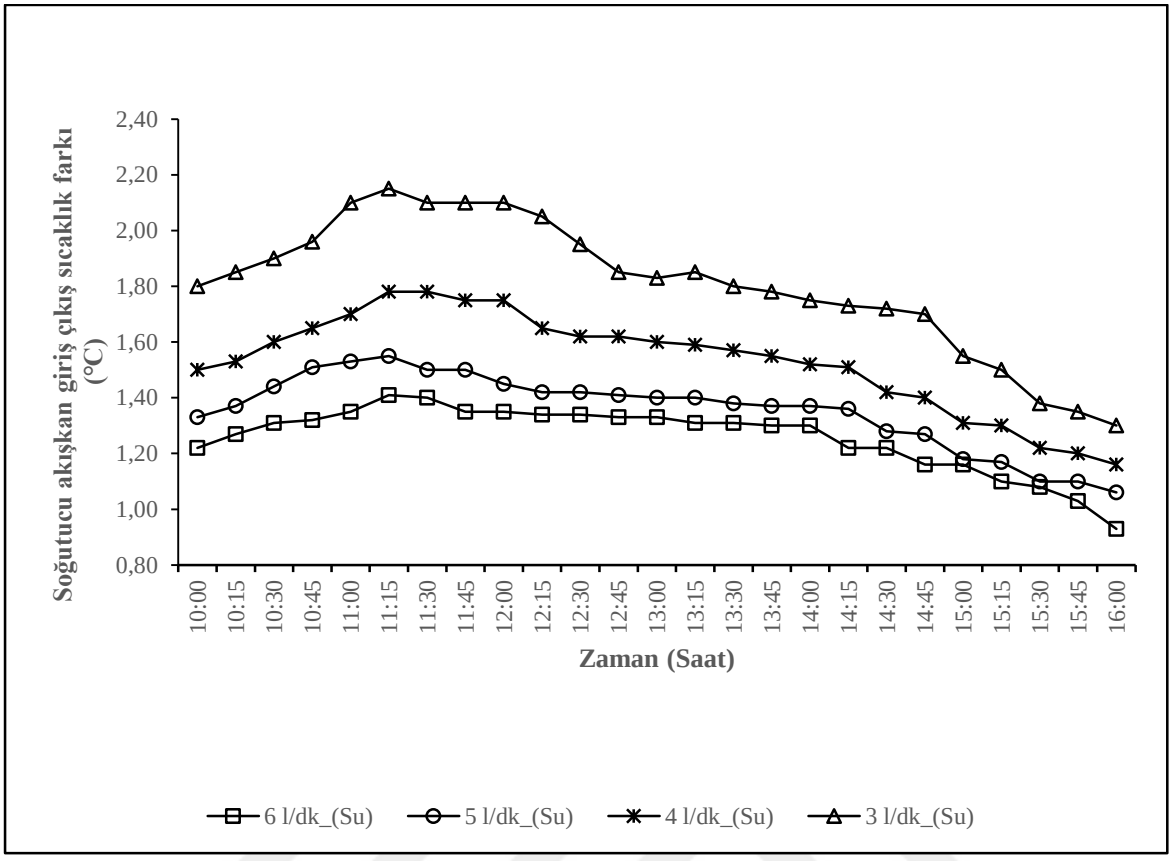
Bu çalışma da göstermiştir ki soğutucu akışkan 6 l/dk olan en yüksek debide panel sağ üst yüzeyinde ortalama sıcaklık farkı en yüksek seviyede tespit edilmiştir.



Şekil 7.5. Su deneylerinde PV ve PV/T panel arasındaki sıcaklık farkı

PV/T panelde verimin yüksek tutulması amacı ile soğutma için suyun kullanımı sonucunda panel arkasından çıkan su ile giriş yapılan su arasındaki farkı Şekil 7.6'da detaylı biçimde gözlemlemek mümkündür.

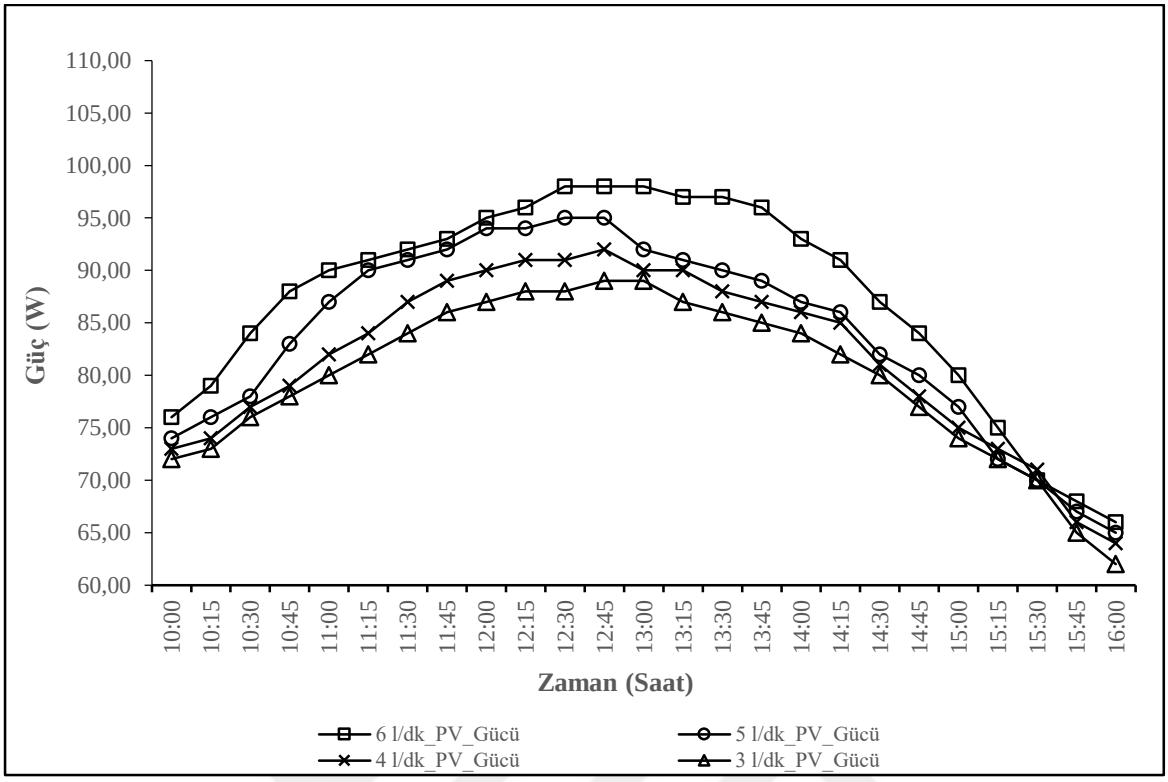
Birinci fazın ilk günü 6 l/dk debi ile yapılan deneyde soğutma sıvısı çıkış ve giriş sıcaklık farkının en fazla olduğu tespiti ilk ölçüm saatlerine yakın 11:15'te 1,41℃ olarak ve gün ortalaması ise 1,26℃ olarak ölçülmüştür. Bir sonraki gün 5 l/dk debi ile yapılan deneyde soğutma sıvısı çıkış ve giriş sıcaklık farkının en fazla olduğu tespiti 11:15'te 1,55℃ ve gün ortalaması ise 1,35℃ olarak ölçülmüştür. Sonraki gün 4 l/dk debi ile soğutma sıvısı çıkış ve giriş sıcaklık farkının en fazla olduğu tespiti 11:30'da 1,78℃ ve gün ortalaması ise 1,53℃ olarak ölçülmüştür. Son günde 3 l/dk debi ile soğutma sıvısı çıkış ve giriş sıcaklık farkının en fazla olduğu tespiti 11:15'te 2,15℃ ve gün ortalaması ise 1,81℃ olarak tespit edilmiştir.



Şekil 7.6. Soğutma sıvısı çıkış ve giriş sıcaklık farkı

Deneysel çalışma kapsamında; soğutma yapılmayan PV panelin güneşin radyasyon etkisine bağlı olarak invertör çıkış gücü değişiminin Şekil 7.7'de ifade edildiği biçimde olduğu tespiti yapılmıştır.

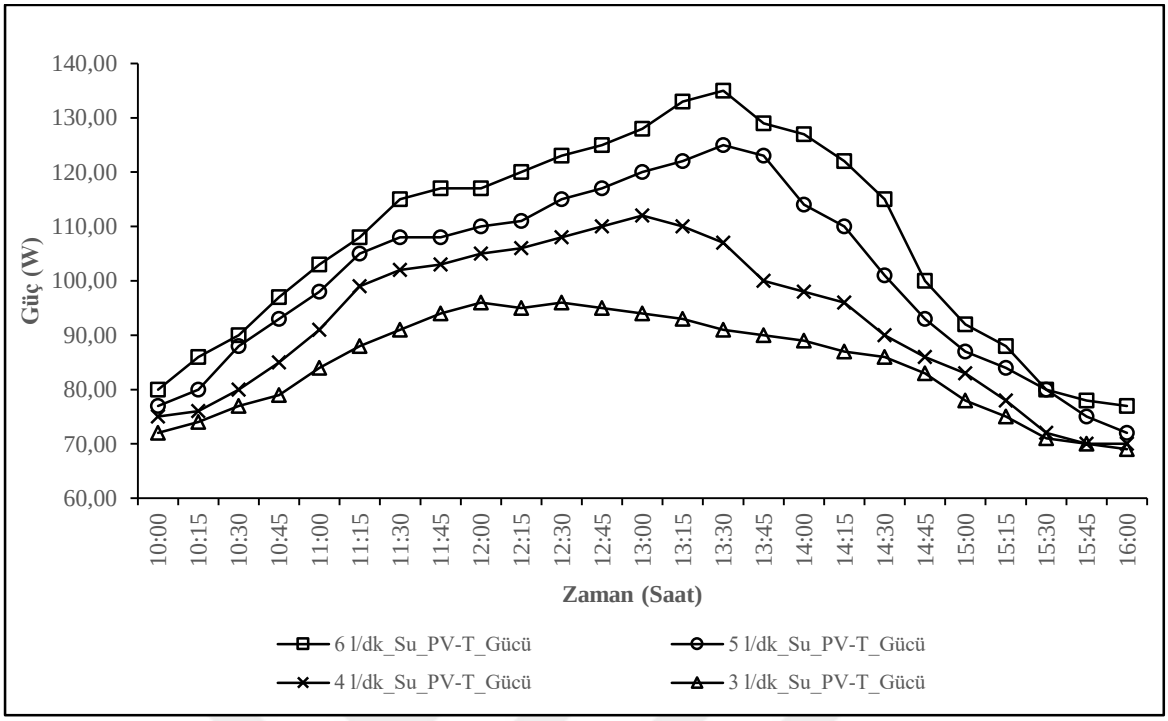
Birinci faz deneyin ilk günü 6 l/dk debi ile yapılan deneyde saat 13:00'te en yüksek invertör çıkış gücü 98 W olup bağlı olan 12 V jel akünün kapasitesi %95 seviyesinde akımı 4,20 A ve gerilimi 12,44 V olarak ölçülmüştür. Bir sonraki gün 5 l/dk debi ile yapılan deneyde saat 12:45'te en yüksek invertör çıkış gücü 95 W olup bağlı olan 12 V jel akünün kapasitesi %95 seviyesinde akımı 4,20 A ve gerilimi 12,65 V olarak ölçülmüştür. Sonraki gün 4 l/dk debi ile yapılan deneyde saat 12:45'te en yüksek invertör çıkış gücü 92 W olup bağlı olan 12 V jel akünün kapasitesi %95 seviyesinde akımı 4,15 A ve gerilimi 12,80 V olarak ölçülmüştür. Son gün ise 3 l/dk debi ile yapılan deneyde saat 12:45'te en yüksek invertör çıkış gücü 89 W olup bağlı olan 12 V jel akünün kapasitesi %95 seviyesinde akımı 3,95 A ve gerilimi 12,80 V olarak ölçülmüştür.



Şekil 7.7. Su deneyinde PV panel çıkış gücü

Su ile soğutma yapılan PV/T panelin, güneşin radyasyon etkisine bağlı olarak invertör çıkış gücü değişiminin Şekil 7.8'de ifade edildiği biçimde tespit edilmiştir.

Birinci faz deneyin ilk günü 6 l/dk debi ile yapılan deneyde saat 13:30'da en yüksek invertör çıkış gücü 135 W olup bağlı olan 12 V jel akünün kapasitesi %95 seviyesinde akımı 4,80 A akım ve gerilimi 13,71 V olarak ölçülmüştür. Bir sonraki gün 5 l/dk debi ile yapılan deneyde saat 13:30'da en yüksek invertör çıkış gücü 125 W olup bağlı olan 12 V jel akünün kapasitesi %95 seviyesinde akımı 4,77 A ve gerilimi 13,19 V olarak ölçülmüştür. Sonraki gün 4 l/dk debi ile yapılan deneyde saat 13:00'te en yüksek invertör çıkış gücü 112 W olup bağlı olan 12 V jel akünün kapasitesi %89 seviyesinde akımı 4,55 A akım ve gerilimi 13,29 V olarak ölçülmüştür. Son günde 3 l/dk debi ile yapılan deneyde saat 12:30'da en yüksek invertör çıkış gücü 96 W olup bağlı olan 12 V jel akünün kapasitesi %95 seviyesinde akımı 4,20 A ve gerilimi 12,98 V olarak ölçülmüştür.



Şekil 7.8. Su deneyinde PV/T panel çıkış gücü

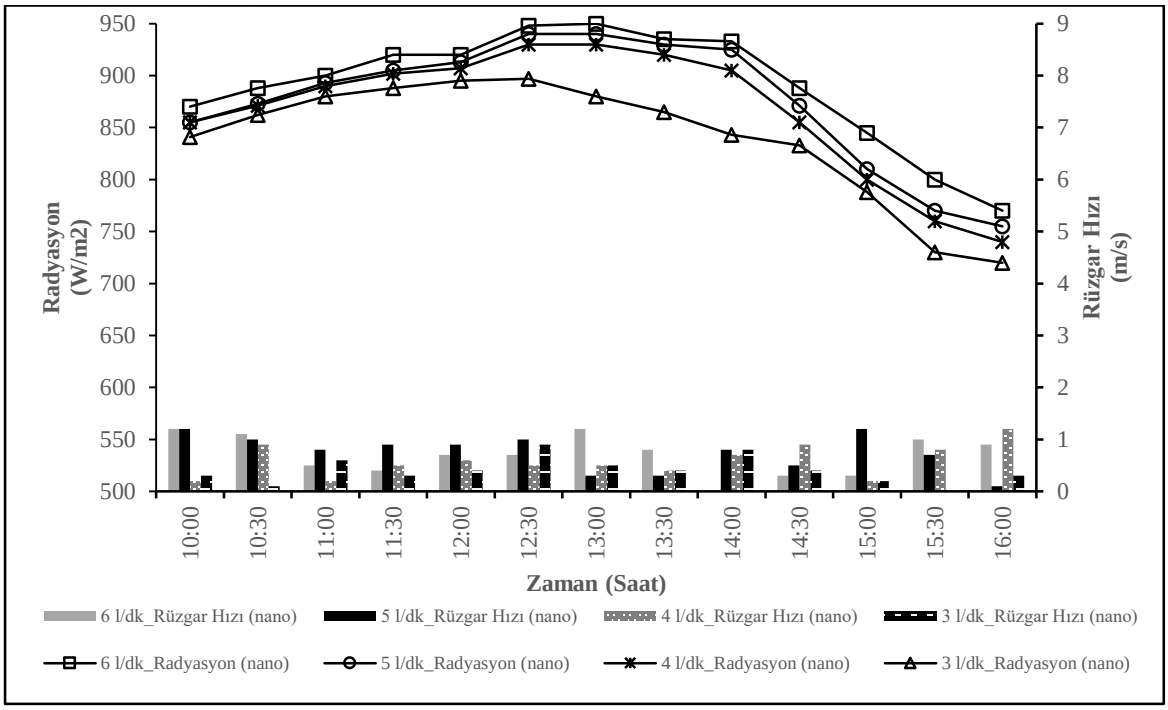
Su ile yapılan deneylerde özellikle radyasyon etkisinin en fazla olduğu tespiti yapılan ilk günkü deneyde PV çıkış gücü buna bağlı olarak diğerlerine göre yüksek seyretmiştir. Yapılan bu tespiti elde etmiş olduğumuz kayıtlı verilere göre en fazla çıkış gücü olan 6 l/dk debili çalışmalarda PV çıkış gücü en yüksek 98 W olmuştur. Buna ilave olarak su ile soğutma yapılan deneylerde 6 l/dk en yüksek debili çalışmada PV/T çıkış gücü verimliliğin arttığını gösterir bir şekilde 135 W olarak en yüksek miktara ulaşmıştır. Bu çalışmalar bize radyasyonun PV'de elektrik üretimi yapılırken olumlu etkisini ve PV/T uygulaması da panelde soğutma ile daha verimli sonuçlara ulaşılabileceği göstermiştir.

Deneysel çalışmalar; mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$) kullanılarak saf su ile nanoakışkan hazırlıkları yapıldıktan sonra soğutucu akışkan dolaşımı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında tasarlanmış olan soğutucu bakır borulu düzenek panel yüzeyine teması da sağlanacak şekilde yerleştirilmiş olup ilk çalışma 6 l/dk akışkan debisinde sonrakiler ise farklı günde sırası ile 5 l/dk, 4 l/dk ve 3 l/dk debilerinde yapılmıştır.

Nanoakışkan ile ikinci faz olarak yapılan deney için ilk gün 6 l/dk debideki soğutucu akışkan kullanıldığı gün radyasyon etkisi en fazla 13:00'te 950 W/m^2 olarak ölçülmüş olup aynı saatte rüzgar hızı 1,2 m/s olarak ölçülmüştür. Aynı deney setinde sıra ile sonraki günde 5

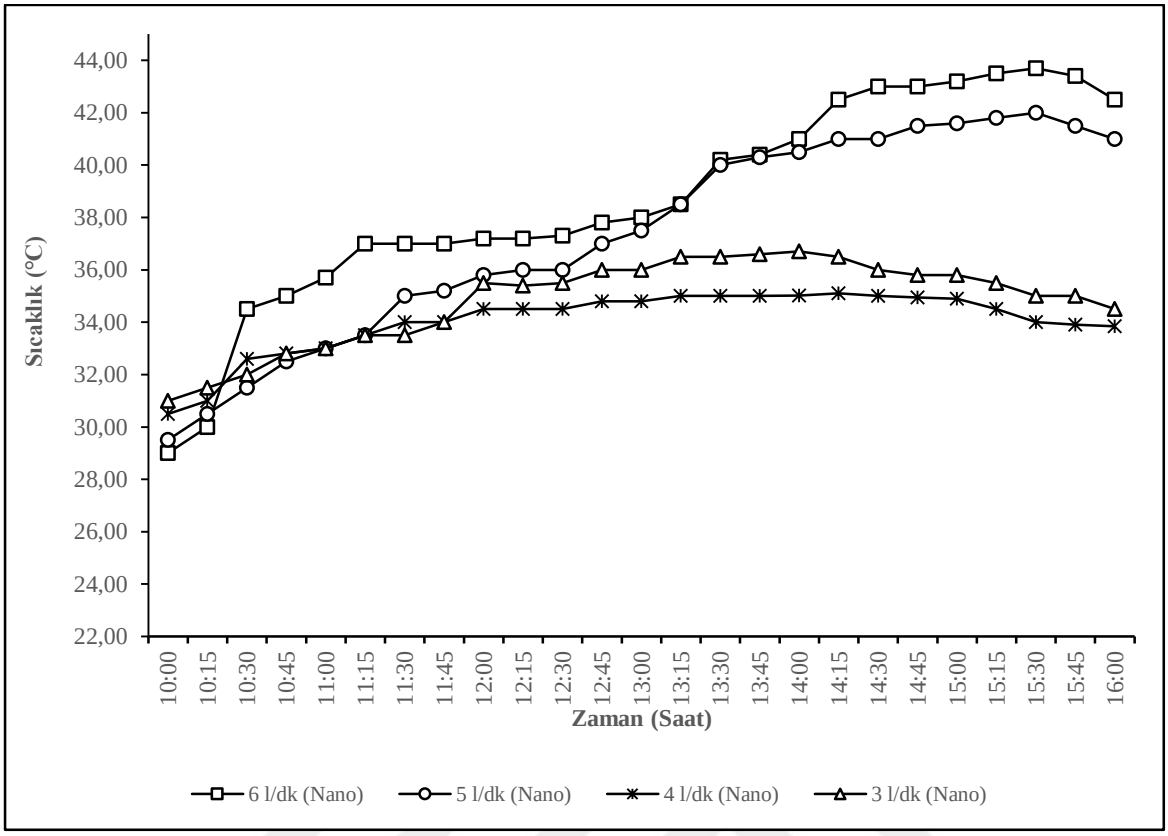
l/dk debi ile soğutucu akışkan kullanımının yapıldığı günde radyasyon etkisi 13:00'te 940 W/m^2 olarak ölçülmüş olup aynı saatte rüzgar hızı 0,3 m/s olarak, sonraki günde 4 l/dk debi ile soğutucu akışkan kullanımının yapıldığı günde radyasyon etkisi 13:00'te 930 W/m^2 olarak ölçülmüş olup aynı saatte rüzgar hızı 0,5 m/s olarak, son gün ise 3 l/dk debi ile soğutucu akışkan kullanımının yapıldığı günde radyasyon etkisi 12:30'da 897 W/m^2 olarak ölçülmüş olup aynı saatte rüzgar hızı 0,9 m/s olarak ölçülmüştür.

Gerçekleştirilmiş olan deney çalışmasına ilişkin radyasyon ve rüzgar hızı Şekil 7.9'daki gibidir.



Şekil 7.9. Nanoakışkan ile yapılan deneylerde rüzgar hızı ve radyasyon

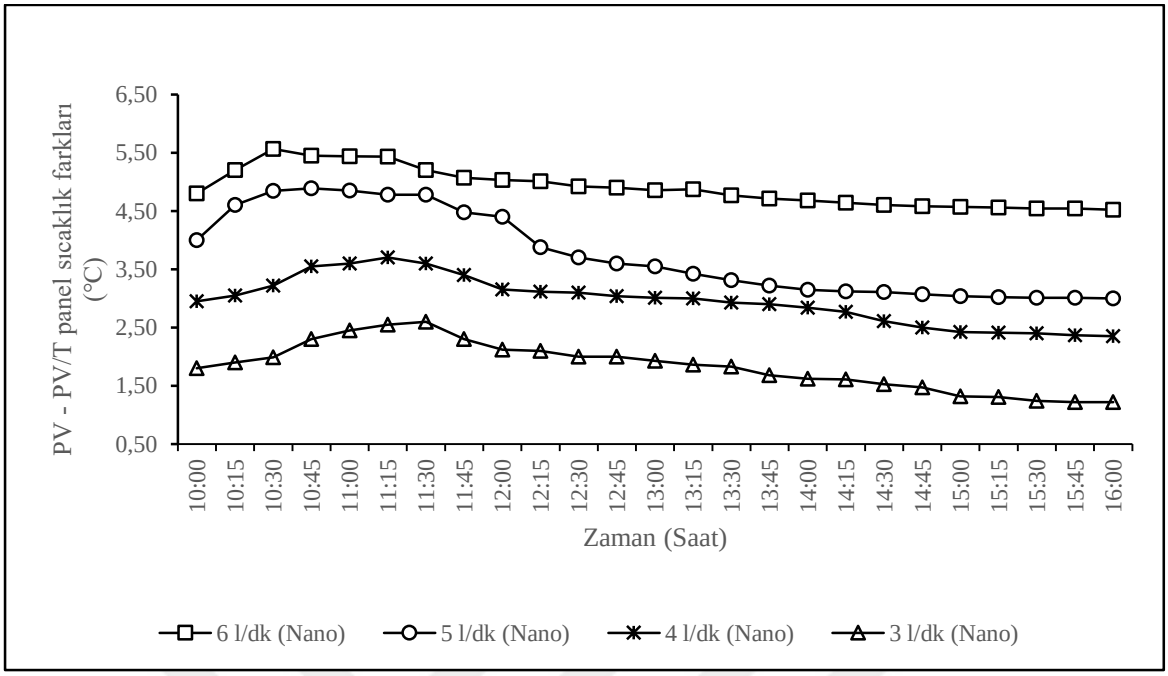
Nanoakışkan ile yapılan deneylerde günlük olarak sıcaklık değişimleri de Şekil 7.10'da ifade edildiği biçimde değişiklik göstermiştir. İkinci faz deneyin ilk günü (6 l/dk deneyinde) hava sıcaklığı en fazla 15:30'da 43,70℃ olarak, devam eden gün (5 l/dk deneyinde) hava sıcaklığı en fazla 15:30'da 42℃ olarak tespit edilmiştir. Bir sonraki gün (4 l/dk deneyinde) hava sıcaklığı en fazla 14:15'te 35,10℃ olarak, son gün (3 l/dk deneyinde) hava sıcaklığı en fazla 14:00'te 36,70℃ olarak tespit edilmiştir.



Şekil 7.10. Nanoakışkan deneylerinde hava sıcaklık değişimi

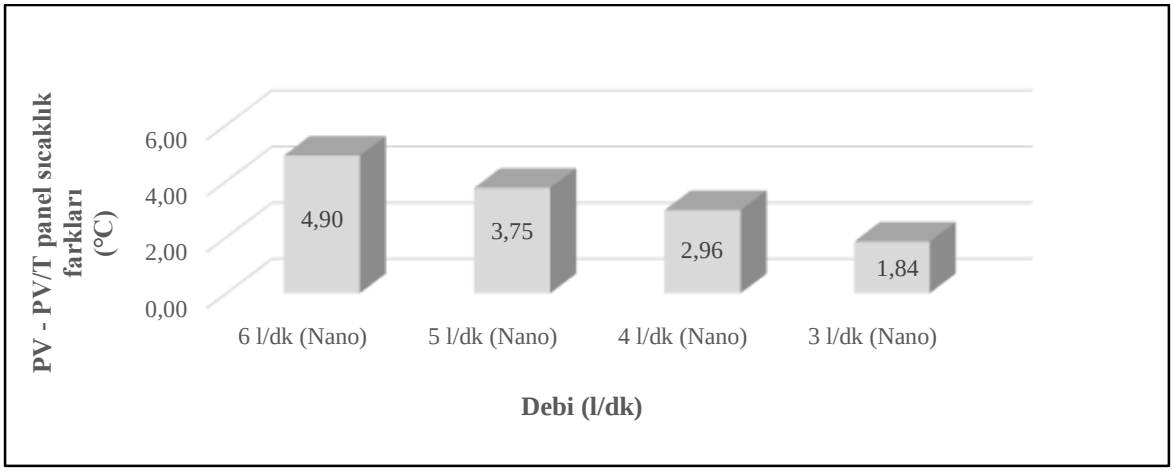
Soğutucu akışkan olarak mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$) kütlece %0,5 ve saf su karışımı kullanılan deneylerde PV ve PV/T deney setlerinin her ikisinde de sağ üstte konumlandırılmış haldeki termokupllardan (PV4 - PV/T1_Sağ_Üst Panel) alınan bilgiler neticesinde Şekil 7.11'deki görünüm elde edilmiştir.

6 l/dk debi ile yapılan deneyde paneller arasındaki yüzey sıcaklık farkı gün ortası 12:00'de 5,03°C olarak ölçülmüştür. Devamında takip eden günde ise aynı saat için 5 l/dk debi ile sıcaklık farkı 4,40°C olduğu tespit edilmiştir. 4 l/dk debi ile sıcaklık ise aynı saat için 3,15°C, son gün 3 l/dk debi ile sıcaklık aynı saatte 2,12°C olarak tespit edilmiştir.



Şekil 7.11. Nanoakışkan deneylerinde PV ve PV/T sağ üst panel sıcaklık değişimleri

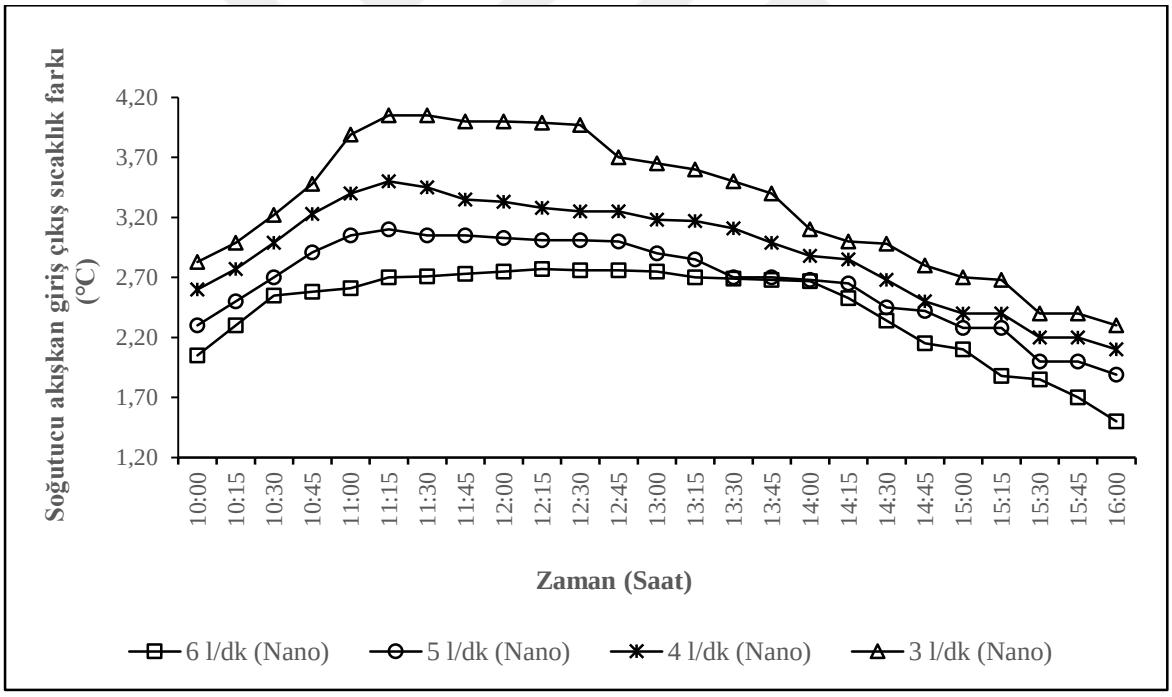
Ayrıca deney süresince her gün yapılan ölçümler neticesinde her iki panele ilişkin sağ üst yüzeye ait sıcaklık farkları ortalamaları ise Şekil 7.12'de ifade edildiği gibidir. İkinci fazın ilk günü 6 l/dk debideki yapılan soğutmada sıcaklık farkı ortalaması 4,90℃ ve 5 l/dk debideki yapılan deneyde soğutmada sıcaklık farkı ortalaması 3,75℃ ölçülmüştür. Sonraki gün 4 l/dk debideki yapılan soğutmada sıcaklık farkı ortalaması 2,96℃ ve son gün 3 l/dk debideki yapılan soğutmada sıcaklık farkı ortalaması 1,84℃ olarak ölçülmüştür. Bu çalışma da göstermiştir ki soğutucu akışkan 6 l/dk en yüksek debide ortalama sıcaklık farkı en yüksek seviyede oluşmuştur.



Şekil 7.12. Nanoakışkan deneylerinde PV ve PV/T panel arasındaki sıcaklık farkı

PV/T panelde verimin yüksek tutulması amacı ile soğutma için nanoakışkan kullanımı sonucunda panel arkasından çıkan soğutucu akışkan ile giriş yapılan soğutucu akışkan arasındaki sıcaklık farkı Şekil 7.13'te detaylı biçimde gözlemlemek mümkündür.

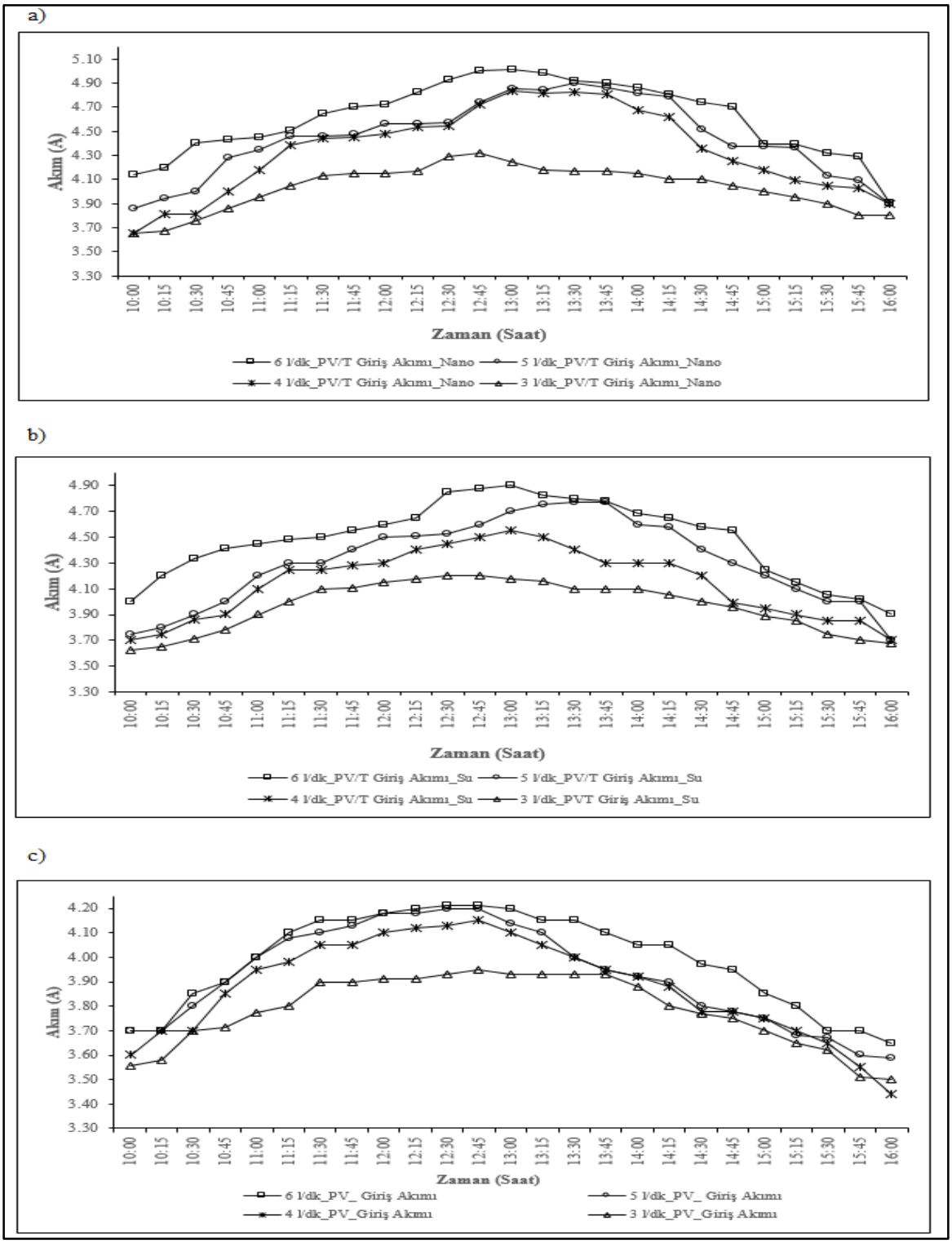
İkinci fazın ilk günü 6 l/dk debi ile yapılan deneyde soğutma sıvısı çıkış ve giriş sıcaklık farkının en fazla olduğu tespiti 12:15'te 2,77℃ ve gün ortalaması ise 2,43℃ olmuştur. Bir sonraki gün 5 l/dk debi ile yapılan deneyde soğutma sıvısı çıkış ve giriş sıcaklık farkının en fazla olduğu tespiti 11:15'te 3,10℃ gün ortalaması ise 2,66℃ olmuştur. Sonraki gün 4 l/dk debi ile soğutma sıvısı çıkış ve giriş sıcaklık farkının en fazla olduğu tespiti 11:15'te 3,50℃, gün ortalaması ise 2,92℃ tespit edilmiştir. Son günde 3 l/dk debi ile soğutma sıvısı çıkış ve giriş sıcaklık farkının en fazla olduğu tespiti 11:30'da 4,05℃, gün ortalaması ise 3,31℃ olarak tespit edilmiştir.



Şekil 7.13. Soğutma sıvısı çıkış ve giriş sıcaklık farkı

Soğutma sıvısı çıkış ve giriş sıcaklık farkı yüksek debide daha düşük olması gerekliliği teoride beklenir buna ilave olarak teorik mümkünlük deney sonuçları ile de kendini göstermiştir. En düşük debide en yüksek sıcaklık farkı oluştuğu neticesine varılmıştır. Ayrıca özgül ısısı nanoakışkana göre daha yüksek olan su deneylerinde sıcaklık farklılıkları biraz daha düşük olduğu sonuçları da alınmıştır.

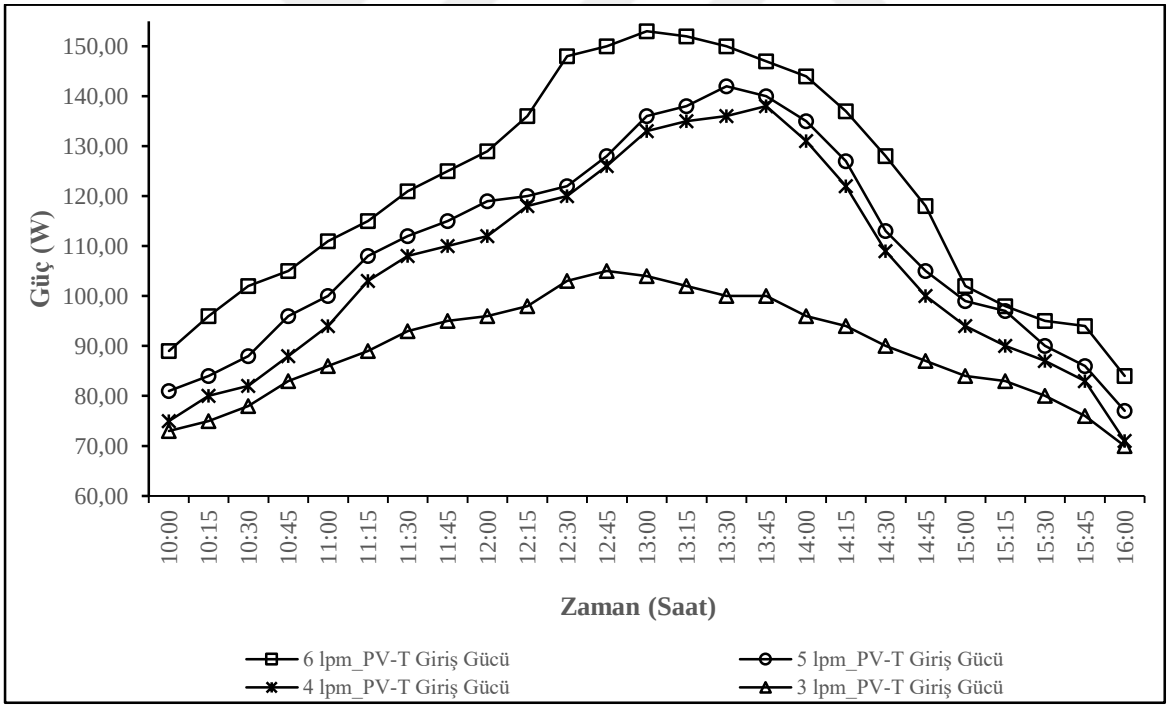
Deneysel çalışma kapsamında; panellere ait invertörden okunan akım değerleri değişimi Şekil 7.14'te ifade edildiği biçimde olduğu tespiti yapılmıştır.



Şekil 7.14. Panellere ait giriş akımları a) Nano deneyi PV/T giriş akımı, b) Su deneyi PV/T giriş akımı ve c) PV giriş akımı

Nanoakışkan ile soğutma yapılan PV/T panelin güneşin radyasyon etkisine bağlı olarak invertör çıkış gücü değişiminin Şekil 7.15'te ifade edildiği biçimde tespit edilmiştir.

İkinci faz deneyin ilk günü 6 l/dk debi ile yapılan deneyde saat 13:00'te en yüksek invertör çıkış gücü 153 W olup bağlı olan 12 V jel akünün kapasitesi %31 seviyesinde akımı 5,02 A ve gerilimi 12,75 V olarak ölçülmüştür. Bir sonraki gün 5 l/dk debi ile yapılan deneyde saat 13:30'da en yüksek invertör çıkış gücü 142 W olup bağlı olan 12 V jel akünün kapasitesi %38 seviyesinde akımı 4,90 A ve gerilimi 12,60 V olarak ölçülmüştür. Sonraki gün 4 l/dk debi ile yapılan deneyde saat 13:45'te en yüksek invertör çıkış gücü 138 W olup bağlı olan 12 V jel akünün kapasitesi %43 seviyesinde akımı 4,81 A ve gerilimi 12,60 V olarak ölçülmüştür. Son günde 3 l/dk debi ile yapılan deneyde saat 12:45'te en yüksek invertör çıkış gücü 105 W olup bağlı olan 12 V jel akünün kapasitesi %50 seviyesinde akımı 4,32 A ve gerilimi 12,37 V olarak ölçülmüştür.



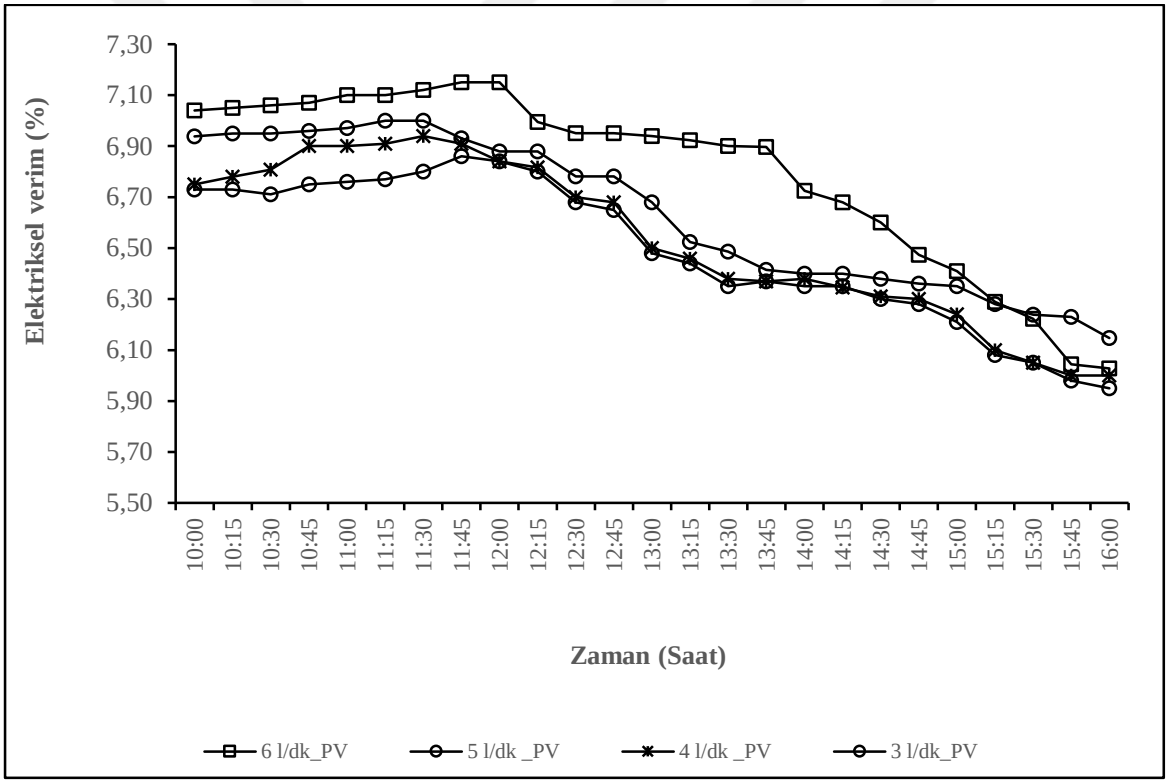
Şekil 7.15. Nanoakışkan deneyinde PV/T panel çıkış gücü

Yapılan deneysel çalışmaların tamamına ait veriler excell formatında derlenmiş olup tüm değerlere ilişkin hesaplamalar yapılarak grafiklenmiştir. Derlenmiş verilere ilişkin matematiksel hesaplamalarda elektriksel ve termal verimin değişiminin her deney aşaması için nasıl gerçekleştiği de detaylı şekilde analiz edilmiştir. Derlenmiş verilerin yüklemesi

yapılıp parametreleri de uygun biçimde tanımladıktan sonra her aşamasında deney fazına göre tanımlanmış hesaplamalar çalıştırılıp sonuç değerler oluşturulmuştur.

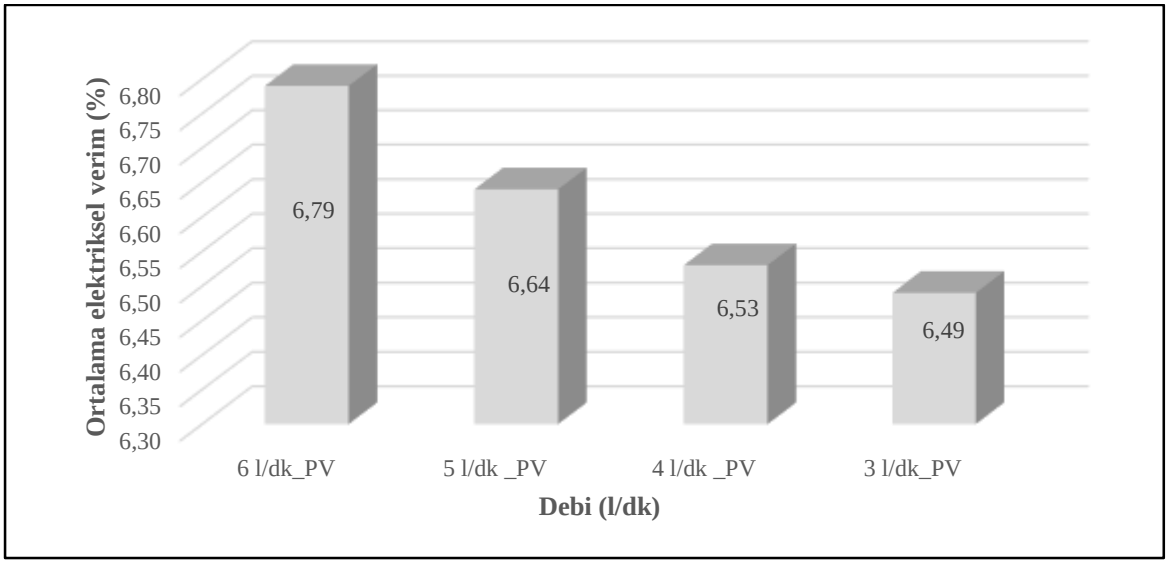
Sayısal analizler birinci fazadaki su ile yapılan deneyde hem PV hem de PV/T için 3 l/dk, 4 l/dk, 5 l/dk ve 6 l/dk soğutucu akışkan debileri dikkate alınarak yapılmıştır. İlave olarak nanoakışkan ile de yapılan deneyler için de analizler tekrarlanarak sonuç değerlere ulaşılmıştır.

Su ile yapılan deneyde elektriksel verim PV sistemde 3 l/dk soğutucu akışkan debisinde en az Şekil 7.16'da ifade edildiği gibi %5,95 seviyesinden 6 l/dk debi ile yapılan çalışmada en yüksek %7,15 değerine ulaşılmıştır.



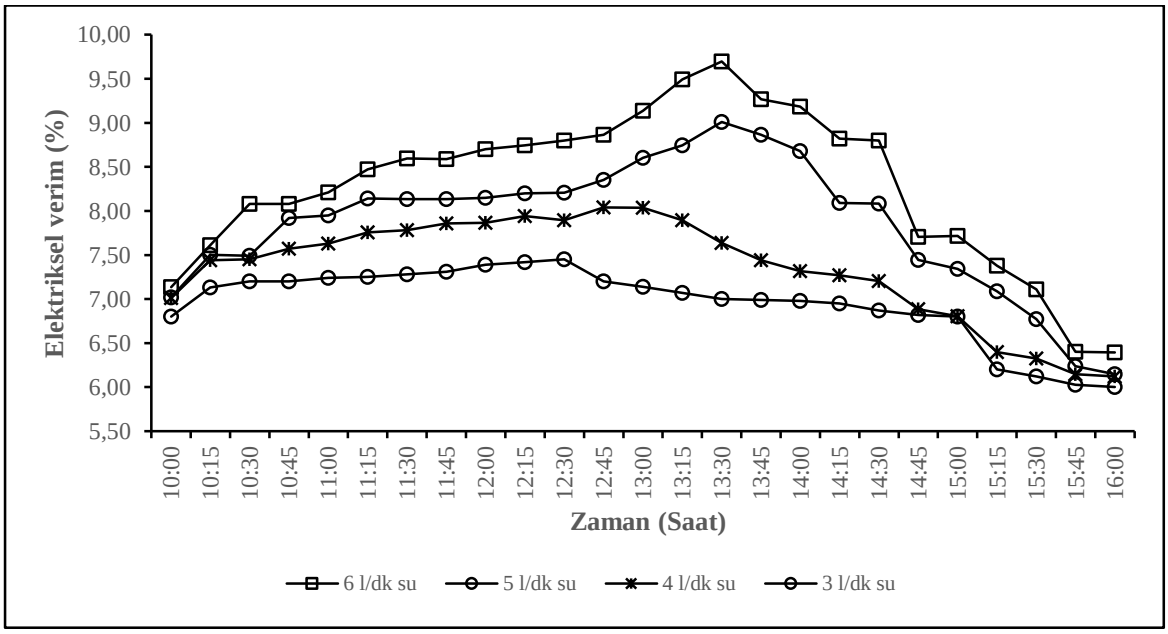
Şekil 7.16. PV sistemde elektriksel verim

Elektriksel verim PV sistemde 3 l/dk soğutucu akışkan debisinde ortalama Şekil 7.17'de ifade edildiği gibi %6,49 seviyesinden 6 l/dk debi ile yapılan çalışmada ortalama %6,79 değerine ulaşılmıştır.



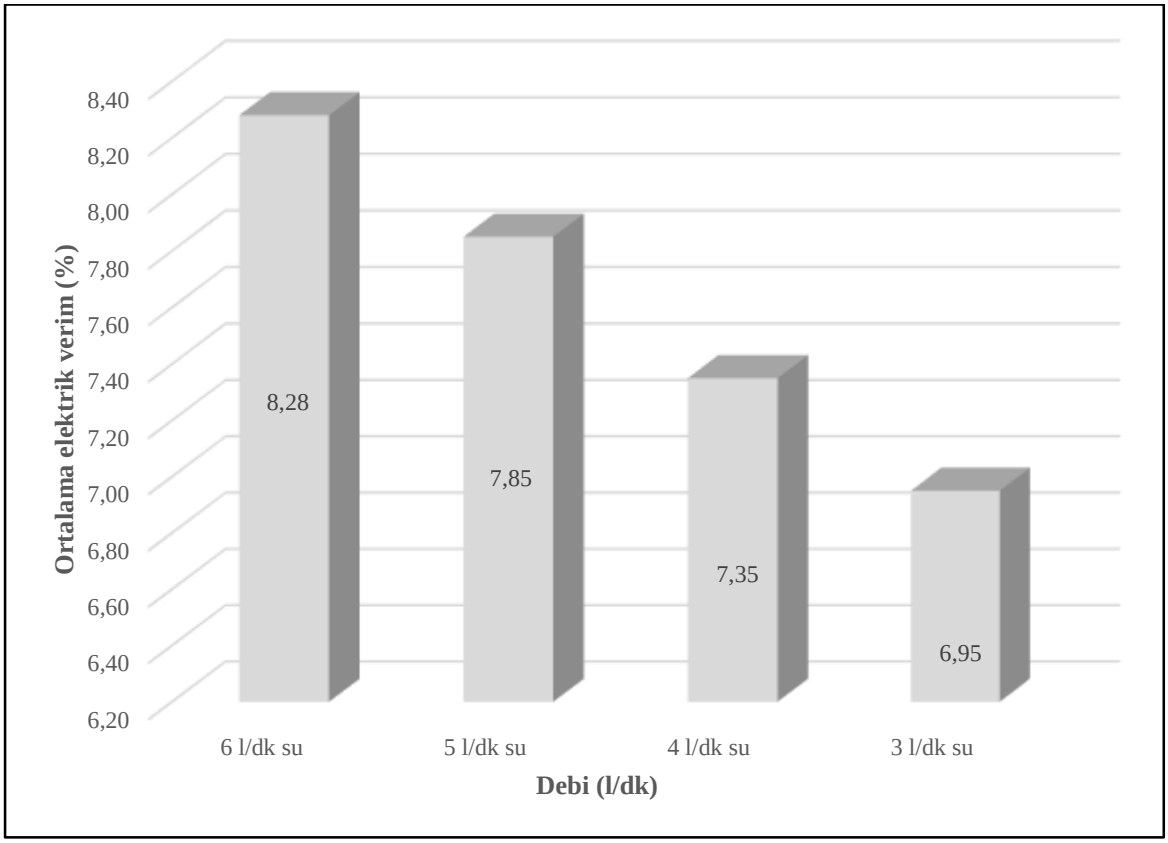
Şekil 7.17. PV sistemde ortalama elektriksel verim

Aynı şekilde yan tarafında eşit güçte güce sahip PV/T panelde ise 3 l/dk debide en az Şekil 7.18'de ifade edildiği gibi %6,00 olan elektriksel verim 6 l/dk debi ile yapılan çalışmada en fazla %9,70 değerine ulaşılmıştır. Soğutucu akışkan olarak su tercih edildiğinde panelde yapılan soğutma ve akışkanın debisi elektriksel verim artışını %5,95'ten %9,70 değerine %3,75 artış sağlayarak yukarıya taşımıştır.



Şekil 7.18. PV/T su ile yapılan deneyde elektriksel verim

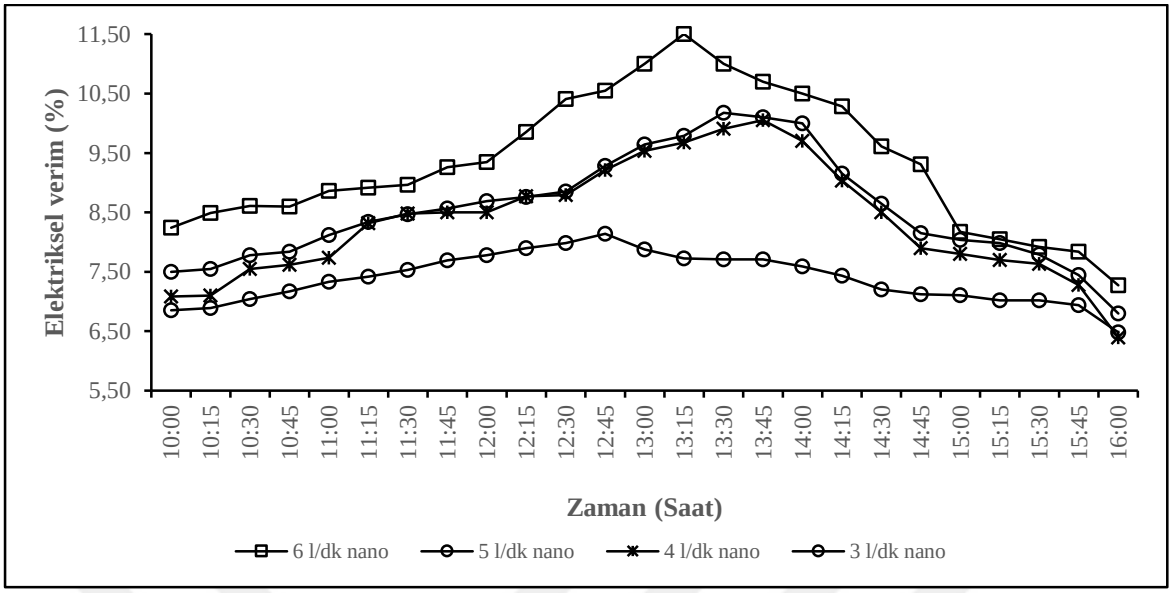
Elektriksel verim su ile yapılan deneyde PV/T sistemde 3 l/dk soğutucu akışkan debisinde ortalama Şekil 7.19'da ifade edildiği gibi %6,95 seviyesinden 6 l/dk debi ile yapılan çalışmada ortalama %8,28 değerine ulaşılmıştır.



Şekil 7.19. PV/T su ile yapılan deneyde ortalama elektriksel verim

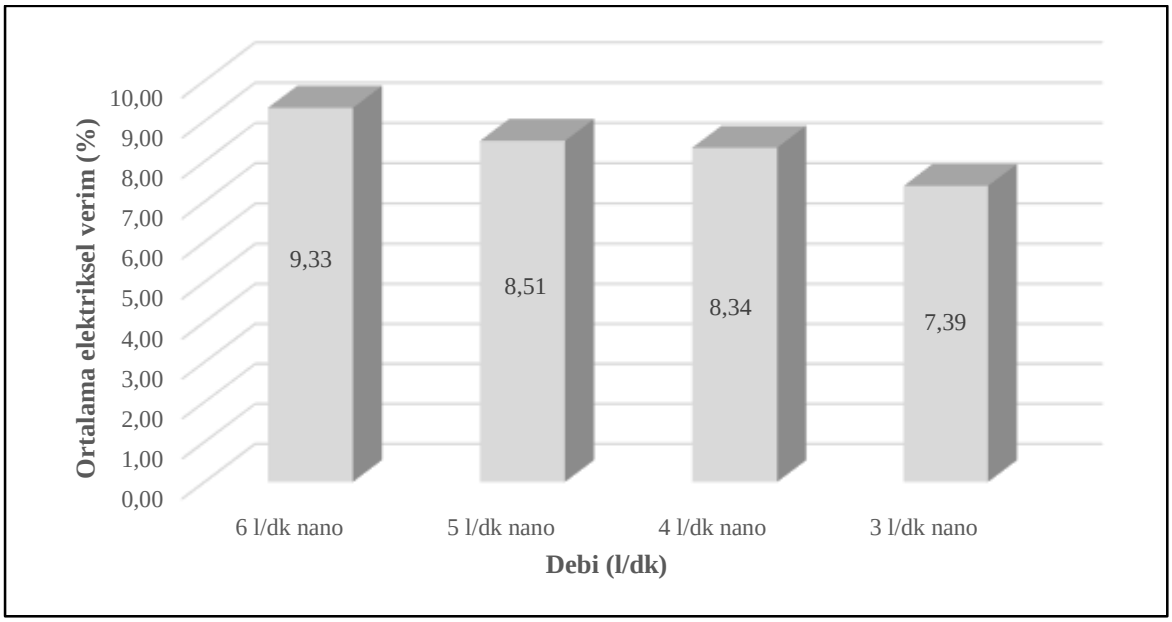
Mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$) ve saf su karışımı (kütlece %0,5) kullanılan nanoakışkanlı deneylerde ise elektriksel verim eşit güce sahip PV/T panelde; Şekil 7.20'de ifade edildiği gibi 3 l/dk debide en az %6,48 olan elektriksel verim 6 l/dk debi ile yapılan çalışmada en fazla % 11,50 değerine ulaşılmıştır.

Nanoakışkanın soğutucu akışkan olarak tercih edilmesi elektriksel verimin %5,95 seviyesinden %11,50 seviyesine %5,55 artış sağlayarak yukarı taşımıştır.



Şekil 7.20. PV/T nanoakışkan ile yapılan deneyde elektriksel verim

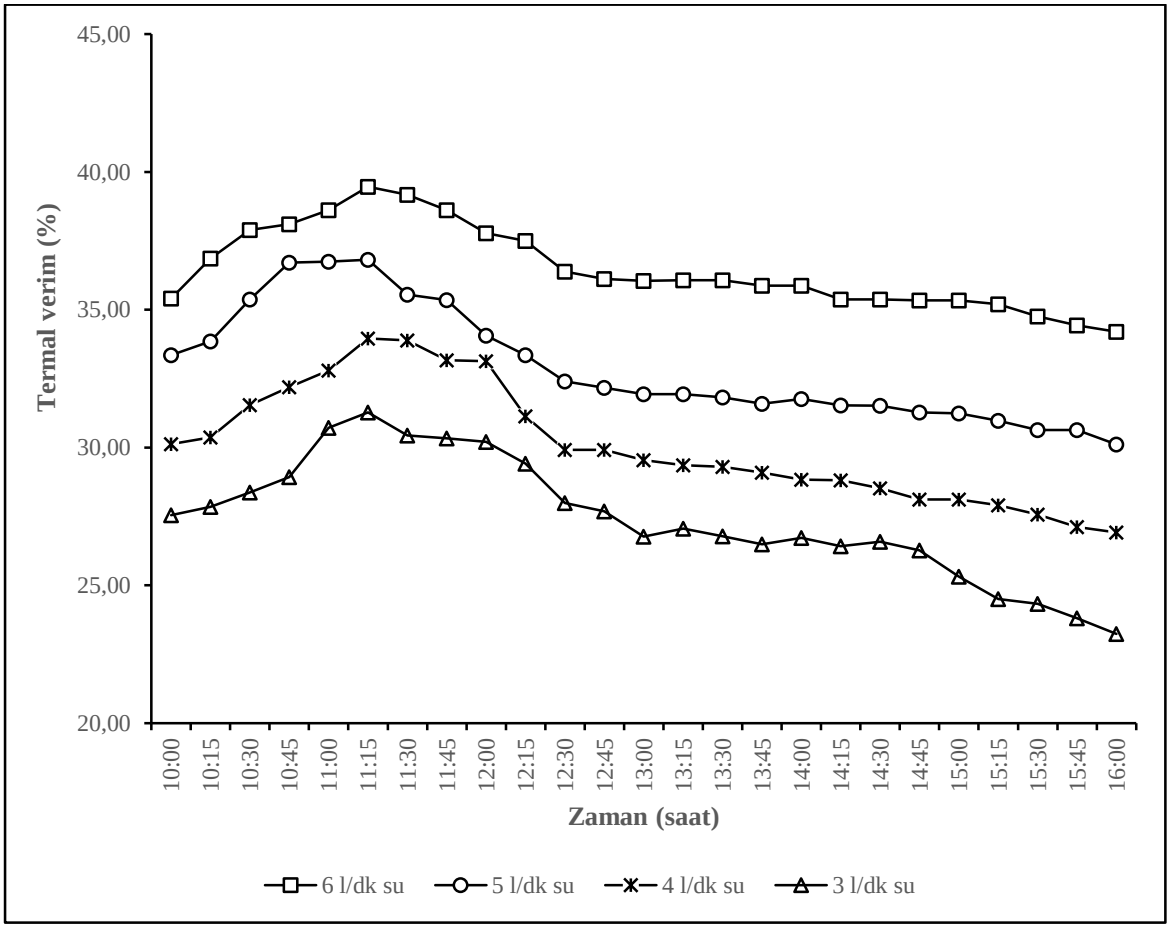
Elektriksel verim nanoakışkan ile yapılan deneyde PV/T sistemde 3 l/dk soğutucu akışkan debisinde ortalama Şekil 7.21'de ifade edildiği gibi %7,39 seviyesinden 6 l/dk debi ile yapılan çalışmada ortalama %9,33 değerine ulaşılmıştır.



Şekil 7.21. PV/T nanoakışkan ile yapılan deneyde ortalama elektriksel verim

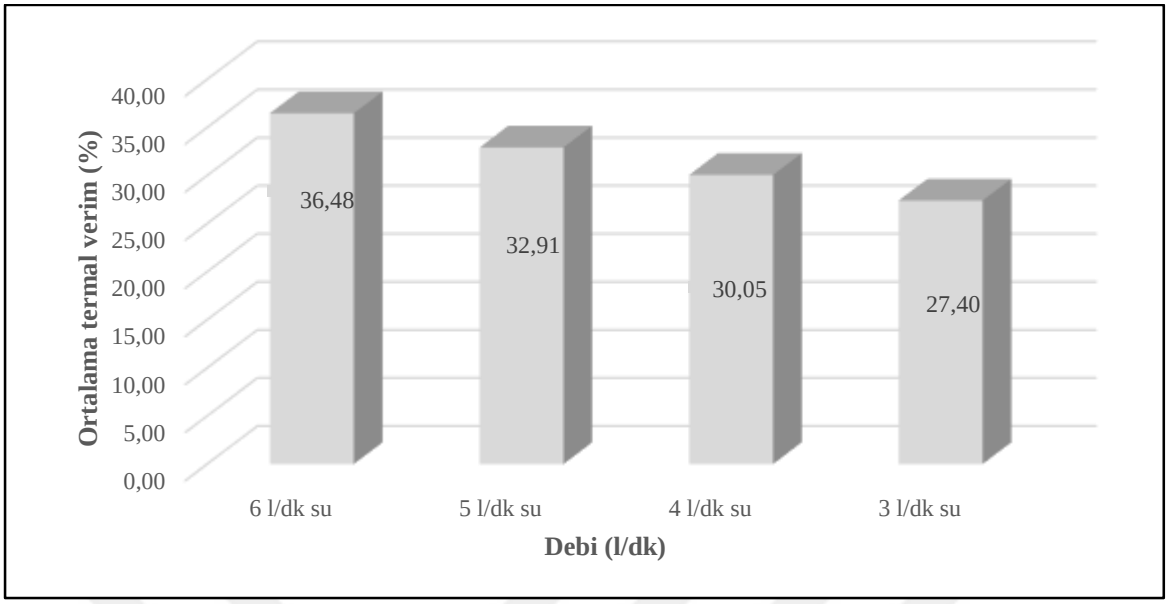
Su ile yapılan deneyde elektriksel verim PV sistemde 3 l/dk soğutucu akışkan debisinde en az Şekil 7.16'da ifade edildiği gibi %5,95 seviyesinden 6 l/dk debi ile yapılan çalışmada en yüksek %7,15 değerine ulaşılmıştır.

Termal verim ise Şekil 7.22'da ifade edildiği gibi soğutucu akışkan olarak su tercih edildiğinde ilk fazdaki deneyde 3 l/dk debide en az %23,24 iken 6 l/dk debide en yüksek %39,46'ya yükselmiştir. Soğutucu akışkan olarak su tercih edildiğinde panelde yapılan soğutma ve akışkanın debisi termal verim artışını %23,24'ten %39,46 değerine %16,22 artış sağlayarak yukarıya taşımıştır.



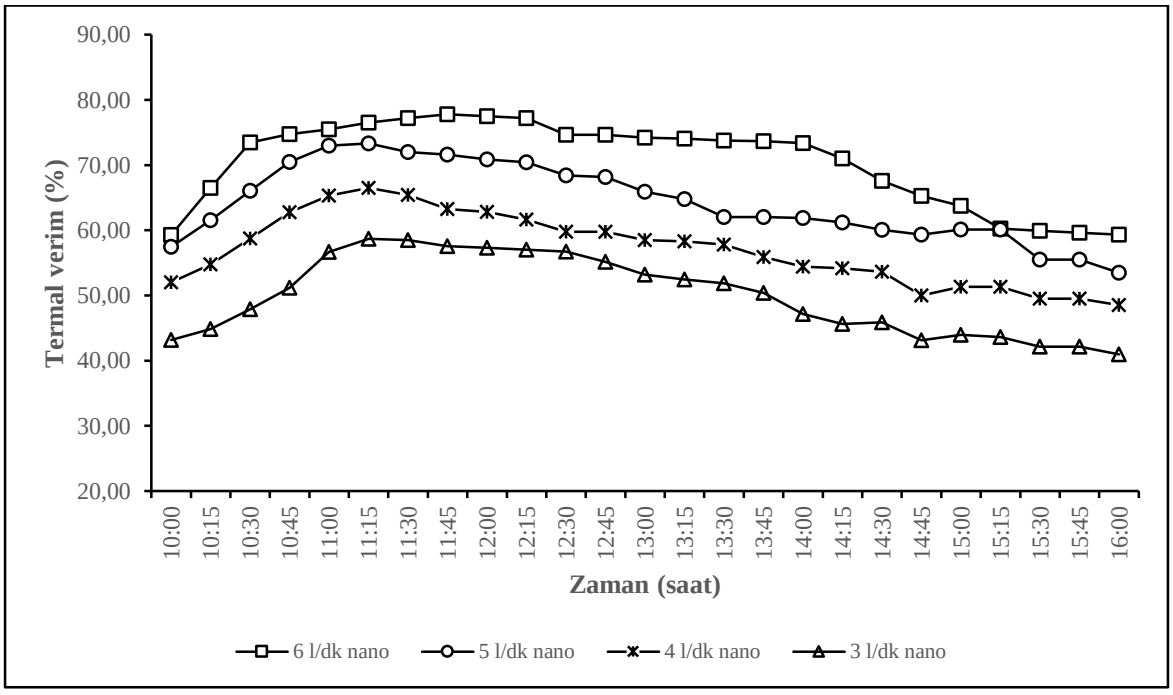
Şekil 7.22. PV/T su ile yapılan deneyde termal verim

Termal verim su ile yapılan deneyde PV/T sistemde 3 l/dk soğutucu akışkan debisinde ortalama Şekil 7.23'te ifade edildiği gibi %27,40 seviyesinden 6 l/dk debi ile yapılan çalışmada ortalama %36,48 değerine ulaşılmıştır.



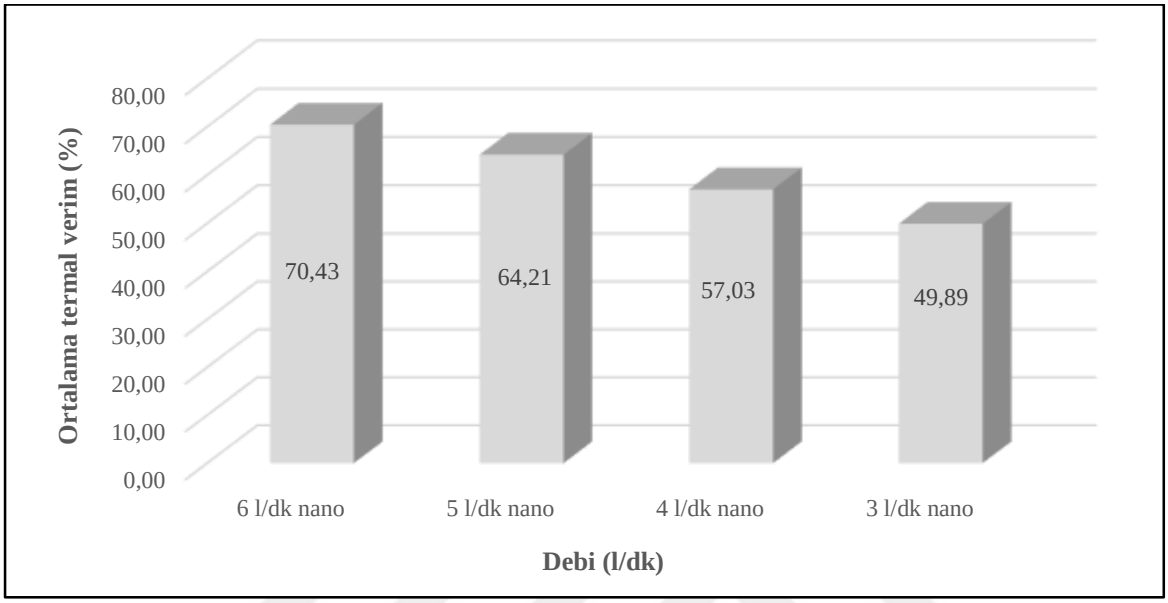
Şekil 7.23. PV/T su ile yapılan deneyde ortalama termal verim

Aynı deney setinde soğutucu akışkanın nanoakışkan olması durumunda PV/T panelde ise Şekil 7.24'te ifade edildiği gibi 3 l/dk debide en az %40,96 olan termal verim 6 l/dk debide en fazla %77,78 seviyelerine çıkmıştır. Soğutucu akışkan olarak nanoakışkanın tercih edilmesi termal verimin %40,96 seviyesinden %77,78 seviyesine %36,82 artış sağlayarak yukarı taşımıştır.



Şekil 7.24. PV/T nanoakışkan ile yapılan deneyde termal verim

Termal verim nanoakışkan ile yapılan deneyde PV/T sistemde 3 l/dk soğutucu akışkan debisinde ortalama Şekil 7.25'te ifade edildiği gibi %49,89 seviyesinden 6 l/dk debi ile yapılan çalışmada ortalama %70,43 değerine ulaşılmıştır.



Şekil 7.25. PV/T nanoakışkan ile yapılan deneyde ortalama termal verim

İyileşmeler toplam verimlilik için su deneylerinde ortalama 3 l/dk soğutucu akışkan debisinde %29,24 iken 6 l/dk debide %46,09 olarak tespit edilmiştir, bu deneylerde iyileşme miktarı %16,85 olmuştur. Fakat nanoakışkanla ile yapılanda ise toplam verim ortalama 3 l/dk soğutucu akışkan debisinde %47,44 iken 6 l/dk debide %85,55 olarak tespit edilmiş olup iyileşme %38,11 olarak en yüksek seviyede gerçekleşmiştir. Yapılan analizler neticesinde elde edilen sonuçlar soğutucu akışkan olarak mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$) ve saf su karışımı (kütlece %0,5) kullanılan deneylerde su ile yapılana göre daha fazla iyileşmeler sağlanabildiğini göstermektedir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan deneylerin tamamında hava sıcaklığının yüksek olmasının güneş panellerinin elektrik üretiminde ciddi etki yaptığı gözlemlenmiştir. Panel yüzeylerinin yüksek hava sıcaklığı, güneşin radyasyon etkisi ve de bunlara ilave olarak elektronik bileşenlerin aktif elektrik üretimi aşamasında sıcaklık katkısı ile 62℃ ve üzeri ciddi sıcaklık düzeylerine ulaştığı tespitleri yapılmıştır. Bu sonuca bağlı olarak aynı güçteki (375 W) iki PV panelden birine hibrit bir yaklaşım olan; soğutma sağlamak amacı ile soğutucu akışkanın dolaşımının rahatlıkla sağlanabileceği hatta panel yüzeyinde temassız ölü alan kalmayacak biçimde bakır borulardan oluşan tasarım gerçekleştirilip montajı yapılarak kullanımı sağlanmıştır. Böylelikle deney setinde PV ve PV/T kullanımının verim açısından farklılıkları tespit edilmiştir.

8.1. Sonuçlar

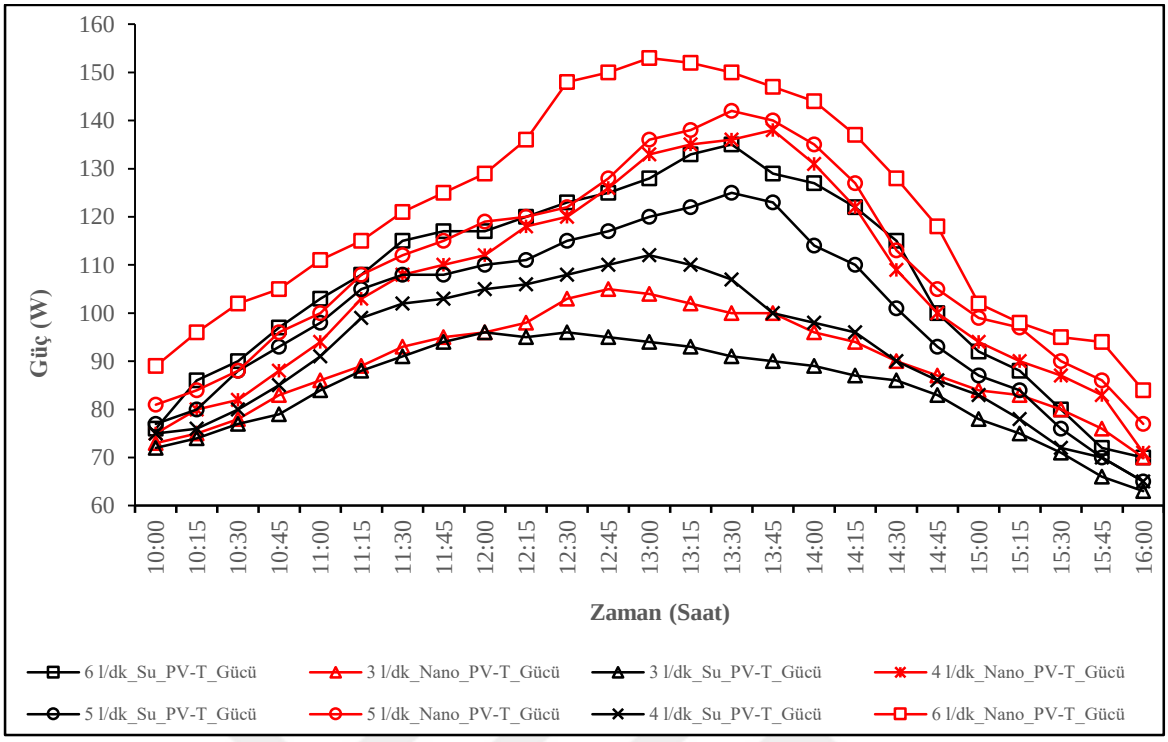
Elektriksel verim anlamında deney çalışmalarının ilk fazı olan su ile yapılan deneylerde PV panelin elektriksel verimi ortalama 3 l/dk debide %6,49 iken, 4 l/dk debide %6,53 olarak, 5 l/dk debide %6,64 olarak ve 6 l/dk debide % 6,79 seviyelerinde tespit edilmiştir. PV/T panele ait elektrik verimi ise su ile soğutmada 3 l/dk debide %6,95 iken, 4 l/dk debide %7,35 olarak, 5 l/dk debide %7,85 olarak ve 6 l/dk debide %8,28 seviyelerinde gerçekleşmiştir. Ayrıca su ile yapılan soğutma sonucu panel elektrik veriminin soğutucu akışkan debisinin artışı ile en yüksek seviyeye debi arttıkça daha rahat ulaştığı gözlemlenmiştir. Bunu soğutucu akışkanın debisi 3 l/dk iken PV elektrik veriminin %6,95 olduğu, debinin 6 l/dk olduğunda ise PV/T panel veriminin %8,28 seviyelerine çıktığı artışın %1,33 olduğu gözlemlenmiştir. Daha yüksek elektriksel verimin sağlanabileceği ve ısı aktarımının yüksek seviyede tutulabileceği deneysel çalışmaların ikinci fazı nanoakışkanlı deneyler de çalışmaya ilave edilerek verimlilikte ciddi artışlar sağlanmıştır. Soğutucu akışkan olarak mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$) kütlece % 0,5 ve saf su karışımı kullanımı sonucunda panelin elektrik verimi ortalama 3 l/dk debide %7,39 iken, 4 l/dk debide %8,34 olarak ilavete 5 l/dk debide %8,51 ve 6l/dk debide %9,33 olarak ölçülmüştür. Aynı nanoakışkan ile 6 l/dk debide en yüksek 13:15'te %11,50 olarak ve 5 l/dk debide en yüksek 13:30'da %10,18 olarak tespit edilmiştir. Aynı şekilde 4 l/dk debide en yüksek 13:45'te en yüksek %10,05 iken, 3 l/dk debide en yüksek 12:45'te %8,14 olarak gerçekleşmiştir.

Soğutucu akışkanın nanoakışkan olduğu durum için; debisi 3 l/dk iken PV/T elektrik veriminin %6,48 olduğunda, debinin 6 l/dk olduğu zaman PV/T panel veriminin %11,50 seviyelerine çıktığı gözlemlenmiştir. Yapılan deneylerin tamamında PV/T panel tercihi ve soğutucu akışkanın debisine bağlı artış ile elektrik veriminin %5,02 arttığı gözlenmiştir.

Termal verim konusunda ise su ile yapılan birinci faz deneysel çalışmada panele ait ortalama termal verim soğutucu akışkan debisi 3 l/dk seviyesinde %27,40 olarak, 4 l/dk seviyesinde %30,05 olarak, 5 l/dk seviyesinde %32,91 ve 6 l/dk seviyesinde %36,48 tespit edilmiştir. Nanoakışkan ile yapılan ikinci faz deneysel çalışmalarda ortalama termal verim ise akışkan debisi 3 l/dk'da % 49,89 olarak, 4 l/dk'da % 57,03 olarak, 5 l/dk'da %64,21 ve 6 l/dk'da %70,43 olduğu tespit edilmiştir.

Toplam verim su ile yapılan çalışmada ortalama olarak soğutucu akışkan debisi 3 l/dk'da %34,35 olarak, 4 l/dk'da %37,40 olarak, 5 l/dk'da %40,76 olarak ve 6 l/dk'da %44,76 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca toplam verim nanoakışkan ile yapılan çalışmada ortalama olarak soğutucu akışkan debisi 3 l/dk'da %57,28 olarak, 4 l/dk'da %65,37 olarak, 5 l/dk'da %72,72 olarak ve 6 l/dk'da %79,76 olarak tespit edilmiştir. Variyenli ve diğerleri (2025) çalışmasında toplam verimi %69,38 olarak elde etmesine rağmen çoklu elementli mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$) ve saf su karışımının tercih edildiği bu çalışmada %79,76 olarak tespit edilmiştir. Böylelikle soğutucu elemanların eliptik şekil ile tasarlanması toplam verimliliği artırıcı yönde etki yapmıştır.

Tüm verilerden çıkan sonuçta PV panele ilişkin verim artışını sağlamak için soğutucu tasarım düzenlemesi yapılarak hibrit bir model yaklaşımı sağlanmalı bunu da uygun bir soğutucu akışkan vasıtası ile ısı enerjisi aktarımının en iyi düzeyde sağlanabildiği akışkan debilerinde yapılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda nanoakışkan ile soğutucu akışkan debisinin 6 l/dk olduğu en yüksek seviyesinde Şekil 8.1'de olduğu gibi dikkate değer iyileşmeler olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca daha verimli sonuçların alındığı soğutucu akışkan olarak da su dışında çoklu elementli mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$) ve saf su karışımının tercih edilmesi durumunda suya göre dikkate değer düzeyde iyileşme sağlanabildiği tespitleri de yapılmıştır. Bununla birlikte sayısal ile deneysel sonuçlar arasındaki ortalama fark %5,70 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 8.1. PV/T çıkış gücünün su ve nanoakışkan deneylerindeki değişimi

Güneş paneli uygulamalarında elektrik üretim verimliliğinin sıcak ortamlarda bile üst seviyelere taşınabileceği sonucuna PV/T model yaklaşımı ile varılmıştır. Şekil 8.1'de ifade edildiği gibi PV/T modelde soğutucu akışkana da bağlı olarak panelin çıkış gücünde artış olduğu gözlemlenmiştir. Kullanılan soğutucu akışkan olarak su yerine mangan demir oksit ($MnFe_2O_4$) ve saf su karışımının (kütlece 0,5) tercih edilmesi durumunda PV çıkış gücündeki artış Şekil 8.1'de kendini göstermiştir. Türkiye elektrik kurulu güç içerisindeki payının giderek artmakta olduğu fotovoltaik panellerde verimlilik uygulamaları santrallere ilişkin ekonomik ömürlerinin de verimlilik oranı ölçüsünde ciddi miktarda uzatabilme imkânı sunacaktır.

Ayrıca panellerin çalışmasında verimlilik artışı kaynak israfını önlemede önem arz etmekte olup karbon emisyonlarına da azaltıcı yönde olumlu katkılar sunabileceği bu çalışma ile ortaya konabilmektedir. İleride Türkiye'de oluşabilecek karbon piyasasında fotovoltaik uygulamalardaki verimlilikten elde edilebilecek ilave yedek güç kapasitesi çevreye emisyon anlamında olumlu katkı sunması kaçınılmaz olacaktır. Bunun yanında emisyon piyasa koşullarında PV kapasite anlamında devredilebilir yükümlülük (yerine getirilmesi zorunlu elektrik üretimi) olarak verimlilik ile % 1 oranında iyileşme olması durumunda 100 GW'ı aşmış olan elektrik kurulu güç içerinde azımsanmayacak ekonomik katkı sunacaktır.

8.2. Öneriler

Bu çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında ileride yapılabilecek çalışmalar için şu öneriler sunulabilir:

- Panel yüzeyinde ısı aktarımının daha iyi sağlanabileceği nanoakışkan kullanılarak benzer deneysel ve sayısal analizler yapılabilir.
- Panel yüzeyinin soğumasını en üst seviyelere taşıyabilecek farklı şekilde soğutucu tasarımları yapılabilir.
- Tasarlanan yeni soğutucu elemanların verimlilik üzerine olumlu etkisine bağlı olarak karbon emisyonundaki iyi gelişmenin seviyesi tespit edilebilir.

KAYNAKLAR

1. ETKB. (2024). Türkiye elektrik üretim iletim istatistikleri türkiye kurulu gücünün yıllar itibari ile gelişimi. *TEİAŞ.* Ankara, 21-37.

2. Öksüz, M., Köse, F. (2019). Hibrit fotovoltaik ısıl pvt su ve pvt hava güneş kollektörlerinin incelenmesi. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi,* 2(3), 95-102.

3. Tripanagnostopoulos, Y., Souliotis, M., Battisti, R. and Corrado, A. (2005). Energy, cost and lca results of pv and hybrit pv/t solar systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications,* 13(3), 235-250.

4. Ji, J., Lu, J. P., Chow, T. T., He, W. and Pei, G. (2007). A sensitivity study of a hybrit photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation. *Applied Energy,* 84(2), 222-237.

5. Erdil, E., Ilkan, M. and Egelioglu, F. (2008). Experimental study on energy generation with a photovoltaic (pv)–solar thermal hybrid system. *Energy,* 33(8), 1241-1245.

6. Al-Waeli, A. H., Sopian, K., Kazem, A. H. and Chaichan, M. T. (2017). Photovoltaic/thermal (pv/t) systems: Status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 77(1), 109-130.

7. Kazem, H. A. and Chaichan, M. T. (2016). Effect of environmental variables on photovoltaic performance based on experimental studies. *International Journal of Civil, Mechanical and Energy Science (IJCMES),* 2(4), 1-8.

8. Gasparin, F. P., Bühler, A. J., Rampinelli, G. A. and Krenzinger, A. (2016). Statistical analysis of i– v curve parameters from photovoltaic modules. *Solar Energy,* 131(1), 30-38.

9. Kapsalis, V. and Karamani, D. (2015). On the effect of roof added pvs on building's energy demand. *Energy Building,* 108(1), 195-204.

10. Al- Sabounchi, A. M., Yalyali, S. A. and Al- Thani, H. A. (2013). Design and performance evaluation of a photovoltaic grid connected system in hot weather conditions. *Renewable Energy,* 53(3), 71-78.

11. Sandnes, B. and Rekstad, J. (2002). A photovoltaic/thermal (pv/t) collector with a polymer absorber plate, experimental study and analytical model. *Solar Energy,* 72(1), 63-73.

12. Chow, T. T., He, W. and Chan, A. L. (2008). Computer modeling and experimental validation of a building ıntegrated photovoltaic and water heating system. *Applied Thermal Engineering,* 28(11), 1356-1363.

13. Sardarabadi, M., Passandideh Fard, M., Sardarabadi, H. and Zeinali Heris, S. (2012, 17-18 November). *Computer modelling and experimental validation of a photovoltaic thermal (pv/t) water based collector system.* In 2nd international conference on power, Hong Kong.

14. İnaç, S. (2020). *Yenilenebilir Enerji Teknolojileri Bir Hibrit Çoklu Üretim Sisteminin Sürdürülebilirlik Analizi,* Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 3-12.

15. Tasci, H. (2021). *Türkiye'de Enerji Politikalarının Etkinliği*, Doktora Tezi, Hasan Kalyoncu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep, 7-20.

16. Taşkıran, E. (2021). *Electricity Demand Forecasting Methods Used In Turkey and Their Effects on Investments In Electricity Sector*, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, 12-32.

17. Fidan, C. (2021). *Batman Şartlarında Fotovoltaik Panellerde Verim Artırma Yöntemleri*, Doktora Tezi, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batma, (1-16).

18. Tonui, J. K. and Tripanagnosstopoulos. (2021). Air- cooled pv/t solar collectors with low cost performance improvements. *Solar Energy,* 81(4), 498-511.

19. Aydoğdu, C. (2021). *Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Stratejisi Ve Federal Almanya Stratejisinin Analizi*, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir, 3-12.

20. Bazilian, M. D., Leenders, F. and Van Der Ree, B. G. (2021). Photovoltaic cogeneration in the built environment. *Solar Energy,* 71(1), 57-69.

21. An, W. T. and Liu, Y. F. (2021). The study of pv/thermal integrated buildings solar system. *Applied Energy Technology*, 23(1), 33.

22. Seifried, D. and Witzel, W. (2021). *Practical handbook of photovoltaics.* (1st Edition). London: Routledge, 52-60.

23. Tripanagnostopoulos, Y. and Tselepis, S. (2021, 25-26 September). *Hybrid solar/wind (pvt/wt) building ıntegrated systems*, In Proc. 2nd International European PV - Hybrid and Mini Grid Conferance, Kassel, Germany.

24. Kohlenbach, P. and Jakob, U. (2021). *Solar cooling: The earthscan expert guide to solar cooling systems.* (1st Edition). London: Routledge, 5-19.

25. Mojumder, M. S., Uddin, M. M., Alam, I. and Enam, H. K. (2021). Study of hybrid photovoltaic thermal (pv/t) solar system with modification of thin metallic sheet in the air channel. *Journal of Energy Technologies and Policy*, 3(5), 47-55.

26. Tyagi, V. V., Kaushik, S. C. and Tyagi, S. K. (2022). Advancement in solar photovoltaic/thermal (pv/t) hybrid collector technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 16(3), 1383-1398.

27. Chow, T. T. (2022). Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model. *Solar Energy*, 75(2), 143-152.

28. Zhang, X., Zhao, X., Smith, S., Xu, J. and Yu, X. (2022). Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (pv/t) technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 599-617.

29. Charalambous, P. G., Maidment, G. G., Kalogirou, S. A. and Yiakoumetti, K. (2023). Photovoltaic thermal (pv/t) collectors, energy computer science. *Applied Thermal Engineering*, 27(3), 275-286.

30. Karadavut, A. (2019, Temmuz). *Yarı Kesik ve Tam Hücreli Fotovoltaik Modüllerin Matematiksel Modellenmesi.* Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 45-66.

31. Alahmad, H., Taşkesen, E., ve Bilen, E. N. (2023). Uzay tabanlı güneş enerjisine genel bakış. *Researcher*, 3(2), 8-30.

32. İnternet: Clissitt, C., Schwerdtfeger, M. (July 2023). The eco experts. *Pv/t-pv*, 07. Web: https://www.theecoexperts.co.uk/solar-panels/transparent#link-pros-and-cons-of-trans-solar-panels.pdf, Son Erişim Tarihi: 31.07.2024.

33. Yakut, M. Z. and Esen, R. (2021). Trombe duvarı etkisiyle çalışan, binaya entegre yarı saydam fotovoltaik sistemin akıllı uygulaması. *UTBD International Journal of Technological Sciences*, 13(3), 121-129.

34. Dilsad, E. and Çolak, M. (2008). Yarı-saydam güneş pili/termal toplayıcı (pv/t) hibrid sistemin izmir koşullarında analizi. *CBU Bilim*, 2(1), 1-13.

35. Duyan, F. and Bayrakdarlar, K. P. (2022). Enerji etkin bina tasarımında yapı elemanı olarak fotovoltaik sistemler. *Journal of Architecture and Life*, 7(3), 965-980.

36. Özel, S. (2015). *İnce Film Fotovoltaik Bir Panelin Mersin İli İçin Kış Dönemi Güç Karakteristiğinin Deneysel Olarak İncelenmesi.* Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 3-22.

37. Aslay, F. (2021). TOPSİS Hwang Yoon metodu çok kriterli karar verme yöntemi ile güneş enerjisi sistemlerinde panel seçimi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 28(3), 548-551.

38. Ekinci, F. (2018). Güneş hücrelerinin performansına baranın etkisinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi,* 33(1), 67-82.

39. Puang, S. (2020). Comparative analysis of solar cell efficiency between monocrystalline and polycrystalline. *INTEK Jurnal Penelitian Polytechnic*, 7(2), 92-100.

40. Duman, S. and Alçı, M. (2022). Yarım ve tam fotovoltaik hücreleri ile tasarlanan güneş enerjisi panellerinin toplam verimliliğini etkileyen parametrelerinin incelenmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(3), 592-600.

41. Sayın, S., Koç, İ. (2011). Güneş enerjisinden aktif olarak yararlanmada kullanılan fotovoltaik (pv) sistemler ve yapılarda kullanım biçimleri. *Selçuk Üniversitesi Müh.-Mim. Fakülte Dergisi*, 26(3), 89-106.

42. Durak, M. (2016). *Güneş enerjisi: Teori ve uygulama.* (1. Baskı). Ankara: Makina Mühendisleri Odası, 59-80.

43. Tossa, K. A., Nounangnonhou, C. T., Aza-Gnandji, M. R., & Semassou, G. C. (2023). Performance analysis of pv/t modules in west african climate zones. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 42(12), 15-23.

44. Zondag, H. A. (2008). Flat-plate pv/thermal collectors and systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 12(4), 891-959.

45. Ooshaksaraei, P., Sopian, K., Zaidi, S., and Zulkifli, R. (2017). Performance of four air based photovoltaic thermal collectors configurations with bifacial solar cell. *Renewable Energy*, 102(1), 279–293.

46. Üçgül, İ., Ergün, E. (2012). Doğrusal fresnel güneş güç sistemi. *Süleyman Demirel Üniversitesi YEKARUM,* 1(3), 11-17.

47. Çağlar, A., Talay, İ. B. (2019). Tasarım parametrelerinin parabolik oluk tipi bir güneş kollektörünün performansına etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi,* 24(2), 15-24.

48. Çiçek, İ. ve Danışmaz, M. (2024, Ocak). *Fotovoltaik termal panellerde soğutucu akışkan olarak su bazlı Al_2O_3 nanoakışkan kullanımının nümerik incelenmesi*, Internatıonal Haliç Congress on Multidisciplinary Scientific Research-VII, İstanbul, Türkiye.

49. Dulkadiroğlu, H. (2018). Türkiye'de elektrik üretiminin sera gazı emisyonları açısından incelenmesi. *OHU Engineering Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi,* 7(1), 67-74.

50. Enerji Piyasası Düzenleme ve Denetleme Kurumu. (2023). Elektrik piyasası sektör raporu. *EPDK*. Ankara, 26-38.

51. Şahin, F. ve Namlı, L. (2018). Nanoakışkanlarda kararlılığın ısı transferini iyileştirme açısından önemi. *OHU Engineering Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 7(2), 880-898.

52. Aytaç, İ. (2020). *Isı geri kazanım ünitelerinde nanoakışkan kullanımı.* Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 51-88.

53. Sharma, U. S., Sharma , R. N. and Shah, R. (2014). Physical and magnetic properties of manganese ferrite nanoparticles. *Uma Shankar Sharma et al Int. Journal of Engineering Research and Applications,* 4(8), 14-17.

54. Anggraini, V., Putra, R. A. and Fadlly, T. A. (2020). Synthesis and characterization of manganese ferrite nanoparticles by coprecipitation method at low temperatures. *Advances in Social Science, Education and Humanities Research,* 576(1), 118-122.

55. Permanasari , A. A., Rusli, M. H., Puspitasari, P., Sukarni, S. and Abdillah, M. (2025). Computational fluid dynamics heat transfer analysis of double pipe heat exchanger using nanofluid $MnFe_2O_4$ with ethylene glycol water. *COMERA,* 8(3), 39-40.

56. Sarf, F. ve Yakar, E. (2018). Kompleks etken madde oranına bağlı olarak $ZnFe_2O_4$ filmlerin incelenmesi. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,* 4(2), 200-211.

57. Deraz, N. M. and Alarifi, A. (2012). Microstructure and magnetic studies of zinc ferrite nanoarticles. *Int. J. Electrochem. S.,* 7(1), 6501-6511.

58. Salih , S. J. and Mahmood , W. M. (2023). Review on magnetic spinel ferrite (MFe_2O_4) nanoparticles: From synthesis to application. *Heliyon*, 9(6), 1-23.

59. Singha, D. J., Guptab , M. and Guptac, R. (2002). Magnetism and electronic structure in $ZnFe_2O_4$ and $MnFe_2O_4$. *Journal of Applied Physics,* 91(10), 1-3.

60. Firlianda, D. A., Permanasari, A. A., Puspitasari, P. and Sukarni, S. (2019). Heat transfer enhancement using nanofluids in mini heat exchanger shell and tube. *International Conference on Biology and Applied Science*, 2(1), 1-11.

61. Li, L., Bi, H., Gai, S., He, F., Gao, P., Dai, Y. and Yang, P. (2017). Uniformly dispersed ZnFe2O4 nanoparticles on nitrogen-modified graphene for high-performance supercapacitor as electrode. *Scientific Reports*, 7(1), 1-10.

62. Yashawantha, K. M. and Vinod, A. V. (2021). Experimental investigation on thermal conductivity and stability of water graphite nanofluid. *Journal of Thermal Engineering*, 7(7), 1743-1751.

63. Yakut, M., Kum, M., Şendoğdular, S. T. ve Şendoğdular, L. (2022). *Nanoteknolojide karakterizasyon teknikleri.* (1. Baskı). Ankara: İksad, 14-28.

64. Das, S. and Patel, S. C. (2006). Heat transfer in nanofluids a review. *Heat Transfer Engineering,* 27(10), 3-19.

65. Xuan, Y. and Li, Q. (2000). Heat transfer enhancement of nanofluids. *Heat transfer International Journal of Heat and Fluid Flow,* 21(1), 58-64.

66. Holman, J. P. (2012). *Experimental methods for engineers.* (8th Edition.). NY 10020: The McGraw-Hill Companies, 63-79.

67. Variyenli, H. İ., Yousefi, M., Tuncer, A. D., Sözen, A., Göksel, B. Ç. and Khanlari, A. (2025). Numerical and experimental analysis of a water cooled photovoltaic-thermal system using modified tubes. *Applied Thermal Engineering*, 279(15), 127559-127560.

68. Karagoz S., Afshari F., Yildirim O. and Comakli O., Experimental and numerical investigation of the cylindrical blade tube inserts effect on the heat transfer enhancement in the horizontal pipe exchangers, *Heat Mass Transfer,* 53(2017), 2769-2784.

69. Ansys (2017). *ANSYS fluent theory guide.* (6th Edition). Canonsburg: ANSYS Programs, 1-50.

70. Afshari, F. (2025). Experimental and numerical study of a solar still with external solar heating: comparing internal condensation and air-pump-assisted external condensation in prism structures. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 35(4), 1360-1384.

71. Afshari, F., Muratçobanoğlu, B., Mandev, E., Ceviz, M. A. and Mirzaee, Z. (2023). Effects of double glazing, black wall, black carpeted floor and insulation on thermal perf of Solar-glazed balconies. *Energy and Buildings*, 285(3), 112919-112920.

72. Çengel, Y., Ghajar, A., (2020). *Heat and mass transfer-fundamentals and applications.* (6th Edition). New York: McGraw-Hill Education, 1-50.



Gazili olmak ayrıcalıktır